Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Estudo do efeito do agregado cerâmico com diferentes porosidades no comportamento mecânico e de retração livre e restringida de concretos, visando o uso de resíduos de construção e demolição como agente de cura interna

Juliana Alves de Lima Senisse

Porto Alegre
2015

JULIANA ALVES DE LIMA SENISSE

ESTUDO DO EFEITO DO AGREGADO CERÂMICO COM DIFERENTES POROSIDADES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DE RETRAÇÃO LIVRE E RESTRINGIDA DE CONCRETOS, VISANDO O USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO AGENTE DE CURA INTERNA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Engenharia

Porto Alegre
2015

Alves de Lima Senisse, Juliana
Estudo do efeito do agregado cerâmico com diferentes porosidades no comportamento mecânico e de retração livre e restringida de concretos, visando o uso de resíduos de construção e demolição como agente de cura interna / Juliana Alves de Lima Senisse. -- 2015.
295 f.

Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

1. agregado cerâmico. 2. transporte de água/pasta. 3. cura interna. I. Carpena Coitinho Dal Molin, Denise, orient. II. Título.

JULIANA ALVES DE LIMA SENISSE

ESTUDO DO EFEITO DO AGREGADO CERÂMICO COM DIFERENTES POROSIDADES NO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DE RETRAÇÃO LIVRE E RESTRINGIDA DE CONCRETOS, VISANDO O USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO AGENTE DE CURA INTERNA

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, na área de Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 19 de janeiro de 2015

Prof.a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra. pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof. Dr. Armando Miguel Awruch
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho (UFRJ)
Dr. pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Claudio de Sousa Kazmierczak (Unisinos)
Dr. pela Universidade de São Paulo (EPUSP)

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
PhD, University of Leeds

Eu dedico este trabalho à minha família que eu amo tanto, meu amor André, meus pais Márcia e Kleber e a minha super irmã Carolina.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Kléber, um grande homem, um herói, um exemplo a ser seguido, pela educação, pelo apoio, e por minha formação como ser humano. À minha mãe, Márcia, uma grande guerreira, pela educação, pelo incentivo e pela força. Aos meus pais agradeço pelo amor e carinho em todos os momentos e pela confiança depositada em mim, em todas as etapas da minha vida. Muito obrigada, eu amo muito vocês!

À minha irmã, Carolina, pela cumplicidade, pelo carinho e pela torcida em todos os momentos. Manona, te amo!

Ao amor da minha vida, André, pelo amor e carinho, pela cumplicidade, pelo apoio nos momentos mais difíceis, por estar sempre ao meu lado e por ser esta pessoa tão especial em que eu posso confiar e amar para sempre. Meu amor, eu te amo muito!

Um agradecimento especial a minha orientadora professora Denise Dal Molin, pela orientação, pela dedicação, pelo conhecimento transmitido, pelo apoio e pela amizade; fatores, os quais tornaram as atividades mais tranqüilas e prazerosas.

Aos professores Ângela Borges Masuero, João Ricardo Masuero e Luís Carlos Bonin pelo conhecimento e auxílio durante o planejamento e execução da pesquisa.

Aos laboratoristas Airton e Gilmar pelo auxílio prestado durante a realização da pesquisa.

Aos alunos de iniciação científica Felipe Hirata Bianchin, Guilherme Puglia e Luiz Gustavo Bianchetti pelo auxílio durante a realização do trabalho, pelo empenho na realização das atividades, sempre tornando o ambiente de trabalho mais leve e divertido. Muito obrigado!

Agradeço ao Cnpq pelo auxílio financeiro, que possibilitou a minha dedicação ao estudos.

Aos colegas do NORIE, Anderson, Carina, Daniel, Eugênio, Laís, Leticia, Luciana, Lucila, Mauro, Marlon, pelo conhecimento e apoio durante toda a execução do trabalho; estando sempre dispostos a ajudar, quando dúvidas surgiam no decorrer da pesquisa.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para que a pesquisa acontecesse da melhor maneira possível. Muito Obrigada!!

“A alegria está na luta, no sofrimento envolvido.
Não na vitória propriamente dita.”

Provérbio Budista

RESUMO

SENISSE, J. A. L. **Estudo do efeito do agregado cerâmico com diferentes porosidades no comportamento mecânico e de retração livre e restringida de concretos, visando o uso de resíduos de construção e demolição como agente de cura interna**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O avanço da tecnologia do concreto permitiu o desenvolvimento de compósitos cimentícios com elevada resistência mecânica. Contudo, apesar de suas inúmeras vantagens, tais concretos estão mais suscetíveis a ocorrência de fissuração, decorrente do fenômeno da retração. Nas últimas décadas inúmeros esforços estão sendo realizados visando mitigar tal fenômeno, como a realização do procedimento de cura interna, a fim de contribuir para a redução da intensidade deste fenômeno, assim buscando a obtenção de estruturas mais duráveis. Conjuntamente, no contexto do ambiente construído, há uma crescente preocupação relacionada com o desenvolvimento sustentável da indústria da construção civil, uma vez que este setor consome grande quantidade de matérias primas não renováveis, além de gerar uma quantidade significativa de resíduos. Dentro deste contexto, o objetivo desta pesquisa foi o de contribuir para a viabilização do emprego de resíduos de construção e demolição cerâmicos como agentes de cura interna, a fim de reduzir a intensidade do fenômeno da retração por secagem em concretos, ao longo do tempo. Para tanto, avaliou-se o emprego de agregados cerâmicos miúdos e graúdos em substituição ao agregado natural, na composição dos concretos. Ensaios mecânicos (resistência à compressão e módulo de elasticidade) foram realizados nos compósitos cimentícios estudados, assim como ensaios de retração por secagem livre e restringida, buscando verificar a eficiência do agregado cerâmico como um agente mitigador do fenômeno. Conjuntamente, realizou-se uma análise da microestrutura dos concretos (por microscopia eletrônica de varredura) buscando uma avaliação do transporte entre a matriz cimentícia e o agregado cerâmico. Com os resultados obtidos verificou-se a potencialidade do emprego do agregado cerâmico na composição dos concretos estudados, uma vez que se constatou o não prejuízo das propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios estudados, quando ocorreu a substituição do agregado natural pelo agregado cerâmico, bem como observou-se uma redução na intensidade do fenômeno da retração por secagem e uma diminuição da tendência de fissuração do material.

Palavras-chave: agregado cerâmico; transporte de pasta/água; cura interna.

ABSTRACT

SENISSE, J. A. L. **Study of the effect of the ceramic aggregates with different porosities on mechanical behavior and free and restrained drying shrinkage in concrete, in order to obtain the use of construction and demolition waste like a internal curing agent**. 2015. Thesis (Engineering Ph.D.) – Civil Engineering Post Graduated Program, UFRGS, Porto Alegre.

Advances in concrete technology have allowed the development of cementitious composites with high mechanical strength. However, even with its many advantages these kind of concrete are more susceptible to the occurrence of cracking, resulting from shrinkage phenomenon. In recent decades many efforts were made to mitigate this phenomenon, using internal curing procedures in order to contribute to the reduction of the intensity of this phenomenon, thus seeking to obtain more durable structures. On the other side, in the context of the built environment, there is growing concern related to the sustainable development of the construction industry, since this sector consumes large amount of non-renewable raw materials, and generate a significant amount of waste. Within this context, the objective of this research was to contribute to the viability of the use of ceramic construction and demolition waste as internal curing agents, in order to reduce the intensity of the phenomenon of shrinkage in concrete over time. Therefore, we evaluated the use of ceramic fines and coarse aggregates instead of natural aggregate in the composition of concrete residue mixes. Mechanical tests (compressive strength and modulus of elasticity) were performed, as well as shrinkage tests for free and restricted drying, trying to verify the efficiency of ceramic addition as an internal curing agent. Jointly, a microstructure analysis of concrete (scanning electron microscopy) was held, seeking to analysis the transportation between the cement matrix and the ceramic aggregate. With the results obtained the potential of the ceramic aggregate employment as an internal curing agent for concrete studied was confirmed. It has been found not to harm the mechanical properties of cementitious composites studied, and there was a reduction in the intensity of the phenomenon of shrinkage by drying and a reduction in cracking tendency of the material.

Key words: ceramic aggregate; binder/water transportation; internal curing.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS **12**

LISTA DE TABELAS **17**

LISTA DE EQUAÇÕES **19**

LISTA DE SIGLAS **20**

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS **21**

1 INTRODUÇÃO **23**

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA **24**

1.2 OBJETIVOS **27**

1.2.1 Objetivos Secundários 27

1.3 ORIGINALIDADE **28**

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA **28**

2 O FENÔMENO DA RETRAÇÃO **30**

2.1 ENRIJECIMENTO, PEGA E ENDURECIMENTO – CONCEITOS **30**

2.2 RETRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO **33**

2.2.1 Retração por Secagem ou Retração Hidráulica 35

2.3 MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO - CURA INTERNA **38**

2.3.1 Mecanismo da Cura Interna 40

2.3.2 Modelo de Powers – Definições 41

2.3.3 Modelo de Powers Aplicado ao Procedimento de Cura Interna 45

2.3.4 Mecanismo de Variação da Pressão Capilar 48

2.4 AGENTES DE CURA INTERNA **51**

2.4.1 Agregados Leves 54

2.4.2 Polímeros Superabsorventes (SAP) 56

2.4.3 Agregados convencionais 57

2.4.4 Agregados Reciclados 58

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL 60

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 60

3.2 BENEFICIAMENTO DO MATERIAL CERÂMICO 64
3.2.1 Estudo Exploratório – Definição das Temperaturas de Queima do Material Cerâmico 65
3.2.2 Etapas do Beneficiamento 67

3.3 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 69
3.3.1 Aglomerantes 69
3.3.2 Agregado Miúdo 72
3.3.3 Agregado Graúdo 73
3.3.4 Agregado Cerâmico (AgCer) 74
3.3.5 Água 85
3.3.6 Aditivo químico 85

3.4 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS 85
3.4.1 Saturação dos agregados cerâmicos 86
3.4.2 Processo de concretagem 87

3.5 MÉTODOS DE ENSAIO 90
3.5.1 Propriedades Mecânicas 90
3.5.2 Retração por secagem 91
3.5.3 Ensaio de microestrutura 98

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 100

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL 100
4.1.1 Efeito da temperatura de queima da cerâmica na resistência à compressão axial 103
4.1.2 Efeito da granulometria substituída na resistência à compressão axial 105
4.1.3 Efeito da idade na resistência à compressão axial 107
4.1.4 Efeito da interação ‘Temperatura x Teor de substituição’ na resistência à compressão axial 107
4.1.5 Efeito da interação ‘Temperatura x Granulometria’ na resistência à compressão axial 108
4.1.6 Efeito da interação ‘Teor de substituição x Granulometria’ na resistência à compressão axial 110
4.1.7 Efeito da interação ‘Temperatura x Idade’ na resistência à compressão axial 111
4.1.8 Efeito da interação ‘Teor de substituição x Idade’ na resistência à compressão axial 112
4.1.9 Efeito da interação ‘Granulometria x Idade’ na resistência à compressão axial 113

4.1.10 Efeito da interação ‘Temperatura x Teor de substituição x Granulometria’ na resistência à compressão axial..... 114
4.1.11 Efeito da interação ‘Temperatura x Teor de substituição x Idade’ na resistência à compressão axial..... 115
4.1.12 Efeito da interação ‘Temperatura x Granulometria x Idade’ na resistência à compressão axial..... 117
4.1.13 Efeito da interação ‘Teor de substituição x Granulometria x Idade’ na resistência à compressão axial..... 119

4.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE 120
4.2.1 Efeito da temperatura de queima da cerâmica no módulo de elasticidade..... 124
4.2.2 Efeito da granulometria substituída no módulo de elasticidade 125
4.2.3 Efeito do teor de substituição no módulo de elasticidade 126
4.2.4 Efeito da idade no módulo de elasticidade 127
4.2.5 Efeito da interação ‘Temperatura x Granulometria’ no módulo de elasticidade..... 128
4.2.6 Efeito da interação ‘Teor de substituição x Granulometria’ no módulo de elasticidade..... 129
4.2.7 Efeito da interação ‘Teor de substituição x Idade’ no módulo de elasticidade..... 130
4.2.8 Efeito da interação ‘Granulometria x Idade’ no módulo de elasticidade..... 131
4.2.9 Efeito da interação ‘Temperatura x Teor de substituição x Idade’ no módulo de elasticidade..... 132

4.3 RETRAÇÃO POR SECAGEM LIVRE..... 133

4.4 RETRAÇÃO POR SECAGEM RESTRINGIDA..... 139

4.5 ENSAIOS MICROESTRUTRAIS..... 151
4.5.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 151

4.6 CONSIDERAÇÕES GERAIS 159

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 163

5.1 CONCLUSÕES..... 163

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 170

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....172

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: representação esquemática das etapas da pasta de cimento, segundo a Teoria de Percolação de Acker (1988) (adaptado de BARCELO; MORANVILLE; CLAVAUD, 2005; SILVA, 2007) 32
Figura 2: distribuição das tensões (adaptado de BISSCHOP, 2002 apud LAM, 2005) 36
Figura 3: representação esquemática da formação de fissuras (adaptado de BAZANT, 1982 apud WITTMANN *et al.*, 2009) 36
Figura 4: diferenciação entre os procedimentos de cura externa e cura interna (adaptado de CASTRO et al., 2011) 39
Figura 5: distribuição volumétrica das fases da pasta de cimento, como uma função do grau de hidratação (α), em um sistema fechado. (a) para uma relação a/c de 0,6. (b) para uma relação a/c de 0,3. (adaptada de RILEM 196-ICC, 2007) 44
Figura 6: distribuição volumétrica das fases da pasta de cimento, como uma função do grau de hidratação (α), em um sistema fechado e para uma relação a/c de 0,30+0,05. (adaptada de RILEM 196-ICC, 2007) 45
Figura 7: representação da quantidade de água mínima necessária para obter a hidratação completa da pasta de cimento (α_{max} = 1). (adaptado de JENSEN; HANSEN, 2001; RILEM 196-ICC, 2007) 47
Figura 8: organização do estudo exploratório do material cerâmico 63
Figura 9: programa experimental da pesquisa 64
Figura 10: beneficiamento do material cerâmico 67
Figura 11: equipamentos empregados no beneficiamento do material cerâmico. (a) forno (mufla); (b) britador de mandíbulas; (c) peneirador mecânico 69
Figura 12: produção dos corpos de prova cerâmicos para avaliação da resistência à compressão. (a) queima dos blocos nas três diferentes temperaturas. (b) corpo de prova cerâmico, com dimensões de 2cm x 2cm. (c) realização do ensaio de resistência à compressão. (d) amostra após a ruptura 76
Figura 13: análise de variância para os resultados de resistência à compressão do agregado cerâmico. (a) corpos de prova produzidos pelo método 1. (b) corpos de prova produzidos pelo método 2 78
Figura 14: padrão de nomenclatura dos traços de concreto estudados 86
Figura 15: variação unidimensional - deformação referência (inicial) 92
Figura 16: equipamento do ensaio de retração restringida, baseado na norma AASHTO PP34-99 (2005) 93
Figura 17: processo de lixamento da superfície interna do anel 94

Figura 18: marcação do posicionamento de colagem 94
Figura 19: limpeza da superfície (exata) de colagem 94
Figura 20: extensômetro sujeito a esforços de compressão..... 95
Figura 21: extensômetro sujeito a esforços de tração 95
Figura 22: colagem do terminal elétrico 95
Figuras 23: extensômetros elétricos, terminais e fios soldados (posicionamento dos extensômetros frente a esforços de compressão e de tração) 95
Figura 24: instrumentação completa do anel 95
Figura 25: processo de concretagem dos CP's..... 96
Figura 26: processo de cura inicial..... 96
Figura 27: representação esquemática do processo de secagem..... 97
Figura 28: equipamento utilizado para a medição das fissuras 98
Figura 29: concretos com agregados cerâmicos (100G-700) – ensaio de resistência à compressão dos concretos (ruptura dos corpos de prova). 101
Figura 30: efeito isolado da temperatura de queima da cerâmica na resistência à compressão axial. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico 104
Figura 31: efeito isolado da granulometria substituída do agregado cerâmico na resistência à compressão axial. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico 105
Figura 32: efeito isolado da idade na resistência à compressão axial. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico 107
Figura 33: efeito da interação entre a temperatura de queima e o teor de substituição do agregado cerâmico sobre a resistência à compressão axial 108
Figura 34: efeito da interação entre a temperatura de queima e a granulometria substituída do agregado cerâmico sobre a resistência à compressão axial..... 109
Figura 35: efeito da interação entre o teor de substituição e a granulometria substituída do agregado cerâmico sobre a resistência à compressão axial 110
Figura 36: efeito da interação entre a temperatura de queima do agregado cerâmico e a idade sobre a resistência à compressão axial 111
Figura 37: efeito da interação entre o teor de substituição e a idade sobre a resistência à compressão axial 112
Figura 38: efeito da interação entre a granulometria substituída e a idade sobre a resistência à compressão axial 113

Figura 39: efeito da interação entre a temperatura, o teor de substituição e a granulometria substituída sobre a resistência à compressão axial 114
Figura 40: efeito da interação entre a temperatura, o teor de substituição e a idade sobre a resistência à compressão axial 116
Figura 41: efeito da interação entre a temperatura, a granulometria substituída e a idade sobre a resistência à compressão axial 117
Figura 42: efeito da interação entre o teor de substituição, a granulometria substituída e a idade sobre a resistência à compressão axial 119
Figura 43: efeito isolado da temperatura de queima da cerâmica no módulo de elasticidade. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico 124
Figura 44: efeito isolado da granulometria substituída no módulo de elasticidade. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico 125
Figura 45: efeito isolado do teor de substituição do agregado cerâmico no módulo de elasticidade. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico 127
Figura 46: efeito isolado da idade no módulo de elasticidade. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico 128
Figura 47: efeito da interação entre a temperatura e a granulometria substituída sobre o módulo de elasticidade 128
Figura 48: efeito da interação entre o teor de substituição e a granulometria substituída sobre o módulo de elasticidade 130
Figura 49: efeito da interação entre o teor de substituição e a idade sobre o módulo de elasticidade 131
Figura 50: efeito da interação entre a granulometria substituída e a idade sobre o módulo de elasticidade 132
Figura 51: efeito da interação entre a temperatura, o teor de substituição e a idade sobre o módulo de elasticidade 133
Figura 52: Resultado médio de retração por secagem livre do concreto referência 134
Figura 53: resultados médios de retração por secagem livre dos concretos com substituição de agregados graúdos, com temperaturas de queima distintas, sendo (a) 700°C. (b) 950°C. (c) 1100°C 136
Figura 54: resultados médios de retração por secagem livre dos concretos com substituição de agregados miúdos, com temperaturas de queima distintas, sendo (a) 700°C. (b) 950°C. (c) 1100°C 138

Figura 55: resultados médios diários da deformação do concreto no anel de aço - concreto referência 140
Figura 56: abertura das fissuras do concreto referência 141
Figura 57: resultados médios diários da deformação do concreto no anel de aço, com a presença de agregados graúdos cerâmicos, com temperatura de queima de (a) 700ºC. (b) 950ºC 142
Figura 58: abertura das fissuras nos traços com substituição de agregado graúdo natural por cerâmico (700ºC), com teores de substituição de (a) 50%. (b) 100% 143
Figura 59: abertura das fissuras nos traços com substituição de agregado graúdo natural por cerâmico (950ºC), com teores de substituição de (a) 50%. (b) 100% 144
Figura 60: resultados médios diários da deformação do concreto no anel de aço, com a presença de agregados miúdos cerâmicos, com temperatura de queima de (a) 700ºC. (b) 900ºC. (c) 1100ºC 146
Figura 61: abertura das fissuras nos traços com substituição de agregado miúdo natural por cerâmico (700ºC), com teores de substituição de (a) 50%. (b) 100% 147
Figura 62: abertura das fissuras nos traços com substituição de agregado miúdo natural por cerâmico (950ºC), com teores de substituição de (a) 50%. (b) 100% 148
Figura 63: abertura das fissuras nos traços com substituição de agregado miúdo natural por cerâmico (1100ºC), com teores de substituição de (a) 50%. (b) 100% 149
Figura 64: micrografias do concreto com substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo cerâmico, produzido a 700ºC. Com magnificação de: (a) 200x. (b) 200x. (c) 85x 152
Figura 65: micrografias do concreto com substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo cerâmico, produzido a 950ºC. Com magnificação de: (a), (b) e (c) 100x 154
Figura 66: micrografias do concreto com substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo cerâmico, produzido a 1100ºC. Com magnificação de: (a) 65x. (b) 100x. (c) 90x 155
Figura 67: micrografias do concreto com substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo cerâmico, produzido a 700ºC. Com magnificação de: (a) 220x. (b) 330x. (c) 90x 156
Figura 68: micrografias do concreto com substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo cerâmico, produzido a 950ºC. Com magnificação de: (a) 300x. (b) 400x. (c) 500x 157

Figura 69: micrografias do concreto com substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo cerâmico, produzido a 1100ºC. Com magnificação de: (a) 500x. (b) 500x. (c) 700x 158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: resultados do ensaio de absorção dos blocos cerâmicos - estudo exploratório.... 66
Tabela 2: resistência à compressão dos blocos cerâmicos..... 67
Tabela 3: caracterização química do cimento 70
Tabela 4: caracterização física do cimento 70
Tabela 5: caracterização mecânica do cimento 70
Tabela 6: caracterização física da sílica ativa 71
Tabela 7: caracterização química da sílica ativa 71
Tabela 8: caracterização física da cinza volante 72
Tabela 9: caracterização química da cinza volante 72
Tabela 10: caracterização física do agregado miúdo 73
Tabela 11: caracterização do agregado graúdo 74
Tabela 12: caracterização química da argila 75
Tabela 13: resistência à compressão do material cerâmico (2 cm x 2 cm)..... 77
Tabela 14: módulo de elasticidade do material cerâmico 79
Tabela 15: índice de pozolanicidade do material cerâmico 80
Tabela 16: caracterização física do agregado miúdo cerâmico 81
Tabela 17: resultados do ensaio de índice de forma - agregado graúdo cerâmico..... 82
Tabela 18: caracterização física do agregado graúdo cerâmico 84
Tabela 19: caracterização físico-química do aditivo químico..... 85
Tabela 20: traço de concreto empregado como referência - método de dosagem de Mehta-Aitcin (1990)..... 88
Tabela 21: traços dos concretos empregados na pesquisa 89
Tabela 22: resultados médios de resistência à compressão axial 101
Tabela 23: análise de variância (ANOVA) – resistência à compressão axial. Análise dos efeitos isolados entre o concreto referência e os concretos com substituição 102
Tabela 24: análise de variância (ANOVA) – resistência à compressão axial. Análise dos efeitos isolados e suas interações para os concretos com substituição do agregado natural por agregado cerâmico..... 103
Tabela 25: resultados médios de módulo de elasticidade 121
Tabela 26: análise de variância (ANOVA) – módulo de elasticidade. Análise dos efeitos isolados entre o concreto referência e os concretos com substituição 122
Tabela 27: análise de variância (ANOVA) – resistência à compressão axial. Análise dos efeitos isolados e suas interações para os concretos com substituição do agregado natural por agregado cerâmico..... 123

Tabela 28: número de fissuras encontradas em cada traço de concreto estudado 150
Tabela 29: quadro resumo dos resultados obtidos neste estudo 160

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 43
Equação 2 43
Equação 3 43
Equação 4 43
Equação 5 43
Equação 6 46
Equação 7 46
Equação 8 46
Equação 9 46
Equação 10 46
Equação 11 47
Equação 12 47
Equação 13 47
Equação 14 48
Equação 15 48
Equação 16 50
Equação 17 78
Equação 18 92

LISTA DE SIGLAS

CME: Centro de Microscopia Eletrônica

LACER: Laboratório de Cerâmica

LAMTAC: Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

NORIE: Núcleo Orientado para Inovação na Edificação

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a/c: relação água/cimento

AgCer: agregado cerâmico

AgGCer: agregado graúdo cerâmico

AgMCer: agregado miúdo cerâmico

Al: alumínio

ANOVA: análise de variância

ARR: aditivo redutor de retração

BSE: elétrons retroespalhados

Ca: cálcio

CAD: concreto de alto desempenho

CAR: concreto de alta resistência

cm: centímetro

CO_2: dióxido de carbono ou gás carbônico

C_3S: silicato tricálcico

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

cp's: corpos de prova

EDS: espectrômetro por dispersão de energia (Energy Disperse X-Ray Spectroscopy)

g: grama

g/cm³: grama por centímetro cúbico

Hz: Hertz

kg: quilograma

m³: metro cúbico

MEV: microscopia eletrônica de varredura

ml: mililitro

mm: milímetro

MPa: MegaPascal

nm: nanômetro

PVC: policloreto de vinila

RCD: resíduo de construção e demolição

SAP: polímeros superabsorventes

SE: elétrons secundários

Si: silício

SSS: saturado superfície seca

UR: umidade relativa

μm: micrometro

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o avanço da tecnologia do concreto permitiu o desenvolvimento de concretos com elevado desempenho, como o concreto de alta resistência (CAR). Além da resistência mecânica mais elevada, estes compósitos cimentícios possuem propriedades vantajosas em relação ao concreto convencional, como a menor permeabilidade, a maior durabilidade e a possibilidade de redução dos elementos estruturais sujeitos à esforços de compressão.

Tais características são proporcionadas em virtude da elevada compacidade do concreto, bem como devido à descontinuidade da estrutura de poros da pasta de cimento, resultado da baixa relação água/cimento das misturas, possibilitada pelo emprego de aditivos redutores de água; bem como pela aplicação de adições minerais, tais como as superpozolanas (sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz, entre outras).

Entretanto, concretos com baixa relação água/cimento estão mais propensos à fissuração nas primeiras idades. Normalmente, a ocorrência de tais fissuras está associada à variação volumétrica decorrente não só da existência de gradientes térmicos, originados pelo desenvolvimento do elevado calor de hidratação, em função do maior consumo de cimento, mas também pela ocorrência dos fenômenos da retração autógena e da retração por secagem, geradas devido à movimentação hídrica.

Se a estrutura não estiver restringida, o compósito cimentício irá sofrer expansão e retração livremente, com poucas consequências. No entanto, se houverem restrições externas e/ou internas às deformações, o concreto pode apresentar fissuração. Assim, as tensões de tração geradas podem originar microfissuras no compósito cimentício, as quais tendem a se conectar, formando macrofissuras, sendo um sério problema para a resistência mecânica, durabilidade e estética da estrutura.

Dentro deste contexto, nos últimos anos inúmeros esforços estão sendo realizados visando a redução da intensidade do fenômeno da retração, principalmente a que se refere às primeiras idades, bem como de suas consequências adversas. O manual da RILEM 196-ICC (2007) menciona que diferentes estratégias estão sendo desenvolvidas nos últimos anos, buscando a mitigação de tal fenômeno, uma vez que os procedimentos de cura

convencional (externa) não são suficientemente eficientes para o combate da retração e, consequentemente, da fissuração, em concretos com elevada resistência mecânica.

Considerando a complexidade do fenômeno, diferentes metodologias estão sendo estudadas visando a redução da intensidade da retração, tanto no estado fresco como no estado endurecido do compósito cimentício, tais como: o emprego de aditivos redutores de retração (ARR), o controle da distribuição das partículas de cimento, a modificação da composição mineralógica do cimento, a aplicação de fibras, o emprego de aditivos expansivos, a aplicação do procedimento de cura interna, bem como até mesmo a combinação entre diferentes estratégias (BENTZ; JENSEN, 2004; LOPES, 2011).

Para Lopes (2011), as principais soluções mitigadoras para o fenômeno da retração autógena e, por consequência, da retração por secagem, estão relacionadas com a aplicação do procedimento de cura interna e com o emprego de aditivos redutores de retração (ARR). Segundo a autora, tal afirmação é baseada não somente pela maior aplicação prática destas técnicas, mas também pelo grande número de estudos realizados empregando tais métodos para a mitigação deste fenômeno.

Ao que se refere ao procedimento de cura interna, diferentes são os materiais empregados visando o fornecimento de água adicional à mistura, necessária para a hidratação do cimento ou para a reposição da umidade perdida, denominados de agentes de cura interna (ACI, 2010). Dentre os agentes de cura interna consagrados, pode-se citar os agregados leves e os polímeros superabsorventes (SAP), comumente aplicados na composição dos concretos. Contudo com a busca pelo desenvolvimento sustentável da construção civil, os agregados reciclados estão se tornando uma nova alternativa para a aplicação do procedimento de cura interna.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Inserido no contexto do ambiente construído, há uma crescente preocupação relacionada com o desenvolvimento sustentável, associado ao desenvolvimento da tecnologia dos materiais cimentícios. Para Limbachiya, Meddah e Ouchagour (2011), o rumo para a produção de concretos sustentáveis está relacionado com a redução do impacto ambiental gerado pelo material, através da substituição de materiais primas naturais por materiais alternativos (reciclados), bem como pela redução da emissão de gás carbônico (CO_2).

Tal preocupação é válida, não somente pela crescente escassez de matérias primas naturais, mas também pela redução das áreas legais de deposição (aterros), em função da elevada quantidade de resíduos de construção e demolição gerados e descartados. Contudo no Brasil, a reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) é ainda restrita.

Para Moreira (2010), a dificuldade de implementação e, consequentemente, do emprego do resíduo de construção e demolição, está relacionada com as inúmeras incertezas existentes, principalmente a da grande variabilidade das propriedades físicas e químicas dos resíduos, devido à variação de sua constituição, fortemente influenciada pela origem dos mesmos. No entanto, a variabilidade dos resíduos de construção e demolição não é uma característica própria do Brasil. Ao mesmo tempo, a ausência de politicas de desenvolvimento, bem como a escassez de normatizações que regulamentem suas propriedades e características, são fatores que influenciam o seu reduzido aproveitamento.

Na última década, inúmeras pesquisas buscam viabilizar o emprego de resíduos de construção e demolição nos compósitos cimentícios. Para Malhotra (2002, apud LAURITZEN, 2004) e González-Fonteboa e Martínez-Abella (2008), uma das decisões mais importantes dentro do pensamento da construção sustentável está relacionada com o emprego de agregados reciclados. Assim, diferentes pesquisadores avaliaram a influência do agregado reciclado frente às propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos (LEITE, 2001; ETXEBERRIA *et al*., 2004; GONÇALVES; ESTEVES; VIEIRA, 2004; JUAN; GUTIÉRREZ, 2004; BRITO; PEREIRA; CORREIA, 2005; SENTHAMARAI; MANOHARAN, 2005; CORREIA; BRITO; PEREIRA, 2006; ULSEN, 2006; CABRAL *et al*., 2010; SENTHAMARAI; MANOHARAN; GOBINATH, 2011; CORDEIRO, 2013; GONZALEZ; ETXEBERRIA, 2014).

Relacionado ao estudo das propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, Amorim (2008) e Fonseca, Brito e Evangelista (2011) analisaram a influência das condições de cura externa neste tipo de compósito cimentício. Parâmetro extremamente relevante, uma vez que a execução de um processo de cura apropriado é crucial para o desenvolvimento das características de resistência e durabilidade do concreto, assim evitando a presença de manifestações patológicas.

Contudo, em concretos com baixa relação água/cimento, somente o processo de cura externa pode não ser suficiente para reduzir a fissuração proveniente das alterações volumétricas geradas na matriz cimentícia. Portanto, torna-se interessante a aplicação de um procedimento de cura interna.

Nos últimos anos o processo de cura interna vem ganhando significativa importância, principalmente em concretos com elevada resistência mecânica. Contudo, a aplicação de tal procedimento em concretos convencionais também é considerada válida, uma vez que há uma busca constante pela redução da intensidade do fenômeno da retração, bem como de suas consequências adversas. Para Suzuki, Meddah e Sato (2009), a cura interna vem se tornando altamente empregada, pois visa reduzir a magnitude da retração autógena, bem como busca minimizar o alto risco de fissuração nas primeiras idades dos concretos com resistências elevadas.

Dentro deste contexto, diversos são os trabalhos que buscaram analisar a redução da intensidade da deformação proveniente do fenômeno da retração através do procedimento de cura interna. Pesquisas como as realizadas por Cusson (2008), Esteves (2009), Sahmaran *et al*. (2009), Akcay e Tasdemir (2010), Castro *et al*. (2011), Golias, Castro e Weiss (2012), Zhutovsky e Kovler (2012) e Ordóñez (2013), entre outras, avaliaram a eficiência do emprego de agregados leves e/ou de polímeros superabsorventes como agentes de cura interna para concretos. Onde, percebeu-se o efeito positivo de tais agentes frente à mitigação da deformação proveniente do fenômeno da retração.

Entretanto, o emprego de agregados reciclados como agentes de cura interna é ainda extremamente restrito. No meio internacional, Kim e Bentz (2008) e Kim (2009) avaliaram o uso de agregados reciclados de concreto como agentes de cura interna para concretos de alto desempenho (CAD). Neste estudo, os autores evidenciaram que os resultados de redução da retração autógena foram limitados com o emprego do agregado reciclado de concreto. Contudo, quando combinado com agregados leves, possibilitou uma melhora significativa nos resultados, sem trazer prejuízo às propriedades mecânicas dos concretos estudados.

Contudo, mesmo com o desenvolvimento dos estudos, os autores mencionam a necessidade de um maior entendimento, principalmente devido à ausência de informações relacionadas ao transporte de água/pasta entre o agente de cura interna (agregado reciclado) e a matriz cimentícia. Os mesmos acreditam que tal fato se deve à complexidade do fenômeno.

Da mesma forma, o emprego do resíduo cerâmico como agente de cura interna é ainda pouco compreendido. Tal fato deve-se a grande mudança reológica que este material gera na matriz cimentícia, devido, principalmente, a sua elevada porosidade (capacidade de absorção de água) e sua baixa resistência mecânica. Suzuki *et al*. (2009) avaliaram a eficiência do emprego de agregados reciclados cerâmicos (graúdos), em teores de

substituição de 10%, 20%, 30% e 40%, como agentes de cura interna em concretos com níveis de resistência entre 30MPa e 160MPa. Os resultados do estudo demonstraram que tal resíduo tem um grande potencial como agente de cura interna, visando mitigar o fenômeno da retração.

Contudo, para Pacheco-Torgal e Jalali (2011), os esforços para o entendimento e viabilização do emprego de resíduos cerâmicos é ainda restrito. Os autores mencionam ainda que pesquisas que buscam a avaliação do emprego de resíduos cerâmicos em concretos são muito escassas e não avaliam propriedades de durabilidade dos compósitos cimentícios.

Desta forma, a presente pesquisa justifica-se por contribuir para uma melhor compreensão do emprego de agregados reciclados cerâmicos como agentes de cura interna em concretos, bem como por avaliar o transporte de pasta/água entre a matriz cimentícia e o agregado reciclado. Conjuntamente, espera-se que estudos desta natureza, por proporcionar avanços na área da tecnologia do concreto associado ao desenvolvimento sustentável da construção civil, possam colaborar para o emprego mais seguro e confiável dos mesmos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é o de verificar a possibilidade da utilização de agregados cerâmicos com diferentes porosidades como agentes mitigadores do fenômeno da retração por secagem livre e restringida em concretos, ao longo do tempo.

1.2.1 Objetivos Secundários

Os objetivos específicos desta pesquisa consistem em:

a) avaliar a influência do emprego de agregado cerâmico, nas formas de agregado graúdo e agregado miúdo, frente às propriedades mecânicas dos concretos estudados;

b) avaliar a eficiência do agregado cerâmico, nas formas de agregado graúdo e agregado miúdo, como agente mitigador do fenômeno da retração por secagem livre e restringida dos concretos estudados;

c) avaliar a existência de transporte dos produtos de hidratação do cimento para o interior dos agregados cerâmicos.

1.3 ORIGINALIDADE

Em âmbito nacional e internacional, foram encontrados diversos estudos relacionados às propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, como o de Leite (2001), Buttler (2003), Vieira (2003), Brito *et al*. (2005), Cabral (2007), Moreira (2010), Vejmelková *et al*. (2012), Cordeiro (2013), Fedumenti (2013), Gujel (2014), Gonzalez-Corminas e Etxeberria (2014) entre outros. Contudo, poucos foram os estudos identificados com a abordagem de emprego dos resíduos de construção e demolição (RCD), com o o foco na avaliação das variações volumétricas causadas pelo fenômeno da retração, podendo citar as pesquisas de Kim e Bentz (2008), Suzuki *et al*. (2009) e Ceconello (2013).

Neste sentido, nota-se que os estudos sobre o uso de agregados reciclados como agentes de cura interna são incipientes. Desta forma, a pesquisa apresentada nesta tese propôs-se a investigar o emprego de agregados reciclados cerâmicos como agentes mitigadores do fenômeno da retração por secagem de concretos. Assim, não só auxiliando para o aumento da durabilidade das estruturas, mas também indo ao encontro do desenvolvimento sustentável do setor da construção civil.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

A presente tese de doutorado foi dividida em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo – “INTRODUÇÃO” – são feitas considerações iniciais a respeito da pesquisa, apresentando uma contextualização e justificando a escolha do tema. O mesmo ainda apresenta o objetivo principal da pesquisa, bem como os seus objetivos específicos.

No capítulo 2 – “MITIGAÇÃO DO FENÔMENO DA RETRAÇÃO” – é realizada uma revisão de literatura, onde são abordados assuntos relevantes à pesquisa. Deste modo, conceitos e características relacionadas ao fenômeno da retração, bem como formas de mitigá-lo são descritos.

O “PROGRAMA EXPERIMENTAL” da pesquisa é descrito no capítulo 3. Tal capítulo apresenta definições sobre as características do material cerâmico empregado na pesquisa, bem como a realização de seu beneficiamento a fim de torná-lo um agregado cerâmico. Conjuntamente, neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para atingir os objetivos propostos na pesquisa.

No capítulo 4 – “ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS” – são apresentados os resultados obtidos na pesquisa, bem como são realizadas análises estatísticas dos mesmos.

As considerações finais e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 5 – “CONSIDERAÇÕES FINAIS”.

2 O FENÔMENO DA RETRAÇÃO

Neste capítulo serão discutidos parâmetros relacionados com o fenômeno da retração nos materiais cimentícios, bem como formas de mitigação. Fatores relevantes para o estudo serão abordados, como conceitos e definições de ocorrência das retrações presentes nas idades iniciais e ao longo do tempo, bem como formas de reduzir a magnitude de tal fenômeno. Contudo, uma maior ênfase será destinada ao fenômeno da retração por secagem e sua mitigação a partir do procedimento de cura interna.

2.1 ENRIJECIMENTO, PEGA E ENDURECIMENTO – CONCEITOS

A ocorrência de variações dimensionais nos materiais cimentícios está diretamente relacionada com os processos químicos de hidratação do cimento. Assim, a correta definição dos mesmos é essencial para o entendimento do fenômeno da retração.

A fase inicial da hidratação do cimento é denominada como o processo de *enrijecimento* do material. Este é definido pela perda de consistência da pasta plástica e está, diretamente, associado à perda gradual de água da mistura, devido, principalmente, à ocorrência das reações iniciais de hidratação do cimento, da adsorção superficial dos produtos de hidratação de baixa cristalinidade, como a etringita e o C-S-H, bem como do seu processo de evaporação (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O processo inicial da hidratação do cimento está associado com a etapa inicial da variação dimensional do material, denominada de fase de suspensão (fase líquida). Conforme Holt (2001) e Silva (2007), as variações volumétricas que ocorrem nesta fase não têm grande importância, uma vez que, qualquer movimento, referente às tensões aplicadas, será imediatamente corrigido, pois o material é ainda um fluido e se deforma plasticamente, sem gerar tensões.

A fase seguinte da hidratação é denominada de processo de pega, sendo definido como a ocorrência de solidificação da pasta plástica de cimento. Em outras palavras, o termo pega está diretamente relacionado à mudança de estado físico da pasta, passando de um fluido para um sólido viscoelástico (NEVILLE, 1997; SANT; FERRARIS; WEISS, 2008).

Com o início do processo de pega do material cimentício, normalmente ocorre o fenômeno da retração autógena (TAZAWA, 1998[1] apud LAM, 2005). Segundo TAZAWA (1998)[2] apud Holt e Leivo (2004) e o *RILEM TECHNICAL COMMITTE 196-ICC* (2007), a retração autógena é definida como a redução macroscópica dimensional (volumétrica ou linear) da pasta de cimento, ocorrida sem transferência de umidade para o ambiente externo. Usualmente, este tipo de retração é uma preocupação em concretos de alta resistência (CAR) ou de alto desempenho (CAD), pois a sua magnitude é afetada diretamente pelas propriedades dos materiais reativos (cimento e pozolanas), constituintes do traço de concreto, e pela baixa relação a/c do compósito (TAZAWA; MIYAZAWA, 1995; HOLT, 2001; ZHANG; TAM; LEOW, 2003; BJONTEGAARD; HAMMER; SELLEVOLD, 2004; HOLT; LEIVO, 2004; MELO NETO, 2008).

Conforme *RILEM TECHNICAL COMMITTE 196-ICC* (2007), a retração autógena é geralmente conduzida pela retração química, e a intensidade dos dois fenômenos é aproximadamente igual no momento em que o material comporta-se como um fluido (plástico). Contudo, a partir do momento em que a pasta começa a se transformar em um sólido viscoelástico, a retração autógena torna-se menos intensa se comparada com a retração química presente no material.

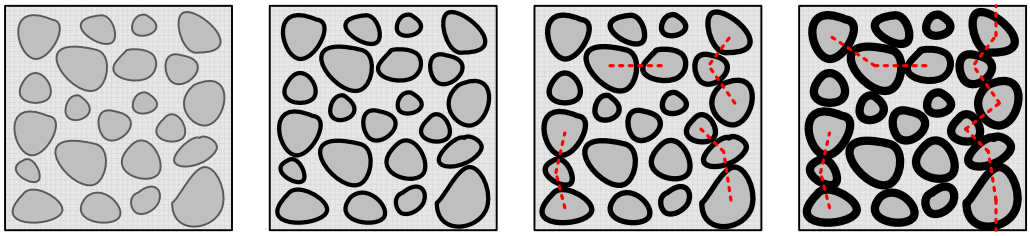
Relacionando esta etapa de transição de fluido para sólido viscoelástico com as variações dimensionais que ocorrem em um compósito cimentício, a mesma pode ser explicada pela Teoria do Patamar de Percolação. Durante esta etapa de transição ocorre a formação de um esqueleto, resultante dos produtos de hidratação do cimento. Segundo Acker (1988)[3] apud Hua *et al.* (1995) e Silva (2007), a Teoria de Percolação permite descrever o fenômeno de pega e simular as reações de hidratação do cimento. A figura 1 apresenta, de forma esquemática, as etapas presentes na Teoria do Patamar de Percolação.

Na fase de suspensão (A), os grãos de cimento estão isolados. Neste momento pode ocorrer a floculação dos mesmos, devido aos grãos de cimento apresentarem cargas positivas e negativas. Quando estes grãos de cimento começam a reagir com as partículas de água, os produtos de hidratação resultantes começam a se depositar ao redor dos mesmos. Esta formação das ligações e deposição acontece de forma aleatória e descontínua em todo o volume da pasta de cimento. À medida que estas reações de hidratação vão ocorrendo, subconjuntos contínuos de grãos são ligados mecanicamente.

31

[1] TAZAWA E. **Autogenous Shrinkage of Concrete**. Proceedings of the International Workshop Organized by Japan Concrete Institute Committee (JCI). Japan, 1998.
[2] TAZAWA E. **Autogenous Shrinkage of Concrete**. Proceedings of the International Workshop Organized by Japan Concrete Institute Committee (JCI). Japan, 1998.
[3] ACKER, P. **Comportement mécanique du béton: apports de l'approche physico-chimique**. Rapport de Recherche, LCPC, n. 152, jul. 1988.

Este processo caracteriza-se pela formação de amas (B), as quais vão interligando-se até o momento em que um caminho contínuo é formado, unindo as faces opostas, assim, formando o Patamar de Percolação (C) (HUA; ACKER; EHRLACHER, 1995; BARCELO; MORANVILLE; CLAVAUD, 2005; SILVA, 2007; LOPES, 2011).



A. Fase de suspensão (eventos isolados) B. Formação de amas C. Patamar de percolação

Figura 1: representação esquemática das etapas da pasta de cimento, segundo a Teoria de Percolação de Acker (1988) (adaptado de BARCELO; MORANVILLE; CLAVAUD, 2005; SILVA, 2007)

Após esta transição, tensões internas são geradas devido às variações volumétricas da pasta de cimento, contra as inclusões rígidas e sólidas dos agregados, e tensões por todo o material cimentício, se o elemento estiver restringido (BISSCHOP; VAN MIER, 2002). Com a formação do patamar de percolação, a matriz cimentícia começa a endurecer e a adquirir resistência mecânica.

Como mencionado anteriormente, é neste momento em que passa a ocorrer o fenômeno da retração química na mistura cimentícia. Segundo o *RILEM TECHNICAL COMMITTE 196-ICC* (2007), a retração química é definida como um fenômeno interno onde ocorre uma redução microscópica do volume do material, em decorrência da variação (redução) entre o volume absoluto dos materiais antes do processo de hidratação (cimento e água) e o volume final dos produtos de hidratação gerados (pasta de cimento hidratada). Portanto, a redução da intensidade deste fenômeno é proporcional ao grau de hidratação do material cimentício (TAZAWA; MIYAZAWA, 1995; HOLT, 2001; ZHANG; TAM; LEOW, 2003; LAM, 2005).

A terceira etapa da hidratação do cimento é denominada de endurecimento. Neste período, a resistência mecânica desenvolve-se devido ao rápido avanço das reações de hidratação do silicato tricálcico (C_3S), as quais ocorrem por muitas semanas. Os produtos destas reações preenchem, progressivamente, os espaços vazios na pasta, resultando em um redução da porosidade e da permeabilidade do compósito cimentício (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Com o esqueleto totalmente formado, o compósito cimentício começa a adquirir resistência mecânica suficiente para começar a resistir às tensões de tração adicionais geradas, contudo variações volumétricas presentes nesta etapa, relacionadas, principalmente, ao gradiente de secagem do material, podem introduzir uma tendência de fissuração bastante severa. Geralmente, os principais processos relacionados às mudanças de volume, presentes na matriz cimentícia nesta fase do material, são a contínua hidratação do cimento e o transporte constante de líquidos e de vapor de água (KAUFMANN; WINNEFELD; HESSELBARTH, 2004).

Assim sendo, a partir do final do processo de pega, o material cimentício sofre, dentre outros, o fenômeno da retração por secagem. Este é definido como uma deformação macroscópica que ocorre no material devido ao seu processo de secagem ao longo do tempo. A secagem do concreto é um processo extremamente lento e ocorre de forma não homogênea na estrutura. Nas camadas superficiais do material cimentício obtêm-se o equilíbrio hídrico com a umidade relativa do ambiente externo rapidamente. No entanto, no interior do material, obviamente dependendo de suas dimensões, o processo ocorre de forma mais branda, formando um diferencial de secagem (COLINA; ACKER, 2000; HOLT, 2001; BENBOUDJEMA *et al*., 2006; WITTMANN *et al*., 2009).

2.2 RETRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO

A retração, em seus dois estágios, pode induzir uma tendência de fissuração. Segundo Alvaredo e Wittmann (1995)[4] apud Wittmann *et al*. (2009), tal fenômeno é a origem mais frequente desta manifestação patológica. Como consequência, pode ocorrer a entrada de agentes agressivos, os quais contribuem para a aceleração da deterioração da estrutura através de diferentes mecanismos, como por exemplo, a carbonatação e a corrosão das armaduras, entre outros, reduzindo a vida útil do material (HOLT; LEIVO, 2004; BANTHIA; GUPTA, 2006; ALY *et al*., 2008).

A segunda etapa do fenômeno retração é caracterizada pelas mudanças volumétricas que ocorrem nos materiais cimentícios ao longo do tempo. O período de ocorrência da retração ao longo do tempo é, comumente, definido como sendo a partir da desmoldagem do compósito cimentício, ou até mesmo como sendo 24 horas após a mistura dos materiais (cimento e água) (HOLT, 2001).

33

[4] ALVAREDO, A.M.; WITTMANN, F.H. **Shrinkage and cracking of normal and high performance concrete. High Performance Concrete: Material Properties and Design**. Aedificatio Publishers, Freiburg, 1995. pp.91–110.

Neste instante, com o processo de pega finalizado, o material cimentício já desenvolveu certo grau de resistência, contudo variações volumétricas presentes nesta etapa, relacionadas, principalmente, ao gradiente de secagem do material, podem introduzir uma tendência de fissuração bastante severa (KAUFMANN *et al*., 2004). Segundo os autores, geralmente, os principais processos relacionados às mudanças de volume, presentes na matriz cimentícia, são a contínua hidratação do cimento (auto-dessecação) e o transporte constante de líquidos e de vapor de água.

A duração da segunda fase da retração está relacionada, diretamente, com a forma e o tamanho do elemento. Características como o tamanho e a forma da estrutura são, frequentemente, analisadas conjuntamente, através da relação superfície exposta/volume ao ambiente (sup/vol). Esta relação afeta não só a taxa de perda de umidade da estrutura para o ambiente externo, mas também, a capacidade de formação de um caminho preferencial, o qual facilita a difusão do calor gerado nas reações de hidratação do cimento (BANTHIA et al., 1996; ACKER; ULM, 2001; BISSCHOP; VAN MIER, 2002).

Em estruturas com uma elevada relação entre a superfície exposta e o volume, o processo de secagem do elemento demanda um período maior de tempo. No entanto, nestes elementos a magnitude total do fenômeno retração poderá ser ligeiramente menor, se comparados com outros idênticos, mas com menor relação sup/vol. Este fato é atribuído à capacidade do elemento em sofrer mais rapidamente o processo de secagem, pois um menor caminho para a difusão da água é formado, até o instante em que a umidade relativa se iguale em toda a seção do elemento (HOLT, 2001).

Além da geometria da estrutura, Yurtdas *et al.* (2006) mencionam que propriedades do concreto, como a porosidade capilar, influenciam no processo de secagem do material. Durante este processo, gradientes de saturação são criados devido a não uniformidade do período de secagem. Assim, os períodos de secagem da superfície e do interior do material ocorrem em intervalos de tempo distintos. Desta forma, ocasionando deformações não homogêneas, as quais induzem tensões de tração e, muitas vezes, microfissuração (BAZANT; NAJJAR, 1972).

Neste período, as variações volumétricas ocorrem devido a diferentes fatores; como a perda de água para o ambiente externo, variações de temperatura e reações químicas de hidratação. Segundo Neville (1997), Holt (2001) e Mehta e Monteiro (2006), em concretos, argamassas e pastas de cimento podem se manifestar diferentes tipos de retração ao longo do tempo, como a retração por secagem, a deformação térmica, a retração autógena e a retração por carbonatação.

As deformações oriundas do fenômeno da retração por secagem ou retração hidráulica ocorrem devido ao processo de secagem do material cimentício. Tal fenômeno será visto com uma maior profundidade no próximo item, visto que é o fenômeno, o qual se pretende mitigar a partir do emprego de agregados cerâmicos, como o agente de cura interna.

2.2.1 Retração por Secagem ou Retração Hidráulica

Segundo Bissonnette et al. (1999), o fenômeno da retração por secagem pode ser considerado o principal responsável pela deterioração das estruturas de concreto. Deformações provenientes deste fenômeno como contrações ou expansões do material, normalmente, são dificultadas por restrições internas e externas, originando tensões de tração no material cimentício. Quando estas tensões excedem a capacidade que o material pode suportar, na maioria dos casos, o fenômeno da retração por secagem vem acompanhado pela formação de fissuras superficiais (WITTMANN *et al*., 2009).

Para Granger *et al.* (1997), tal fenômeno é originado a partir do processo de secagem do material, onde ocorre a primeira mudança macroscópica no compósito cimentício. A secagem do concreto é um processo extremamente lento e ocorre de forma não homogênea na estrutura. Nas camadas superficiais do material cimentício obtêm-se o equilíbrio hídrico com a umidade relativa do ambiente externo rapidamente. No entanto, no interior do material, obviamente dependendo de suas dimensões, o processo ocorre de forma mais branda, formando um diferencial de secagem (COLINA; ACKER, 2000; HOLT, 2001; BENBOUDJEMA *et al*., 2006; WITTMANN *et al*., 2009).

A Figura 2 demonstra o aumento das tensões devido ao diferencial de umidade formado pela ocorrência lenta e não homogênea do processo de secagem. Em outras palavras, pode-se dizer que pelo processo de secagem ocorrer de forma não uniforme no material, tem-se como resultado uma formação de um gradiente de umidade. A diferença de umidade no centro e na superfície do material gera tensões de tração na superfície e de compressão no interior, assim tal comportamento, possivelmente, induzirá a microfissuração da estrutura de concreto, prejudicando as propriedades do material, devido às deformações perto da zona superficial (BENBOUDJEMA *et al.*, 2006; WITTMANN *et al*., 2009).

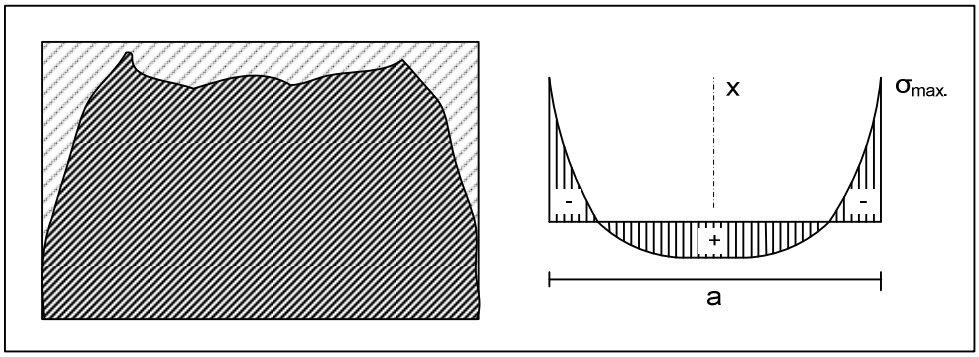


Figura 2: distribuição das tensões (adaptado de BISSCHOP,[5] 2002 apud LAM, 2005)

Conjuntamente, na figura 3 é mostrado o aumento das tensões geradas no material, bem como a formação das fissuras. Wittmann *et al*. (2009) enfatizam que em muitas estruturas de concreto, o gradiente hídrico permanece no interior do material, na forma de água saturada, durante um longo período de tempo, ou seja, estando presente por muitos anos ou até mesmo décadas.

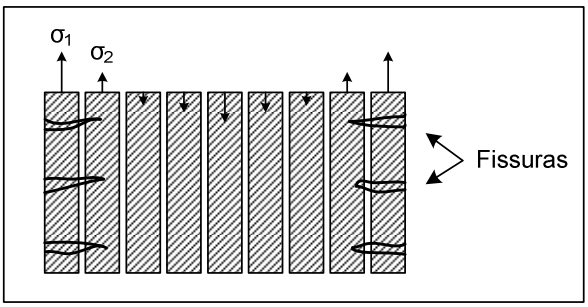


Figura 3: representação esquemática da formação de fissuras (adaptado de BAZANT,[6] 1982 apud WITTMANN *et al.*, 2009)

Associado ao lento processo de secagem, fatores como as reações de hidratação do cimento, variações externas de temperatura e o fenômeno da auto-dessecação, provocado pela contínua hidratação do cimento após o período de pega, influenciam nas ações hídricas presentes na matriz cimentícia. Tais fatores geram fluxos e gradientes de umidade, originando tensões e deformações no material cimentício, assim, estes originam características semelhantes às que ocorrem no material devido ao processo de secagem (COLINA; ACKER, 2000; ACKER; ULM, 2001; BISSCHOP; VAN MIER, 2002).

36

[5] BISSCHOP, J. **Drying Srinkage Microcracking in Cement Based Materials**. Delft University Press, Netherlands, 2002.
[6] BAŽANT, Z. P. Mathematical models for creep and shrinkage of concrete. **Creep and Shrinkage in Concrete Structures**, pp.163–256, 1982.

Além da influência na retração hidráulica do concreto, o processo de secagem do material cimentício afeta diretamente as propriedades mecânicas. Burlion *et al*. (2005) estudaram a ocorrência da deterioração das propriedades elásticas do concreto, devido ao processo de secagem. Os resultados demonstraram uma relação direta entre o processo de secagem e a degradação das propriedades do material cimentício. Dois efeitos foram verificados, o efeito da sucção capilar, aumentando a resistência mecânica do concreto, e a degradação das propriedades elásticas do material, induzindo a tendência de fissuração.

Tal como foi mencionado para o modelo de Wittmann *et al*. (2009), o fenômeno da retração por secagem foi influenciado pelas dimensões do elemento e pelo tipo de restrição presente, contrário às tensões que geram as deformações. O dimensionamento do elemento, através da relação superfície exposta ao ambiente/volume (sup/vol), influenciou, de forma direta, a magnitude da retração hidráulica. Tal relação afetou não só a taxa de perda de umidade do material, mas também a capacidade que a estrutura possuía para difundir o calor gerado nas reações de hidratação do cimento (BANTHIA *et al*., 1996; ACKER; ULM, 2001; BISSCHOP; VAN MIER, 2002).

As restrições nos compósitos cimentícios são diferenciadas em externas e internas. As restrições externas originam fissuras visíveis, denominadas de macrofissuras (SHIOTANI *et al*., 2003). Já as restrições internas, as quais geram microfissuração, segundo a literatura podem ser classificadas em dois tipos. São eles:

d) auto-restrição - causada pelo desenvolvimento de um gradiente de umidade, a partir do processo de secagem não uniforme do material; gerando, consequentemente, restrições internas no elemento, resultando na deformação lenta da matriz. Fatores como o tamanho e a geometria do elemento, através da relação sup/vol, são intervenientes no processo de secagem e na formação do gradiente de umidade (ACKER; ULM, 2001; BISSCHOP; VAN MIER, 2002; SHIOTANI *et al*., 2003);

e) restrição imposta pela dureza do agregado constituinte do compósito cimentício - as tensões, devido a este tipo de restrição, levam a formação de microfissuras radiais no entorno do agregado. Em muitos casos, esta fissuração radial ocorre no interior do material. Parâmetros relacionados com o tamanho, a dureza, o aspecto superficial e a resistência dos agregados, bem como a diferença entre o módulo de Young do agregado e da matriz cimentícia são importantes, e devem ser considerados (BISSCHOP; VAN MIER, 2002; SHIOTANI *et al*., 2003; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Contudo, os mesmos autores mencionam que fatores adicionais, como a composição da matriz cimentícia (tipo de cimento e relação a/c) e as condições de cura/secagem (umidade relativa e temperatura de secagem), possivelmente afetarão, de forma significativa, a tendência de microfissuração devido à retração por secagem. Neste sentido, é provável que as restrições existentes impostas à estrutura de concreto poderão gerar a fissuração.

Além dos processos e técnicas construtivas, as propriedades internas da matriz cimentícia podem auxiliar na redução desta manifestação patológica. Neste sentido, diversos pesquisadores têm avaliado a influência positiva da realização de cura interna nos compósitos cimentícios, visando à redução das tensões internas e, consequentemente, da fissuração. Tal tema será abordado no item que segue, o qual evidencia formas de mitigar o fenômeno da retração nos materiais cimentícios.

2.3 MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO - CURA INTERNA

O grande desenvolvimento tecnológico dos concretos nos últimos anos influenciou o emprego de compósitos cimentícios com maiores níveis de resistência mecânica e, consequentemente, com menores taxas de relação a/c. Contudo, concretos com tais características, como os concretos com alta resistência (CAR), estão mais propensos a ocorrência de fissuração, oriundas do fenômeno da retração.

Visando a redução da fissuração decorrente da retração nas estruturas de concreto, diferentes estratégias estão sendo desenvolvidas baseadas no procedimento de cura interna (RILEM, 2007), objetivando a mitigação do fenômeno da retração que ocorre principalmente nas primeiras idades (autodessecação e a retração autógena), porém considerando o seu efeito na retração ao longo do tempo (retração hidráulica).

Nos últimos anos, diferentes pesquisadores buscaram a mitigação do fenômeno da retração, com o emprego de diferentes técnicas. Pode-se citar diversas pesquisas, tais como a de Sukuzi *et al*. (2009), onde os autores avaliaram o uso de agregados graúdos cerâmicos como agentes de cura interna visando a mitigação da retração autógena em concretos; Akcay e Tasdemir (2010) estudaram a aplicação de agregados leves como agentes de cura interna na mitigação da retração; Silva (2007) e Lopes (2011), as quais estudaram a influência dos aditivos redutores de retração (ARR) em concretos visando à mitigação do fenômeno da retração autógena; igualmente, Ordóñez (2013) estudou a mitigação da retração autógena em CAR com o emprego de aditivos redutores de retração (ARR) e de

polímeros superabsorventes; e a de Han *et al*. (2014), que estudaram a influência da cura interna, com o emprego de agregados leves, em placas de concreto de alta resistência.

A cura interna vem, portanto, sendo investigada como uma nova solução tecnológica, a qual visa proporcionar uma melhora não só nas características de durabilidade dos compósitos cimentícios, mas também nas suas propriedades mecânicas. A realização de tal procedimento visa neutralizar os efeitos adversos causados pela perda de água do material cimentício para o ambiente externo, assim garantindo que não falte água para a ocorrência das reações de hidratação. Esta perda de água do material pode ser mitigada de diferentes formas, sendo estas externas ou internas (JENSEN; LURA, 2006).

Segundo o *American Concrete Institute* (2010) a cura interna é definida como sendo um procedimento no qual existem reservatórios internos de água por toda a mistura cimentícia, que rapidamente liberam a quantidade de água necessária para a hidratação do cimento ou para a reposição de umidade perdida, devido à evaporação para o ambiente externo, ou ainda devido à ocorrência do fenômeno da autodessecação; este fenômeno está associado com a redução da umidade relativa no material cimentício endurecido, devido ao consumo de água dos capilares pelas reações de hidratação do cimento (RILEM, 2007). O funcionamento do procedimento de cura interna é demonstrado, esquematicamente, na figura 4.

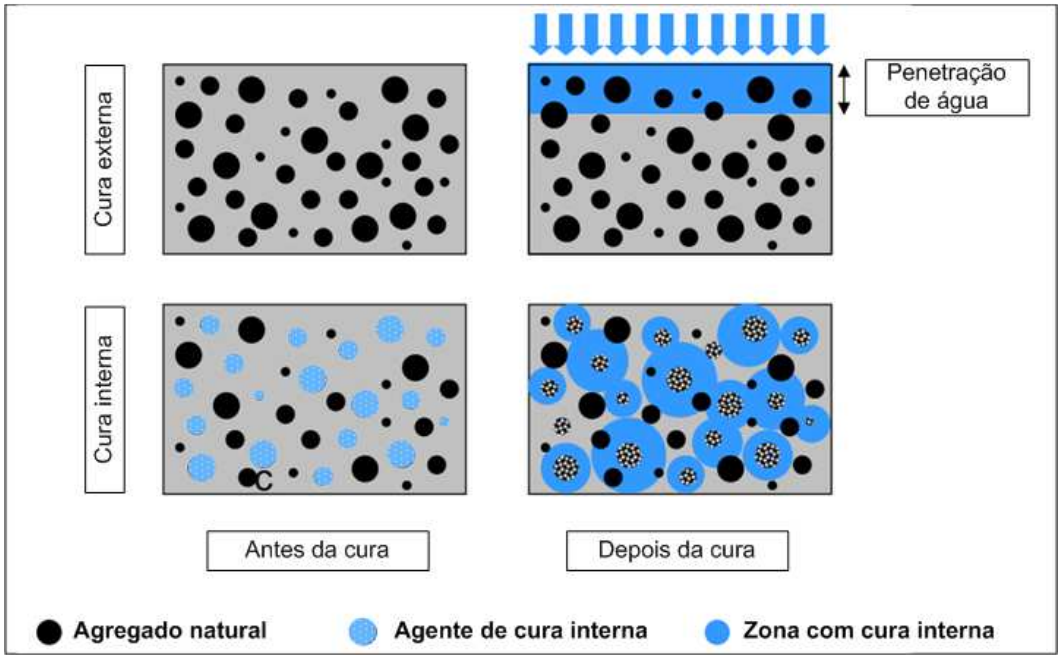


Figura 4: diferenciação entre os procedimentos de cura externa e cura interna (adaptado de CASTRO et al., 2011)

Analisando a figura 4, percebe-se que o procedimento de cura externa é menos eficiente, uma vez que a água é capaz de penetrar somente poucos milímetros (mm) na superfície do compósito cimentício. Cabe salientar que à medida que a relação a/c do concreto é reduzida, tal entrada de água é minimizada significativamente, devido a menor porosidade do material. Diferentemente do que ocorre no procedimento de cura interna, onde a água é capaz de manter-se distribuída uniformemente na matriz cimentícia, assim auxiliando na eficiência da ocorrência das reações de hidratação, bem como na mitigação do fenômeno da retração, decorrente da variação hídrica no compósito cimentício.

Segundo Suzuki *et al*. (2009), a cura externa é um dos mais convencionais e conhecidos métodos de realização de cura e tem-se demonstrado eficiente em elementos de concreto com pequenas dimensões. Contudo, com a redução da porosidade do material, torna-se necessária a cura interna, uma vez que os diferentes métodos de cura externa não são capazes de prevenir a redução da umidade relativa interna devido ao consumo de água dos capilares durante as reações de hidratação (auto dessecação). Assim, o procedimento de cura interna pode ser considerado o método mais eficiente para reduzir as tensões capilares e a ocorrência do fenômeno da retração.

Portanto, a água presente para a cura interna auxilia em evitar a secagem (perda de água) do concreto, principalmente em compósitos com baixa relação a/c. Desta forma, a umidade relativa interna do material permanece elevada durante as reações de hidratação do cimento, assim a retração resultante do fenômeno da auto-dessecação consegue ser limitada ou até mesmo eliminada.

2.3.1 Mecanismo da Cura Interna

O procedimento de cura interna impede a secagem do concreto, a qual pode ser uma consequência das reações de hidratação em misturas com baixa relação água/cimento. Em compósitos que possuem agentes de cura interna, a umidade relativa interna do material permanece elevada e a deformação originada pelo fenômeno da auto-dessecação pode ser limitado ou até mesmo evitado (RILEM 196-ICC, 2007).

A água armazenada, nos agentes de cura interna, é um parâmetro essencial para o funcionamento apropriado da cura interna. Para Jensen (RILEM 196-ICC, 2007), esta água pode ser classificada de três formas: a quantidade de água total, a água disponivel termodinamicamente e a água disponivel cineticamente. Segundo o autor, a quantidade de água necessária é dependente da composição da mistura, das condições de cura convencional (externa) e do objetivo da realização do processo de cura interna, uma vez

que tal procedimento pode ser aplicado para compensar a perda de água decorrente da secagem do concreto.

A água disponível termodinamicamente deve gerar um equilíbrio da umidade relativa interna próxima a 100%, em relação à hidratação do cimento. Contudo, se ocorre uma pequena redução desta umidade relativa interna, a hidratação do cimento será afetada significativamente. Já a água presente nos poros capilares terá um equilíbrio próximo a 99%, quando o diâmetro do poro (menisco) for superior a 100 nm, pois somente com este tamanho de poro é que a água será capaz de auxiliar no procedimento de cura interna (JENSEN *et al.*, 1999; RILEM 196-ICC, 2007).

Diferentemente, a água disponível cineticamente refere-se àquela transportada a partir do armazenamento de água para toda a matriz cimentícia. Assim, percebe-se que esta água não pode estar confinada, pois ela deve estar facilmente disponível para ser transportada pela matriz cimentícia, bem como deve estar adequadamente distribuída por todo o compósito cimentício. Segundo Jensen, a distribuição espacial da água no compósito cimentício pode ser melhorada através da redução do tamanho dos reservatórios internos de água (RILEM 196-ICC, 2007).

2.3.2 Modelo de Powers – Definições

Powers e Brownyard (1948[7] apud JENSEN; HANSEN, 2001; RILEM 196-ICC, 2007) apresentaram um modelo empírico sobre a estrutura da pasta de cimento Portland. Tal modelo consegue explicar propriedades físicas da pasta de cimento, bem como permite realizar cálculos teóricos da composição das fases endurecidas de pastas de cimento Portland.

Segundo os mesmos autores, características da estrutura da pasta de cimento endurecida estão relacionadas com o estado físico da fase sólida, bem como de sua atração pela água. Onde, no estado fresco a pasta é composta por grãos de cimento em solução aquosa, e no estado endurecido é composta por produtos hidratados e espaçamentos onde é possível a penetração de água, gerando uma estrutura porosa. Os produtos de hidratação formados na pasta de cimento são densos e apresentam uma porosidade característica, denominada de poros de gel. O gel de cimento corresponde a uma substância densa e porosa, composta principalmente por silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) (JENSEN; HANSEN, 2001; RILEM 196-ICC, 2007; ORDÓÑEZ, 2013).

41

[7] Powers, T.C.; Brownyard, T.L., “Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste”, Bulletin 22, Portland Cement Association, Chicago (1948); **Journal of the American Concrete Institute.**

Assim, o modelo de Powers classificou a água presente na pasta de cimento endurecida em três fases:

- água capilar (água livre) - definida como o volume de água livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida. A movimentação da água capilar pode gerar deformações da matriz cimentícia (expansão ou retração), quando a mesma está bem ligada ao sólido por forças de tensão superficial. A água capilar está disponível para a hidratação do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2006; LOPES, 2011);
- água de gel (água adsorvida) - definida como a água adsorvida em camadas moleculares sobre a superfície sólida dos poros; sendo submetida à ação de forças intermoleculares de Van der Waals (adsorção física) e de forças eletrostáticas (ligações de hidrogênio) (LOPES, 2011);
- água quimicamente combinada (água não evaporável) - definida como aquela consumida pelas reações de hidratação e que está combinada com os compostos dos hidratos. De acordo com Jensen e Hansen (2001) é também denominada de água não evaporável, uma vez que somente pode ser expulsa com temperaturas superiores a 105ºC (LOPES, 2011).

O modelo fez determinações baseadas na hidratação completa de 1g de cimento. Onde, quimicamente, aproximadamente 0,23g de água corresponde à água não evaporável ou água quimicamente combinada, parte integrante da estrutura sólida do gel. Na superfície da estrutura sólida do gel, uma quantidade de aproximadamente 0,19g de água é adsorvida, sendo denominada de água de gel ou água adsorvida. Já a água evaporável na pasta de cimento é denominada de água capilar ou água livre, estando presente nos poros capilares com maiores dimensões. Somente a água capilar está livremente acessível para a hidratação do cimento (JENSEN; HANSEN, 2001).

Assim, a água capilar é considerada um fator que permite o equilíbrio da umidade relativa interna em 100%. Contudo, os produtos hidratados gerados possuem um volume inferior, quando comparados com o volume de cimento e da água antes da hidratação. Como mencionado anteriormente, este fenômeno é denominado de retração química e corresponde a aproximadamente 6,4ml para cada 100g de cimento hidratado (JENSEN; HANSEN, 2001).

Conjuntamente, é importante ressaltar que tais quantitativos mencionados acima (água quimicamente combinada, água adsorvida e a retração química) estão diretamente relacionados com a composição do cimento Portland, ou seja, os mesmos vão variar em função da composição do aglomerante. Segundo o modelo de Powers, a determinação do volume das fases que compõem uma pasta de cimento hidratada podem ser determinadas pelas equações que seguem:

$$V_{cs} = 0{,}20(1-p)\alpha$$ Equação 1

$$V_{cw} = p - 1{,}32(1-p)\alpha$$ Equação 2

$$V_{gw} = 0{,}60(1-p)\alpha$$ Equação 3

$$V_{gs} = 1{,}52(1-p)\alpha$$ Equação 4

$$V_{uc} = (1-p)(1-\alpha)$$ Equação 5

Onde:

V_{cs} – volume de retração química (m³);

V_{cw} – volume de água capilar (m³);

V_{gw} – volume de água de gel (m³);

V_{gs} – volume de sólidos de gel (m³);

V_{uc} – volume de cimento não hidratado (cimento anidro) (m³);

p – porosidade inicial;

α – grau de hidratação o cimento (kg de cimento hidratado / kg de cimento anidro).

Se somente a água capilar está livremente disponível para a hidratação do cimento, como mencionado anteriormente, quando esta é totalmente consumida/evaporada, a hidratação do cimento é significativamente retardada. Pelo modelo, a hidratação do cimento somente será completa se a relação água/cimento for superior a 0,42 (= 0,23 + 0,19). Contudo, se a pasta de cimento hidratar com presença constante de água, o volume (vazios) gerado pela

retração química será preenchido por água adsorvida, estando disponível para a hidratação do cimento (JENSEN; HANSEN, 2001).

Assim, para compósitos com relação água/cimento superiores a 0,42, o acesso livre de água possibilita um aumento no grau de hidratação do material cimentício. Na figura 5 são demonstradas as relações volumétricas calculadas pelo modelo de Powers, para pastas de cimento com relação a/c > 0,42, figura 5(a), e para relação a/c < 0,42, figura 5(b), em um sistema sem transporte de umidade (em perda de massa).

Analisando a figura 5(a), percebe-se uma total hidratação do cimento, bem como o excesso de água livre (água capilar) nos poros capilares com maiores dimensões, devido à elevada relação a/c da pasta (> 0,42). Conjuntamente, pode-se dizer que a água capilar está em equilíbrio com a umidade relativa de 100%; a água de gel possui um intervalo de energia de ligação correspondente ao intervalo da umidade relativa entre 0 e 100%. Logo, com o aumento do grau de hidratação do cimento, a água capilar é parcialmente consumida e a quantidade da água de gel aumenta (JENSEN; HANSEN, 2001; RILEM 196-ICC, 2007).

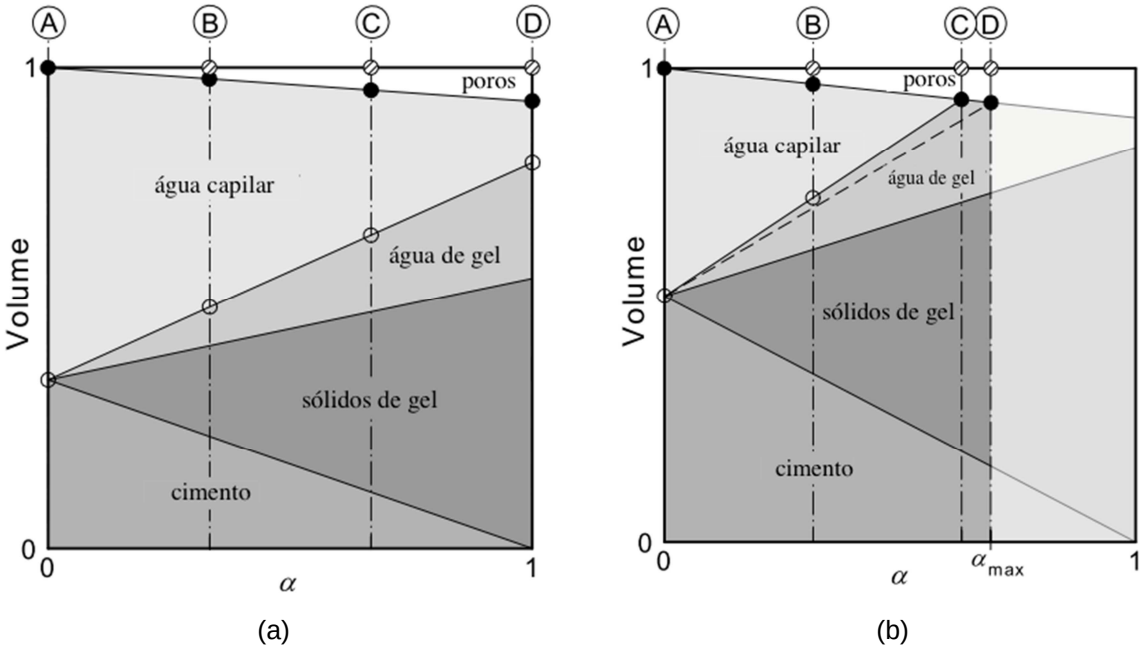


Figura 5: distribuição volumétrica das fases da pasta de cimento, como uma função do grau de hidratação (α), em um sistema fechado. (a) para uma relação a/c de 0,6. (b) para uma relação a/c de 0,3. (adaptada de RILEM 196-ICC, 2007)

A figura 5(b) corresponde à pasta de cimento hidratada com relação a/c inferior a 0,42 (baixa relação a/c). Analisando a figura, observa-se a insuficiência de água capilar para a hidratação completa do cimento. Conforme as medições de Powers, a hidratação do cimento necessita que o gel de cimento produzido (sólidos de gel e água de gel) tenham

uma porosidade mínima, pois se não houver tal espaço (poros) o crescimento das partículas de gel existentes e a formação de novas partículas será restrito (JENSEN; HANSEN, 2001; RILEM 196-ICC, 2007). Portanto, percebe-se a presença de grãos de cimento não hidratados (anidros), isto é, o grau de hidratação máximo da pasta de cimento é inferior a 1.

2.3.3 Modelo de Powers Aplicado ao Procedimento de Cura Interna

Na atualidade, o modelo de Powers é ainda considerado um dos poucos que consegue prever, teoricamente, a quantidade de água necessária para compensar as deformações causadas pela autodessecação (JENSEN; HANSEN, 2001; RILEM 196-ICC, 2007). Na figura 6 é apresentada a distribuição das fases de uma pasta de cimento, com baixa relação a/c, porém com fornecimento de água livre durante toda a hidratação.

A presença de água livre permite que o cimento atinja um mais alto grau de hidratação. Além disso, os micro poros presentes na pasta de cimento permanecem vazios. A água adicional, demonstrada na figura 6, está relacionada com uma fonte de fornecimento de água, independente da água de amassamento da mistura, ou seja, pela presença do procedimento de cura interna (JENSEN; HANSEN, 2001; RILEM 196-ICC, 2007).

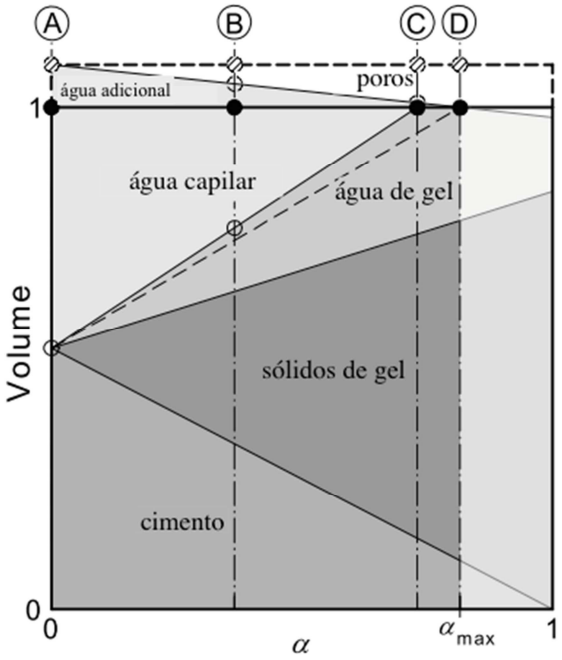


Figura 6: distribuição volumétrica das fases da pasta de cimento, como uma função do grau de hidratação (α), em um sistema fechado e para uma relação a/c de 0,30+0,05. (adaptada de RILEM 196-ICC, 2007)

Jensen e Hansen (2001) mencionam ainda que somente a quantidade de água necessária para reduzir a autodessecação deveria ser adicionada, através de um agente de cura interna, pois os poros gerados, após o consumo e/ou secagem, influenciam negativamente

as propriedades da matriz cimentícia. Portanto, com base no modelo de Powers, os autores conseguiram propor equações capazes de estimar a quantidade de água necessária para a cura interna, visando mitigar o fenômeno da autodessecação.

Os autores mencionam ainda que estas equações seguem o principio de que o volume de água incorporada à mistura, através da cura interna, deve ser igual à retração química desenvolvida no grau máximo de hidratação do cimento. Assim, quando os autores concordam com o modelo de Powers, que a hidratação cessa, para pastas com baixas relações a/c, quando o espaço disponível é ocupado pela água de gel, sólidos de gel e cimentos anidros, tem-se que:

$$\{\alpha = \alpha_{max} \quad para \quad V_{gw} + V_{gs} + V_{uc} = 1\} \rightarrow$$
$$0{,}60(1-p)\alpha_{max} + 1{,}52(1-p)\alpha_{max} + (1-p)(1-\alpha_{max}) = 1$$

Equação 6

Portanto, em um sistema aberto, com relações a/c baixas:

$$\alpha_{max} = \frac{p}{1{,}1(1-p)}$$

Equação 7

$$V_{icw,0} = 0{,}20(1-p)\alpha_{max} = 0{,}18p = 0{,}18V_{cw,0}$$

Equação 8

Com base em uma determinada relação a/c (kg de água/kg de cimento), a água incorporada, através do procedimento de cura interna, e a água capilar podem ser representadas pelas equações 9 e 10, respectivamente.

$$\left(\frac{a}{c}\right)_{ic} = \frac{V_{icw,0}\,\rho_w}{V_{c,0}\,\rho_c}$$

Equação 9

$$\frac{a}{c} = \frac{V_{cw,0}\,\rho_w}{V_{c,0}\,\rho_c}$$

Equação 10

Logo, combinando as equações 8, 9 e 10, a água necessária para cura interna, visando obter a hidratação máxima do cimento, é apresentada através da equação 11.

$$\left(\frac{a}{c}\right)_{ic} = 0{,}18\frac{a}{c}\ , para\ a/c \leq 0{,}36$$ Equação 11

A equação 11 é somente relevante para uma relação inferior a 0,36. Para misturas com relação a/c superior, a hidratação completa pode ser alcançada com uma menor quantidade de água incorporada, através da cura interna. De acordo com o modelo de Powers, a hidratação total (α_{max} = 1) somente é possível para o intervalo entre 0,36 ≤ a/c ≤ 0,42, se:

$$\frac{a}{c} + \left(\frac{a}{c}\right)_{ic} = 0{,}42$$ Equação 12

Assim sendo, a condição necessária para obter a hidratação completa (α_{max} = 1) neste intervalo de relação a/c é expresso pela equação 13.

$$\left(\frac{a}{c}\right)_{ic} = 0{,}42 - \frac{a}{c}\ , para\ 0{,}36 \leq a/c \leq 0{,}42$$ Equação 13

Como forma de elucidar tais equações, os autores ainda apresentam a figura 7, onde é possível verificar a quantidade mínima de água incorporada (água de cura interna) para garantir a hidratação completa da pasta de cimento e prevenir o fenômeno da autodessecação. A mesma leva em consideração as equações 11 e 13.

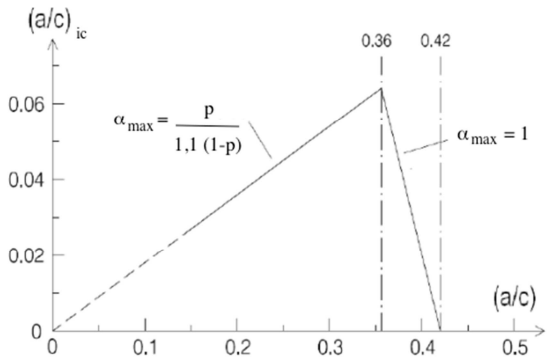


Figura 7: representação da quantidade de água mínima necessária para obter a hidratação completa da pasta de cimento (α_{max} = 1). (adaptado de JENSEN; HANSEN, 2001; RILEM 196-ICC, 2007)

Analisando a figura 7, percebe-se que a relação a/c da mistura, representada no eixo horizontal, e a relação a/c necessária para a cura interna, representada no eixo vertical, correspondem a dados de entrada. Logo, visando promover a hidratação completa do

cimento, bem como evitar a autodessecação, a relação a/c da mistura é representada pela soma destes dois valores de a/c.

2.3.4 Mecanismo de Variação da Pressão Capilar

A capilaridade gera interfaces curvas entre o fluido (líquido – água) e o ar contido no interior dos poros. Nesta interface é estabelecido um gradiente de pressão mensurável denominado de pressão capilar, o qual é diretamente influenciado pela tensão superficial do poro (líquido-gás), pelo raio de curvatura e pelo ângulo de molhamento (SILVA, 2007; BENTZ; WEISS, 2011).

O mecanismo da pressão capilar (depressão capilar) é explicado pelas leis de Laplace (equação 14) e Kelvin (equação 15). Estas descrevem o equilíbrio higrométrico entre as fases líquida e gasosa (vapor de água), bem como o equilíbrio mecânico de um menisco submetido a pressões distintas (SILVA, 2007).

$$\Delta P = P_g - P_L = \frac{2\,\sigma}{r} \cos\theta_E \qquad \text{Equação 14}$$

Onde:

$\Delta P = P_g - P_L$ – intensidade da pressão capilar (MPa);

$P_g = P_a - P_v$ – pressão da fase gasosa úmida (ar seco + vapor d'água) (MPa);

P_a – pressão parcial do ar seco (MPa);

P_v – pressão parcial do vapor d'água (MPa);

P_L – pressão do líquido (MPa);

σ – tensão superficial na interface líquido/gás (N/m);

r – raio do maior poro (m);

θ_E – ângulo de contato entre a superfície sólida e a fase líquida.

$$P_L - P_g = \frac{RT\rho_l}{V_m} \ln(UR) \qquad \text{Equação 15}$$

Onde:

R – constante ideal dos gases (8,314 J/mol*K);

T – temperatura absoluta (K);

ρ_l – massa específica do líquido;

UR – umidade relativa (%);

V_m – volume molar da água (m³/mol).

Analisando as leis de Laplace (equação 14) e Kelvin (equação 15) é possível associar a intensidade da depressão capilar, o raio do poro onde foi formado o menisco e a umidade relativa. Assim sendo, sabendo que a depressão capilar e o raio do poro são inversamente proporcionais, pode-se dizer que quanto mais finos forem os poros em processo de esvaziamento, maior será a intensidade deste fenômeno; bem como quanto menor for a umidade relativa interna do material menor será a dimensão do poro não saturado (SILVA, 2007).

Portanto, tal formação é seguida por uma redução progressiva do raio de curvatura (r) deste menisco, o qual proporciona um equilíbrio entre suas fases líquida e gasosa. Assim sendo, a fase líquida é tracionada, induzindo pressões negativas sobre as paredes dos capilares, tendendo a aproximá-las. Consequentemente, esta pressão da fase líquida tende a ser equilibrada por uma mudança de volume do sólido poroso, gerando a variação volumétrica no material (HUA; ACKER; EHRLACHER, 1995; ACKER; ULM, 2001; BENBOUDJEMA; MEFTAH; TORRENTI, 2006; SILVA, 2007).

Segundo Bentz e Weiss (2011), quando não existem tais reservatórios de água presentes na matriz cimentícia, a pressão capilar (ΔP) aumentará rapidamente, ao longo do tempo. Conjuntamente, Hua *et al*. (1995) e Silva (2007) afirmam que o aumento do teor de umidade dos átomos e moléculas (adsorção) na superfície sólida causa uma diminuição nas tensões superficiais, enquanto a redução do teor de umidade (desorção) provoca uma elevação destas tensões, assim resultando em uma compressão no sólido.

Cabe ressaltar que existem dois modos de minimizar a intensidade da pressão capilar (ΔP), seja reduzindo a tensão superficial da interface líquido/gás, como por exemplo, pelo emprego de aditivos redutores de retração (ARR) (SHAH *et al*., 1998), seja aumentando o tamanho do poro parcialmente preenchido, a partir do fornecimento de água em poros de

maior escala presentes na microestrutura, em outras palavras, empregando o procedimento de cura interna (BENTZ; WEISS, 2011).

Conforme Lura *et al*. (2003), esta pressão capilar existente acabará produzindo variações de volume significativas na matriz cimentícia. Assim sendo, uma retração na microestrutura será gerada, onde tal fenômeno poderá ser estimado a partir de uma versão modificada da equação de Mackenzie, equação 16 (MACKENZIE, 1950[8] apud BENTZ; WEISS, 2011).

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma S}{3}\right)\left[\left(\frac{1}{K}\right) - \left(\frac{1}{K_s}\right)\right] \qquad \text{Equação 16}$$

Onde:

ε – deformação linear mensurável (*measured linear strain*);

σ – tensão ou pressão capilar (*capillary pressure or stress*);

K – módulo do material poroso (*bulk modulus of the porous material*);

K_s – módulo do esqueleto do sólido (*modulus of its solid backbone*);

S – nível de saturação do poro (entre 0 e 1) (*level of saturation in the pore space*).

Quando tal deformação proveniente da variação volumétrica tornar-se suficiente, esta contribuirá ou até mesmo poderá causar fissuração no material, nas primeiras idades. Desta forma, as características de durabilidade do compósito cimentício serão severamente prejudicadas, minimizando a vida útil da estrutura (BENTZ; WEISS, 2011).

Dentro deste contexto, nota-se que o objetivo da realização do procedimento de cura interna em materiais cimentícios está relacionado com a possibilidade de fornecer uma fonte de água adicional à mistura, na quantidade e na distribuição espacial adequada. Assim, será possível manter elevada a umidade relativa interna do material, possibilitando uma adequada hidratação do cimento, bem como uma redução da ocorrência do fenômeno da retração, e de suas consequências severas.

[8] MACKENZIE, J. The Elastic Constants of a Solid Containing Spherical Holes. **Proceedings of the Physics Society**, 683, 2-11, 1950.

2.4 AGENTES DE CURA INTERNA

Diferentes são as técnicas empregadas para a realização do procedimento de cura interna, o qual visa mitigar a perda de água da mistura para o ambiente. Segundo Jensen e Lura (RILEM, 2007), tal procedimento é realizado a partir do fornecimento de água interna (água adicional) para a mistura cimentícia.

Na bibliografia é possível verificar que diversos são os materiais empregados como agentes de cura interna. Contudo, estes devem possuir características adequadas para garantir a liberação da água na quantidade e no momento adequados, visando garantir o controle da auto dessecação durante a ocorrência das reações de hidratação.

De acordo com Jensen e Lura (2006; RILEM 196-ICC, 2007), os agentes de cura interna, quando adicionados ao concreto, devem ser suficientemente resistentes para suportar o processo de mistura e não liberar a água antes do inicio de pega. Assim sendo, após a ocorrência do processo de pega, a água presente nos reservatórios (agentes de cura interna) deve ser liberada livremente para auxiliar na hidratação do cimento. Portanto, esta água deve estar disponível tanto termodinamicamente quanto cineticamente para as reações de hidratação do cimento Portland.

Para os autores, tais características termodinâmicas e cinéticas estão relacionadas com a umidade relativa interna (potencial químico de atividade da água) e com o transporte de umidade, respectivamente. Logo, tais parâmetros estão diretamente relacionados com as propriedades do material empregado como o agente de cura interna, assim como por sua capacidade de absorção de água, pela dimensão do poro do agente (reservatório), bem como pela sua distribuição espacial na mistura cimentícia (uniformidade) (JENSEN; LURA, 2006; RILEM 196-ICC, 2007).

Conjuntamente, Esteves (2009) afirma que a eficiência de qualquer material empregado como agente de cura interna dependerá, em grande escala, da forma em que ocorrerá o transporte de umidade (cinética) entre o mesmo e a matriz cimentícia. Tal cinética está relacionada não só com a absorção de água, mas também com o processo de desorção, o qual permite a liberação de água para as reações de hidratação.

Muitos são os materiais que podem ser empregados como agentes de cura interna. No entanto, tais reservatórios internos de água podem ter princípios de funcionamento físico-químicos distintos. Segundo Jensen e Lura (RILEM, 2007), os agentes de cura interna funcionam de acordo com tais princípios:

a) água quimicamente combinada;

Para Jensen e Lura (RILEM, 2007), diferentes tipos de substâncias químicas contêm água ligada quimicamente à sua estrutura molecular, que são mantidas por ligações químicas. Quando aplicadas como agentes de cura interna, a água presente na sua estrutura molecular deve ser elevada, bem como deve ser facilmente liberada à mistura, à medida que a umidade relativa do sistema diminui. Conjuntamente, os autores mencionam que tal substância deve ser compatível com o tipo de cimento empregado no compósito cimentício. Exemplo de uma substância química aplicada em pasta de cimento é a etringita ($C_3A(CS)_3H_{32}$), onde aproximadamente 50% da água presente neste composto, em peso, pode ser liberado quando a umidade relativa do sistema é reduzida, porém em umidades relativas elevadas parte pequena da água é liberada. Para os autores, tal técnica possui aplicação reduzida e nos últimos anos não se identificou nenhuma tentativa de emprego da mesma.

b) água adsorvida (fisicamente);

Os materiais que adsorvem fisicamente a água são definidos como aqueles que possuem uma elevada superfície específica, sendo capazes de adsorver grandes quantidades de água à sua superfície, ou seja, adsorvem inúmeras camadas moleculares de água entre a sua superfície. Jensen e Lura (RILEM, 2007) explicam que a água é mantida na superfície do material através de reações químicas secundárias, sendo liberadas no momento em que a umidade relativa do sistema reduz. Os autores citam como exemplos de agentes de cura interna que possuem tal princípio de funcionamento, as argilas bentoníticas e os polímeros super absorventes (SAP).

c) água capilar;

Os agentes de cura interna que possuem este princípio de funcionamento são aqueles que têm uma significativa estrutura interna de poros, onde pela ação de forças capilares é possível manter a água necessária para a ocorrência da cura interna, ou seja, a água é armazenada nos poros do material, sendo liberada no momento da redução da umidade relativa do sistema. Contudo, é válido ressaltar que somente em poros com tamanho superior à aproximadamente 10 nm é possível armazenar a água para a cura interna, uma

vez que em poros com menores dimensões a água se mantém tão firmemente retida que não se torna disponível para as reações de hidratação (RILEM, 2007).

Jensen e Lura (RILEM, 2007) citam que diferentes materiais naturais ou artificiais possuem elevada porosidade, que os torna potencialmente úteis para a aplicação do procedimento de cura interna, como exemplos pode-se citar os agregados leves, como a perlita, a argila expandida e a pedra pomes, os agregados convencionais e os agregados reciclados.

d) Água livre;

A ocorrência de cura interna, através do princípio da água livre, está relacionada com a técnica de microencapsulação[9], onde a água é o material encapsulado e, está é liberada pela ruptura mecânica da parede da cápsula, pela dissolução da parede da cápsula ou pela difusão através da parede da cápsula (RILEM, 2007). Entretanto, Jensen e Lura (RILEM, 2007) enfatizam que a microencapsulação da água é uma técnica delicada para ser empregada no procedimento de cura interna, uma vez que as paredes das cápsulas devem possuir resistência química e física para permanecerem intactas até o início da pega do cimento, para então iniciar o processo de liberação de água.

Conjuntamente, outro fator importante a ser considerado foi abordado por Lura *et al*. (2007), onde o emprego de materiais com elevada porosidade e, consequentemente, com baixa resistência mecânica, como agentes de cura interna, acabam por modificar as propriedades do compósito cimentício, alterando as características reológicas da mistura. Assim, a utilização excessiva de tais materiais pode trazer consequências adversas ao concreto, uma vez que as características dos mesmos influenciam na redução da resistência mecânica e do módulo de elasticidade do compósito cimentício, potencialmente aumentando a intensidade do fenômeno da retração.

Dentro deste contexto, diferentes são os materiais empregados como agentes para a realização do procedimento de cura interna, os quais visam mitigar as deformações do material cimentício, a partir da compensação dos espaços vazios criados pela ocorrência da retração química (ESTEVES, 2009). A seguir serão abordadas características e propriedades de materiais consagrados, bem como de novos materiais, para o emprego como agentes de cura interna.

53

[9] A microencapsulação é definida como a técnica através da qual parcelas de um determinado gás, líquido ou sólido são encapsuladas no interior de pequenas esferas, normalmente poliméricas.

2.4.1 Agregados Leves

Uma grande quantidade de materiais naturais ou produzidos artificialmente possuem elevada potencialmente quando falamos em agentes de cura interna, devido a sua estrutura interna de poros. Tais materiais são comumente empregados como agregados leves em concretos (RILEM 196-ICC, 2007).

Os agregados leves foram o primeiro tipo de material a ser empregado como agente de cura interna. Tal fato deve-se, principalmente, as suas características físicas de elevada porosidade e capacidade de transporte. Quando comparado com os agregados normais (convencionais), a porosidade interna do agregado leve chega até ser 50% superior, característica esta intrínseca deste material. Este comportamento facilita a sua rápida captação de água, durante o procedimento de pré-saturação do agregado (ESTEVES, 2009).

O mecanismo responsável por manter a água presente no interior do agregado leve são as forças capilares, pois em função do grão possuir uma estrutura de poros elevada, bem como a dimensão de poro adequada (superior a 100 nm), proporcionam o armazenamento da água para o procedimento de cura interna. Entretanto, em poros menores, a água presente não se torna disponível para a cura interna e para as reações de hidratação. Assim, pode-se dizer que o principio de funcionamento do agregado leve como um agente de cura interna está relacionado com a presença de água capilar (RILEM 196-ICC, 2007).

O desenvolvimento desta tecnologia iniciou em 1967, quando Aroni e Polivka afirmaram que a cura interna poderia ser atingida a partir do uso de agregados porosos saturados, tais como os agregados leves, uma vez que os poros deste material poderiam ser reservatórios internos de água, disponíveis para o procedimento de cura interna (LURA, 2003). Contudo, somente na década de 90 que se obteve uma real contribuição para esta área do conhecimento, com a publicação do trabalho de Philleo (1991)[10]. Nesta pesquisa, o autor sugeriu a incorporação de agregados leves saturados (finos) na mistura, onde se buscou realizar o abastecimento interno de uma fonte de água adicional, assim possibilitando a reposição da água consumida durante a hidratação da pasta (BENTZ; SNYDER, 1999; LURA, 2003; LAM, 2005; KIM, 2009; CASTRO *et al*., 2011).

A partir deste momento, inúmeros pesquisadores desenvolveram estudos buscando um maior entendimento sobre o emprego de agregados leves como agentes de cura interna.

54

[10] PHILLEO, R. **Concrete Science and Reality**. Materials Science of Concrete II. American Ceramic Society, Ohio, 1991.

Dentre estes, pode-se citar o trabalho de Kohno *et al*. (1999), que avaliou os efeitos do tipo, do teor de umidade e do volume de agregado graúdo leve frente à retração autógena; o estudo de Bentz e Snyder (1999), o qual buscou o desenvolvimento de modelos matemáticos para estimar a quantidade necessária de agregado leve a ser empregada, a fim de garantir a adequada liberação de água durante a cura interna; a pesquisa de Bentur *et al*. (2001), a qual avaliou o emprego de agregado leve saturado como um agente de cura interna a fim de neutralizar a auto dessecação e o desenvolvimento das tensões geradas, quando em condições restringidas.

Conjuntamente, estudos mais atuais como o de Akcay e Tasdemir (2010), Henkensiefken *et al*. (2010) e Castro *et al*. (2011) ainda buscam entender propriedades dos agregados leves, quando empregados como agentes de cura interna. Golias, Castro e Weiss (2012), estudaram a influência do teor de umidade inicial do agregado leve frente a sua eficiência como agente de cura interna. Já Lura *et al*. (2014) avaliaram a possibilidade de aplicação de agregados leves produzidos a partir de resíduos derivados de biomassa, como agentes de cura interna em concretos, assim buscando o avanço da tecnologia dos materiais cimentícios associado ao desenvolvimento sustentável da construção civil.

Os esforços contínuos para o desenvolvimento desta tecnologia devem-se principalmente à dificuldade de seu entendimento devido à grande heterogeneidade do material. Tal característica exerce influência não somente nas características reológicas do compósito cimentício, como na consistência e na trabalhabilidade, mas também em suas propriedades mecânicas, como na resistência mecânica e no módulo de elasticidade (JENSEN; HANSEN, 2002).

Para Lura (2005), há ausência de conhecimento relacionado a questões fundamentais sobre os mecanismos de transporte de umidade, os quais regem a cura interna. Segundo o autor, parâmetros como o transporte de água do agregado leve para a pasta, bem como a tentativa de quantificação da quantidade de água que permanece nos poros é ainda pouco entendida. Conjuntamente, Bentz e Weiss (2011) afirmam que é de extrema dificuldade mensurar a forma de transporte de água proveniente do agente de cura interna, como o agregado leve. Tal comportamento deve-se à complexidade do processo e a ausência de metodologias, as quais auxiliem na correta determinação das características de desorção deste material.

Esteves (2009) afirma que um controle adequado sobre as propriedades físicas do agregado leve e de sua interação com a água possibilita a viabilização do emprego deste material como agente de cura interna para compósitos cimentícios. Um exemplo deste controle de

qualidade é realizado nos Estados Unidos, onde o emprego de agregados leves como agentes de cura interna é crescente, sendo principalmente utilizado em concretos de alto desempenho.

2.4.2 Polímeros Superabsorventes (SAP)

O polímero superabsorvente (SAP) é um outro exemplo de material que pode ser aplicado como um agente de cura interna. Estes materiais poliméricos são substâncias expansíveis capazes de absorver uma quantidade significativa de líquidos e mantê-la no interior de sua microestrutura, sem que ocorra a dissolução (JENSEN; HANSEN, 2001; RILEM 196-ICC, 2007; CRAEYE; GEIRNAERT; SCHUTTER, 2011). Para Hasholt *et al*. (2012), tais polímeros são capazes de absorver uma quantidade substancial de água, correspondente a aproximadamente 1000 vezes o seu próprio peso ou mesmo mais (ORDÓÑEZ, 2013).

Segundo Mechtcherine *et al*. (2009[11] apud ORDÓÑEZ, 2013), os polímeros superabsorventes consistem em cadeias de ligação cruzada que têm grupos funcionais iônicos, os quais facilitam a absorção de grandes quantidades de água, onde o seu principio básico de funcionamento segue o conceito da água adsorvida (RILEM 196-ICC, 2007). Desta forma, a presença do SAP no interior da mistura cimentícia possibilita o fornecimento de água adicional, auxiliando para a minimização da auto dessecação, mitigando as deformações provenientes das variações volumétricas da matriz cimentícia (JENSEN; HANSEN, 2001; LURA, 2005; MECHTCHERINE; DUDZIAK, 2012).

Além disso, Jensen e Hansen (2001) mencionam que os polímeros superabsorventes possuem vantagens em relação aos agregados leves, uma vez que sua técnica de aplicação é mais simples e não possui desvantagens significativas. Os autores colocam ainda que os SAP’s podem ser usados como uma adição ao concreto, e diferentemente do agregado leve, o emprego dos polímeros possibilita uma liberdade na escolha do formato e da distribuição do poro no compósito endurecido, além de eliminar o emprego de agregados com características mecânicas reduzidas.

Conjuntamente, outra vantagem do emprego dos polímeros superabsorventes está relacionada à ação gelo-degelo. Onde, torna-se possível a formação de um sistema de vazios, a partir dos pequenos vazios esféricos deixados, no momento da saída de água dos macro-poros durante a hidratação da pasta (JENSEN; HANSEN, 2001; BENTZ; JENSEN,

56

[11] MECHTCHERINE, V., DUDZIAK, L., & HEMPEL, S. Mitigating early age shrinkage of Ultra - High Performance Concrete by using Super Absorbent Polymers (SAP). **Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures**. Instituto de Materiais de Construção, TU Dresden, Alemanha, 2009.

2004; ESTEVES, 2009). Contudo, muitos consideram que a formação deste sistema de poros é uma desvantagem deste tipo de material, uma vez que esta porosidade desenvolvida pode afetar as propriedades mecânicas do material compósito, como a pasta, a argamassa ou o concreto (JENSEN; HANSEN, 2002; MECHTCHERINE *et al*., 2006[12] apud ESTEVES, 2009; MÖNNING; REINHARDT, 2006[13] apud ESTEVES, 2009).

2.4.3 Agregados convencionais

Segundo Jensen e Lura (RILEM, 2007), os agregados convencionais utilizados usualmente em concretos podem conter água em seu interior, fator este que pode auxiliar na ocorrência de cura interna nos concretos. Este comportamento está relacionado, principalmente, com a porosidade e a capacidade de absorção de água da rocha, a qual é empregada como agregado nas misturas cimentícias.

Em rochas com taxas de porosidade próximas a 25%, como as rochas calcárias, é possível obter-se o teor de água suficiente para a ocorrência de cura interna, se os poros do agregado estiverem preenchidos por água. Assim sendo, é possível verificar que a água presente em alguns agregados convencionais deveria ser levada em consideração como uma fonte potencial para fornecer a água necessária para a ocorrência da cura interna (JENSEN, LURA, 2006).

Contudo, a porosidade dos grãos pode ser parcialmente preenchida. Conjuntamente, a distribuição espacial da água nos grãos pode ser um parâmetro desfavorável, e somente a fração fina do agregado pode ser capaz de garantir a cura interna, devido à percolação da água em direção à pasta (JENSEN, LURA, 2006; RILEM 196-ICC, 2007).

Segundo os autores, a propriedade principal dos agregados é a porosidade total, sendo esta a característica fundamental para o fornecimento de água interna às misturas. Contudo, em concretos de alta resistência (CAR), o agregado empregado é mais denso (rígido) por possuir maior resistência mecânica, para não ser o limitador para o ganho de resistência. No entanto, tal característica gera uma baixa porosidade ao grão. Assim, em rochas graníticas e basálticas, a porosidade pode ser considerada praticamente nula, o que impossibilita a ocorrência do procedimento de cura interna.

57

[12] MECHTCHERINE, V. et al. Internal curing by superabsorbent polymers (SAP) - Effects on material properties of self-compacting fibre-reinforced high performance concrete. **International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation**, RILEM, 2006.
[13] MÖNNIG, S., REINHARDT, H. W. Results of a comparative study of the shrinkage behaviour of concrete and mortar mixtures with different internal water sources. **International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation**, RILEM, 2006.

2.4.4 Agregados Reciclados

Nos últimos anos, o uso dos agregados reciclados têm ganho importância, em função da necessidade da busca pelo emprego de materiais alternativos na indústria da construção civil. Muitas são as pesquisas que estudaram a influência da substituição de agregados naturais por agregados reciclados nas propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade dos concretos. Contudo, estudos que avaliem a sua eficiência como um agente de cura interna ainda são restritos.

Para Jensen e Lura (RILEM 196-ICC, 2007), os agregados reciclados de concreto podem ter uma maior capacidade de absorção de água, quando comparados com os agregados convencionais, devido a fração de argamassa contida nos grãos. No entanto, para os autores, a ocorrência de cura interna pode ser dificultada em função da diferente estrutura de poros da argamassa, presente no agregado reciclado, e da pasta de cimento nas primeiras idades.

Conjuntamente, os autores mencionam que os grãos de rocha presentes nos agregados reciclados, cuja porosidade pode potencialmente conter água, são parcialmente cobertos pela pasta de cimento endurecida, o que impede o transporte de água. Tal comportamento demonstra que tanto cinética quanto termodinamicamente o transporte de água entre os agregados reciclados e a matriz cimentícia é dificultada.

É relevante ressaltar que as propriedades do agregado reciclado de concreto são extremamente variáveis, em função da composição das misturas que os geram. Assim, características mecânicas, como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, bem como características físicas do compósito cimentício, como a capacidade de absorção de água e a sua porosidade, influenciam diretamente a eficiência deste tipo de agregado reciclado como um agente de cura interna.

Assim sendo, não só as características do agregado reciclado a ser empregado como um agente de cura interna, mas também as do compósito cimentício produzido, devem ser compatibilizadas, para que assim seja possível o uso destes materiais alternativos. Tal relação é considerada importante uma vez que diversos estudos estão sendo realizados nesta área, os quais têm demonstrado resultados promissores para o uso de agregados reciclados como agentes de cura interna.

Em estudo realizado por Kim e Bentz (2008), agregados reciclados de concreto foram avaliados como agentes de cura interna. Foram estudados três tipos de agregados

reciclados de concreto, diferenciados pela resistência à compressão, aos 28 dias (6,9MPa, 20,7MPa e 34,5MPa), e um tipo de agregado leve. Os resultados demonstraram que o emprego somente do agregado reciclado de concreto limitou a redução da retração autógena das argamassas de alto desempenho estudadas, na idade final analisada (56 dias), sendo esta redução de 30,1%, 1,5% e 36,6%, em relação aos níveis de resistência dos agregados reciclados de concretos estudados, respectivamente. Contudo, quando associados os agregados reciclados de concreto com os agregados leves, observou-se uma redução significativa frente à retração autógena, de 79% e 70,5%, nas idades de 1 dia e 56 dias, respectivamente, com o mínimo de redução das propriedades mecânicas avaliadas. Portanto, os autores mencionam que os agregados reciclados têm potencial para auxiliar na redução do fenômeno da retração, assim como o seu uso combinado com os agregados leves auxiliam na redução de custos, bem como no desenvolvimento sustentável da construção civil.

Em pesquisa realizada por Suzuki *et al*. (2009), foi avaliada a eficiência de agregados reciclados cerâmicos como agentes de cura interna, para concretos de alto desempenho (CAD). Os resultados demonstraram uma elevada eficiência do emprego deste tipo de agregado reciclado, uma vez que foi possível reduzir ou até mesmo eliminar completamente a retração autógena dos concretos avaliados. Conjuntamente, os autores mencionam que a eficiência da cura interna possibilitou uma melhor ocorrência das reações de hidratação, assim possibilitando um aumento nas propriedades mecânicas avaliadas entre 10% e 20%, aos 28 dias.

Desta forma, existem indícios do potencial dos agregados reciclados frente ao uso como agentes mitigadores do fenômeno da retração. No entanto, evidencia-se a necessidade de mais estudos para que seja possível entender o comportamento e, consequentemente, buscar a viabilização do emprego de tais materiais, visando a redução da intensidade do fenômeno da retração autógena e da retração por secagem em concretos.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A pesquisa experimental é caracterizada como sendo uma sequência de ensaios estruturada, a qual possibilita a determinação entre a causa e o efeito de um determinado fenômeno. Esta metodologia está fortemente apoiada em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, a execução e a análise dos resultados de um experimento (VARGAS, 1985; RIBEIRO; TEN CATEN, 2001; CERVO; BERVIAN, 2002). Neste sentido, a etapa de planejamento do programa experimental, de forma organizada, foi indispensável para o bom andamento da pesquisa.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A correta execução de um planejamento experimental possibilita uma maior eficiência em termos de informação, se comparado com qualquer outra sequência de ensaios não-estruturada. Isto permite a otimização dos recursos e do tempo empregado na pesquisa, viabilizando em termos técnicos e econômicos a sua realização (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001; MARCONI; LAKATOS, 2002; DAL MOLIN *et al*., 2005).

Segundo Ribeiro e Ten Caten (2001), a realização de um projeto experimental adequado possibilita ao pesquisador encontrar o ajuste ótimo entre os parâmetros do sistema, maximizando o seu desempenho, reduzindo os custos e tornando-o pouco suscetível aos fatores não controláveis (fatores de ruído). Os parâmetros do sistema são definidos como os fatores que podem influenciar no desempenho do produto, processo ou serviço. Tais parâmetros são subdivididos em fatores controláveis, fatores de ruído e fatores constantes.

De forma geral, os fatores controláveis (variáveis independentes) são definidos como um subconjunto dos parâmetros do sistema que podem exercer influência sobre as variáveis de resposta, sendo estes aspectos mensuráveis do produto, os quais possibilitam a quantificação de características e propriedades relacionadas à qualidade do mesmo. Os fatores de ruído são variáveis que não podem ser controladas, sendo responsáveis pelo erro experimental e pela ocorrência de variabilidade residual no sistema; os fatores constantes são aquelas variáveis que não foram escolhidas como prioritárias no desenvolvimento da

pesquisa, entretanto, devem ser mantidas constantes, uma vez que influenciam nas variáveis de resposta do sistema (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001).

Portanto, quando o planejamento experimental é executado de forma correta, ele possibilita o cumprimento de uma sequência estruturada de ensaios, permitindo com que haja uma interpretação confiável dos dados finais. Logo, assegura-se a realização de uma análise estatística coerente e precisa dos resultados, com um maior embasamento científico.

Desta forma, as variáveis dependentes, determinadas como respostas ao estudo deste projeto experimental, estão relacionadas com as características de qualidade do produto, o concreto. Logo, estas estão vinculadas às propriedades mecânicas e às variações dimensionais dos concretos estudados. As variáveis de resposta selecionadas para a presente pesquisa foram as seguintes:

a) resistência à compressão uniaxial;
b) módulo de elasticidade;
c) retração por secagem livre;
d) retração por secagem restringida;
e) análises microestruturais (microscopia eletrônica de varredura (MEV) e lupa estereoscópica)

A escolha da avaliação da resistência à compressão axial dos concretos estudados deve-se a grande relevância desta propriedade na avaliação de estruturas de concreto, uma vez que ela dá uma boa indicação da qualidade do material, pelo fato de estar relacionada com a pasta de cimento endurecida. Segundo Neville (1997), a porosidade da matriz e a zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo são os fatores que determinam a resistência dos concretos mais utilizados.

Além disso, nesta pesquisa tal propriedade é extremamente relevante uma vez que ocorreu a substituição do agregado natural pelo agregado cerâmico, assim a zona de transição, entre a matriz cimentícia e o grão cerâmico, teve suas propriedades modificadas. Logo, devido às características inerentes ao agregado cerâmico foi importante avaliar tal propriedade mecânica visando a busca pela viabilização do emprego deste material.

Igualmente, a análise do módulo de elasticidade dos concretos estudados foi considerada relevante, uma vez que tal propriedade mecânica está diretamente relacionada com as características da pasta de cimento hidratada, da ligação entre a pasta e os agregados (zona de transição) e do agregado utilizado, cuja capacidade de deformação está

diretamente ligada à sua porosidade e é quem controla a capacidade de restrição da deformação da matriz de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Leite (2001) menciona ainda que características dos agregados como a granulometria, a dimensão máxima, a textura, a forma e a composição mineralógica são parâmetros que também exercem influência sobre o módulo de elasticidade dos concretos. Logo, para concretos com agregados reciclados tal propriedade é modificada em função das características dos agregados, como principalmente a porosidade e a resistência mecânica.

Já a avaliação da retração por secagem livre e restringida dos concretos foi extremamente importante uma vez que se desejava verificar o comportamento dos agregados cerâmicos como agentes mitigadores deste fenômeno em concretos. Assim, a análise da eficiência de tais agregados na redução do fenômeno da retração foi necessária para responder os objetivos propostos na pesquisa.

Sabe-se que os parâmetros de qualidade dos concretos estudados, os quais definem o desempenho dos mesmos, não se limitam somente a essas variáveis de resposta. Entretanto, devido às limitações de tempo e recursos para o desenvolvimento da pesquisa, optou-se por estudar as propriedades que poderiam dar resultados mais significativos, frente aos problemas gerados pelo fenômeno da retração por secagem em concretos.

Adicionalmente, procurando analisar a eficiência do agregado cerâmico com um agente mitigador do fenômeno da retração, buscou-se avaliar o transporte de água/pasta entre a matriz cimentícia e o agregado cerâmico, através de ensaios microestruturais. Inicialmente, realizou-se um estudo em argamassas coloridas, onde foi analisada a zona de transição entre o grão cerâmico e a matriz cimentícia, através de técnicas de obtenção de imagens, com a aplicação da lupa estereoscópica, e de microscopia eletrônica de varredura (MEV), visando a determinação da composição (quantitativa e semiquantitativa) das amostras (EDS), bem como a formação de imagens, com o mapeamento por elementos. A metodologia aplicada neste estudo, bem como os resultados obtidos encontram-se no Apêndice A.

Contudo, como não foram obtidos resultados conclusivos, partiu-se para uma segunda tentativa de estudo, onde a técnica de MEV, com a determinação da composição das amostras (EDS), foram aplicadas visando avaliar as alterações microestruturais na zona de transição (agregado/matriz cimentícia) e no interior dos agregados cerâmicos dos concretos produzidos.

De modo a investigar o comportamento dos agregados cerâmicos (AgCer) frente à redução da intensidade do fenômeno da retração foi proposta a investigação dos efeitos das seguintes variáveis de controle, bem como de suas interações:

a) porosidade do agregado cerâmico, modificada em função da temperatura de queima (700°C, 950°C ou 1100°C);

b) granulometria do agregado natural substituído (graúdo ou miúdo);

c) teor de substituição do agregado natural por agregado cerâmico (0%, 50% ou 100%);

d) idade do concreto (variável em função do ensaio realizado).

A definição dos fatores controláveis buscou avaliar parâmetros relacionados não somente com as propriedades do material cerâmico, mas também com parâmetros da tecnologia do concreto. Com relação ao material cerâmico, primeiramente foi necessária a realização de um estudo exploratório visando avaliar propriedades físicas do material, tais como a porosidade e a absorção, as quais podem influenciar de forma significativa na eficiência do material como um agente mitigador da retração. Assim, mostrou-se necessária a avaliação da temperatura de queima do material cerâmico, uma vez que tal parâmetro gera uma variação da estrutura de poros formados. A figura 8 demonstra, esquematicamente, o estudo exploratório realizado para a definição da temperatura de queima do material cerâmico.

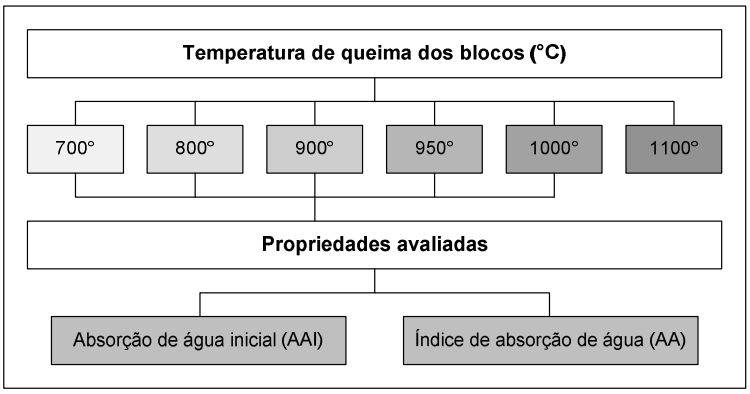


Figura 8: organização do estudo exploratório do material cerâmico

A partir da definição dos parâmetros do sistema da matriz experimental, a metodologia da pesquisa foi definida em duas etapas. A primeira etapa está relacionada com as atividades de beneficiamento do material cerâmico e a segunda etapa com a produção dos concretos e avaliação das propriedades definidas. Na figura 9 é demonstrado esquematicamente como o trabalho foi organizado.

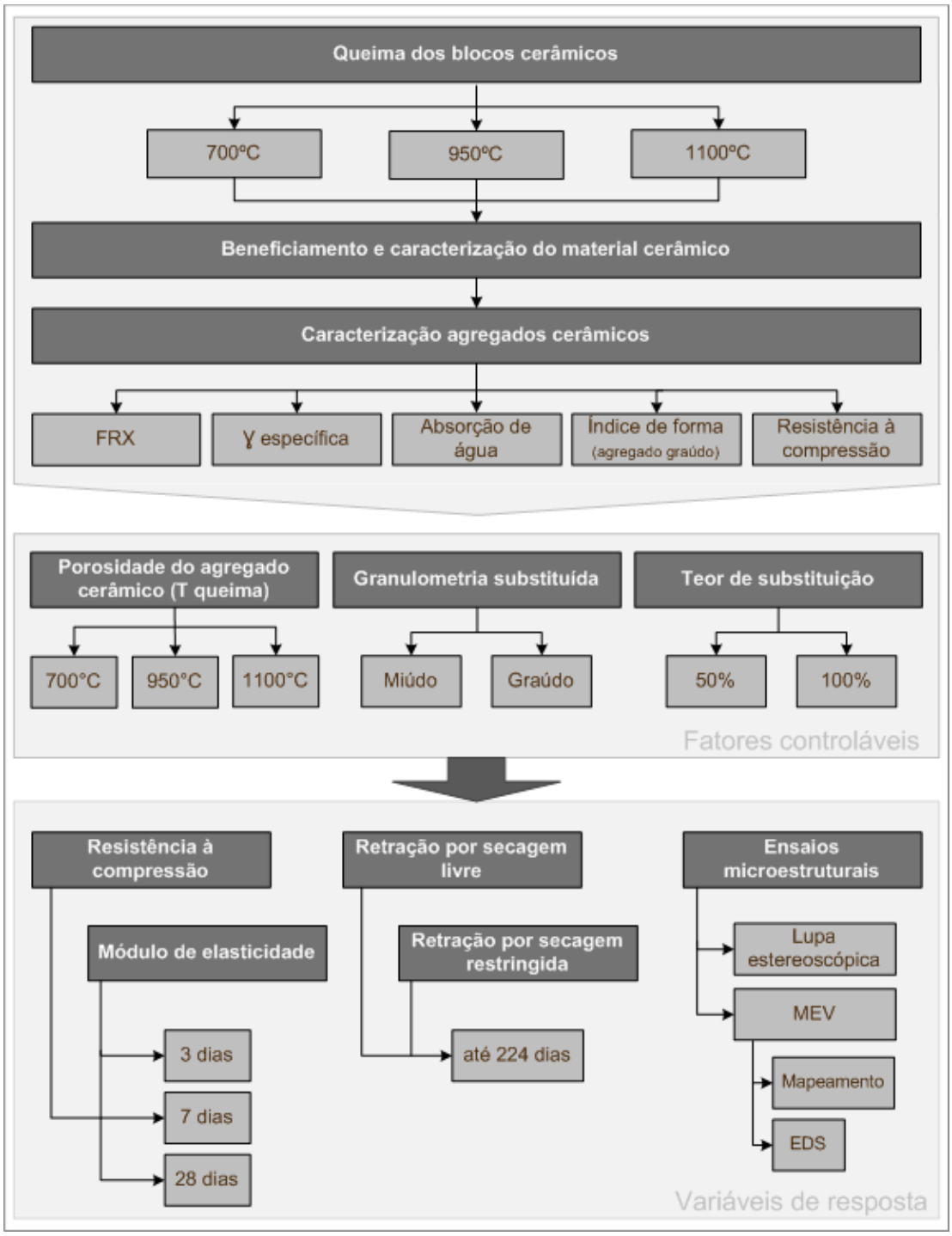


Figura 9: programa experimental da pesquisa

3.2 BENEFICIAMENTO DO MATERIAL CERÂMICO

Os agregados cerâmicos utilizados na pesquisa foram obtidos a partir do beneficiamento de blocos cerâmicos (14 x 19 x 29 cm), doados por uma empresa da região metropolitana de

Porto Alegre. Os blocos foram coletados crus de um mesmo lote de argila, isto é, sem que houvesse ocorrido qualquer processo de queima (sinterização[14]).

Nos itens que seguem será explicitado o modo como foram definidas as temperaturas de queima dos blocos cerâmicos, bem como quais as atividades que envolveram o processo de beneficiamento dos mesmos, visando transformá-los em agregados cerâmicos.

3.2.1 Estudo Exploratório – Definição das Temperaturas de Queima do Material Cerâmico

A eficiência do emprego do resíduo de construção e demolição cerâmico como um agente de cura interna está diretamente relacionada com as propriedades microestruturais deste material. Segundo Jensen e Lura (2006) e Esteves (2009), características como a dimensão do poro (reservatório) e sua distribuição espacial, bem como a sua capacidade de absorção e desorção são características extremamente importantes.

Neste sentido, após o recebimento dos blocos crus, iniciou-se um estudo exploratório visando determinar quais seriam as 3 (três) temperaturas de queima do material cerâmico. Tal definição baseou-se na obtenção de blocos e, consequentemente, de agregados cerâmicos com diferentes características microestruturais, principalmente no que se refere à porosidade (absorção de água).

A definição do intervalo de temperaturas de queima avaliado baseou-se em estudos de autores como Cultrone *et al*. (2004) e Pagnussat (2013), onde os mesmos buscavam obter materiais cerâmicos com diferentes porosidades. Desta forma, foi possível definir qual seria o intervalo de temperaturas de queima a ser avaliado, sendo este de 700°C, 800°C, 900°C, 1000°C e 1100°C.

Conjuntamente, além de avaliar as características dos blocos queimados em laboratório, nas 5 (cinco) temperaturas explicitadas acima, realizou-se uma análise de blocos cerâmicos queimados na própria empresa, em que foram coletados os blocos crus. Segundo o fabricante, a temperatura de queima destes blocos foi de 950°C.

Como mencionado anteriormente, a escolha das 3 (três) temperaturas de queima dos blocos cerâmicos, as quais foram empregadas para a produção do agregado cerâmico, foram baseadas pela obtenção de diferentes porosidades do material. Assim, ensaios de absorção de água inicial (AAI) e de índice de absorção d'água (AA) dos blocos cerâmicos

65

[14] A sinterização é definida como o processo onde as forças de compactação do material cerâmico são fortalecidas em elevadas temperaturas. Tal processo envolve uma redução da área superficial, densificação e aumento da resistência mecânica do material (HLAVAC, 1983 apud PUREZA, 2004).

foram realizados, conforme recomendações da NBR 15270-3 (ABNT, 2005). Para estes ensaios foram empregados 3 corpos de prova (blocos cerâmicos), para cada uma das temperaturas avaliadas. A tabela 1 apresenta os resultados obtidos nestes ensaios.

Tabela 1: resultados do ensaio de absorção dos blocos cerâmicos - estudo exploratório

Temperatura de queima (°C)	Ensaios de absorção de água	
	AAI médio (g/193,5 cm².s)	AA médio (%)
700	18,80	15,03
800	13,28	15,11
900	16,72	14,01
950	8,30	10,47
1000	16,89	11,89
1100	0,98	3,83

Onde: AAI – absorção de água inicial; AA – índice de absorção de água

Analisando os resultados obtidos no ensaio de absorção de água inicial percebe-se que os mesmos não seguem o comportamento esperado para as cerâmicas produzidas com temperaturas de queima de 950ºC, 1000ºC e 1100ºC. Contudo, mesmo com repetições do ensaio, tais resultados foram os obtidos.

Considerando a grande variabilidade do RCD cerâmico, bem como a sua aplicação como um agente de cura interna, optou-se em estudar materiais com características distintas. Assim sendo, definiram-se as temperaturas de 700°C, 950°C e 1100°C para a queima dos blocos cerâmicos.

Conjuntamente, após tal definição foram realizados ensaios de resistência à compressão dos blocos cerâmicos queimados nas três temperaturas, segundo as recomendações da NBR 15270-3 (ABNT, 2005), buscando sua caracterização mecânica. Na tabela 2 são apresentados os resultados obtidos neste ensaio.

Como pode ser observado nos resultados obtidos, o ganho de resistência dos blocos cerâmicos ocorre com o aumento da temperatura de queima do material, conforme esperado. Neste sentido, após tais definições e caracterizações, partiu-se para o beneficiamento do material cerâmico, visando à obtenção dos agregados cerâmicos, como descrito no item que segue.

Tabela 2: resistência à compressão dos blocos cerâmicos

Amostras (cp's)	Resistência à compressão (MPa)		
	Temperatura de queima (°C)		
	700	950	1100
1	4,98	10,12	21,71
2	4,22	15,58	20,72
3	5,58	7,65	20,88
4	3,86	14,61	20,88
5	4,83	8,74	17,87
6	4,75	11,5	20,31
Média (MPa)	4,70	11,37	20,40
Desvio padrão (MPa)	0,60	3,18	1,32
Coeficiente de variação (%)	12,8	28,0	6,5

3.2.2 Etapas do Beneficiamento

O processo de beneficiamento do material cerâmico consistiu basicamente na realização de 5 atividades, sendo estas de secagem, queima, britagem, peneiramento e, quando necessário, a rebritagem, visando a obtenção do agregado cerâmico nas granulometrias desejadas. Na figura 10 é possível visualizar de forma esquemática o processo de beneficiamento realizado.

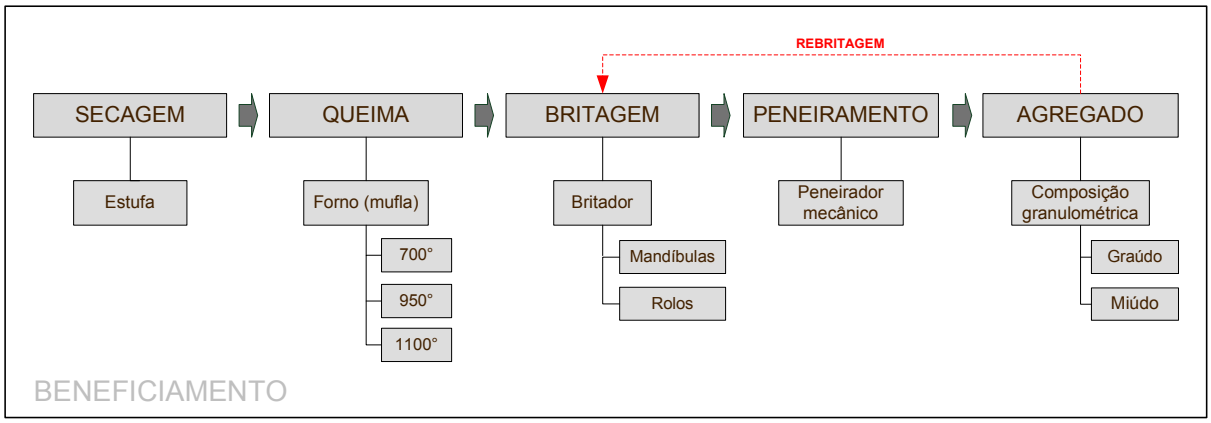


Figura 10: beneficiamento do material cerâmico

Inicialmente ocorreu o processo de secagem dos blocos crus. Segundo Vicenzi (1999), tal etapa é essencial, uma vez que se os blocos forem introduzidos com elevado teor de umidade no forno, a evaporação da água ocorre muito bruscamente, gerando uma série de tensões, as quais podem causar deformações e a deterioração da resistência do material.

O processo de secagem dos blocos cerâmicos foi realizado em uma estufa, com temperatura de 100ºC ± 10°C, visando retirar o excesso de água. O equipamento empregado tem capacidade de alocar 6 unidades, sendo o período de secagem (tempo) definido pela obtenção da constância de massa do elemento cerâmico. Desta forma, não se definiu um período de tempo específico (fixo) para a secagem dos blocos, visto que foram realizadas avaliações individuais, buscando tal característica da unidade cerâmica, a qual foi obtida entre 3 e 5 dias.

A etapa seguinte à secagem consistiu na queima dos elementos cerâmicos. Pureza (2004) define este processo como sendo a etapa em que ocorre o aquecimento do material, em elevadas temperaturas, visando promover a vitrificação e/ou sinterização de suas partículas.

A queima dos blocos ocorreu em três temperaturas distintas (700°C, 950°C e 1100°C), com uma taxa de incremento de temperatura de 5°C/min e um patamar de queima de 6 horas, figura 11(a). Após o período de queima, os blocos permaneceram no forno desligado, de onde eram retirados quando a temperatura fosse menor do que 40°C. Com a saída do forno, os blocos foram estocados no laboratório, em local limpo e seco, até a obtenção da quantidade necessária para a realização do processo de britagem. O procedimento baseou-se em pesquisa realizada por Pagnussat (2013).

Com a obtenção de aproximadamente 50 blocos de cada uma das temperaturas, realizou-se a etapa de britagem dos mesmos. Iniciou-se utilizando um britador de mandíbulas, figura 11(b). Contudo, com este britador não se conseguiu obter todas as granulometrias necessárias, principalmente as mais finas (ausência de 0,3 mm e 0,15 mm), assim foi necessário o emprego de um britador de rolos.

Finalizada a etapa de britagem dos blocos, partiu-se para a realização do peneiramento do material, sendo realizado com o auxílio de um peneirador mecânico, figura 11(c). Tal atividade visou à obtenção de todas as frações granulométricas do agregado cerâmico, uma vez que a substituição do mesmo pelo agregado natural (graúdo e miúdo) ocorreu com a mesma composição granulométrica.

No entanto, quando terminada a atividade de peneiramento e a quantidade obtida de agregados cerâmicos não era suficiente para compor as amostras, realizava-se a rebritagem do material. Desta forma, objetivando obter a quantidade suficiente de cada uma das frações granulométricas, necessárias para a composição das amostras.

(a) (b) (c)

Figura 11: equipamentos empregados no beneficiamento do material cerâmico. (a) forno (mufla); (b) britador de mandíbulas; (c) peneirador mecânico

3.3 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais empregados para a realização do programa experimental desta pesquisa são especificados nos itens que seguem.

3.3.1 Aglomerantes

3.3.1.1 Cimento Portland

No momento da escolha do aglomerante a ser utilizado na composição dos concretos, optou-se em utilizar um cimento sem a presença de adições quimicamente ativas, assim seria possível eliminar o efeito das mesmas nas propriedades das misturas. Desta forma, o cimento Portland empregado foi o de alta resistência inicial (CPV-ARI), por ser o mais puro disponível no mercado nacional.

As características físicas, químicas e mecânicas do cimentos foram solicitadas junto à empresa fabricante. Contudo, no sentido de complementar as características obtidas, alguns ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica (LACER) e no Laboratório do LAMTAC/NORIE, ambos da UFRGS. As características químicas (tabela 3), obtidas a partir da técnica de fluorescência de raios-X, características físicas (tabela 4) e características mecânicas (tabela 5) do cimento utilizado na pesquisa são apresentadas a seguir.

Tabela 3: caracterização química do cimento

Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - CP V-ARI													
Características avaliadas (% da massa)	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CO_2	MgO	SO_3	K_2O	MnO	P_2O_5	Perda ao fogo	CaO livre	Resíduo Insolúvel
Resultados (fabricante)	-	-	-	-	-	2,65	3,09	-	-	-	3,28	-	-
Resultados obtidos	58,52	3,41	20,16	3,67	6,61	0,81	4,55	1,17	0,06	0,19	-	-	-
Exigências da NBR 5733/91	-	-	-	-	≤ 3,0	≤ 6,50	≤ 4,50	-	-	-	≤ 4,50	-	≤ 1,0

Analisando a tabela 3, percebe-se que a partir dos resultados obtidos na caracterização química do cimento, as quantidades de dióxido de carbono (CO_2) e de trióxido de enxofre (SO_3) não estão de acordo com os critérios estabelecidos por norma. Entretanto, nos resultados informados pelo fabricante, tais resultados encontram-se de acordo com os parâmetros estabelecidos NBR 5733 (ABNT, 1991).

Tabela 4: caracterização física do cimento

Características avaliadas		**CP V-ARI**		
		Resultados (fabricante)	Resultados obtidos	Exigências da NBR 5733/91
Massa específica (g/cm³)			3,04	-
Tempo de pega (h:min)	Início	02:35		≥ 1h
	Fim	04:10		≤ 10h
Finura Blaine (cm²/g)		4678	4690	≥ 3000
Resíduo peneira #200µm (%)		0,22		≤ 6,0
Resíduo peneira #325µm (%)		2,04		-
Diâmetro médio (µm)			11,54	

Tabela 5: caracterização mecânica do cimento

Características avaliadas (MPa)		**CP V-ARI**	
		Resultados (fabricante)	Exigências da NBR 5733/91
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	20,9	≥ 14,0
	3 dias	34,9	≥ 24,0
	7 dias	41,3	≥ 34,0
	28 dias	47,9	-

As características físicas e mecânicas do cimento Portland aplicado na pesquisa encontram-se em conformidade com o especificado pela NBR 5733 (ABNT, 1991).

3.3.1.2 Sílica Ativa

Na pesquisa empregou-se sílica ativa como adição mineral, uma vez que o traço dos concretos estudados baseou-se nas especificações do método de dosagem Mehta-Aitcin (1990). Na tabela 6 é apresentada a caracterização quanto às propriedades físicas deste material, seguindo os ensaios de determinação da massa específica (NBR NM 23/2001) e determinação da composição granulométrica (granulometria à laser), e na tabela 7 é apresentada a caracterização quanto as propriedades químicas do material, realizada a partir da técnica de fluorescência de raios-X. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica (LACER) e no Laboratório do LAMTAC/NORIE, ambos da UFRGS.

Tabela 6: caracterização física da sílica ativa

SÍLICA ATIVA	
Característica avaliada	Resultados obtidos
Massa específica (g/cm³)	2,20

Tabela 7: caracterização química da sílica ativa

Sílica Ativa											
Características avaliadas (% da massa)	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CO_2	MgO	SO_3	K_2O	MnO	P_2O_5	CaO	Na_2O
Resultados obtidos	0,20	92,36	0,14	5,06	0,24	0,15	0,86	0,03	0,11	0,77	0,06

3.3.1.3 Cinza Volante

O emprego da cinza volante nas misturas está relacionado com as especificações do método de dosagem Mehta-Aitcin (1990). Na tabela 8 é apresentada a caracterização quanto às propriedades físicas deste material, seguindo os ensaios de determinação da massa específica (NBR NM 23/2001) e determinação da composição granulométrica (granulometria à laser), já na tabela 9 é apresentada a caracterização quanto as propriedades químicas da cinza volante, realizada a partir da técnica de fluorescência de raios-X. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica (LACER) e no Laboratório do LAMTAC/NORIE, ambos da UFRGS.

Tabela 8: caracterização física da cinza volante

CINZA VOLANTE	
Características avaliadas	Resultados obtidos
Diâmetro médio (µm)	21,36
Massa específica (g/cm³)	2,01

Tabela 9: caracterização química da cinza volante

Cinza Volante											
Características avaliadas (% da massa)	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CO_2	MgO	SO_3	K_2O	MnO	TiO_2	CaO	ZrO_2
Resultados obtidos	24,17	64,30	4,13	1,44	0,28	0,41	1,97	0,03	1,72	1,26	0,10

3.3.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo empregado na pesquisa é uma areia regular quartzosa, de origem natural, selecionada entre um grupo de areias comercializadas no município de Porto Alegre (RS). A escolha do agregado miúdo foi baseada na distribuição granulométrica, sendo preferida uma distribuição contínua.

A areia foi caracterizada quanto as suas propriedades físicas, seguindo os ensaios de determinação da composição granulométrica (NBR NM 248/2003), determinação da massa unitária (NBR NM 45/2006) e determinação de massa específica e massa específica aparente (NBR NM 52/2009). Para a execução dos ensaios de caracterização, as amostras foram submetidas a um processo de quarteamento, a fim de possibilitar que as mesmas representassem o material em sua totalidade, conforme as recomendações da NBR NM 27 (ABNT, 2001).

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório do LAMTAC/NORIE, da UFRGS. Os resultados da caracterização física do agregado miúdo são apresentados na tabela 10.

Tabela 10: caracterização física do agregado miúdo

AGREGADO MIÚDO						
Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)			
			Porcentagem, em massa, retida acumulada			
			Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Zona utilizável	Zona ótima	Zona utilizável	Zona ótima
4,75	4	4	0	0	5	10
2,36	6	10	0	10	20	25
1,18	11	21	5	20	30	50
0,6	14	35	15	35	55	70
0,3	35	70	50	65	85	95
0,15	27	97	85	90	95	100
< 0,15	3	100	100	100	100	100
Módulo de Finura		2,37	1,55 - 2,20	2,2	2,90 - 3,50	2,9
Dimensão Máxima (mm)		4,8				
Massa Específica (g/cm³)		2,62				
Massa Unitária (g/cm³)		1,55				
Absorção de água (%)		0,795				

Conforme a tabela 10, observa-se que o agregado miúdo empregado na pesquisa possui dimensão máxima de 4,8 mm, distribuição granulométrica contínua e massa específica de 2,62 g/cm³, o que o caracteriza como um agregado convencional.

3.3.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo empregado na pesquisa é de origem basáltica, selecionado entre um grupo de agregados comercializados no município de Porto Alegre (RS), proveniente da cidade de Montenegro (RS). A escolha do agregado graúdo baseou-se não somente nas características do próprio material, como a dimensão máxima, a composição granulométrica e as características da superfície do grão; mas também em características relacionadas com o agregado graúdo cerâmico (AgGCer), como o índice de forma, como será demonstrado no subitem 3.3.4.2.

Desta forma, o agregado graúdo natural empregado (brita 0) foi caracterizado quanto as suas propriedades físicas, seguindo os ensaios de determinação da composição granulométrica (NBR NM 248/2003), determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (NBR NM 53/2009). Da mesma forma que o agregado miúdo, as amostras utilizadas para a execução de todos os ensaios de caracterização passaram por um processo de quarteamento, assim possibilitando que as amostras utilizadas representassem o material como um todo, conforme as recomendações da NBR NM 27 (ABNT, 2001).

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório do LAMTAC/NORIE, da UFRGS. Os resultados da caracterização física do agregado graúdo são apresentados na tabela 11.

Tabela 11: caracterização do agregado graúdo

AGREGADO GRAÚDO - BRITA 0							
Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)				
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa				
			Zona Granulométrica - d/D[a]				
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
19	0	0	-	2 - 15[b]	65[b] - 95	95 - 100	-
12,5	2	2	0 - 5	40[b] - 65[b]	92 - 100	-	-
9,5	16	18	2 - 15[b]	80[b] - 100	95 - 100	-	-
6,3	38	56	40[b] - 65[b]	92 - 100	-	-	-
4,75	24	80	80[b] - 100	95 - 100	-	-	-
2,36	19	99	95 - 100	-	-	-	-
1,18	1	100	-	-	-	-	-
0,6	0	100	-	-	-	-	-
0,3	0	100	-	-	-	-	-
0,15	0	100	-	-	-	-	-
Fundo	0	100	-	-	-	-	-

Módulo de Finura	5,97
Dimensão Máxima (mm)	12,5
Massa Específica (g/cm³)	2,98
Massa Unitária (g/cm³)	1,51
Índice de forma	2,19
Absorção de água (%)	1,20

[a] - Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.

[b] - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados. Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

De acordo com a tabela 11, observa-se que o agregado graúdo empregado na pesquisa possui dimensão máxima de 12,5mm, conforme definição a ser demonstrada no item 3.3.4.2, distribuição granulométrica contínua e massa específica de 2,98 g/cm³.

A resistência à compressão do agregado graúdo empregado na pesquisa foi avaliada por estudo realizado por Rohden (2011). Tal material apresentou resistência à compressão de 218,6 MPa.

3.3.4 Agregado Cerâmico (AgCer)

Os agregados cerâmicos (miúdos e graúdos) empregados na pesquisa foram obtidos através do beneficiamento de blocos cerâmicos, conforme mencionado anteriormente. Na tabela 12 é apresentada a caracterização química da argila utilizada para a produção dos blocos cerâmicos, segundo as especificações fornecidas pelo fabricante, bem como a

caracterização química das argilas realizada após a queima do material em três temperaturas distintas, sendo estas de 700ºC, 950ºC e 1100ºC. Tal caracterização química foi realizada a partir da técnica de fluorescência de raios-X.

Tabela 12: caracterização química da argila

Composição dos blocos cerâmicos - Argila											
Características avaliadas (% da massa)		Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Mn_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
Resultados (fabricante)	Crua	15,00	70,40	4,22	0,09	0,56	0,22	1,05	0,35	2,62	0,11
Resultados obtidos	700º	15,67	68,47	5,75	-	0,73	-	0,60	-	3,93	0,35
	900º	12,66	73,40	4,87	-	0,62	0,84	0,56	-	3,75	0,13
	1100º	13,13	70,82	6,51	-	0,78	1,90	0,51	-	4,14	0,10

Conjuntamente, realizou-se a caracterização mecânica do material cerâmico, o qual foi utilizado para a produção dos agregados cerâmicos. Os ensaios foram realizados buscando avaliar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos agregados cerâmicos com suas três diferentes temperaturas de queima (700ºC, 950ºC e 1100ºC). Esta caracterização foi realizada no Laboratório do LAMTAC/NORIE e no Laboratório de Cerâmica (LACER), ambos da UFRGS

Para a avaliação da resistência à compressão, duas metodologias para a produção dos corpos de prova cerâmicos foram testadas. A primeira metodologia avaliada (método 1) iniciou com a queima dos blocos cerâmicos nas três diferentes temperaturas, figura 12 (a). Após a queima, pequenos cubos (corpos de prova) foram cortados, a partir da espessura da parede do bloco, com o auxílio de uma serra de corte, e, posteriormente lixados, assim gerando um corpo de prova com dimensões de 2cm x 2cm, figura 12 (b).

Além do lixamento, foi empregado neoprene para o nivelamento das faces no momento de realização do ensaio. Com as amostras preparadas, realizou-se o ensaio de resistência à compressão, figura 12 (c) e figura 12 (d). Para o cálculo da resistência à compressão dos corpos de prova cerâmicos, foi levado em consideração a área de cada um dos cp's.

Para as cerâmicas queimadas nas temperaturas de 950ºC e 1100ºC foram produzidos 60 corpos de prova. Contudo, para a cerâmica queimada na temperatura de 700ºC, não foi possível a produção dos corpos de prova, por este método, devido à grande fragilidade do material cerâmico; quando da realização do corte dos corpos de prova, os mesmos

esfarelavam, não sendo possível a sua obtenção. Assim, os resultados foram obtidos a partir de cálculos de interpolação com base nos resultados da resistência à compressão dos blocos cerâmicos, Tabela 2.

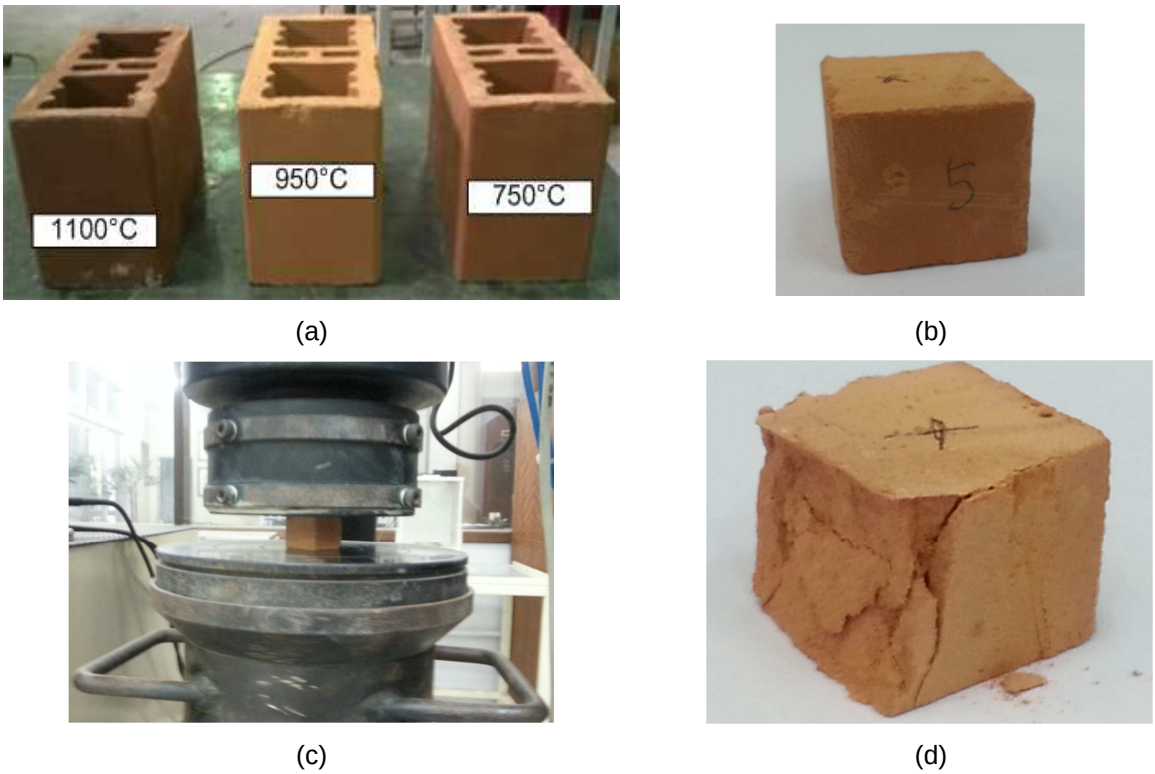


Figura 12: produção dos corpos de prova cerâmicos para avaliação da resistência à compressão. (a) queima dos blocos nas três diferentes temperaturas. (b) corpo de prova cerâmico, com dimensões de 2cm x 2cm. (c) realização do ensaio de resistência à compressão. (d) amostra após a ruptura

A segunda metodologia aplicada (método 2) para a produção dos corpos de prova cerâmicos, baseou-se, primeiramente, no corte dos corpos de prova (cubos) cerâmicos, com dimensões de 2cm x 2cm, a partir do bloco cerâmico cru, para posterior queima dos mesmos nas três diferentes temperaturas. Foram produzidos 60 corpos de prova para cada uma das três temperaturas de queima da cerâmica.

A partir deste método de produção, conseguiu-se obter corpos de prova com condições ideais de ensaio para as cerâmicas queimadas nas temperaturas de 700ºC e 950ºC. No entanto, para as amostras queimadas a 1100ºC, os corpos de prova apresentaram fissuras e deformações dimensionais, devido à sua elevada temperatura de queima, o que resultou em grande variabilidade no resultado do ensaio mecânico.

Na tabela 13 são apresentados os resultados médios obtidos neste ensaio, para as duas metodologias de produção dos corpos de prova. Os resultados deste ensaio foram

analisados estatisticamente, onde foi realizada a exclusão dos dados espúrios, devido à grande variabilidade dos resultados. Neste estudo de caracterização da cerâmica, foi considerado dado espúrio aquele que não pertencia ao intervalo médio mais ou menos um desvio padrão. Os dados individuais obtidos neste ensaio encontram-se no Apêndice B.

Tabela 13: resistência à compressão do material cerâmico (2 cm x 2 cm)

	Produção dos corpos de prova					
	Método 1			**Método 2**		
Temperatura de queima da cerâmica (ºC)	**700ºC**	**950º**	**1100º**	**700º**	**950º**	**1100º**
Resistência à compressão média (MPa)	12,36*	32,44	63,22	10,92	24,03	36,78

* resultado calculado por interpolação.

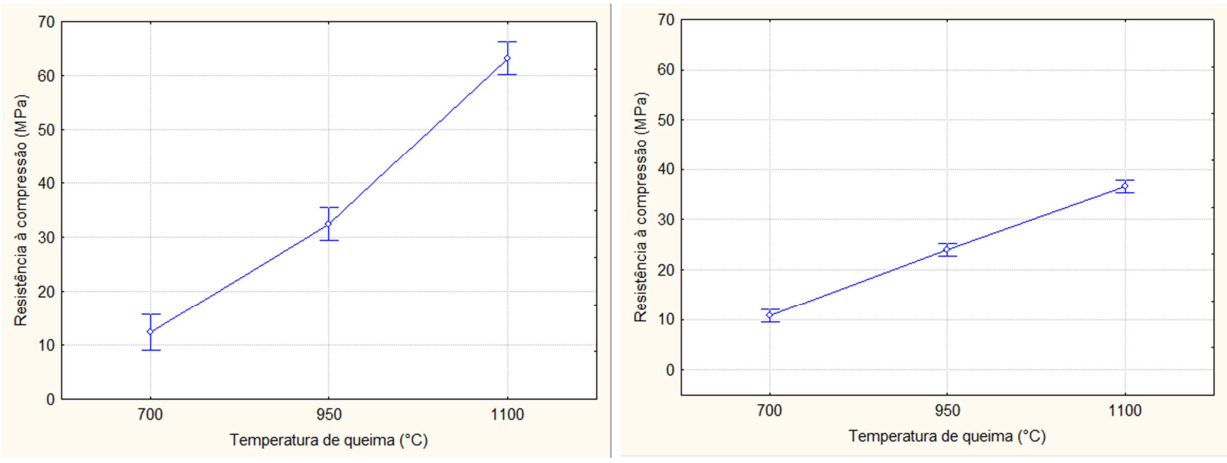
Analisando os resultados, percebe-se uma diferença importante com a variação do método de produção dos corpos de prova cerâmicos. Cabe ressaltar que os resultados obtidos pelo método 2 não explicam as propriedades mecânicas do material, quando comparados com os resultados obtidos para os blocos cerâmicos (Tabela 2), assim como não representam a realidade. Contudo, este método foi realizado para que fosse possível a execução do ensaio para os cp's produzidos à 700ºC.

Mesmo com a grande variabilidade dos resultados, percebe-se uma tendência de comportamento da resistência à compressão das cerâmicas produzidas nas três diferentes temperaturas. Assim, foi possível observar que ocorre uma elevação da resistência mecânica do material cerâmico a medida que aumentada a temperatura de queima do mesmo, o que corrobora com os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água, apresentados no item 3.2.1.

A fim de comprovar estatisticamente tal comportamento, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) dos resultados obtidos. Na figura 13 são apresentados os resultados obtidos nesta análise estatística, onde na figura 13(a) é demonstrada a análise para as amostras produzidas a partir da queima dos blocos e posterior corte dos corpos de prova (método 1), e na figura 13(b) os resultados das amostras produzidas a partir do corte dos corpos de prova, seguida pela queima dos mesmos (método 2).

Analisando a figura 13, nota-se que há diferença significativa entre os resultados de resistência à compressão do material cerâmico queimado nas três diferentes temperaturas

(700ºC, 950ºC e 1100ºC). Contudo, como mencionado anteriormente, a produção dos corpos de prova a partir da queima dos blocos cerâmicos seguido pelo corte dos cp's (método 1) gerou uma maior resistência mecânica da cerâmica, quando comparado com o método de produção 2. No entanto, esta foi realizada por não ter sido possível avaliar a resistência à compressão da cerâmica produzida com uma temperatura de queima de 700ºC.



(a) (b)

Figura 13: análise de variância para os resultados de resistência à compressão do agregado cerâmico. (a) corpos de prova produzidos pelo método 1. (b) corpos de prova produzidos pelo método 2

Contudo, cabe ressaltar que o agregado cerâmico empregado na pesquisa, em substituição ao agregado natural, foi produzido pela moagem de blocos cerâmicos queimados, nas suas três diferentes temperaturas (700ºC, 950ºC e 1100ºC), como demonstrado no item 3.2.

Portanto, pela análise realizada foi possível verificar uma tendência de comportamento da resistência à compressão do material cerâmico. Logo, independente do método de produção do corpo de prova cerâmico, o mesmo comportamento foi observado, onde a resistência à compressão e a temperatura de queima do material mostraram ter uma relação direta.

Conjuntamente, realizou-se o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico do material cerâmico empregado para a produção dos agregados cerâmicos. O ensaio seguiu as recomendações da norma americana ASTM E-1876 (2009), onde o módulo de elasticidade é calculado a partir da Equação 17.

$$E = 0{,}9465 \left({mf_f^2}/{b} \right) \left({L^3}/{t^3} \right) T_1 \qquad \text{Equação 17}$$

Onde:

E – módulo de elasticidade para corpos de prova retangulares (módulo de Young) (Pa);

m – massa do corpo de prova (g);

b – largura do corpo de prova (mm);

L – comprimento do corpo de prova (mm);

t – espessura do corpo de prova (mm);

f_f – frequência de ressonância fundamental do corpo de prova em flexão (Hz);

T_1 – fator de correção.

Para cada uma das três temperaturas de queima da cerâmica foram empregados 6 corpos de prova para o ensaio de módulo de elasticidade. Na tabela 14 são apresentados os resultados obtidos neste ensaio.

Tabela 14: módulo de elasticidade do material cerâmico

Amostras (cp's)	**Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)**		
	Temperatura de queima (°C)		
	700	**950**	**1100**
1	3,4	9,1	33,4
2	3,8	9,8	17,7
3	3,7	9,9	29,1
4	3,2	9,7	30,7
5	3,4	8	32,2
6	5,5	8,3	26,1
Média (GPa)	3,8	9,1	28,2
Desvio padrão (GPa)	0,8	0,8	5,7
Coeficiente de variação (%)	22,1	8,9	20,4

Analisando os resultados obtidos, percebe-se que o módulo de elasticidade dinâmico da cerâmica e a sua temperatura de queima possuem uma relação direta, ou seja, à medida que se aumenta a temperatura de produção do material cerâmico é reduzida a sua capacidade de deformação (aumento do módulo de elasticidade). Observa-se ainda que com a sinterização do material cerâmico, produzido com temperatura de queima de 1100ºC,

o módulo de elasticidade tem um aumento importante em relação à cerâmica produzida à 700ºC e 950ºC.

Os resultados mecânicos obtidos (resistência à compressão e módulo de elasticidade) foram coerentes entre si, demonstrando um comportamento decorrente da temperatura de queima do material cerâmico. Além disso, tais resultados corroboram com os resultados obtidos no ensaio de absorção de água, item 3.2.1.

Além da caracterização mecânica, o ensaio de determinação de atividade pozolânica foi realizado, seguindo as recomendações da NBR 5752 (2014). Tal ensaio buscou avaliar o índice de atividade pozolânica do material cerâmico, produzido nas três diferentes temperaturas.

Para cada uma das três temperaturas de queima da cerâmica foram produzidos 6 corpos de prova. Na Tabela 15 são apresentados os resultados obtidos após o tratamento dos mesmos (eliminação dos dados espúrios), obtendo-se 4 resultados individuais para cada uma das cerâmicas avaliadas, conforme recomendações da NBR 5752 (2014).

Tabela 15: índice de pozolanicidade do material cerâmico

Resistência à compressão (MPa)	**Referência**	**Temperatura de queima da cerâmica (ºC)**		
		700ºC	**950º**	**1100º**
Individual	36,00	37,55	33,87	28,28
	38,86	37,26	36,09	28,76
	38,13	38,07	35,89	27,62
	36,12	37,64	32,87	27,71
Média	37,28	37,63	34,68	28,09
Desvio relativo máximo (%)	3,44	1,16	5,22	2,37
Índice de atividade pozolânica (%)	-	100,9	93,0	75,4

Analisando a Tabela 15, percebe-se que o desvio relativo máximo foi inferior à 6% para todas as misturas avaliadas, conforme recomendações da versão anterior da NBR 5752 (2012). Conjuntamente, a mesma norma menciona que o índice de atividade pozolânica do material deve ser superior a 75% para ser considerado reativo. Portanto, percebe-se que os materiais cerâmicos produzidos nas três diferentes temperaturas de queima possuem atividade pozolânica.

Ensaios de caracterização física dos agregados cerâmicos, para as duas granulometrias avaliadas na pesquisa (miúdos e graúdos) foram realizados. Nos itens que seguem são apresentados os resultados obtidos.

3.3.4.1 Agregado Miúdo Cerâmico (AgMCer)

O agregado miúdo cerâmico utilizado na pesquisa foi obtido a partir do beneficiamento dos blocos cerâmicos, como mencionado no item 3.2. O material foi caracterizado quanto as suas propriedades físicas, seguindo os ensaios de determinação de massa específica e massa específica aparente (NBR NM 52/2009).

Para a execução dos ensaios de caracterização, as amostras foram compostas segundo a composição granulométrica do agregado miúdo natural empregado neste estudo. Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório do LAMTAC/NORIE, da UFRGS. Os resultados da caracterização física do agregado miúdo cerâmico são apresentados na tabela 16.

Tabela 16: caracterização física do agregado miúdo cerâmico

Agregado miúdo cerâmico (AMC)			
Características avaliadas	**Temperatura de queima (°C)**		
	700	**950**	**1100**
Massa específica aparente (g/cm³)	1,89	2,12	2,31
Absorção de água (%)	14,95	7,78	2,13

Os resultados obtidos vão ao encontro aos resultados apresentados por Pinto, Sousa e Holanda (2005) e Pinheiro e Holanda (2010), onde o aumento da temperatura de queima acarreta um aumento da massa específica aparente e uma redução da absorção de água do material cerâmico.

3.3.4.2 Agregado Graúdo Cerâmico (AgGCer)

O agregado graúdo cerâmico utilizado na pesquisa foi obtido a partir do beneficiamento dos blocos cerâmicos, como mencionado no item 3.2. Contudo, inicialmente realizou-se uma análise da forma do grão, a qual foi importante para a definição da granulometria do agregado graúdo empregado na pesquisa.

Tal análise foi considerada relevante, pois era possível observar (visualmente) o formato lamelar dos grãos britados com granulometrias maiores (25 mm e 19 mm). Neste sentido,

realizou-se o ensaio de índice de forma dos agregados graúdos cerâmicos, seguindo as recomendações da NBR 7809 (ABNT, 2008).

Entretanto, pequenas adaptações na metodologia da norma foram necessárias, visto que se desejava avaliar o índice de forma de agregados graúdos cerâmicos com 3 (três) granulometrias diferentes (19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm). Após a realização do processo de quarteamento dos materiais, conforme as recomendações da NBR NM 27 (ABNT, 2001), separou-se para a avaliação do índice de forma dos grãos uma amostra de 200 unidades (agregados), para cada uma das 3 (três) granulometrias. Na tabela 17 são apresentados os resultados obtidos neste ensaio.

Tabela 17: resultados do ensaio de índice de forma - agregado graúdo cerâmico

INDÍCE DE FORMA																3,93
AGREGADOS GRAÚDOS - RETIDOS NA PENEIRA DE 19mm	1	4,53	26	5,82	51	5,79	76	4,66	101	6,60	126	3,80	151	5,46	176	4,09
	2	4,32	27	5,98	52	2,78	77	5,86	102	5,46	127	2,79	152	2,59	177	2,91
	3	4,11	28	5,80	53	2,78	78	3,93	103	4,88	128	6,85	153	4,10	178	3,48
	4	4,79	29	2,49	54	4,37	79	4,52	104	3,05	129	5,93	154	4,73	179	2,43
	5	5,88	30	3,23	55	1,79	80	3,85	105	2,57	130	2,89	155	2,99	180	1,88
	6	5,62	31	4,70	56	4,92	81	3,38	106	2,75	131	3,75	156	1,98	181	4,16
	7	4,35	32	3,49	57	5,23	82	4,30	107	2,32	132	3,94	157	3,24	182	3,38
	8	3,81	33	4,70	58	3,94	83	11,19	108	2,36	133	4,89	158	4,17	183	4,88
	9	4,15	34	3,38	59	6,60	84	4,87	109	2,52	134	2,84	159	3,56	184	5,23
	10	4,04	35	4,98	60	3,95	85	3,18	110	2,84	135	3,35	160	3,83	185	3,61
	11	4,07	36	4,85	61	3,64	86	3,73	111	3,37	136	3,31	161	5,17	186	11,30
	12	3,74	37	5,32	62	3,96	87	4,12	112	2,42	137	3,02	162	3,09	187	6,83
	13	3,38	38	4,24	63	7,30	88	2,56	113	6,26	138	6,12	163	2,31	188	4,35
	14	5,27	39	2,71	64	2,94	89	2,32	114	3,51	139	6,42	164	3,08	189	5,07
	15	5,30	40	2,88	65	3,28	90	3,40	115	3,61	140	3,31	165	2,96	190	4,13
	16	4,79	41	2,22	66	2,65	91	4,80	116	2,60	141	2,61	166	3,46	191	4,47
	17	4,77	42	2,70	67	4,85	92	4,49	117	3,66	142	3,89	167	2,78	192	3,29
	18	4,79	43	1,58	68	4,29	93	2,54	118	1,80	143	2,63	168	5,11	193	1,95
	19	3,62	44	3,92	69	3,09	94	2,47	119	2,72	144	2,80	169	3,48	194	4,69
	20	4,56	45	3,01	70	3,25	95	2,51	120	2,34	145	2,83	170	3,35	195	4,08
	21	2,86	46	4,10	71	2,74	96	2,35	121	3,24	146	2,80	171	4,38	196	2,56
	22	4,77	47	3,47	72	6,18	97	2,02	122	2,51	147	4,45	172	3,32	197	5,69
	23	3,28	48	2,96	73	6,88	98	3,71	123	2,85	148	2,02	173	3,12	198	7,31
	24	2,21	49	7,18	74	4,32	99	3,50	124	4,50	149	3,87	174	2,68	199	4,16
	25	3,27	50	4,76	75	2,67	100	4,91	125	3,74	150	3,57	175	2,53	200	2,61

AGREGADOS GRAÚDOS - RETIDOS NA PENEIRA DE 12,5mm	INDÍCE DE FORMA															3,34
	1	2,27	26	3,73	51	2,80	76	6,60	101	2,28	126	3,49	151	2,51	176	3,24
	2	3,97	27	4,33	52	3,56	77	2,35	102	2,86	127	2,71	152	6,65	177	3,60
	3	2,17	28	2,75	53	2,54	78	3,57	103	3,71	128	2,65	153	2,32	178	4,66
	4	2,24	29	1,80	54	3,91	79	1,83	104	2,80	129	2,87	154	2,53	179	3,23
	5	4,11	30	3,19	55	2,91	80	3,94	105	3,73	130	2,99	155	5,26	180	3,42
	6	5,59	31	1,79	56	3,46	81	2,55	106	2,21	131	2,82	156	1,93	181	3,92
	7	3,51	32	2,41	57	2,04	82	2,10	107	2,68	132	5,83	157	2,07	182	3,60
	8	2,96	33	1,64	58	4,25	83	2,45	108	1,86	133	3,35	158	4,95	183	3,24
	9	3,01	34	3,14	59	2,60	84	1,82	109	3,39	134	3,48	159	1,76	184	2,31
	10	4,96	35	2,31	60	3,74	85	3,71	110	2,44	135	1,90	160	3,28	185	2,19
	11	2,78	36	3,19	61	2,06	86	3,45	111	1,78	136	5,16	161	2,66	186	2,49
	12	11,55	37	1,24	62	4,50	87	3,37	112	1,10	137	1,97	162	1,94	187	2,79
	13	3,99	38	2,89	63	2,39	88	2,39	113	2,37	138	4,01	163	3,38	188	2,92
	14	3,08	39	4,42	64	3,06	89	2,15	114	2,43	139	5,51	164	3,62	189	3,03
	15	2,43	40	2,22	65	2,99	90	2,91	115	3,83	140	4,05	165	2,68	190	4,30
	16	4,60	41	2,83	66	3,69	91	3,52	116	2,49	141	1,90	166	2,19	191	2,74
	17	5,48	42	3,55	67	2,51	92	2,76	117	1,63	142	2,37	167	4,87	192	3,47
	18	4,34	43	3,58	68	1,98	93	2,31	118	2,85	143	3,33	168	2,28	193	5,52
	19	3,07	44	3,42	69	38,84	94	3,46	119	2,05	144	3,17	169	2,76	194	4,03
	20	3,57	45	3,50	70	2,90	95	2,30	120	2,52	145	3,70	170	3,38	195	3,01
	21	2,50	46	2,40	71	3,87	96	2,56	121	2,31	146	1,90	171	2,40	196	5,04
	22	2,49	47	3,20	72	3,90	97	2,20	122	2,19	147	4,68	172	1,97	197	4,49
	23	5,69	48	5,48	73	2,54	98	2,91	123	3,23	148	2,20	173	3,10	198	3,14
	24	2,47	49	3,31	74	3,06	99	2,19	124	2,60	149	2,72	174	2,10	199	2,99
	25	3,57	50	2,87	75	3,60	100	2,45	125	5,11	150	4,74	175	2,13	200	3,61

AGREGADOS GRAÚDOS - RETIDOS NA PENEIRA DE 9,5mm	INDÍCE DE FORMA															2,71
	1	2,38	26	2,01	51	1,90	76	2,18	101	1,64	126	1,55	151	4,31	176	3,40
	2	4,72	27	6,82	52	4,37	77	1,48	102	3,06	127	4,33	152	3,12	177	2,57
	3	3,34	28	9,18	53	2,96	78	2,79	103	1,15	128	1,87	153	2,44	178	2,04
	4	2,26	29	1,59	54	2,88	79	2,27	104	2,39	129	3,01	154	2,17	179	1,26
	5	2,00	30	2,77	55	2,60	80	2,00	105	1,83	130	2,25	155	2,10	180	2,41
	6	3,16	31	1,68	56	2,89	81	1,54	106	4,12	131	2,41	156	2,42	181	1,51
	7	2,11	32	5,46	57	3,06	82	5,00	107	2,66	132	1,64	157	2,85	182	2,74
	8	2,02	33	1,44	58	3,06	83	3,38	108	4,93	133	2,48	158	2,44	183	2,62
	9	2,41	34	1,73	59	2,16	84	2,59	109	1,62	134	2,76	159	2,86	184	2,27
	10	1,80	35	2,04	60	3,85	85	2,29	110	3,07	135	2,73	160	1,67	185	1,74
	11	2,36	36	3,61	61	3,46	86	2,56	111	2,13	136	2,71	161	2,29	186	6,07
	12	3,42	37	2,03	62	2,73	87	3,41	112	1,79	137	1,99	162	3,80	187	5,72
	13	2,74	38	2,23	63	2,17	88	3,04	113	2,78	138	1,45	163	2,45	188	1,21
	14	3,80	39	7,64	64	3,11	89	2,36	114	1,96	139	3,66	164	1,63	189	2,11
	15	2,63	40	2,24	65	3,25	90	2,16	115	2,35	140	3,56	165	2,30	190	2,06
	16	5,16	41	2,89	66	2,06	91	4,59	116	1,93	141	2,36	166	2,46	191	2,09
	17	3,45	42	2,42	67	2,41	92	2,30	117	1,67	142	2,36	167	2,45	192	2,96
	18	4,69	43	2,23	68	3,10	93	2,23	118	2,57	143	1,84	168	1,82	193	2,05
	19	4,04	44	1,77	69	3,19	94	2,89	119	2,80	144	2,54	169	2,91	194	1,86
	20	2,69	45	3,72	70	1,78	95	2,40	120	2,08	145	2,52	170	2,24	195	3,37
	21	2,99	46	2,33	71	2,37	96	2,19	121	4,69	146	3,05	171	2,23	196	1,99
	22	2,72	47	2,69	72	2,62	97	1,88	122	2,23	147	2,76	172	4,47	197	2,69
	23	2,15	48	2,57	73	1,69	98	3,54	123	2,01	148	4,87	173	2,24	198	2,40
	24	2,07	49	2,65	74	2,88	99	1,53	124	2,10	149	2,22	174	2,45	199	2,43
	25	2,07	50	4,21	75	2,18	100	3,10	125	2,08	150	2,13	175	1,93	200	2,43

Analisando os resultados obtidos pelo ensaio do índice de forma (tabela 17), observa-se uma proporcionalidade entre a granulometria do agregado e o valor do índice de forma obtido. Portanto, conforme recomendações da NBR 7211 (ABNT, 2009), o índice de forma dos grãos do agregado não deve ser superior a 3, assim foi definida a granulometria do agregado graúdo a ser empregado na pesquisa, ou seja, o agregado graúdo definido para pesquisa foi a brita 0, por possuir menor dimensão máxima característica.

Com a definição da granulometria do agregado graúdo, ensaios de caracterização física foram realizados, sendo estes de determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (LEITE, 2001; NBR NM 53/2009). Para a execução destes ensaios, as amostras foram compostas segundo a composição granulométrica do agregado graúdo natural. Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório do LAMTAC/NORIE, da UFRGS. Os resultados da caracterização física do agregado graúdo cerâmico são apresentados na tabela 18.

Tabela 18: caracterização física do agregado graúdo cerâmico

Agregado graúdo cerâmico (AGC)			
Características avaliadas	**Temperatura de queima (°C)**		
	700	**950**	**1100**
Massa específica aparente (g/cm³)	1,81	1,86	1,82
Absorção de água (%)	17,58	15,09	9,13

Analisando a Tabela 18, percebe-se que os resultados obtidos para a massa específica aparente dos agregados graúdos cerâmicos, com diferentes porosidades, foram semelhantes. Tal resultado não era esperado, contudo quando realizada a repetição dos ensaios, resultados semelhantes foram obtidos.

Para os resultados de absorção de água, nota-se comportamento semelhante aos resultados obtidos para a caracterização do agregado miúdo cerâmico (tabela 16), onde o aumento de temperatura de queima da cerâmica gerou uma redução da absorção de água. Entretanto, os resultados de absorção de água para os agregados miúdos foram inferiores aos obtidos para os agregados graúdos. Tal comportamento está relacionado com a cominuição dos grãos, a qual possibilita a redução do tamanho de poros do agregado cerâmico, influenciando diretamente na capacidade de absorção de água do material.

3.3.5 Água

A água empregada na pesquisa, para a produção dos concretos, bem como para realizar a pré-saturação dos agregados cerâmicos (AgCer), foi proveniente da rede de abastecimento público, da cidade de Porto Alegre (RS).

3.3.6 Aditivo químico

O aditivo químico utilizado nas misturas foi um superplastificante para concretos, a base de éter policarboxílico. Na tabela 19 é apresentada a caracterização físico-química do aditivo químico empregado na pesquisa, segundo as especificações fornecidas pelo fabricante.

Tabela 19: caracterização físico-química do aditivo químico

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	
Estado físico	Líquido
Cor	Branco turvo
Odor	Característico
pH	5 - 7
Base química	Éter policarboxílixo
Ponto de fulgor	-
Explosividade	-
Densidade (g/cm³)	1,067 - 1,107
Solubilidade	Solúvel em água
Viscosidade (cps)	< 150
Teor de sólidos (%)	38 - 42

3.4 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Neste item serão explicitadas todas as atividades envolvidas com o processo de produção dos concretos. Assim, atividades que antecederam a produção dos concretos, como a saturação dos agregados cerâmicos, bem como as atividades realizadas durante e após a produção dos concretos serão descritas.

Inicialmente, optou-se em determinar a nomenclatura utilizada para definição de cada um dos traços de concreto estudados. Assim sendo, tal nomenclatura seguiu um padrão, conforme demonstrado na figura 14.

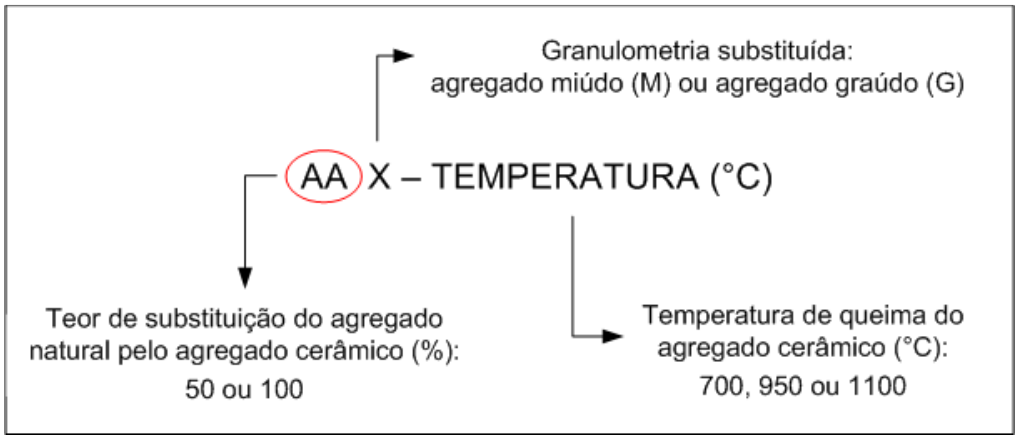


Figura 14: padrão de nomenclatura dos traços de concreto estudados

3.4.1 Saturação dos agregados cerâmicos

Inúmeros estudos demonstram a necessidade de realização de pré-saturação ou pré-molhagem nos agregados reciclados antes da inserção dos mesmos na mistura do compósito cimentício. Tal fato deve-se à elevada porosidade e, consequentemente, a alta absorção de água dos mesmos, assim gerando influência em propriedades do concreto no estado fresco, o que se relaciona principalmente com a trabalhabilidade (ANGULO, 2000; LEITE, 2001; CARRIJO, 2005; ETXEBERRIA *et al*., 2007; MAS *et al*., 2012).

O emprego de pré-saturação dos agregados foi necessário, não somente para manter as propriedades do concreto, mas também devido à avaliação dos agregados reciclados como agentes de cura interna. Assim, a presença de água nos poros internos dos grãos é essencial para garantir a ocorrência das reações de hidratação, quando ocorre a perda de água do material cimentício para o ambiente externo (JENSEN; LURA, 2006).

Diferentes métodos são mencionados na bibliografia para realizar a pré-saturação dos agregados reciclados, tais como a imersão por 24 horas, o pré-umedecimento por 10 minutos ou a aspersão (ETXEBERRIA *et al*., 2007; CORDEIRO, 2013; MALTA, 2013). Contudo, devido à dificuldade evidenciada nos processos, assim como limitações de laboratório, uma nova metodologia foi desenvolvida, visando facilitar a realização deste procedimento.

Primeiramente foi definido o teor de saturação a ser aplicado, sendo este de 80% da absorção total do agregado cerâmico. Tal teor foi definido com base em estudos, tais como o de Cordeiro (2013), onde a autora avaliou diferentes teores de saturação do agregado reciclado (20%, 40%, 60%, 80% e 100%), evidenciando que o teor ótimo de saturação foi de 80% frente às propriedades mecânicas avaliadas. Conjuntamente, a NBR 15116 (ABNT,

2004) recomenda que seja realizada uma pré-molhagem dos agregados reciclados com teores de 80% de sua absorção total para a produção de concretos sem fins estruturais.

Com o teor de pré-saturação (80±1%)[15] definido, partiu-se para a composição das amostras de agregados cerâmicos, correspondentes a 50% e 100% de substituição. A composição das amostras de agregado graúdo cerâmico (AgGCer) e agregado miúdo cerâmico (AgMCer) foi baseada na curva granulométrica do agregado natural, bem como foi aplicada a compensação do volume do material proposto por Leite (2001).

Com a amostra preparada em um recipiente plástico, o procedimento de pré-saturação foi realizado adicionando a quantidade de água correspondente a 81% da absorção total do agregado cerâmico, com posterior homogeneização dos materiais. Após este processo, a amostra foi coberta por um filme plástico e vedada com o auxílio de fita adesiva, assim buscando evitar a evaporação de água, mantendo a umidade entre os grãos. Tal etapa foi realizada 72 horas antes da atividade de concretagem.

O procedimento de pré-saturação adotado na pesquisa é semelhante ao empregado por Malta (2013). Contudo, a autora realizou um pré-umedecimento da amostra de agregado miúdo reciclado, com uma taxa de compensação de 40,71%, realizado 10 minutos antes da mistura. Na metodologia proposta na pesquisa, a realização do procedimento de pré-saturação, 72 horas antes do processo de concretagem, visou obter um agregado saturado superfície seca (SSS). Assim, eliminando a possibilidade de presença de água livre na superfície do grão.

A avaliação da obtenção de agregados cerâmicos graúdos e miúdos com 80±1% de saturação foi realizada com a pesagem do material, isto é, pela massa do conjunto (agregado + água), instantes antes da realização do procedimento de concretagem.

3.4.2 Processo de concretagem

Com base na avaliação do emprego do agregado cerâmico (miúdo e graúdo) como agentes de cura interna, optou-se em estudar compósitos cimentícios com elevado consumo de aglomerantes (cimento + adições minerais), uma vez que seria possível majorar a intensidade do fenômeno da retração. Para tanto, o método de dosagem aplicado como base para a definição do traço do concreto estudado foi o de Mehta-Aitcin (1990).

87

[15] O teor de pré-saturação de 80±1% foi definido prevendo a possibilidade de evaporação de água (1%) dos agregados cerâmicos, contudo tal comportamento não foi evidenciado.

Neste sentido, optou-se em utilizar como base para a definição do traço de concreto referência, a opção com maior resistência mecânica e elevado consumo de materiais reativos (cimento e adições minerais). Logo, definiu-se a opção de traço de concreto com classe de resistência do tipo E, opção 3, como demonstrado na tabela 20.

Tabela 20: traço de concreto empregado como referência - método de dosagem de Mehta-Aitcin (1990)

Classe de resistência	Resistência média (MPa)	Opção	Consumo (kg/m³)						relação a/c
			Cimento	Cinza volante	Silica ativa	água	Agregados		
							Graúdo	Miúdo	
E	120	3	495	79	44	120	1120	620	0,19

Conjuntamente a esta definição teórica, o abatimento de tronco de cone do concreto no estado fresco foi definido em 120 ± 20 mm, sendo realizado conforme recomendações da NBR NM 67 (ABNT, 1998); assim como o teor de aditivo superplastificante no concreto referência, definido em 0,5% em relação à massa de cimento.

O concreto referência foi produzido com o consumo de materiais especificados pelo método de Mehta-Aitcin (1990). Contudo, empregou-se 0,5% de aditivo superplastificante e a quantidade de água foi definida visando obter a trabalhabilidade de 120 ± 20 mm. Para todos os demais concretos avaliados, a relação a/c definida foi mantida fixa, sendo a trabalhabilidade obtida pelo emprego de aditivo superplastificante. Na tabela 21 são apresentados os traços dos concretos empregados nesta pesquisa.

Todos os concretos foram produzidos em uma betoneira de tombo, previamente imprimada. A ordem de colocação dos materiais na betoneira seguiu as recomendações de Cordeiro (2013), onde a autora menciona que o agregado reciclado deve ser o último material seco a ser adicionado na mistura, de modo a evitar a quebra dos grãos, assim possibilitando a manutenção da sua composição granulométrica. Esta ordem de mistura foi respeitada independente da granulometria do agregado cerâmico empregado (graúdo ou miúdo).

Analisando a tabela 21, percebe-se que para o traço com 100% de substituição do agregado miúdo natural por AgMCer, queimado à temperatura de 700°C (100M-700ºC), o teor de aditivo superplastificante foi superior aos demais, o que era esperado em função da elevada superfície específica do material. Durante a mistura, o aditivo superplastificante foi o último

material a ser incorporado, contudo para este traço houve a formação de ‘pelotas’, tornando-se difícil a obtenção de uma mistura homogênea e da trabalhabilidade.

Tabela 21: traços dos concretos empregados na pesquisa

Traços	Características do ARCer				a/c	Consumo de materiais (kg/m³)					Aditivo (%)	Abatimento (mm)
	Temp. queima (°C)	Substituição		% sat. do ARCer		Cim	C.V.	S.A.	Agregados			
		Miúdo	Graúdo						Graúdo	Miúdo		
Referência	-	-	-		0,48	495	79	44	1120	620	0,50	100
50G-700	700	-	50	80,7							0,31	115
100G-700		-	100	80,4							0,42	105
50G-900	900	-	50	80,3							0,26	105
100G-900		-	100	80,2							0,35	100
50G-1100	1100	-	50	80,3							0,33	125
100G-1100		-	100	80,0							0,30	105
50M-700	700	50	-	80,1							0,68	110
100M-700		100	-	80,2							1,75	110
50M-900	900	50	-	80,8							0,32	110
100M-900		100	-	80,2							0,76	130
50M-1100	1100	50	-	80,9							0,34	130
100M-1100		100	-	80,6							0,54	140

Onde: C.V. - cinza volante; S.A. - Sílica ativa

Para os demais concretos com 100% de substituição de agregado miúdo (100M-950ºC e 100M-1100ºC), uma pequena quantidade de aditivo foi incorporada antes da inserção do AgMCer, assim deixando a mistura com maior trabalhabilidade. Após a incorporação do AgMCer, quando necessário empregou-se mais aditivo superplastificante, visando atingir o abatimento do concreto.

Para a realização da moldagem dos corpos de prova, todas as fôrmas haviam sido preparadas, aplicando-se desmoldante (óleo mineral) nas faces internas, a fim de facilitar a desfôrma dos corpos-de-prova, após o período de 24 horas.

Os corpos de prova para todos os ensaios realizados foram moldados simultaneamente, para cada um dos concretos estudados. O processo de adensamento adotado foi mecânico, com o auxílio de uma mesa vibratória para os corpos de prova cilíndricos (propriedades mecânicas) e prismáticos (retração por secagem livre). Estes foram moldados em duas camadas, com um tempo de adensamento de 15 segundos por camada.

Para o corpo de prova do ensaio de retração por secagem restringida (anel), o processo de adensamento empregado também foi mecânico, contudo utilizou-se um vibrador de imersão (interno) com eixo rígido. O procedimento de moldagem também foi realizado em duas camadas, seguindo recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2003). A diferença no processo de vibração deve-se a realização do procedimento de concretagem, dos corpos de prova do ensaio de retração por secagem restringida, ter sido realizado em câmara climatizada, devido à necessidade da manutenção da temperatura e da umidade.

Imediatamente após a moldagem, os corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos foram revestidos por um filme plástico, não reativo e não absorvente, a fim de evitar a perda de água do concreto para o ambiente externo. O corpo-de-prova correspondente ao ensaio de retração por secagem restringida foi revestido conforme especificações da norma americana, sendo descrito no item 3.5.2.2.

Os cp's referentes aos ensaios mecânicos foram armazenados em superfície horizontal rígida e em ambiente livre da ação de intempéries, durante as primeiras 24 horas. Os corpos-de-prova, correspondentes aos ensaios de retração por secagem livre e restringida, foram armazenados conforme as prescrições de suas correspondentes normas, sendo apresentados nos itens 3.5.2.1 e 3.5.2.2, respectivamente.

3.5 MÉTODOS DE ENSAIO

Neste item serão descritos os métodos de ensaio empregados nesta pesquisa. Os mesmos são diferenciados em ensaios de propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e módulo de elasticidade), ensaios de retração por secagem (livre e restringida) e ensaio de microestrutura (microscopia eletrônica de varredura - MEV).

3.5.1 Propriedades Mecânicas

Os ensaios mecânicos foram realizados com a finalidade de não somente controlar a produção dos concretos pesquisados, mas também buscaram avaliar a influência do emprego do agregado cerâmico na composição dos mesmos, frente às propriedades mecânicas como a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade estático.

3.5.1.1 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão é uma propriedade que fornece um indicativo referente à qualidade do concreto, pelo fato de estar relacionada com a pasta de cimento endurecida. Segundo Neville (1997), a porosidade da matriz, relacionada à estrutura da pasta de

cimento endurecida, bem como a zona de transição entre a matriz cimentícia e o agregado graúdo, são fatores determinantes para a resistência dos concretos mais utilizados.

De um modo geral, a resistência do concreto está relacionada com a porosidade de todos os materiais constituintes, assim como da zona de transição. Neste sentido, a avaliação de tal propriedade é relevante uma vez que as características dos agregados são modificadas em virtude da substituição de agregado natural por agregado cerâmico (graúdo e miúdo).

Os ensaios de resistência à compressão axial foram executados de acordo com os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 2007), nas idades determinadas pelo programa experimental (3, 7 e 28 dias). Tal propriedade foi avaliada para 3 (três) corpos de prova por idade determinada, os mesmos permaneceram em câmara úmida até a idade de execução dos ensaios. Anteriormente à realização do ensaio, os corpos de prova foram retificados.

3.5.1.2 Módulo de elasticidade estático

O módulo de elasticidade estático é uma propriedade que reflete a capacidade de deformação do compósito cimentício. Assim sendo, julgou-se importante avaliar tal propriedade nos concretos estudados devido à modificação das propriedades físicas e mecânicas dos agregados (graúdos e miúdos) constituintes da mistura, evidenciados pela substituição de agregado natural por agregado cerâmico.

Os ensaios de módulo de elasticidade estático foram realizados de acordo com as recomendações da NBR 8522 (ABNT, 2008), nas idades determinadas pelo programa experimental (3, 7 e 28 dias). Tal propriedade foi avaliada para 3 (três) corpos de prova por idade determinada, os mesmos permaneceram em câmara úmida até a idade de execução dos ensaios. Anteriormente à realização do ensaio, os corpos de prova foram retificados.

3.5.2 Retração por secagem

A propriedade da retração por secagem foi avaliada visando verificar a eficiência do agregado cerâmico como um agente mitigador do fenômeno da retração por secagem em concretos. Desta forma, sendo possível averiguar se os resíduos cerâmicos de construção e demolição podem auxiliar na redução das deformações geradas por tal fenômeno.

3.5.2.1 Retração por secagem livre

O método de ensaio de retração por secagem livre baseou-se nas recomendações da norma americana ASTM C157/C157M (2008). Logo após a moldagem dos cp’s, os mesmos foram revestidos por um filme plástico e levados para a câmara úmida (UR ≥ 95% e temperatura de 23º ± 2 °C), onde ficaram armazenados durante as primeiras 24 horas.

Após as primeiras 24 horas, os cp's foram retirados dos moldes e colocados em um recipiente com água (temperatura ambiente) saturada em cal, onde passaram por um processo de cura submersa, durante o período de 14 dias. Passados os primeiros 60 minutos da cura submersa, realizou-se a leitura referência para cada um dos corpos de prova, sendo esta considerada como a dimensão inicial do concreto. Este processo de leitura foi realizado com o auxílio de um relógio comparador horizontal, figura 15.

Figura 15: variação unidimensional - deformação referência (inicial)

Com os corpos de prova em cura submersa, foram realizadas leituras diárias até a idade de 14 dias. Após este período, os corpos de prova passaram a ser estocados em câmara climatizada, onde ficaram armazenados ao ar, com temperatura (23º ± 1,7°C) e umidade (50% ± 4%) controladas, conforme especificações da norma ASTM C157/C157M (2008).

Na câmara climatizada, os corpos-de-prova foram dispostos de modo que o processo de secagem ocorresse em suas seis faces. Leituras semanais foram realizadas até a idade de 112 dias. Após este período, leituras mensais foram realizadas até a idade de 224 dias.

Seis leituras da variação unidimensional livre dos concretos foram realizadas para cada um dos corpos-de-prova, em todas as idades de leitura definidas, sendo utilizada a média das leituras, em cada idade, para o cálculo da deformação total livre dos concretos. Segundo a norma americana ASTM C157/C157M (2008), a variação unidimensional total livre do concreto é calculada a partir da equação 18.

$$\Delta L_x = \frac{\mathrm{L_{jc}} - \mathrm{L_{oc}}}{\mathrm{G}} * 100 \qquad \text{Equação 18}$$

Onde:

ΔL_x – deformação unidirecional, após a desforma (%);

L_{jc} – leituras no aparelho comparador, na idade j (dias);

L_{oc} – leitura inicial no aparelho comparador, deformação zero, após a desforma;

G – comprimento inicial entre as extremidades internas dos pinos metálicos, antes da moldagem.

Para este ensaio foram moldados 3 corpos de prova prismáticos para cada traço de concreto, resultando em 39 corpos-de-prova para o ensaio de retração por secagem livre.

3.5.2.2 Retração por secagem restringida

O método do ensaio de retração por secagem restringida seguiu as recomendações da norma americana AASHTO PP34-99 (2005). O ensaio consistiu na avaliação da magnitude do fenômeno da retração por secagem, de forma restringida às variações dimensionais do concreto, bem como a sua tendência de fissuração devido a este fenômeno.

O molde utilizado no ensaio foi desenvolvido e seguiu as prescrições da norma americana, porém com algumas adaptações, devido aos materiais disponíveis no mercado nacional. Pequenas alterações estão relacionadas com os materiais empregados na confecção do equipamento, porém a principal diferença entre o equipamento normalizado e o empregado na pesquisa está na dimensão interna da fôrma externa do molde (fôrma de PVC).

Na norma americana a dimensão especificada é de 457 mm, porém, empregou-se uma fôrma de PVC, com diâmetro interno de 450 mm. As dimensões da fôrma interna (aço) e da base do molde seguiram as prescrições da norma americana. A figura 16 apresenta, esquematicamente, as dimensões do molde utilizado para o ensaio de retração por secagem restringida.

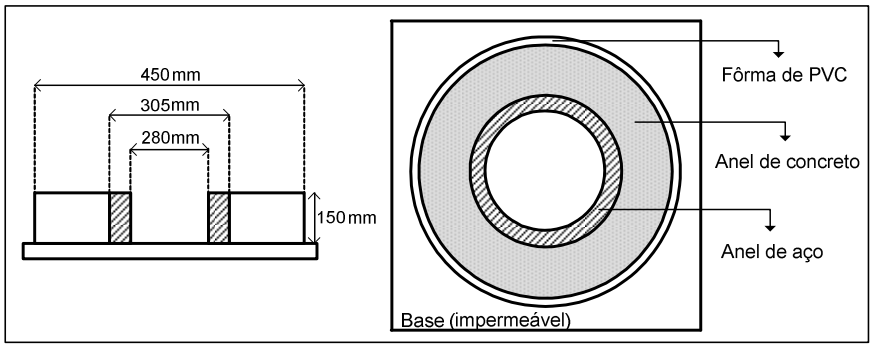


Figura 16: equipamento do ensaio de retração restringida, baseado na norma AASHTO PP34-99 (2005)

A primeira etapa deste ensaio consistiu na instrumentação da forma interna de aço (anel) e posteriormente, na preparação do molde para o processo de moldagem do concreto. A fase de instrumentação do anel resumiu-se na colagem de extensômetros elétricos na face interna do anel de aço. Tal processo de instrumentação seguiu as seguintes etapas, para os quatro extensômetros elétricos:

e) marcação da posição, na face interna do anel de aço, na qual será colado o extensômetro elétrico, sendo estas posições equidistantes;

f) lixamento do anel de aço, na posição previamente marcada, até a obtenção de uma superfície livre de rugosidades (figura 17);

g) limpeza da superfície interna do anel de aço;

h) marcação exata do posicionamento do extensômetro, na face interna do anel de aço, sendo esta na metade da altura (figura 18);

i) limpeza da superfície, na posição exata da colagem do extensômetro elétrico (figura 19);

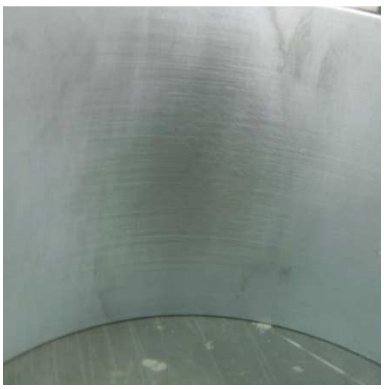


Figura 17: processo de lixamento da superfície interna do anel

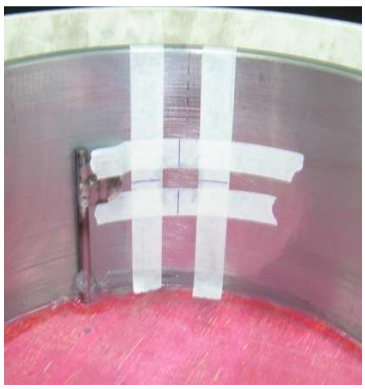


Figura 18: marcação do posicionamento de colagem

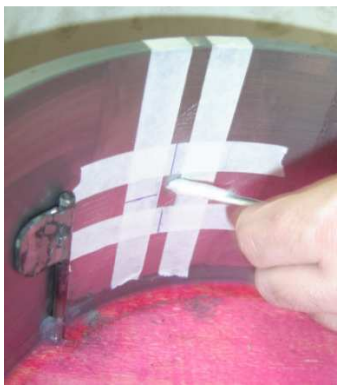


Figura 19: limpeza da superfície (exata) de colagem

j) colagem do extensômetro elétrico, podendo este estar sujeito a esforços de compressão (figura 20) ou de tração (figura 21);

k) colagem do terminal elétrico (figura 22);

l) soldagem (estanho) do extensômetro elétrico ao terminal elétrico;

m) soldagem dos fios (dois) no terminal elétrico (figuras 23);

n) formação do circuito elétrico – denominado como ponte de *Wheatstone,* sendo esta completa, pois é formada por quatro extensômetros elétricos (figura 24).

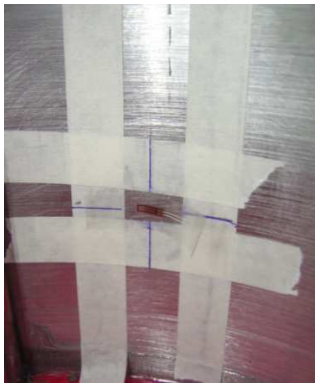


Figura 20: extensômetro sujeito a esforços de compressão

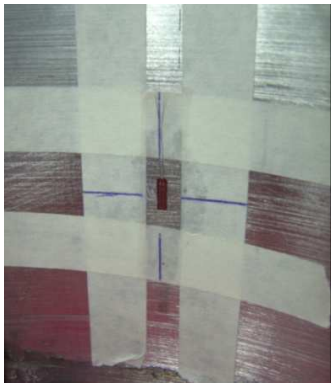


Figura 21: extensômetro sujeito a esforços de tração

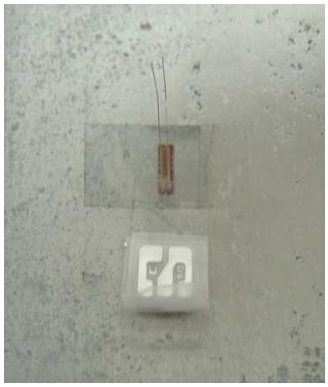
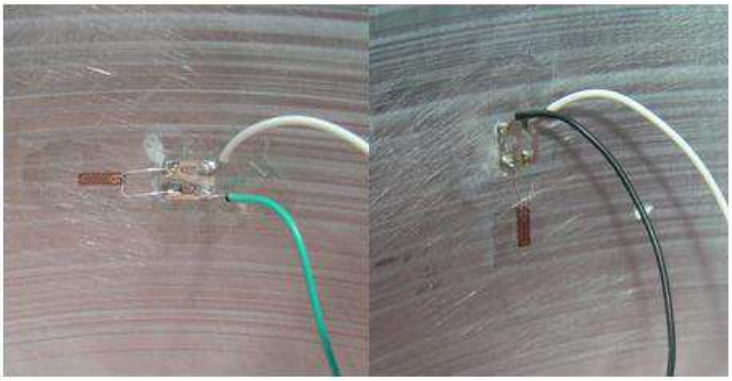


Figura 22: colagem do terminal elétrico



Figuras 23: extensômetros elétricos, terminais e fios soldados (posicionamento dos extensômetros frente a esforços de compressão e de tração)

Figura 24: instrumentação completa do anel

A norma americana recomenda que as leituras das tensões sofridas pelo anel de aço sejam realizadas, separadamente, em cada um dos extensômetros elétricos. No entanto, como a pesquisa pretende avaliar, comparativamente, os concretos estudados, e, conjuntamente, devido ao número limitado de aparelhos para aquisição de dados, optou-se em empregar uma ponte de *Wheatstone* completa para cada um dos moldes, assim obtiveram-se valores médios das tensões sofridas pelo anel de aço.

Com o processo de instrumentação completo, passou-se para a etapa de preparação do equipamento. Primeiramente, revestiu-se a base (madeira ou metálica) com um plástico, a fim de torná-la uma superfície totalmente impermeável, evitando qualquer variabilidade na obtenção do resultado. Após este processo, as fôrmas interna (anel de aço) e externa (anel

de PVC) foram posicionadas em seus locais pré-determinados com o auxílio de pinos metálicos, e vedadas à base com um material selante (silicone), de forma a evitar a perda de pasta de cimento nos momentos de concretagem e adensamento do concreto.

Com os processos de instrumentação e preparação finalizados, os moldes foram armazenados ao ar, em uma câmara climatizada com temperatura (23º ± 1,7°C) e umidade (50% ± 4%) controladas, onde ficaram durante todo o período de ensaio, conforme prescrições da norma americana AASHTO PP34-99 (2005). Na câmara climatizada, os moldes, através de sua ponte de *Wheatstone* (completa), foram ligados a um sistema de aquisição e registro de dados, o qual permaneceu ligado até o final do ensaio, emitindo resultados a cada 5 minutos.

Esta etapa do trabalho foi realizada, aproximadamente, 24 horas antes do processo de concretagem, possibilitando a estabilização das leituras de cada um dos extensômetros elétricos, já que variáveis como a temperatura e a umidade poderiam afetá-las. As leituras obtidas neste período correspondem ao estado de deformação zero do anel de aço.

Os corpos-de-prova foram moldados na câmara climatizada, figura 25, assim evitando que variações de temperatura e umidade pudessem afetar os valores de leitura dos extensômetros elétricos. O processo de cura inicial foi realizado segundo recomendações da AASHTO PP34-99 (2005), onde o corpo de prova foi coberto por um plástico espesso e por sacas de linhaça úmidas, evitando que a secagem ocorresse neste período inicial, figura 26.

Figura 25: processo de concretagem dos CP's

Figura 26: processo de cura inicial

Posteriormente ao processo de cura inicial, o corpo-de-prova de concreto foi desformado. O processo de desmoldagem consistiu na retirada, através de corte, da fôrma externa de PVC, sendo este realizado facilmente, devido ao emprego de desmoldante, e sem qualquer variação nas leituras dos extensômetros elétricos. A fôrma interna, anel de aço, permaneceu como núcleo durante o período de ensaio, uma vez que ela é a restrição às tensões geradas pelo fenômeno da retração por secagem.

Após a desmoldagem, um plástico foi colado na face superior do anel de concreto, limitando o processo de secagem às laterais do corpo-de-prova, unicamente. Na literatura, encontra-se a possibilidade de dois tipos de realização do processo de secagem para os corpos-de-prova deste ensaio, sendo estes pela superfície (*top and bottom*) ou pelas laterais do anel de concreto. Porém, a norma AASHTO PP34-99 (2005) especifica o processo de secagem como sendo pelas laterais do corpo de prova, logo, sendo este adotado nesta pesquisa. A figura 27 demonstra, esquematicamente, este processo de secagem.

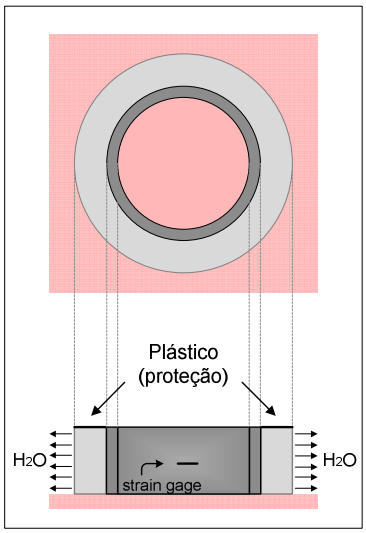


Figura 27: representação esquemática do processo de secagem

Leituras das tensões no anel de aço, devidas às deformações do concreto, foram realizadas a cada 5 minutos de forma ininterrupta até os 224 dias, para cada um dos corpos-de-prova. Durante todo o período de ensaio, os anéis de concreto foram inspecionados com o auxílio de uma luz fluorescente e lupa, a fim de verificar a formação de fissuras.

Conjuntamente, após a idade final das leituras de retração restringida (224 dias), as aberturas de todas as fissuras presentes nos anéis foram medidas com o auxílio de um equipamento conhecido como fissurômetro, demonstrado na figura 28. Para cada uma das fissuras foram realizadas medidas das aberturas em sua parte superior, central e inferior. Os resultados apresentados estão relacionados com a maior abertura, contida no comprimento da fissura. Estes dados auxiliaram na análise dos resultados frente à verificação da eficiência do agregado cerâmico como um agente de cura interna para o concreto. Para este ensaio foi moldado um corpo de prova para cada traço de concreto, resultando em 13 corpos-de-prova para o ensaio de retração por secagem restringida.

Figura 28: equipamento utilizado para a medição das fissuras

3.5.3 Ensaio de microestrutura

3.5.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Ensaios microestruturais de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizados buscando avaliar a existência de transporte de água e de produtos hidratados entre a matriz cimentícia e o agregado (natural e cerâmico). Assim sendo, análises foram realizadas em todos os compósitos cimentícios estudados. As análises de microscopia eletrônica de varredura, bem como a preparação das amostras, foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação e resolução limitada pelo volume do feixe de elétrons e o micro volume de interação com a amostra (SILVEIRA, 2007). Segundo Maliska (2005), na microscopia eletrônica de varredura (MEV), os sinais de elétrons secundários (SE) e de elétrons retroespalhados (BSE) são os de maior interesse para a formação das imagens. Assim, à medida que o feixe de elétrons vai varrendo a superfície da amostra analisada, os sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície.

Assim sendo, os elétrons secundários (SE) possibilitam a formação de uma imagem de topografia da superfície da amostra, sendo os responsáveis pela obtenção de imagens de alta resolução, enquanto os elétrons retroespalhados (BSE) fornecem uma imagem característica da variação de composição da amostra, pela diferenciação de tons de cinza (MALISKA, 2005). Onde, os tons claros correspondem às porções constituídas por elementos com número atômico médio maior do que aquelas com tons mais escuros, com número atômico médio menor (SILVEIRA, 2007).

Nesta pesquisa utilizou-se a obtenção de imagem por elétrons retroespalhados (BSE) e a determinação da composição qualitativa e semiquantitativa das amostras. Para a realização da análise de composição, é necessária uma análise do espectro de raios-x característicos, o qual utiliza um espectrômetro por dispersão de energia ou EDS (*Energy-Disperse X-Ray Spectroscopy*).

As imagens desta pesquisa foram obtidas com o equipamento Jeol – JSM 5800 Scanning Microscope, do Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CME/UFRGS). As seguintes condições analíticas foram utilizadas para as análises realizadas: tensão de 20kV e vácuo de 10^{-4} Pa. O tempo de contagem do EDS foi de 60s por análise (*livetime*), regulando a intensidade do feixe para obter entre 20% e 30% de tempo morto (*deadtime*), para a obtenção do espectro. Para a análise de obtenção do perfil microanalítico de EDS (*linescan*), o tempo de contagem foi de 90s, com uma intensidade do feixe regulada para obter um tempo morto de 50% (*deadtime*).

Para as análises, as amostras foram preparadas no próprio CME. As mesmas foram secas em estufa, coladas nos porta-amostras de alumínio (*stub*), com auxílio de uma fita de carbono, e metalizadas com carbono. Até a idade de análise, as amostras ficaram armazenadas em dessecadores.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios mecânicos (resistência à compressão axial e módulo de elasticidade), nos ensaios de variação dimensional (retração por secagem livre e retração por secagem restringida) e nos ensaios microestruturais (microscopia eletrônica de varredura). Conjuntamente, é realizada uma análise dos resultados obtidos, buscando verificar se os objetivos propostos no estudo foram atingidos através dos ensaios realizados.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados da resistência à compressão axial média dos concretos estudados, para as idades de análise, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados são apresentados na tabela 22. No Apêndice C encontram-se todos os resultados correspondentes a este ensaio.

A partir dos resultados obtidos, percebe-se claramente o efeito da idade e das propriedades do agregado cerâmico no ganho de resistência dos compósitos cimentícios. Analisando a Tabela 22 verifica-se a existência de uma relação direta entre a temperatura de queima do agregado cerâmico, a qual influência às suas propriedades (porosidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade), e a resistência mecânica dos concretos, sendo a fase do grão cerâmico a limitante para o ganho de resistência, demonstrado na Figura 29.

Portanto, nota-se que mesmo com propriedades inferiores do agregado cerâmico em relação aos agregados naturais, ocorre um aumento da resistência mecânica dos concretos com a presença de grãos cerâmicos, produzidos com temperatura de queima de 950ºC ou 1100ºC. Acredita-se que tal comportamento esteja relacionado com o fortalecimento da zona de transição e do grão cerâmico devido à percolação dos cristais hidratados da pasta de cimento para o interior do grão cerâmico. Assim, além da ocorrência de uma macro-ancoragem em decorrência da textura rugosa do agregado cerâmico, tenha acontecido uma micro-ancoragem devido à entrada dos produtos hidratados, bem como a possibilidade de ocorrência do procedimento de cura interna.

Tabela 22: resultados médios de resistência à compressão axial

Traços	Resultados obtidos								
	Idade (dias)								
	3			7			28		
	fc médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. variação (%)	fc médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. variação (%)	fc médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. variação (%)
Referência	43,21	0,51	1,19	51,34	1,12	2,18	62,79	3,30	5,25
50G-700	22,49	0,68	3,04	26,96	0,62	2,30	32,83	0,63	1,92
100G-700	17,74	0,78	4,40	19,93	0,17	0,85	25,47	0,54	2,10
50G-950	37,30	1,41	3,78	43,18	1,86	4,30	53,22	1,42	2,68
100G-950	32,95	1,14	3,46	38,16	0,86	2,26	47,03	0,62	1,32
50G-1100	42,09	2,00	4,74	51,92	3,32	6,40	66,47	1,15	1,74
100G-1100	43,70	2,35	5,38	53,52	1,46	2,73	71,79	2,80	3,90
50M-700	34,02	0,07	0,21	44,86	0,69	1,53	58,05	3,03	5,23
100M-700	32,52	1,62	4,97	43,84	0,04	0,10	55,86	1,69	3,02
50M-950	42,83	1,31	3,05	53,14	2,00	3,76	55,50	0,67	1,22
100M-950	43,42	1,32	3,03	57,18	1,10	1,93	73,78	1,69	2,29
50M-1100	43,52	0,65	1,50	52,92	1,65	3,12	59,09	3,02	5,10
100M-1100	40,45	2,62	6,48	58,44	1,92	3,28	70,12	3,11	4,44

Onde: fc médio – resistência à compressão axial média dos concretos estudados.

Figura 29: concretos com agregados cerâmicos (100G-700) – ensaio de resistência à compressão dos concretos (ruptura dos corpos de prova).

Para comprovar estatisticamente a influência de cada um dos fatores controláveis estudados (temperatura de queima da cerâmica, granulometria substituída, teor de substituição e idade), bem como de suas interações, os resultados foram analisados através do método de análise de variância (ANOVA).

A análise de variância (ANOVA) dos dados experimentais, correspondentes a esta variável de resposta, foi realizada de duas formas distintas. Inicialmente, realizou-se a análise de variância a partir dos efeitos principais (efeitos isolados) dos fatores controláveis, visando comparar o concreto referência com os demais concretos com substituição do agregado, demonstrado na tabela 23. A segunda análise realizada considerou os efeitos isolados de cada um dos fatores controláveis bem como de suas interações, para os concretos com substituição do agregado natural pelo agregado cerâmico, demonstrado na tabela 24.

Tabela 23: análise de variância (ANOVA) – resistência à compressão axial. Análise dos efeitos isolados entre o concreto referência e os concretos com substituição

ANOVA - Resistência à compressão axial					
Variáveis	**GDL**	**MQ**	**F (calc)**	**p**	**Significância**
Temperatura	3	3740,525	97,39687	0,000000	S
% Substituição	2	2,514	0,06547	0,798537	NS
Granulometria	2	3097,464	80,65266	0,000000	S
Idade	2	3779,827	98,42024	0,000000	S
Erro	109	38,405			

Onde: GDL – graus de liberdade; MQ – média quadrática; F(calc) – valor calculado de F; p – nível de significância; S – valor significativo; NS – valor não significativo.

Analisando a tabela 23, percebe-se que somente o efeito do teor de substituição não se mostrou significativo na análise realizada. Contudo, todos os demais fatores controláveis avaliados exercem influência significativa quando analisados comparativamente entre o concreto referência e os concretos com substituição de agregado natural por agregado cerâmico.

Na tabela 24, é demonstrada a análise de variância (ANOVA) realizada para os concretos com substituição de agregados. Igualmente ao mencionado para a análise anterior, somente o efeito do teor de substituição não se mostrou significativo na análise. Todos os demais efeitos isolados, assim como suas interações mostraram-se significativos na análise realizada.

Tabela 24: análise de variância (ANOVA) – resistência à compressão axial. Análise dos efeitos isolados e suas interações para os concretos com substituição do agregado natural por agregado cerâmico

ANOVA - Resistência à compressão axial					
Variáveis	**GDL**	**MQ**	**F (calc)**	**p**	**Significância**
Temperatura (1)	2	3740,5	1301,57	0,000000	S
% Substituição (2)	1	2,5	0,87	0,352738	NS
Granulometria (3)	1	3097,5	1077,81	0,000000	S
Idade (4)	2	3490,5	1214,58	0,000000	S
Temperatura x % Substituição	2	137,1	47,70	0,000000	S
Temperatura x Granulometria	2	1052,7	366,30	0,000000	S
% Substituição x Granulometria	1	278,9	97,05	0,000000	S
Temperatura x Idade	4	53,8	18,73	0,000000	S
% Substituição x Idade	2	60,2	20,94	0,000000	S
Granulometria x Idade	2	106,1	36,90	0,000000	S
1 x 2 x 3	2	74,6	25,96	0,000000	S
1 x 2 x 4	4	27,5	9,57	0,000003	S
1 x 3 x 4	4	69,6	24,22	0,000000	S
2 x 3 x 4	2	63,4	22,06	0,000000	S
1 x 2 x 3 x 4	4	20,4	7,10	0,000071	S
Erro	72	2,9			

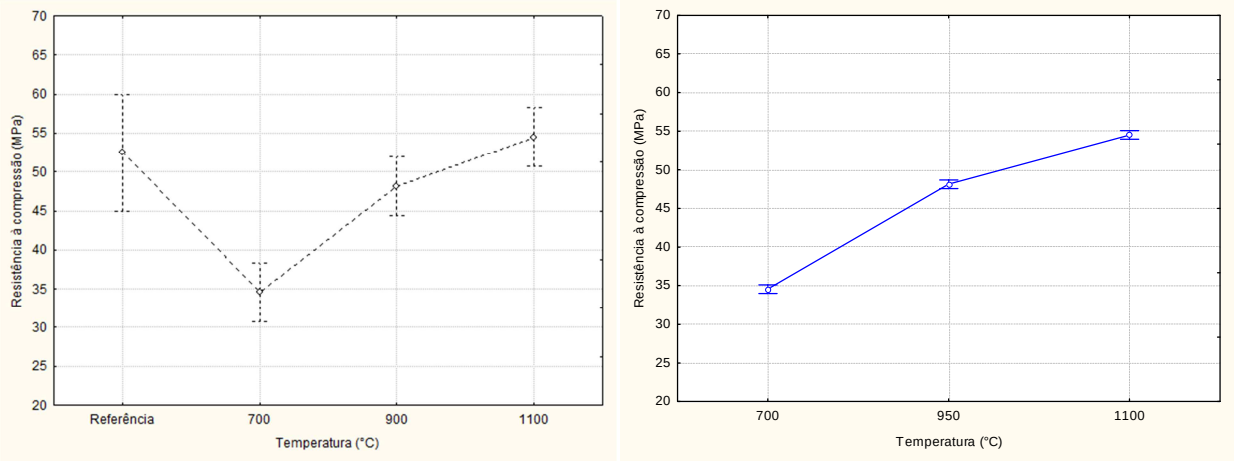
Onde: GDL – graus de liberdade; MQ – média quadrática; F(calc) – valor calculado de F; p – nível de significância; S – valor significativo; NS – valor não significativo.

A seguir são demonstradas as análises das variáveis controláveis que se mostraram significativas, bem como de suas interações, as quais tiveram uma influência expressiva na análise de variância (ANOVA) realizada.

4.1.1 Efeito da temperatura de queima da cerâmica na resistência à compressão axial

A figura 30 apresenta o gráfico da influência isolada da temperatura de queima do agregado cerâmico sobre a resistência à compressão axial dos concretos estudados. Na figura 30(a) é apresentada a análise realizada com todos os concretos estudados (presença do concreto referência). Contudo, na figura 30(b) é apresentado o resultado obtido avaliando-se somente os concretos com agregado cerâmico na composição.

Analisando os gráficos, percebe-se que a substituição do agregado natural pelo agregado cerâmico reduziu a resistência à compressão axial, conforme esperado. Tal comportamento está relacionado com as características do próprio agregado, como a resistência mecânica, a porosidade (estrutura de poros internos), a absorção de água, conforme evidenciado por inúmeros autores tais como Leite (2001), Khatib (2005), Cabral (2007), Debieb e Kenai (2008), Cordeiro (2013) e Alves *et al*. (2014).



(a) (b)

Figura 30: efeito isolado da temperatura de queima da cerâmica na resistência à compressão axial. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico

Ao avaliar o comportamento dos concretos com presença de agregado cerâmico, percebe-se que ocorre um ganho da resistência à compressão axial à medida que a temperatura de queima do agregado cerâmico aumenta. Certamente, tal fato está relacionado com as características do agregado cerâmico, onde o aumento da temperatura de queima reduz a porosidade interna do material, assim modificando suas propriedades mecânicas (CULTRONE *et al*., 2004; PAGNUSSAT, 2013).

Conjuntamente, através da caracterização do agregado cerâmico realizada, tal afirmação é comprovada. Na tabela 13 é apresentada a caracterização mecânica do agregado cerâmico. Ao analisá-la é possível observar o ganho de resistência do agregado cerâmico com o aumento da temperatura de queima da cerâmica. Igualmente, na tabela 16 e tabela 18, observa-se a redução da taxa de absorção de água (porosidade) do agregado reciclado com o aumento da temperatura de queima.

Ao realizar uma análise de Fisher, percebe-se ainda que os resultados obtidos para o concreto referência e para os concretos com a presença dos agregados cerâmicos, produzidos à 950ºC e 1100ºC, não apresentaram diferença significativa. Tal comportamento

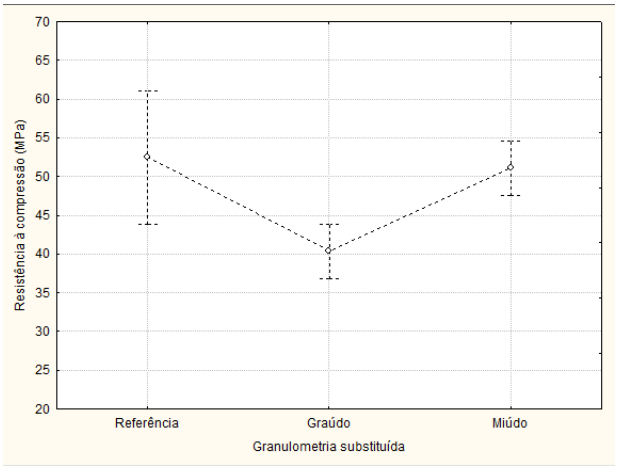
está diretamente relacionado com a melhora da qualidade do agregado cerâmico quando comparado com aquele produzido com temperatura de queima de 700ºC.

Assim sendo, percebe-se que o agregado cerâmico é a fase do compósito cimentício que limita o seu ganho de resistência mecânica. Portanto, como demonstrado nos resultados da análise de variância, à medida que se melhora a qualidade do agregado cerâmico, a resistência à compressão axial do concreto é majorada.

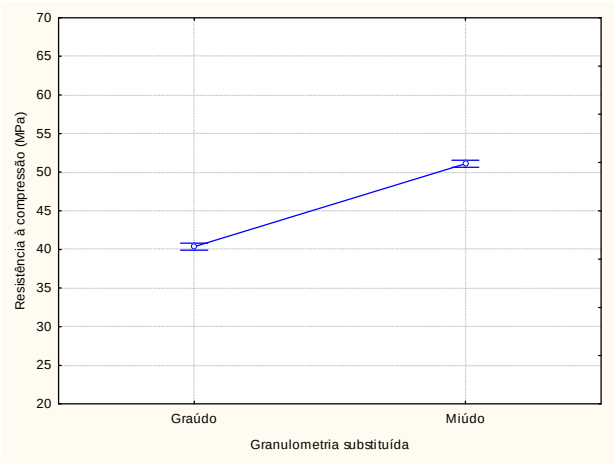
4.1.2 Efeito da granulometria substituída na resistência à compressão axial

A figura 31 apresenta o gráfico da influência isolada da granulometria substituída do agregado cerâmico sobre a resistência à compressão axial dos concretos estudados. Na figura 31(a) é apresentada a análise realizada com a presença do concreto referência. Contudo, na figura 31(b) é apresentado o resultado obtido avaliando-se somente os concretos com a presença de agregado cerâmico na composição.

Ao analisar os gráficos, percebe-se que a substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo cerâmico causou uma redução da resistência à compressão axial dos concretos. No entanto, para a substituição da fração miúda ocorreu uma leve redução da resistência mecânica dos concretos estudados. Tal comportamento era esperado, uma vez que o agregado reciclado torna-se a fase limitante do ganho de resistência mecânica, devido a suas características físicas e mecânicas, como mencionado na análise anterior.



(a)



(b)

Figura 31: efeito isolado da granulometria substituída do agregado cerâmico na resistência à compressão axial. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico

Tal comportamento foi mais evidente para a substituição por agregado graúdo, em função da dimensão do grão, o qual gera maior limitação para o aumento da resistência mecânica. Contudo, para a substituição por agregado miúdo cerâmico ocorre uma leve redução da resistência mecânica quando comparado com os concretos convencionais, uma vez que a matriz cimentícia torna-se menos resistente em função da maior porosidade e menor resistência (rigidez) do grão cerâmico. Tal comportamento também foi observado por autores como Khatib (2005), Debieb e Kenai (2008) e Alves *et al*. (2014).

No entanto, quando realizada uma análise pelo teste de Fisher, verifica-se que a diferença entre os resultados de resistência à compressão do concreto referência e do concreto com substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo cerâmico não apresentaram diferença significativa. Comportamento semelhante também foi observado por Cabral (2007), entretanto tal substituição (agregado miúdo natural por agregado miúdo cerâmico) gerou uma majoração da resistência à compressão. Para Leite (2001), tal comportamento pode estar relacionado com a existência de índices de atividade pozolânica das partículas finas do agregado miúdo cerâmico, assim auxiliando para o ganho de resistência mecânica dos concretos estudados, igualmente ao observado nesta pesquisa, como demonstrado na Tabela 15.

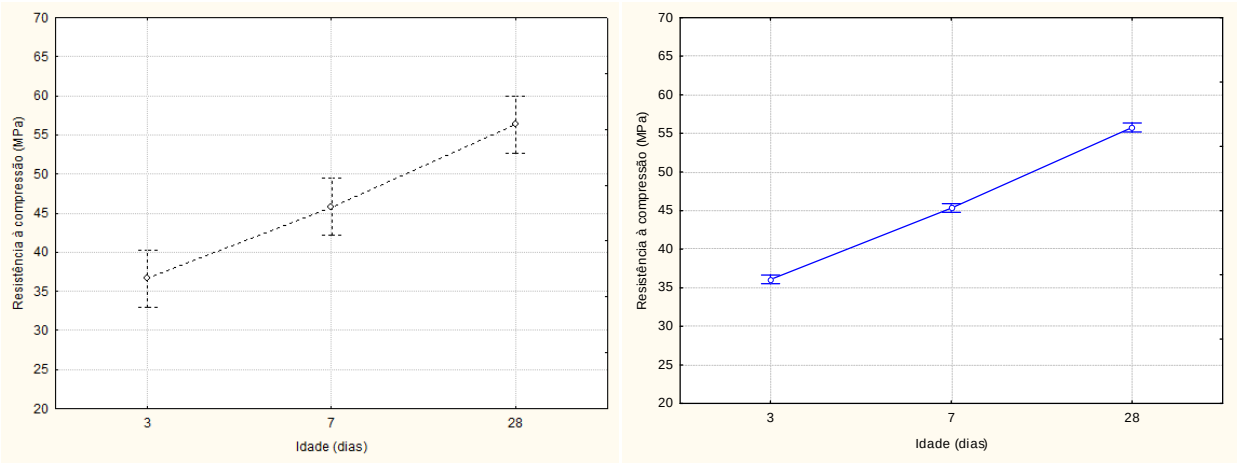
Na figura 31(b), observa-se o efeito isolado da granulometria somente nos concretos com a presença de agregado cerâmico (AgCer). Nota-se que a granulometria substituída influencia significativamente nos resultados de resistência à compressão axial dos concretos estudados, como mencionado anteriormente. A substituição do agregado graúdo reduz a resistência mecânica quando comparado com concretos com substituição de agregado miúdo.

Acredita-se que tal comportamento está relacionado com a precipitação dos cristais gerados pelas reações de hidratação para a parte interna do agregado cerâmico. Assim, para o AgCer miúdo tal fortalecimento ocorre praticamente em todo o grão, devido a menor granulometria do agregado substituído.

Já para o AgCer graúdo, acredita-se que a precipitação dos produtos gerados não ocorre na parte interna do grão (miolo), sendo este o fator limitante para o ganho de resistência. Logo, para o AgCer graúdo ocorre somente uma melhora da zona de transição do agregado cerâmico com a matriz cimentícia, mesmo que a porosidade dos grãos seja maior quando comparada com a do AgCer miúdo de mesma temperatura de queima, demonstrada na caracterização dos materiais (tabela 16 e tabela 18).

4.1.3 Efeito da idade na resistência à compressão axial

A figura 32 apresenta o gráfico da influência isolada da idade sobre a resistência à compressão axial dos concretos estudados. Na figura 32(a) é apresentada a análise realizada com a presença do concreto referência, e na figura 32(b) é apresentado o resultado obtido avaliando-se comparativamente os concretos com a presença de agregado cerâmico na composição.



(a) (b)

Figura 32: efeito isolado da idade na resistência à compressão axial. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico

Observando os gráficos, percebe-se o aumento na resistência à compressão dos concretos com o passar do tempo, conforme esperado. Tal comportamento está relacionado com o grau de hidratação do cimento, fator este determinante para o ganho de resistência do concreto. Conjuntamente, com o aumento da idade de hidratação do compósito ocorre a redução de sua porosidade, assim auxiliando na majoração das propriedades mecânicas (MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

4.1.4 Efeito da interação 'Temperatura x Teor de substituição' na resistência à compressão axial

A influência da interação entre a temperatura de queima do agregado cerâmico e o seu teor de substituição frente à resistência à compressão axial é demonstrado na figura 33. Analisando o gráfico, percebe-se que para os concretos com agregados cerâmicos queimados a 700°C, ocorre uma redução significativa na resistência à compressão para teores de substituição variando de 50% para 100%. Acredita-se que tal comportamento esteja relacionado com a baixa resistência mecânica e elevada porosidade do agregado cerâmico, sendo esta a fase limitante no ganho de resistência mecânica do compósito cimentício.

Já para os concretos produzidos com agregados cerâmicos queimados a 950°C, percebe-se uma leve inversão no comportamento. Contudo, realizando uma análise pelo teste de Fisher, não verificou-se diferença significativa entre os resultados obtidos para teores de substituição de 50% e 100% dos concretos com agregados cerâmicos queimados a 950°C.

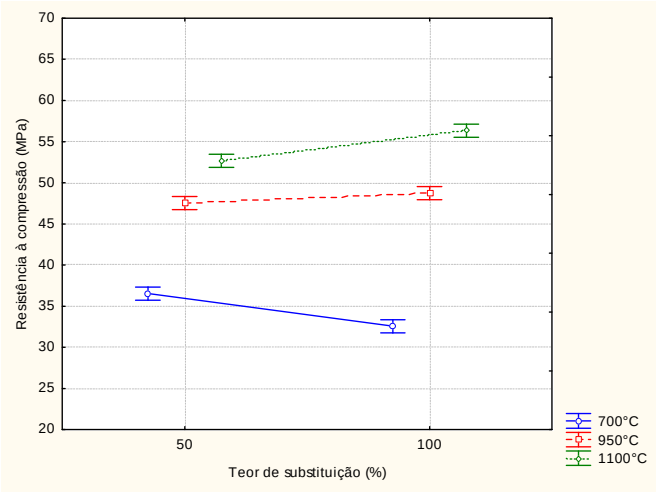


Figura 33: efeito da interação entre a temperatura de queima e o teor de substituição do agregado cerâmico sobre a resistência à compressão axial

Para os concretos produzidos com agregados cerâmicos queimados a 1100°C, nota-se a total inversão do comportamento. Conforme evidenciado anteriormente, o aumento da temperatura de queima do material cerâmico gera uma redução da porosidade do material e, consequentemente, um aumento da resistência da cerâmica. Assim, percebeu-se que com a substituição de 100% do agregado natural pelo agregado cerâmico ocorreu um aumento da resistência à compressão dos concretos.

Sabendo que as propriedades do agregado cerâmico são inferiores as do agregado natural, acredita-se que tal aumento da resistência mecânica esteja relacionado não somente com a precipitação dos produtos hidratados, melhorando as características do grão e da zona de transição, mas também por estar auxiliando no processo de cura interna do concreto. Assim, possibilita um ganho de resistência, uma vez que auxilia na ocorrência das reações de hidratação do cimento.

4.1.5 Efeito da interação ‘Temperatura x Granulometria’ na resistência à compressão axial

O efeito da interação entre a temperatura de queima do agregado cerâmico e a granulometria substituída (miúdo ou graúdo) nos concretos é demonstrada na figura 34. Para os concretos com AgCer queimados a 700° e 950°, percebe-se uma diferença

significativa entre os resultados de resistência mecânica de acordo com a granulometria substituída. Tal comportamento é explicado pela teoria da precipitação dos cristais originados pelas reações de hidratação para o interior do agregado, os quais geram um fortalecimento dos grãos. Este fenômeno, comparativamente, demonstrou-se mais eficiente para os agregados miúdos, onde há um maior preenchimento do agregado.

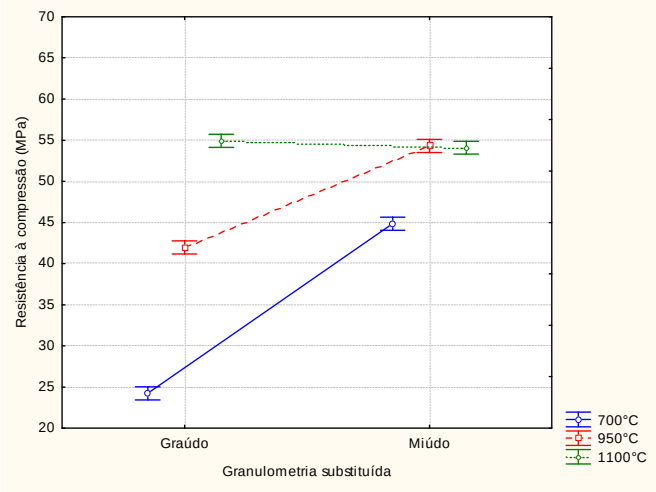


Figura 34: efeito da interação entre a temperatura de queima e a granulometria substituída do agregado cerâmico sobre a resistência à compressão axial

Conjuntamente, tal ganho de resistência pode estar relacionado com o índice de atividade pozolânica presente nos grãos do agregado miúdo cerâmico, como demonstrado na Tabela 15. Portanto, a substituição das menores frações granulométricas do agregado natural pelo agregado cerâmico pode ter contribuído para a melhora das propriedades mecânicas dos concretos estudados, quando comparado com a substituição do grão graúdo.

Contudo, para os concretos com agregados cerâmicos queimados a 1100°C, o comportamento foi completamente distinto, onde a granulometria substituída não se mostrou um fator significativo, através de uma análise pelo teste de Fisher. Possivelmente, tal fato esteja relacionado com as características do agregado, onde o aumento da temperatura de queima possibilita uma melhora nas propriedades mecânicas, devido à redução da estrutura interna de poros do material cerâmico.

Assim, a combinação entre a melhora das características do grão, associada com a precipitação dos cristais originados pelos produtos de hidratação e com a ocorrência do procedimento de cura interna, auxiliaram na obtenção de resistências semelhantes, independente da granulometria substituída.

4.1.6 Efeito da interação 'Teor de substituição x Granulometria' na resistência à compressão axial

Na figura 35 é apresentado o gráfico que representa a interação entre o teor de substituição do agregado natural pelo agregado cerâmico e o tipo de granulometria substituída (miúdo ou graúdo). Analisando tal gráfico, percebe-se que a substituição total do agregado graúdo gera uma redução da resistência mecânica do concreto, independente do teor de substituição (50% ou 100%). Tal fato pode ser explicado pelas características inferiores do agregado cerâmico quando comparado com o agregado natural.

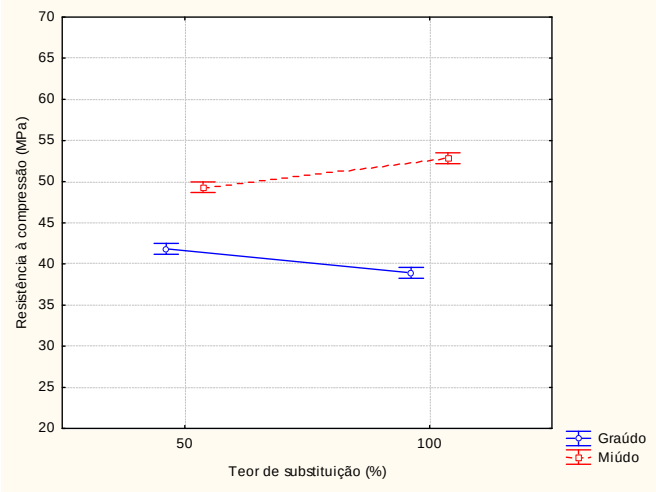


Figura 35: efeito da interação entre o teor de substituição e a granulometria substituída do agregado cerâmico sobre a resistência à compressão axial

Contudo, quando o agregado miúdo é a granulometria substituída percebe-se uma inversão de comportamento, onde a substituição total desta granulometria do agregado ocasiona um aumento da resistência à compressão do concreto. Como mencionado anteriormente, acredita-se que tal comportamento decorra não somente da teoria da precipitação dos cristais de hidratação, onde o fortalecimento do agregado e, consequentemente, da zona de transição, possibilite uma melhora desta propriedade mecânica, como também pela ocorrência de reações pozolânicas, devido à atividade pozolânica presente nas partículas finas do material cerâmico (Tabela 15).

Para Leite (2001), a substituição parcial ou total do agregado miúdo reciclado pelo natural é viável para concretos com diferentes relações a/c (0,40; 0,60 e 0,80). No entanto, quando ocorreu a substituição total do grão miúdo natural pelo cerâmico, observou-se as maiores taxas de crescimento da resistência mecânica dos concretos, apontando para a existência de atividade pozolânica da fração miúda do agregado reciclado.

4.1.7 Efeito da interação 'Temperatura x Idade' na resistência à compressão axial

Na figura 36 é apresentado o resultado da análise de variância da interação entre a temperatura de queima do agregado cerâmico e a idade de realização do ensaio. Ao analisar o gráfico, percebe-se que com o aumento da idade, o ganho de resistência é acentuado quando comparados os concretos com agregados cerâmicos queimados nas três diferentes temperaturas

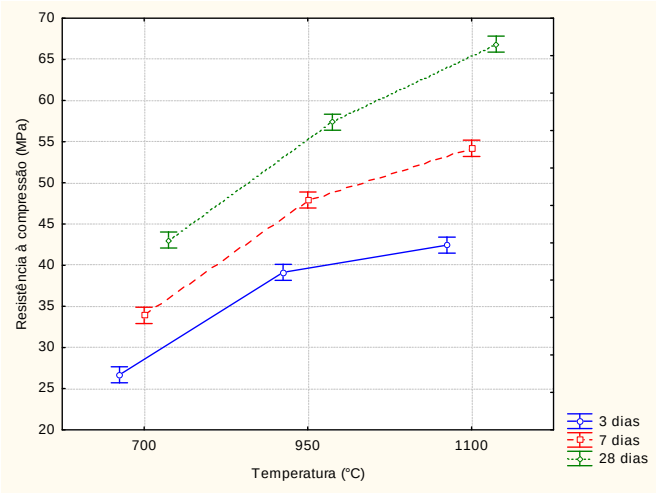


Figura 36: efeito da interação entre a temperatura de queima do agregado cerâmico e a idade sobre a resistência à compressão axial

Quando se compara os concretos produzidos com AgCer queimados a 700°C e 950°C, nota-se uma diferença da resistência à compressão de 46,6%, 41,3% e 33,3% para as idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente. Portanto, percebe-se que com o avanço da idade, a resistência à compressão dos concretos possui uma menor diferença em função da melhora da qualidade do agregado cerâmico produzido à 700ºC, devido à teoria de precipitação dos produtos hidratados. Contudo, tal efeito não é suficiente para majorar a resistência mecânica e torná-lo semelhante aos demais.

Já para os concretos produzidos com AgCer queimados a 950°C e 1100°C, percebe-se um aumento na resistência à compressão de 8,5%, 13,1% e 16,5% para as idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente. Assim, nota-se que com o passar do tempo aumenta a diferença entre a resistência à compressão dos concretos produzidos com estes dois tipos de agregados cerâmicos. Acredita-se que tal comportamento esteja associado à combinação da teoria de percolação dos produtos decorrentes da hidratação do cimento para o interior do grão e da qualidade do agregado, uma vez que com o aumento da idade, a resistência

da pasta majora e a qualidade do agregado passa a ser um fator de grande influência na resistência do compósito cimentício.

4.1.8 Efeito da interação 'Teor de substituição x Idade' na resistência à compressão axial

Na figura 37 é apresentado o resultado da análise de variância da interação entre o teor de substituição do agregado cerâmico e a idade de realização do ensaio. Analisando os resultados aos 3 dias, percebe-se que a substituição total do agregado reduz a resistência mecânica dos concretos estudados, fato este relacionado diretamente com as propriedades do agregado cerâmico.

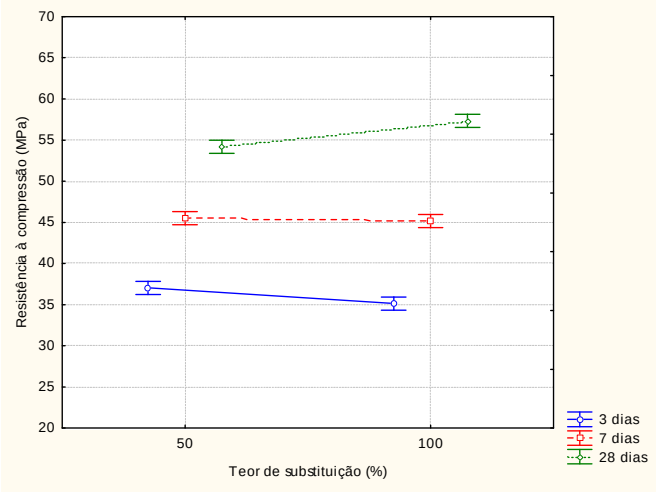


Figura 37: efeito da interação entre o teor de substituição e a idade sobre a resistência à compressão axial

Contudo, para a idade de 7 dias tal comportamento não é evidenciado. Logo, a substituição total ou parcial dos agregados não demonstrou influência significativa, pela análise do teste de Fisher. Já para a idade de 28 dias, percebe-se uma total inversão do comportamento, assim sendo, a substituição total do agregado resultou em um aumento na resistência à compressão dos concretos estudados.

Acredita-se que tal comportamento seja explicado pela teoria da percolação dos cristais de hidratação para o agregado cerâmico, onde com o passar do tempo e com a hidratação do cimento ocorre uma melhora significativa não somente das propriedades do agregado cerâmico e da zona de transição entre a matriz e o agregado cerâmico, mas também das propriedades mecânicas do compósito cimentício.

4.1.9 Efeito da interação 'Granulometria x Idade' na resistência à compressão axial

Na figura 38 é apresentado o resultado da análise de variância da interação entre a granulometria substituída do agregado cerâmico e a idade de realização do ensaio. Analisando o gráfico, percebe-se que a resistência à compressão dos compósitos cimentícios estudados é superior quando a granulometria substituída é a do agregado miúdo, independente da idade avaliada.

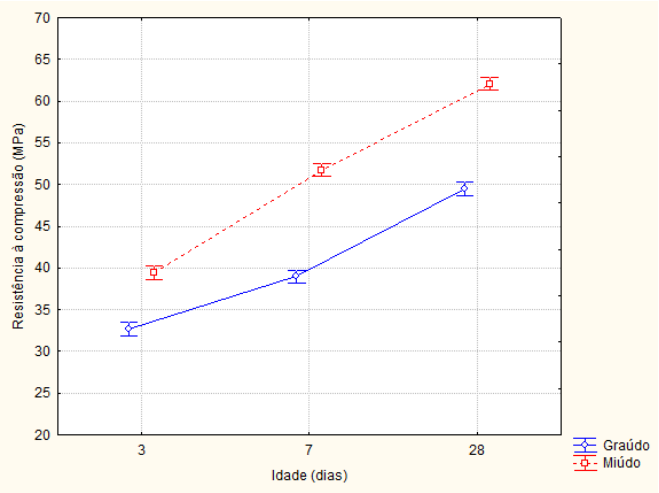


Figura 38: efeito da interação entre a granulometria substituída e a idade sobre a resistência à compressão axial

Como mencionado nas análises anteriores, acredita-se que tal comportamento decorra da teoria de percolação dos cristais oriundos das reações de hidratação do cimento. Assim, para os agregados miúdos cerâmicos, com o aumento da idade e, consequentemente, com o maior grau de hidratação do cimento, ocorre um maior preenchimento do grão, fortalecendo-o completamente. Conjuntamente, acredita-se na ocorrência de reações pozolânicas, devido à atividade pozolânica da fração miúda do material cerâmico, como demonstrado na Tabela 15. Tal comportamento também foi observado em pesquisa realizada por Leite (2001). Desta forma, tal parâmetro também pode estar contribuindo para o aumento da resistência mecânica dos concretos com a presença de agregado miúdo cerâmico.

Já para os agregados cerâmicos graúdos, o aumento da idade e dos produtos de hidratação gerados possibilita um ganho de resistência, de 19,1% (7 dias) e de 27% (28 dias). Contudo, mesmo com tal incremento na resistência à compressão, os resultados não se igualaram aos resultados obtidos para os concretos com substituição do agregado miúdo, os quais demonstraram um crescimento de 31,1% (7 dias) e de 20% (28 dias).

Acredita-se que tal comportamento ocorra devido ao fortalecimento somente da zona de transição entre a matriz cimentícia e o agregado graúdo cerâmico, e não do interior do grão (miolo), devido à percolação dos cristais gerados pela hidratação do cimento, em função da dimensão do mesmo. Assim, o agregado graúdo cerâmico (miolo do grão) torna-se o fator limitante para o ganho de resistência à compressão do compósito cimentício.

4.1.10 Efeito da interação 'Temperatura x Teor de substituição x Granulometria' na resistência à compressão axial

Na figura 39 é demonstrado o resultado da análise de variância (ANOVA) referente à interação de 3° ordem entre a temperatura de queima de cerâmica, o teor de substituição do agregado natural por cerâmico e a granulometria substituída.

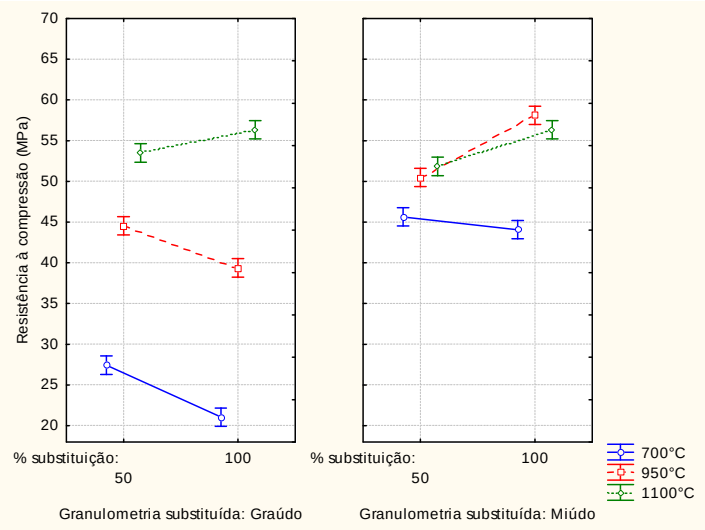


Figura 39: efeito da interação entre a temperatura, o teor de substituição e a granulometria substituída sobre a resistência à compressão axial

Analisando a substituição do agregado graúdo, percebe-se que a qualidade do agregado cerâmico influencia diretamente nos resultados, uma vez que a substituição total do agregado natural por agregados cerâmicos, produzidos a 700ºC e 950ºC, reduziu a resistência à compressão em 23,3% e 11,6%, respectivamente. Contudo, com a melhora da qualidade do agregado graúdo cerâmico, quando produzido com temperatura de queima de 1100ºC, obteve-se uma leve melhora (5,3%) na resistência mecânica dos concretos estudados.

Assim sendo, percebe-se que tal comportamento está diretamente relacionado com as propriedades físicas e mecânicas do agregado graúdo cerâmico, pois à medida que se aumenta a temperatura de queima da cerâmica, a porosidade do grão reduz, como

demonstrado pelo ensaio de absorção de água na tabela 18, aumentando a sua resistência mecânica, não se tornando a fase limitante no ganho de resistência mecânica do concreto.

Quando analisada a substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo cerâmico, nota-se que a substituição total dos grãos (100%) reduziu em 3,4% a resistência à compressão dos concretos com a presença de agregados miúdos cerâmicos produzidos à 700ºC. Entretanto, para os concretos com a presença de agregados miúdos cerâmicos produzidos com temperatura de queima de 950ºC e 1100ºC, a resistência mecânica majorou em 15,1% e 8,7%, respectivamente.

Acredita-se que tal comportamento decorra da combinação entre a melhora das características do agregado cerâmico, da teoria da percolação dos cristais gerados pelas reações de hidratação, para o interior do grão, e da ocorrência das reações pozolânicas devido à atividade pozolânica do agregado miúdo cerâmico (Tabela 15). Desta forma, todos estes fatores contribuíram para o aumento da resistência mecânica dos concretos estudados.

4.1.11 Efeito da interação ‘Temperatura x Teor de substituição x Idade’ na resistência à compressão axial

Na figura 40 é apresentada a análise de variância (ANOVA) realizada para a interação de 3° grau entre a temperatura de queima da cerâmica, o teor de substituição dos agregados naturais pelos cerâmicos e a idade.

Analisando o gráfico, percebe-se que a qualidade do grão é um fator importante frente à variável de resposta avaliada, uma vez que a substituição total (100%) do agregado cerâmico produzido à 700ºC, reduziu a resistência à compressão de forma semelhante para todas as idades avaliadas, ou seja, tal diminuição foi de 11,1%, 11,2% e 10,5%, para as idades de 3, 7 e 28, respectivamente. Desta forma, acredita-se que o aumento da resistência mecânica dos concretos estudados esteja fortemente relacionado com o aumento da resistência da pasta de cimento, decorrente das reações de hidratação, e não com a melhora da qualidade do agregado cerâmico em função da percolação. Portanto, não se obtém uma inversão de comportamento em função das características inferiores do agregado cerâmico produzido nesta temperatura, tais como a baixa resistência mecânica e a elevada porosidade (capacidade de absorção de água).

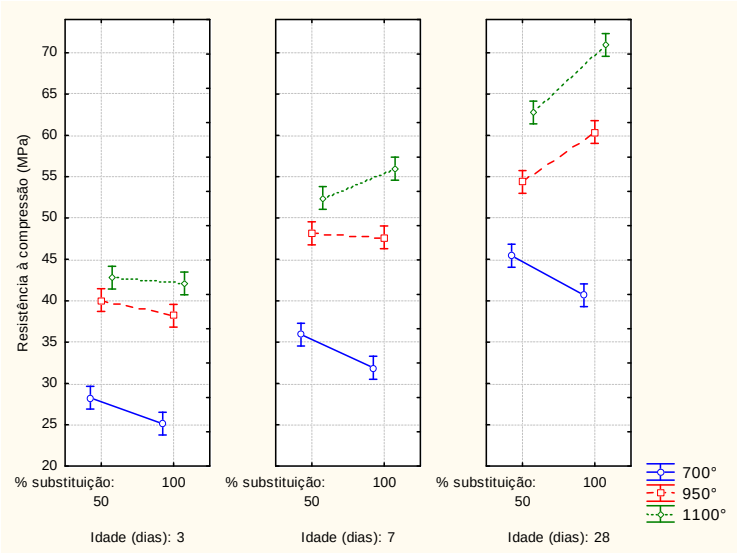


Figura 40: efeito da interação entre a temperatura, o teor de substituição e a idade sobre a resistência à compressão axial

No entanto, quando a temperatura de queima dos agregados cerâmicos passa a ser de 950°C, percebe-se que a substituição total dos grãos somente causa uma redução da resistência mecânica nas primeiras idades, ou seja, aos 3 dias (4,7%) e 7 dias (1%); entretanto, aos 7 dias, os resultados obtidos em função da variação do teor de substituição, já não apresentam diferença significativa, quando realizada uma análise pelo teste de Fisher. Contudo, com o aumento da hidratação, nota-se uma inversão de comportamento, onde aos 28 dias percebe-se um acréscimo de 11,1% na resistência mecânica dos concretos com substituição total dos agregados cerâmicos (950ºC), em relação aos concretos produzidos com substituição parcial deste tipo de grão cerâmico.

Igualmente, para os concretos produzidos com agregados cerâmicos, obtidos com temperatura de queima de 1100ºC, nota-se comportamento semelhante. Aos 3 dias, percebe-se uma redução da resistência mecânica dos concretos de 1,7%, quando comparadas as misturas com substituição parcial e substituição total dos agregados cerâmicos, porém tal diferença não se mostra significativa quando realizada análise pelo teste de Fisher. Entretanto, a inversão de comportamento ocorre com a idade de 7 dias, onde observa-se um ganho de resistência mecânica de 6,8%, quando comparados os diferentes teores de substituição (50% e 100%); enquanto que aos 28 dias, tal crescimento demonstra-se ainda mais acentuado, sendo de 13,1%.

Neste sentido, acredita-se que o aumento da resistência mecânica, quando substituído 100% dos agregados naturais por agregados cerâmicos, esteja relacionado não somente com a melhora das características físicas e mecânicas dos agregados cerâmicos,

decorrentes do aumento da temperatura de queima da cerâmica (950ºC e 1100ºC), mas também esteja associado com a teoria de percolação dos cristais gerados pela hidratação do cimento.

Assim, quando as características do agregado cerâmico são inferiores (950°C) é necessário um grau de hidratação superior do cimento para gerar o fortalecimento do agregado. No entanto, quando o agregado cerâmico possui propriedades físicas e mecânicas superiores (1100°C) oriundas da temperatura de queima do grão, em poucas idades (7 dias) já observa-se uma melhora na resistência mecânica do concreto com teores totais de substituição.

Conjuntamente, associado a estes parâmetros mecânicos, poderá estar ocorrendo o procedimento de cura interna. Desta forma, a água presente no interior dos agregados cerâmicos pode estar auxiliando nesta inversão de comportamento, e, consequentemente no ganho de resistência do concreto, uma vez que auxilia na ocorrência das reações de hidratação do cimento.

4.1.12 Efeito da interação 'Temperatura x Granulometria x Idade' na resistência à compressão axial

A figura 41 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a interação de 3° ordem entre a temperatura de queima do agregado cerâmico, a granulometria substituída (miúdo ou graúdo) e a idade.

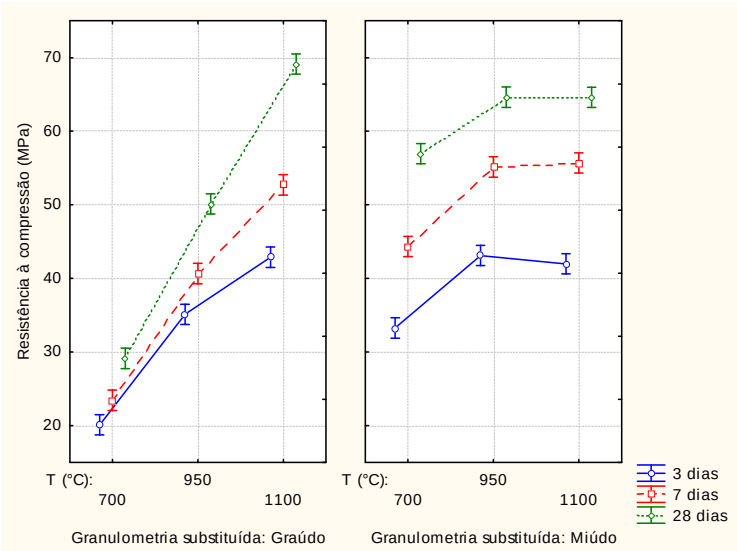


Figura 41: efeito da interação entre a temperatura, a granulometria substituída e a idade sobre a resistência à compressão axial

Analisando o gráfico com substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo cerâmico, percebe-se que ocorre um aumento da resistência à compressão dos concretos, independente da temperatura de queima do grão cerâmico adicionado a mistura, para todas as idades avaliadas, conforme esperado.

Ao avaliar os concretos com agregados graúdos cerâmicos produzidos à 700ºC, observa-se que o aumento de resistência mecânica dos concretos, dos 3 aos 7 dias foi de 16,6%, enquanto que dos 7 aos 28 dias foi de 24,4%. Contudo, mesmo com este importante ganho de resistência à compressão dos concretos, os resultados são inferiores quando comparados com os demais compósitos estudados, em função da qualidade inferior do grão, sendo este o fator limitante para o aumento da resistência mecânica do concreto.

Conjuntamente, nota-se que o aumento do ganho de resistência mecânica dos concretos com AgGCer-950ºC é semelhante, sendo de 15,8%, dos 3 aos 7 dias, e de 23,2%, dos 7 aos 28 dias. Entretanto, para os concretos produzidos com AgGCer-1100ºC, o ganho de resistência à compressão demonstra-se mais acentuado, sendo de 22,9%, dos 3 aos 7 dias, e de 31,1%, dos 7 aos 28 dias.

Acredita-se que tal comportamento esteja principalmente relacionado com a melhor qualidade do agregado cerâmico, uma vez que a suas propriedades físicas e mecânicas são superiores. Assim, a melhora do agregado cerâmico acompanha o aumento da resistência da pasta de cimento, e, consequentemente, do ganho de resistência mecânica do compósito cimentício.

Já para os concretos com substituição de agregado miúdo natural por agregado miúdo cerâmico, tal comportamento não se demonstra tão evidente. No entanto, o ganho de resistência com o passar do tempo, para as três temperaturas avaliadas, mostra-se semelhante. Quando realizada uma análise pelo teste de Fisher, observa-se que somente os resultados de resistência à compressão dos concretos produzidos com AgMCer-700°C mostraram-se significativamente diferentes em relação aos demais concretos estudados (AgMCer-950ºC e AgMCer-1100ºC).

Analisando o ganho de resistência mecânica dos concretos dos 3 aos 7 dias, percebe-se um comportamento semelhante entre os concretos, sendo tal aumento de 33,3% (700ºC), 27,9% (950ºC) e de 32,6% (1100ºC). No entanto, analisando tal aumento dos 7 aos 28 dias, o concreto com agregados miúdos cerâmicos (700ºC) apresentou um crescimento mais acentuado, sendo 28,4%, comparado com os demais que foram de 17,2% (950ºC) e de 16% (1100ºC). Entretanto, mesmo com o ganho de resistência mecânica mais acentuado, os

resultados demonstram-se inferiores em relação aos demais, em função da qualidade inferior do agregado cerâmico, decorrente da sua temperatura de queima.

Dentro deste contexto, acredita-se que tal comportamento esteja relacionado não somente com as características do agregado cerâmico, mas também esteja em parte associado com a teoria de percolação dos cristais formados pelas reações de hidratação do cimento para o interior do agregado cerâmico.

4.1.13 Efeito da interação 'Teor de substituição x Granulometria x Idade' na resistência à compressão axial

A figura 42 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a interação de 3° ordem entre o teor de substituição do agregado cerâmico, a granulometria substituída (miúdo ou graúdo) e a idade.

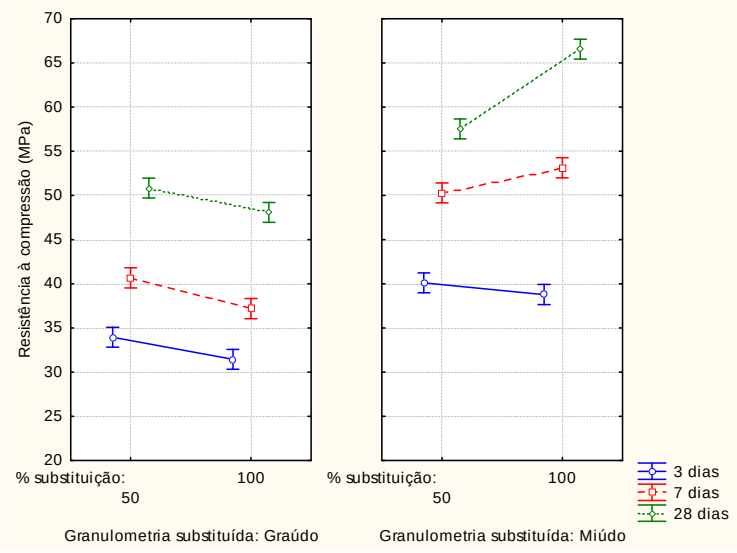


Figura 42: efeito da interação entre o teor de substituição, a granulometria substituída e a idade sobre a resistência à compressão axial

Com a análise do gráfico, nota-se que a substituição de 100% do agregado graúdo natural pelo AgGCer gerou uma redução da resistência mecânica dos concretos estudados, de 7,3%, 8,6% e 5,4%, para as idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente. Acredita-se que tal comportamento esteja relacionado com as características do agregado cerâmico, pois mesmo que ocorra a percolação dos cristais gerados pelas reações de hidratação do cimento, somente a zona de transição é fortalecida, permanecendo o interior do grão (miolo) frágil, sendo este o limitador para o ganho de resistência do compósito cimentício.

Quando analisado os resultados referentes à total substituição do agregado miúdo natural pelo AgMCer, percebe-se uma modificação no comportamento. Para os concretos avaliados

com a idade de 3 dias, observa-se uma redução de 3,3% na resistência mecânica dos concretos estudados, comportamento semelhante ao mencionado anteriormente. Contudo, para as idades de 7 e 28 dias, percebe-se uma inversão no comportamento, onde o aumento do teor de substituição gerou uma melhora na resistência mecânica dos concretos estudados, de 5,7% e 15,7%, respectivamente.

Supõe-se que tal comportamento seja explicado pela teoria da percolação dos produtos formados pela hidratação do cimento. Assim, com o aumento da idade, e, consequentemente, com o aumento do grau de hidratação do cimento, os grãos cerâmicos são fortalecidos, assim não limitando o ganho de resistência mecânica do concreto.

4.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados de módulo de elasticidade médio dos traços estudados, para as idades de análise, são apresentados na tabela 25. No Apêndice D encontram-se todos os resultados correspondentes a este ensaio.

A partir dos resultados obtidos, percebe-se claramente o efeito da idade e das propriedades do agregado cerâmico no aumento do módulo de elasticidade dos concretos estudados. Nota-se que a melhora das propriedades do grão cerâmico, oriundas da temperatura de queima do material, auxiliam na majoração desta propriedade, possibilitando a obtenção de resultados semelhantes aos obtidos para o concreto referência.

Igualmente ao mencionado para a análise anterior, tal comportamento é explicado pelo fortalecimento dos grãos e da zona de transição devido à teoria de precipitação dos cristais hidratados da pasta de cimento para o interior do grão cerâmico. Desta forma, possibilitando uma maior rigidez do compósito cimentício, reduzindo a sua capacidade de deformação.

Para comprovar estatisticamente a influência de cada um dos fatores controláveis estudados (temperatura de queima da cerâmica, granulometria substituída, teor de substituição e idade), bem como de suas interações, os resultados foram analisados através do método de análise de variância (ANOVA).

Tabela 25: resultados médios de módulo de elasticidade

Traços	Resultados obtidos								
	Idade (dias)								
	3			7			28		
	Emédio (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coef. variação (%)	Emédio (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coef. variação (%)	Emédio (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coef. variação (%)
Referência	28,23	0,92	3,27	28,00	3,81	13,61	34,20	2,71	7,92
50G-700	15,73	0,51	3,26	17,30	0,30	1,73	21,30	1,77	8,31
100G-700	9,50	0,26	2,79	11,17	0,40	3,62	12,57	1,14	9,05
50G-950	16,63	0,91	5,46	19,50	0,36	1,85	23,37	0,80	3,43
100G-950	11,30	0,40	3,54	13,07	0,32	2,46	14,03	0,40	2,88
50G-1100	21,60	2,95	13,64	25,00	1,47	5,89	26,73	0,80	3,00
100G-1100	18,90	1,48	7,83	18,80	0,26	1,41	21,27	0,59	2,76
50M-700	22,23	0,45	2,03	24,70	1,57	6,36	28,40	0,44	1,53
100M-700	17,27	1,67	9,70	22,37	1,10	4,92	25,17	0,96	3,82
50M-950	24,80	0,30	1,21	27,83	0,21	0,75	31,53	1,50	4,76
100M-950	23,10	0,72	3,12	24,97	1,21	4,85	27,90	1,18	4,23
50M-1100	27,93	1,21	4,32	31,77	2,29	7,22	33,93	2,22	6,54
100M-1100	25,80	1,50	5,81	27,60	1,82	6,61	30,53	1,76	5,77

Onde: E médio – módulo de elasticidade médio dos concretos estudados.

A análise de variância (ANOVA) dos dados experimentais, correspondentes a esta variável de resposta, foi realizada de duas formas distintas, igualmente ao realizado para a avaliação da resistência à compressão axial. Inicialmente, realizou-se a análise de variância a partir dos efeitos principais (efeitos isolados) dos fatores controláveis, visando comparar o concreto referência com os demais concretos com substituição do agregado, demonstrado na tabela 26. A segunda análise realizada considerou os efeitos isolados de cada um dos fatores controláveis bem como de suas interações, para os concretos com substituição do agregado natural pelo agregado cerâmico, demonstrado na tabela 27.

Analisando a tabela 26, percebe-se que os efeitos isolados de todas as variáveis controláveis mostraram-se significativas na análise realizada, quando avaliados comparativamente o concreto referência e os concretos com substituição de agregado natural por agregado cerâmico.

Tabela 26: análise de variância (ANOVA) – módulo de elasticidade. Análise dos efeitos isolados entre o concreto referência e os concretos com substituição

ANOVA - Módulo de elasticidade					
Variáveis	**GDL**	**MQ**	**F (calc)**	**p**	**Significância**
Temperatura	3	431,590	132,2046	0,000000	S
% Substituição	2	602,083	184,43	0,000000	S
Granulometria	2	2135,111	654,0266	0,000000	S
Idade	2	267,845	82,0461	0,000000	S
Erro	109	3,265			

Onde: GDL – graus de liberdade; MQ – média quadrática; F(calc) – valor calculado de F; p – nível de significância; S – valor significativo; NS – valor não significativo.

Tabela 27: análise de variância (ANOVA) – resistência à compressão axial. Análise dos efeitos isolados e suas interações para os concretos com substituição do agregado natural por agregado cerâmico

ANOVA - Módulo de elasticidade					
Variáveis	**GDL**	**MQ**	**F (calc)**	**p**	**Significância**
Temperatura (1)	2	431,59	282,41	0,000000	S
% Substituição (2)	1	602,08	393,97	0,000000	S
Granulometria (3)	1	2135,11	13,97,1	0,000000	S
Idade (4)	2	239,97	157,03	0,000000	S
Temperatura x % Substituição	2	3,75	2,46	0,092921	NS
Temperatura x Granulometria	2	18,11	11,85	0,000036	S
% Substituição x Granulometria	1	65,96	43,16	0,000000	S
Temperatura x Idade	4	0,99	0,65	0,629617	NS
% Substituição x Idade	2	7,21	4,72	0,011890	S
Granulometria x Idade	2	7,40	4,85	0,010611	S
1 x 2 x 3	2	4,50	2,95	0,058931	NS
1 x 2 x 4	4	4,10	2,68	0,038214	S
1 x 3 x 4	4	0,91	0,60	0,667014	NS
2 x 3 x 4	2	3,80	2,49	0,090176	NS
1 x 2 x 3 x 4	4	0,63	0,41	0,800531	NS
Erro	72	1,53			

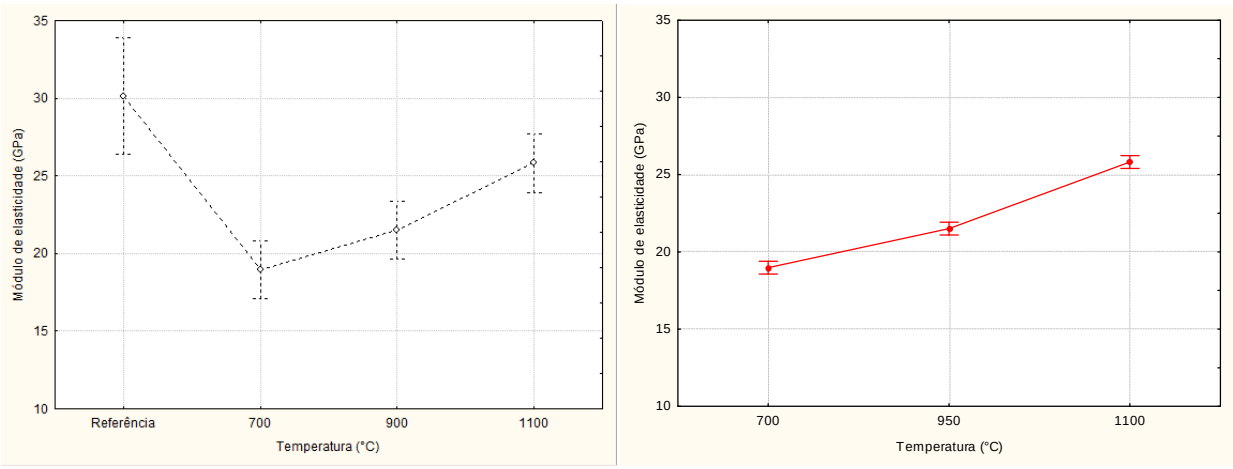
Onde: GDL – graus de liberdade; MQ – média quadrática; F(calc) – valor calculado de F; p – nível de significância; S – valor significativo; NS – valor não significativo.

Na tabela 27, é demonstrada a análise de variância (ANOVA) realizada para os concretos com substituição de agregados naturais por agregados cerâmicos. Igualmente ao mencionado para a análise anterior, todos os efeitos isolados dos fatores controláveis mostraram-se significativos. Contudo, algumas interações de 2° e 3° ordem não se mostraram significativas nesta análise.

A seguir são demonstradas as análises das variáveis controláveis que se mostraram significativas, bem como de suas interações, as quais tiveram uma influência expressiva na análise de variância (ANOVA) realizada.

4.2.1 Efeito da temperatura de queima da cerâmica no módulo de elasticidade

A figura 43 apresenta o gráfico da influência isolada da temperatura de queima do agregado cerâmico sobre o módulo de elasticidade dos concretos estudados. Na figura 43(a) é apresentada a análise realizada com todos os concretos estudados (presença do concreto referência). Entretanto, na figura 43(b) é apresentado o resultado obtido avaliando-se somente os concretos com a presença de agregado cerâmico na composição.



(a) (b)

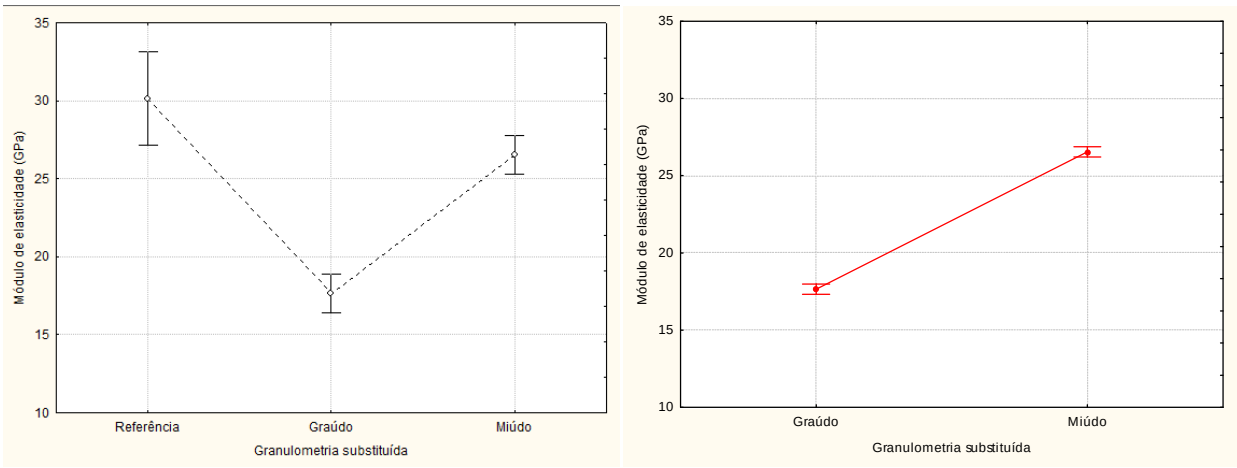
Figura 43: efeito isolado da temperatura de queima da cerâmica no módulo de elasticidade. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico

Ao analisar a figura 43(a), observa-se que a substituição do agregado natural pelo agregado cerâmico reduziu o módulo de elasticidade dos concretos. Tal comportamento era esperado, uma vez que as propriedades físicas e mecânicas do agregado cerâmico são inferiores quando comparadas com as propriedades do agregado natural.

Da mesma forma, quando analisado somente os concretos com substituição de agregado natural por reciclado, observa-se que o aumento da temperatura de queima do grão cerâmico gera uma majoração no módulo de elasticidade do concreto. Tal comportamento está diretamente relacionado com a melhora das características do agregado cerâmico a medida que se aumenta a temperatura de queima do mesmo, conforme mencionado nos ensaios de caracterização dos agregados cerâmicos (ensaios mecânicos e físicos), no item 3.3.4.

4.2.2 Efeito da granulometria substituída no módulo de elasticidade

Na figura 44 são demonstrados os resultados da análise do efeito isolado da granulometria substituída do agregado cerâmico (miúdo ou graúdo) sobre o módulo de elasticidade dos concretos estudados. Onde, na figura 44(a) é apresentada a análise realizada com todos os concretos estudados (presença do concreto referência); na figura 44(b) é apresentada a análise avaliando-se somente os concretos com a presença de agregado cerâmico na composição.



(a) (b)

Figura 44: efeito isolado da granulometria substituída no módulo de elasticidade. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico

Analisando os resultados, figura 44(a), verifica-se que a substituição do agregado natural pelo cerâmico, independente da granulometria (miúdo ou graúdo), gera uma redução no módulo de elasticidade dos concretos. Tal redução está diretamente relacionada com a diminuição da rigidez dos agregados substituídos (miúdo e graúdo). Assim, pode-se dizer que o agregado cerâmico torna-se a fase limitante para o aumento do módulo de elasticidade dos compósitos cimentícios estudados.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) e Neville (1997), os valores de módulo de elasticidade dos concretos são maiores, quanto maior for a quantidade de agregados densos (rígidos) na mistura. Neste sentido, Leite (2001) menciona que também é válida a afirmação de que o aumento da quantidade de agregados porosos na mistura reduz o módulo de elasticidade dos compósitos, conforme observado nos resultados obtidos.

Quando avaliada somente os concretos com a presença de agregados cerâmicos, figura 44(b), nota-se que o agregado graúdo reduz de forma mais significativa o módulo de elasticidade dos concretos, quando comparado com os concretos com a presença de agregado miúdo. Tal comportamento já era esperado, uma vez que o agregado graúdo,

independente se natural ou reciclado, possui grande responsabilidade frente ao módulo de elasticidade do concreto.

Em pesquisa realizada por Cabral (2007), o mesmo comportamento foi observado, onde a substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo reciclado produziu um efeito negativo superior, quando comparado com a substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado.

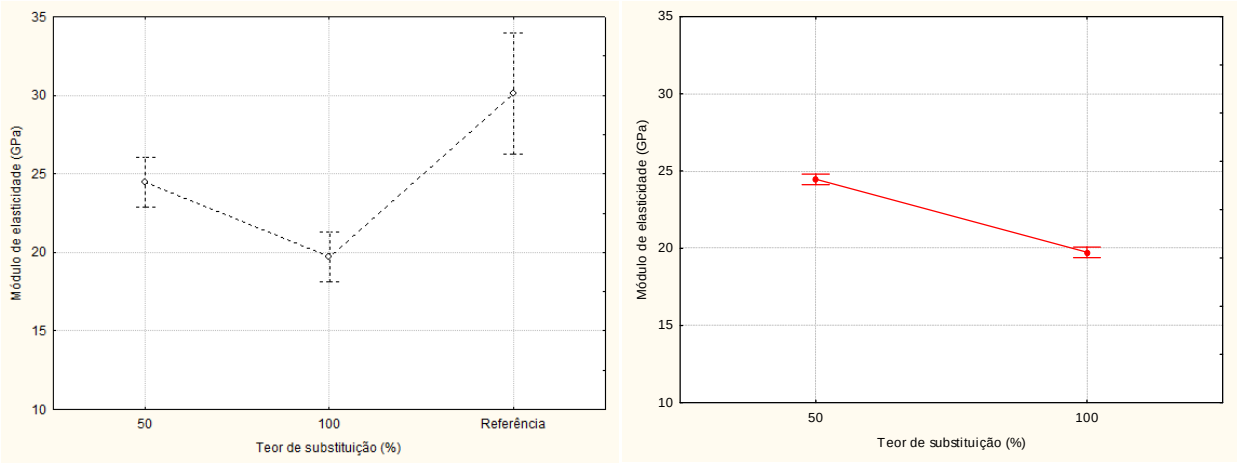
Conjuntamente, supõe-se que tal fato esteja relacionado com as características físicas do agregado cerâmico, como a dimensão máxima e a porosidade do grão, pois observando-se a tabela 16 e a tabela 18, nota-se a maior porosidade, avaliada pela absorção de água, dos agregados graúdos cerâmicos em relação aos agregados miúdos cerâmicos com mesma temperatura de queima.

Conjuntamente, também acredita-se que o efeito da percolação dos cristais gerados pelas reações de hidratação possam ter melhorado as características de rigidez (resistência mecânica) dos agregados miúdos cerâmicos, devido a maior penetração nos grãos. Portanto, tais grãos cerâmicos não causaram uma redução tão significativa nesta propriedade mecânica quanto os agregados graúdos cerâmicos (AgGCer) quando inseridos na composição dos concretos.

4.2.3 Efeito do teor de substituição no módulo de elasticidade

Na figura 45 são demonstrados os resultados da análise do efeito isolado do teor de substituição do agregado cerâmico sobre o módulo de elasticidade dos concretos estudados. Na figura 45(a) é apresentada a análise realizada com todos os concretos estudados (presença do concreto referência); na figura 45(b) é apresentada a análise avaliando-se somente os concretos com a presença de agregado cerâmico na composição.

Analisando os gráficos, percebe-se a redução do módulo de elasticidade dos concretos com a substituição do agregado natural pelo agregado cerâmico. Conforme mencionado anteriormente, tal comportamento já era esperado uma vez que esta propriedade mecânica está fortemente relacionada com a rigidez e, consequentemente, a porosidade das fases que compõem o concreto. Assim, a presença de agregados cerâmicos na composição do concreto aumenta a capacidade de deformação do material, ou seja, gera uma redução do módulo de elasticidade do compósito cimentício.



(a) (b)

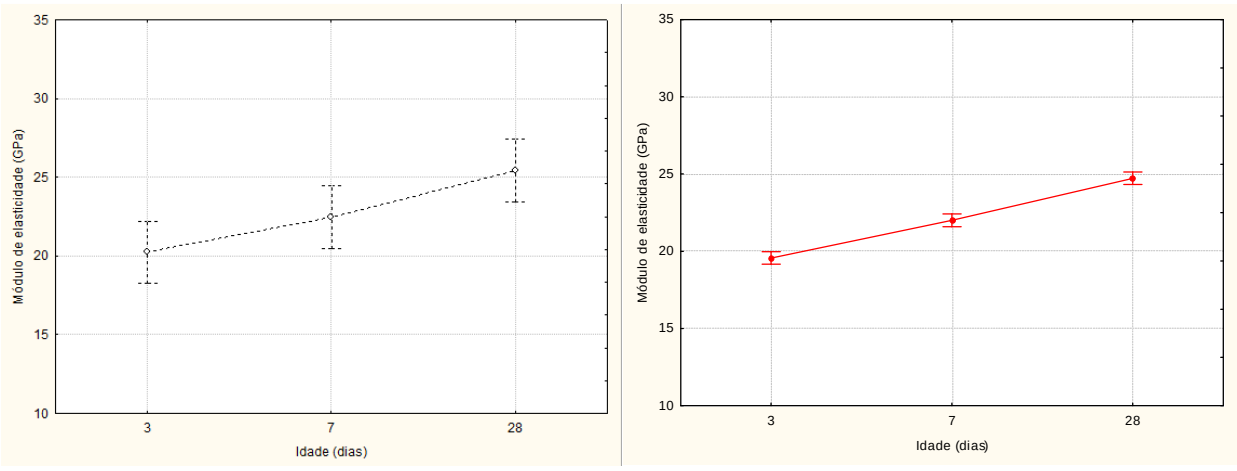
Figura 45: efeito isolado do teor de substituição do agregado cerâmico no módulo de elasticidade. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico

Conjuntamente, é válido afirmar que à medida que ocorre o aumento da quantidade de agregado cerâmico na composição do concreto, ocorre uma redução mais significativa no módulo de elasticidade do material. Tal comportamento também foi observado por inúmeros pesquisadores, dentre eles pode-se citar Leite (2001), Debieb e Kenai (2008) e Alves *et al*. (2014).

4.2.4 Efeito da idade no módulo de elasticidade

Na figura 46 são apresentados os resultados da análise do efeito isolado da idade sobre o módulo de elasticidade dos concretos estudados. Na figura 46(a) é demonstrada a análise realizada com todos os concretos estudados (presença do concreto referência), e na figura 46(b) é demonstrada a análise avaliando-se somente os concretos com a presença de agregado cerâmico na composição.

A partir da análise dos dois gráficos, observa-se o aumento do módulo de elasticidade com o aumento da idade. Tal comportamento já era esperado uma vez que é de conhecimento geral que com o passar do tempo ocorre um aumento da resistência mecânica (rigidez) dos concretos devido ao maior grau de hidratação do cimento, assim possibilitando também um aumento ao módulo de elasticidade (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2006).



(a) (b)

Figura 46: efeito isolado da idade no módulo de elasticidade. (a) Análise considerando o concreto referência. (b) Análise dos concretos somente com agregado cerâmico

4.2.5 Efeito da interação 'Temperatura x Granulometria' no módulo de elasticidade

O resultado da análise de variância (ANOVA) da interação entre a temperatura de queima do material cerâmico e a granulometria substituída nos concretos estudados sobre o módulo de elasticidade é demonstrada na figura 47. Analisando o gráfico, nota-se que a granulometria substituída exerce forte influência nos resultados do módulo de elasticidade dos concretos avaliados, independente da temperatura de queima do material cerâmico.

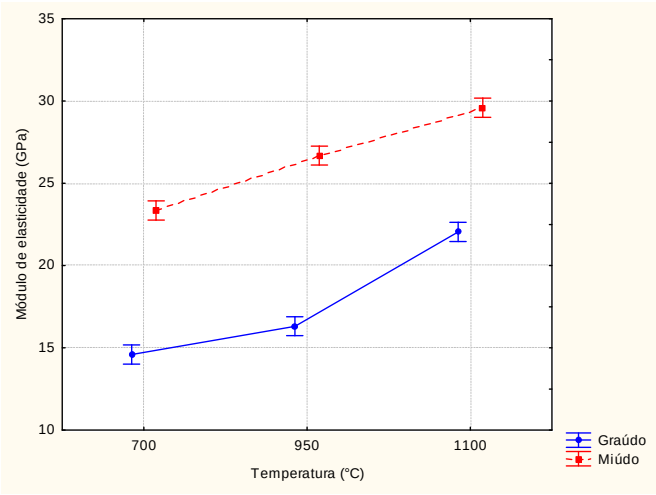


Figura 47: efeito da interação entre a temperatura e a granulometria substituída sobre o módulo de elasticidade

Tal comportamento está diretamente relacionado com as características físicas e mecânicas do agregado cerâmico, onde o aumento da temperatura de queima do material gera o aumento da sua resistência mecânica e da sua rigidez, bem como acarreta uma redução da

sua porosidade (absorção de água). Assim sendo, possibilita um aumento do módulo de elasticidade dos compósitos cimentícios estudados.

Esta melhora das características do agregado cerâmico devido a sua temperatura de queima é fortemente evidenciada nos resultados dos concretos com substituição de agregados graúdos. Para as substituições de AgGCer-950°C e AgGCer-1100°C, percebe-se fortemente a melhora das características dos grãos, sendo evidenciada pelo aumento do módulo de elasticidade dos concretos em 11,8% e 51,1%, em relação ao concreto com AgGCer-700ºC, respectivamente.

Entretanto para as substituições de agregados miúdos um comportamento semelhante foi mantido para as três temperaturas avaliadas. O aumento do módulo de elasticidade, em relação ao concreto com AgMCer-700ºC, foi de 14,3% e 26,7% para os concretos com AgMCer-950°C e AgMCer-1100°C, respectivamente. Acredita-se que tal fato esteja relacionado não somente com a dimensão do agregado, mas, principalmente, pelo aumento da rigidez dos grãos, devido ao fortalecimento dos mesmos pela precipitação dos cristais gerados pelas reações de hidratação do cimento.

4.2.6 Efeito da interação ‘Teor de substituição x Granulometria’ no módulo de elasticidade

Na figura 48 é apresentado o resultado da análise realizada para a interação entre o teor de substituição dos agregados naturais por agregados cerâmicos e a granulometria substituída sobre o módulo de elasticidade dos concretos estudados.

A partir da análise do gráfico, percebe-se que a substituição total do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo cerâmico gera uma redução mais significativa do módulo de elasticidade, de 30,2%, quando comparada com a redução em decorrência da substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo cerâmico, de 11,2%. Tal comportamento está diretamente relacionado com as características físicas e mecânicas do agregado cerâmico, tais como resistência mecânica, rigidez e porosidade, as quais são inferiores quando comparadas com as características do agregado natural.

Observa-se ainda que a redução do módulo de elasticidade dos concretos com substituição de agregados miúdos ocorre de forma mais tênue, quando da substituição parcial para a total. Supõe-se que tal comportamento esteja relacionado com a teoria de percolação dos cristais gerados pela hidratação do cimento. Assim, mesmo com a maior quantidade de agregado cerâmico na mistura, a redução do módulo de elasticidade não se mostrou tão

importante quanto a evidenciada para a substituição total do agregado graúdo natural pelo AgGCer.

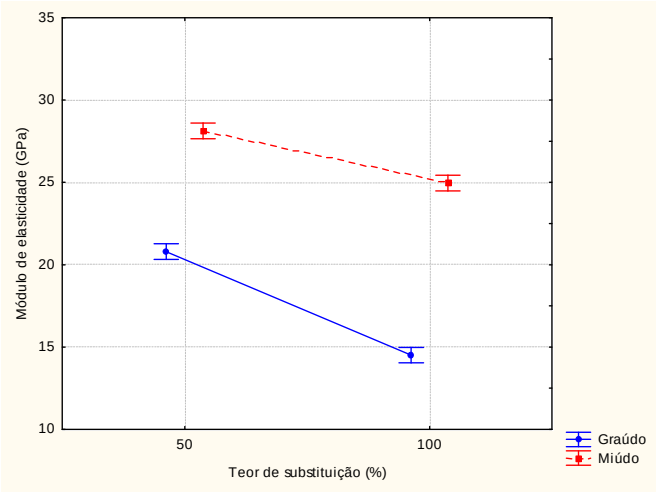


Figura 48: efeito da interação entre o teor de substituição e a granulometria substituída sobre o módulo de elasticidade

Portanto, acredita-se que o AgMCer seja preenchido pelos cristais formados, assim se tornando um grão mais resistente, com maior rigidez. Diferente do que ocorre para o AgGCer, onde o fortalecimento é gerado somente na zona de transição entre o agregado e a pasta, devido a sua maior dimensão. Deste modo, não origina um fortalecimento no interior do grão, permitindo com que a parte interna do mesmo (miolo) não tenha sua rigidez majorada.

4.2.7 Efeito da interação ‘Teor de substituição x Idade’ no módulo de elasticidade

Na figura 49 é apresentado o resultado da análise realizada para a interação entre o teor de substituição dos agregados naturais por agregados cerâmicos e a idade sobre o módulo de elasticidade dos concretos estudados.

Analisando o gráfico, percebe-se que para todas as idades analisadas, o módulo de elasticidade é menor com a substituição total dos grãos naturais pelos grãos cerâmicos, em virtude das características físicas e mecânicas do agregado cerâmico. Desta forma, é possível observar uma diferença entre os resultados obtidos em função do teor de substituição dos agregados naturais pelos agregados cerâmicos e da idade, sendo de 17,9%, aos 3 dias, de 19,3%, aos 7 dias e de 20,5%, aos 28 dias.

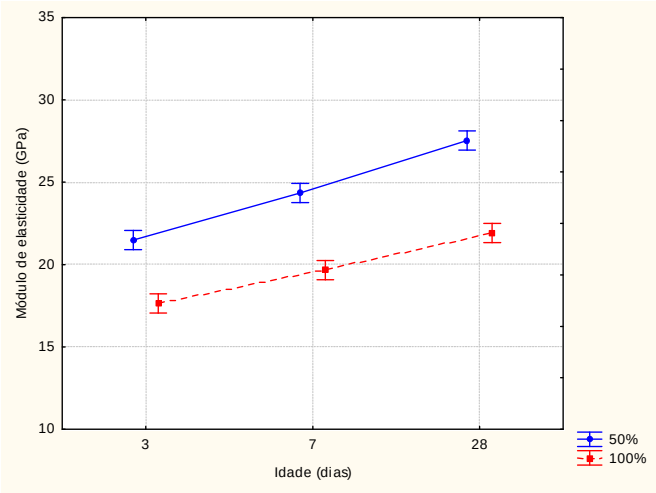


Figura 49: efeito da interação entre o teor de substituição e a idade sobre o módulo de elasticidade

Como pode ser observado, a diferença entre os resultados, em função da interação avaliada, aumenta levemente ao longo do tempo. Acredita-se que tal comportamento esteja diretamente relacionado não somente com a ocorrência da hidratação do cimento, a qual possibilita o aumento da resistência da pasta e, consequentemente, aumento do módulo de elasticidade do concreto, mas também com a menor quantidade de agregado cerâmico na mistura (substituição parcial), o qual gera uma menor influência na propriedade avaliada.

4.2.8 Efeito da interação 'Granulometria x Idade' no módulo de elasticidade

Na figura 50 é apresentado o resultado obtido para a análise de variância entre a interação da granulometria substituída e a idade frente ao módulo de elasticidade dos concretos. Ao analisar o gráfico, percebe-se a diferença significativa entre os resultados do módulo de elasticidade, em virtude da granulometria substituída, sendo tais variações de 50,7%, 51,9% e 48,7%, aos 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

Além disso, nota-se que entre os 3 e 7 dias, o ganho no módulo de elasticidade foi levemente superior para as substituições com agregado miúdo, conforme observado pela inclinação das retas, sendo este de 12,8% contra 11,9%, para os concretos com substituição de agregado graúdo. Contudo com o aumento das reações de hidratação, tal crescimento é ligeiramente invertido, sendo de 12,5%, para os concretos com substituição de agregado miúdo, e de 13,8%, para os concretos com a presença de agregado graúdo cerâmico.

No entanto, mesmo com taxas de crescimento semelhantes, os concretos com a presença de agregado graúdo cerâmico possuem resultados de módulo de elasticidade significativamente inferiores, uma vez que as características físicas e mecânicas do grão

cerâmico, em função da sua granulometria, influenciam diretamente tal propriedade mecânica.

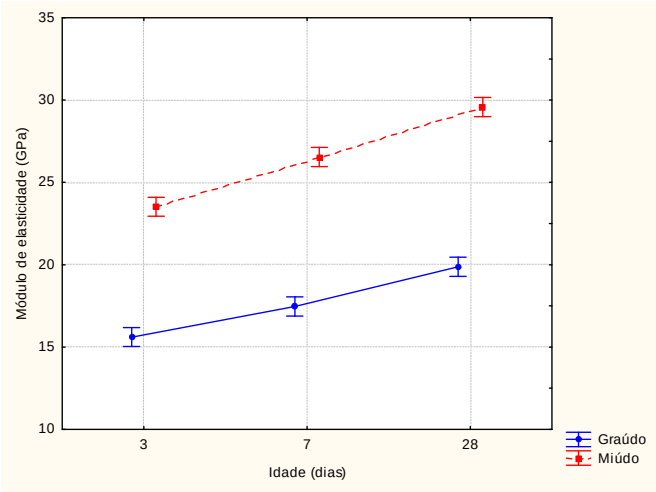


Figura 50: efeito da interação entre a granulometria substituída e a idade sobre o módulo de elasticidade

Contudo, acredita-se que além da qualidade do agregado cerâmico, a percolação dos cristais gerados para o interior dos mesmos exerça influência sobre tal propriedade. Neste sentido, com o aumento da idade e, consequentemente, o maior grau de hidratação do cimento, os agregados miúdos cerâmicos foram fortalecidos em seu interior pela penetração dos cristais, tornando-se mais resistentes, possibilitando um aumento de rigidez frente às deformações. Enquanto, os agregados graúdos cerâmicos foram fortalecidos somente na sua zona de transição, permanecendo com o seu miolo (parte interna) frágil, sendo este o limitador para o aumento do módulo de elasticidade dos concretos estudados.

4.2.9 Efeito da interação 'Temperatura x Teor de substituição x Idade' no módulo de elasticidade

Na figura 51 é apresentado o resultado da análise de variância da interação de 3° ordem entre a temperatura de queima da cerâmica, o teor de substituição do agregado natural por agregado cerâmico e a idade, frente ao módulo de elasticidade dos concretos.

Ao analisar o gráfico, nota-se que com o aumento da temperatura de produção da cerâmica, as diferenças dos resultados de módulo de elasticidade entre os concretos com substituição parcial (50%) e substituição total (100%) são reduzidas para todas as idades analisadas. No entanto, as variações são mais evidentes para a idade de 3 dias, em virtude da maior dependência da qualidade do agregado cerâmico, onde estas foram de 29,5%, 17% e 9,8%,

para os concretos com agregados com temperaturas de queima de 700ºC, 950ºC e 1100ºC, respectivamente.

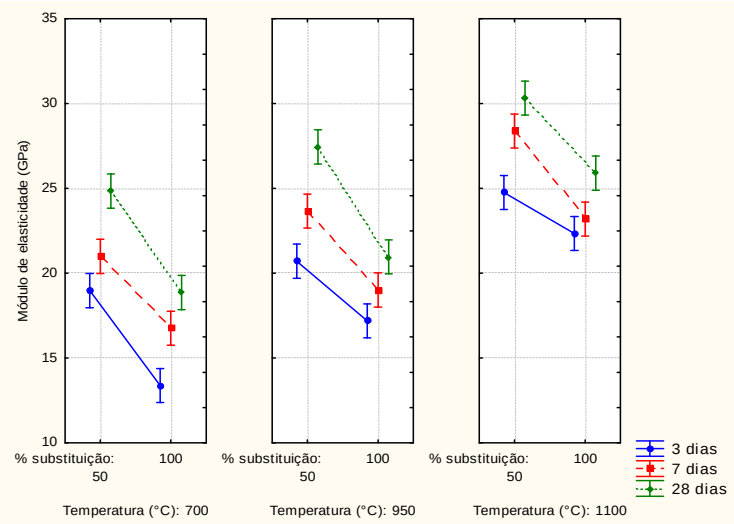


Figura 51: efeito da interação entre a temperatura, o teor de substituição e a idade sobre o módulo de elasticidade

Conjuntamente, também é possível observar que com o aumento da temperatura de queima dos grãos cerâmicos, dos 3 aos 28 dias as diferenças entre os resultados de módulo de elasticidade dos concretos com substituição total (100%) são reduzidas, sendo tais variações de 41%, 21,9% e 15,9%, para os concretos com agregados cerâmicos produzidos com temperaturas de queima de 700ºC, 950ºC e 1100ºC, respectivamente.

Acredita-se que estes resultados tenham sido diretamente influenciados pelas características dos agregados cerâmicos, onde a temperatura de queima é o fator mais importante para a obtenção de grãos com reduzida estrutura interna de poros, tornando os agregados cerâmicos menos porosos, mais resistentes e com uma maior rigidez.

4.3 RETRAÇÃO POR SECAGEM LIVRE

A norma americana ASTM C157/C157M (2008), utilizada para este ensaio, preconiza a determinação experimental da retração por secagem mais o incremento da retração autógena, após 28 dias de cura submersa. Como hipótese simplificadora, pode ser considerada desprezível a contribuição da parcela da retração autógena, fato este determinante para o emprego apenas do termo “retração por secagem” para denominação do resultado deste ensaio. Logo, para esta pesquisa, o termo retração por secagem foi utilizado, contudo é sabido que existe uma parcela de contribuição de origem térmica e autógena (LOPES, 2011).

Nesta pesquisa, a determinação da variação unidimensional livre dos concretos foi extremamente relevante uma vez que se desejava verificar o comportamento dos agregados cerâmicos como agentes mitigadores do fenômeno da retração por secagem. Neste sentido, a avaliação das características físicas e mecânicas dos diferentes tipos de agregados cerâmicos estudados mostrou-se relevante, uma vez que tal propriedade exerce influência direta sobre a durabilidade do compósito cimentício. Contudo, é importante ressaltar que o ensaio de retração por secagem livre apresenta grande variabilidade. Tal comportamento é atribuído a um somatório de fatores, tais como a sensibilidade do equipamento de leitura (relógio comparador horizontal), a magnitude dos valores medidos e a falha humana.

Os corpos de prova foram retirados de água saturada em cal com idade de 14 dias, momento em que iniciou o processo de secagem. Portanto, considera-se que a medição do fenômeno da retração por secagem inicie neste instante. Cabe salientar que a partir dos 14 dias, os fenômenos da deformação térmica e da retração autógena contribuem com uma parcela pequena na variação dimensional dos concretos, devido ao elevado grau de hidratação das misturas. Assim, considera-se que a medição realizada esteja relacionada com a retração devido à secagem do compósito cimentício.

A figura 52 apresenta a curva média de retração por secagem do concreto referência. O resultado de retração por secagem de cada concreto corresponde à média aritmética de três corpos de prova. O início do processo de secagem (14 dias) é marcado pelo eixo vertical no gráfico. Os resultados individuais encontram-se no Apêndice E.

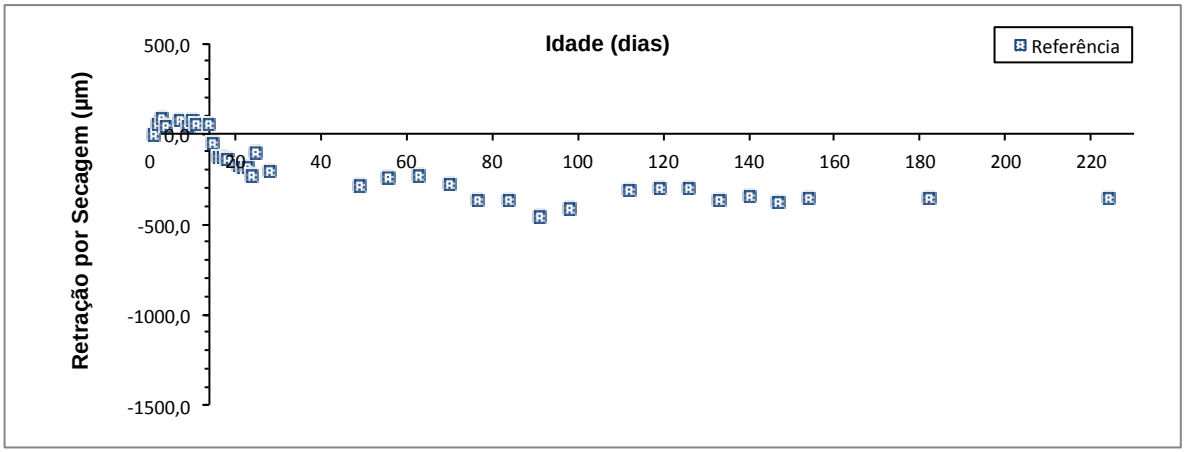
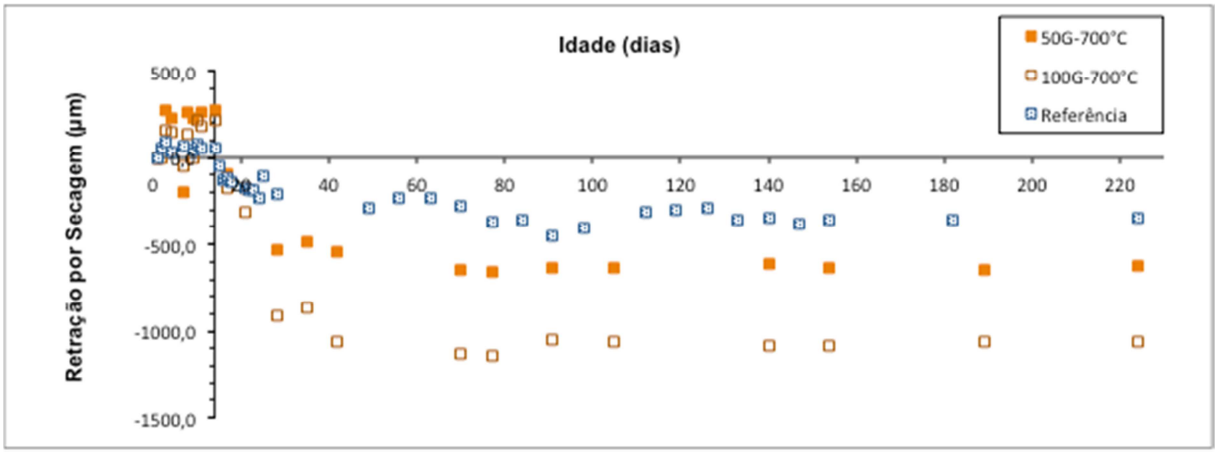


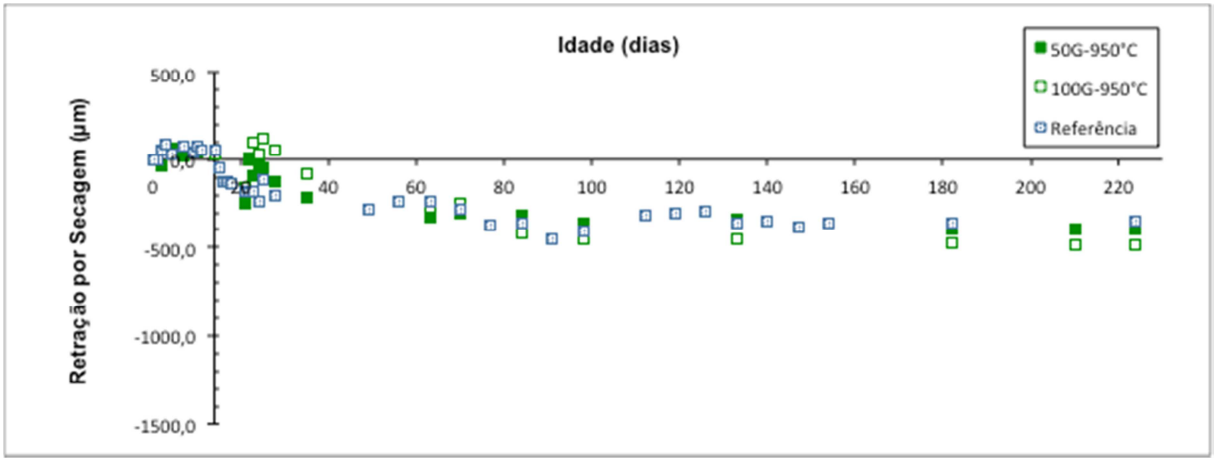
Figura 52: Resultado médio de retração por secagem livre do concreto referência

Na figura 53(a), (b) e (c) são apresentados os resultados médios de retração por secagem livre dos concretos com substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo cerâmico. Em todos os gráficos, está demonstrado também o resultado obtido neste ensaio para o concreto referência, visando facilitar a análise comparativa dos resultados obtidos neste estudo. O início do processo de secagem (14 dias) é marcado pelo eixo vertical nos gráficos.

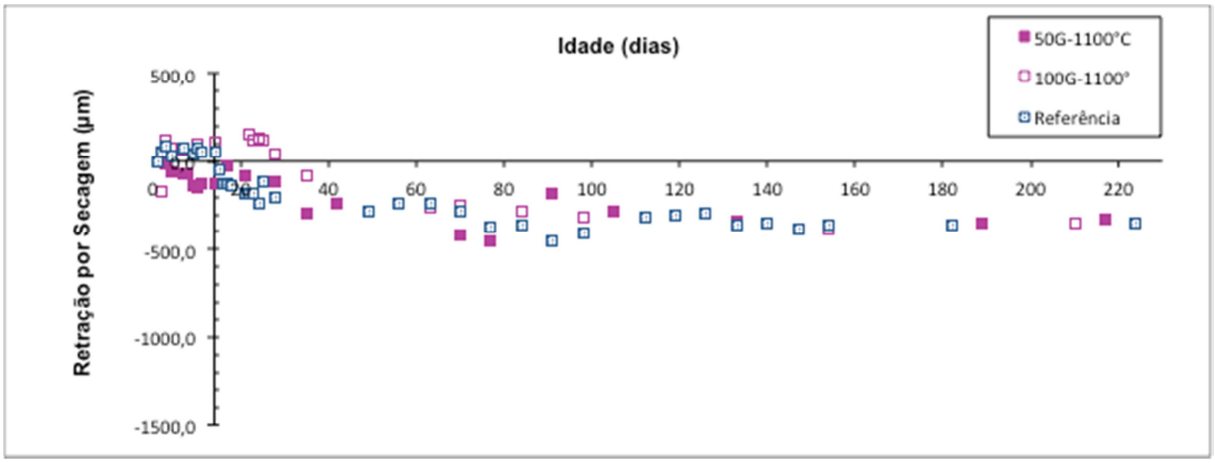
Analisando a figura 53(a), percebe-se que a substituição total do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo cerâmico (100G-700ºC), resultou em um aumento significativo da magnitude do fenômeno da retração por secagem quando comparado com os resultados do concreto referência. Acredita-se que tal comportamento esteja diretamente relacionado com as características físicas e mecânicas do agregado cerâmico (700ºC). A total substituição do agregado graúdo natural pelo cerâmico, ocasionou uma redução do módulo de elasticidade do concreto produzido, como demonstrado anteriormente (tabela 25), auxiliando para o aumento da retração por secagem.



(a)



(b)



(c)

Figura 53: resultados médios de retração por secagem livre dos concretos com substituição de agregados graúdos, com temperaturas de queima distintas, sendo (a) 700°C. (b) 950°C. (c) 1100°C

No entanto, a partir da análise da figura 53(a), também observa-se que para a substituição parcial do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo cerâmico (50G-700ºC), a intensidade do fenômeno estudado mostrou-se semelhante ao resultado obtido para o concreto referência. Acredita-se então que o agregado graúdo cerâmico (700ºC) tenha sido eficiente como um agente de cura interna, uma vez que mesmo reduzindo o módulo de elasticidade do concreto estudado (tabela 25), por ser um agregado com menor resistência mecânica (≅11 MPa) quando comparado com o agregado graúdo natural (218,6 MPa), tenha auxiliado na redução da magnitude da retração por secagem, mantendo-a semelhante a do concreto referência.

Conjuntamente, acredita-se que em função da elevada porosidade do material cerâmico, demonstrado pelos resultados de absorção de água, tabela 18, tenha ocorrido uma precipitação dos cristais gerados pela hidratação do cimento, na zona de transição, assim auxiliando no aumento da resistência mecânica (rigidez) do agregado cerâmico. Tal comportamento será abordado com uma maior profundidade nos resultados obtidos pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), no subitem 4.5.1.

Observando a figura 53(b) e a figura 53(c), nota-se que independente do teor de substituição (50% ou 100%) do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo cerâmico (950ºC e 1100ºC), a magnitude do fenômeno da retração por secagem tornou-se equivalente ou até mesmo ligeiramente inferior ao resultado obtido para o concreto referência. Acredita-se que este comportamento esteja relacionado com a melhora das propriedades mecânicas do agregado graúdo cerâmico queimado nas temperaturas de 950ºC e 1100ºC, quando

comparado com o agregado cerâmico produzido à 700ºC, conforme mencionado anteriormente na caracterização mecânica do material, subitem 3.3.4.

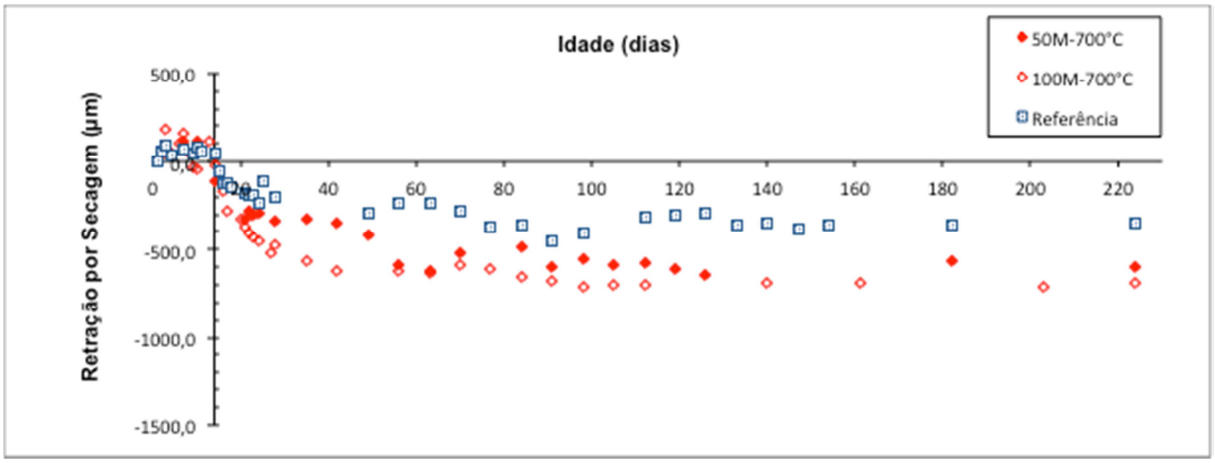
Contudo, além destas melhoras mecânicas do agregado graúdo cerâmico, supõem-se que para a obtenção de tais resultados tenha ocorrido um equilíbrio entre as propriedades físicas e mecânicas do agregado graúdo cerâmico com o concreto produzido. Onde, mesmo com a queda das propriedades mecânicas do agregado cerâmico em relação ao agregado natural, pressupõem-se que tenha ocorrido o processo de cura interna no compósito cimentício. Portanto, auxiliando para a redução da intensidade da retração por secagem nos concretos.

Além deste fenômeno, acredita-se na ocorrência da a precipitação dos cristais gerados pela hidratação do cimento, assim tornando o agregado graúdo cerâmico mais resistente. Logo, observou-se uma redução menos significativa do módulo de elasticidade dos concretos produzidos com tais agregados graúdos cerâmicos, assim a magnitude da retração por secagem manteve-se semelhante a do concreto referência, independente do teor de substituição de agregado graúdo.

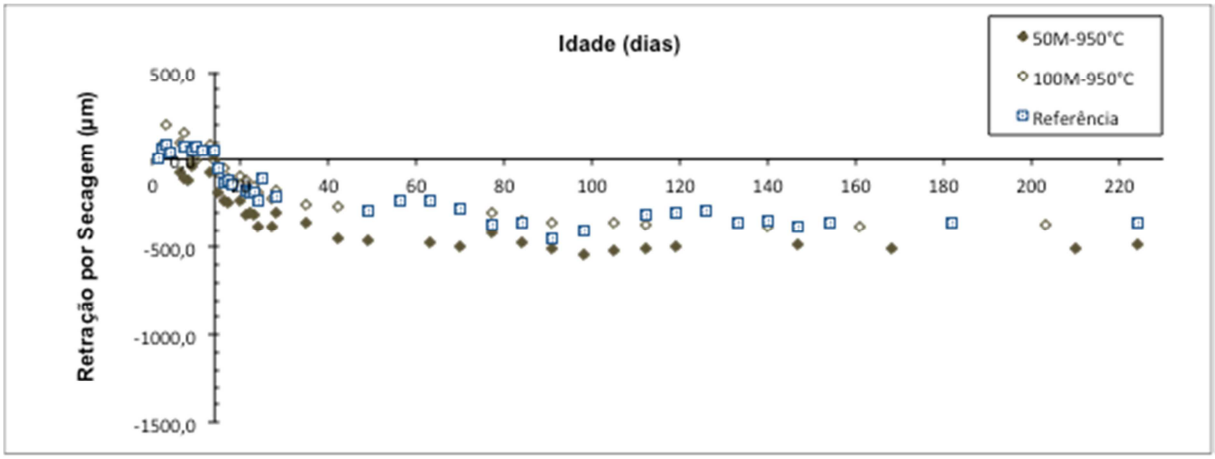
Neste sentido, é possível verificar a potencialidade do uso de agregados graúdos cerâmicos como agentes mitigadores do fenômeno da retração por secagem livre em compósitos cimentícios. Contudo, há a necessidade de mais estudos, uma vez que tais resultados estão relacionados com um material cerâmico específico, bem como com o seu emprego em concretos com resistências próximas a 60 MPa.

Na figura 54(a), (b) e (c) são apresentados os resultados médios de retração por secagem livre dos concretos com substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo cerâmico. Em todos os gráficos, está demonstrado também o resultado deste ensaio referente ao concreto referencia, visando facilitar a análise comparativa dos resultados obtidos neste estudo.

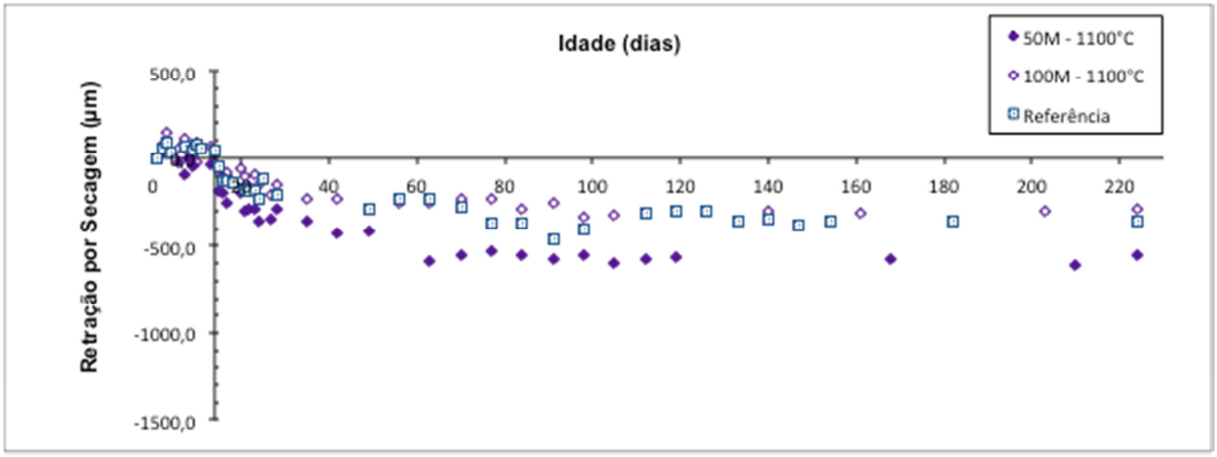
Analisando o comportamento dos resultados obtidos, percebe-se que as características físicas e mecânicas do agregado miúdo cerâmico influenciam diretamente na intensidade da retração por secagem dos concretos estudados. Onde, a partir da análise da figura 54(a), (b) e (c), nota-se que a intensidade do fenômeno foi mais acentuada para os concretos com substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo cerâmico, produzido a uma temperatura de queima de 700ºC.



(a)



(b)



(c)

Figura 54: resultados médios de retração por secagem livre dos concretos com substituição de agregados miúdos, com temperaturas de queima distintas, sendo (a) 700°C. (b) 950°C. (c) 1100°C

Conjuntamente, percebe-se que estes agregados miúdos cerâmicos (700ºC) não demonstraram um comportamento eficiente frente ao seu emprego como um agente de cura interna, uma vez que a intensidade da retração por secagem foi majorada quando comparada com a do concreto referência.

Contudo, para as substituições do agregado miúdo cerâmico, produzidos com temperaturas de queima de 950ºC e 1100ºC, os resultados demonstraram-se mais satisfatórios, uma vez que a intensidade do fenômeno aproximou-se dos resultados obtidos pelo concreto referência.

Dentro deste contexto, acredita-se que a eficiência de agregados cerâmicos, independente da sua granulometria (miúdos ou graúdos), como agentes mitigadores do fenômeno da retração por secagem (agentes de cura interna), deve ser avaliada a partir de uma série de fatores. Tais parâmetros devem estar relacionados não só com características do próprio grão cerâmico, como a sua resistência mecânica, módulo de elasticidade, porosidade e capacidade de absorção/desorção de água, mas também com características do compósito cimentício onde os mesmos serão adicionados.

Portanto, conjectura-se que deva haver um equilíbrio entre as propriedades do agente de cura interna e do compósito cimentício no qual os mesmos serão adicionados. Para que desta forma, seja possível verificar a eficiência e a viabilização do emprego de resíduos de construção e demolição, independente de sua composição (cerâmica, argamassa, concreto), como matéria-prima para a redução do fenômeno da retração por secagem em compósitos cimentícios, assim minimizando a tendência de fissuração das estruturas de concreto.

4.4 RETRAÇÃO POR SECAGEM RESTRINGIDA

A retração por secagem restringida é uma propriedade extremamente importante frente à avaliação da eficiência do agregado cerâmico como um agente mitigador do fenômeno da retração por secagem (agente de cura interna), uma vez que possibilita reproduzir o comportamento real do compósito cimentício, quando sujeito às restrições internas e/ou externas.

Cabe ressaltar que o processo de secagem dos corpos de prova (anéis) iniciaram com idade de 1 dia, momento em que os mesmos foram desformados. Assim, o período de início da secagem entre os cp’s avaliados pelo ensaio de retração por secagem livre e de retração por secagem restringida possuem idades distintas (grau de hidratação).

Desta forma, os resultados obtidos para o fenômeno da retração por secagem restringida possuem uma parcela de contribuição de origem térmica (deformação térmica) e autógena (retração autógena).

Na figura 55 são apresentados os resultados médios diários para o ensaio de retração por secagem restringida para o concreto referência. Como mencionado anteriormente, em função do número de equipamentos disponíveis, somente 1 corpo de prova foi avaliado para cada um dos traços de concreto estudados. Os resultados individuais diários deste ensaio encontram-se no Apêndice F.

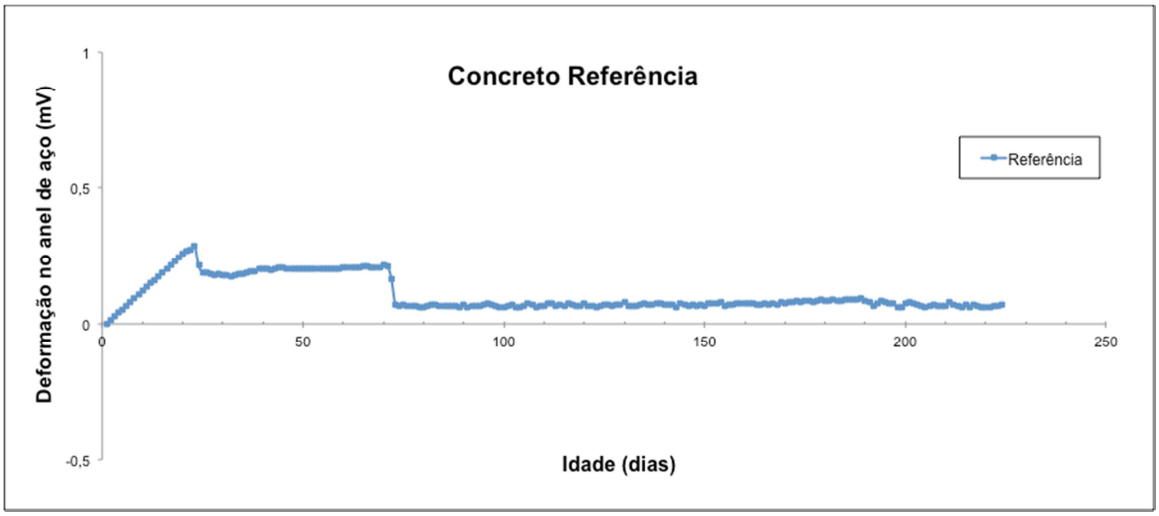


Figura 55: resultados médios diários da deformação do concreto no anel de aço - concreto referência

Os dados contidos nos gráficos representam os valores da tensão diária média imposta pelo concreto no anel de aço (núcleo). Segundo Mokarem, Weyers e Lane (2005), à medida que o concreto retrai, uma deformação à compressão é produzida no anel de aço (núcleo). Esta deformação é balanceada pelas deformações à tração que ocorrem no compósito cimentício. No momento em que acontece a primeira fissura no concreto, estas deformações e as tensões geradas sobre o núcleo de aço são aliviadas.

Analisando a figura 55, percebe-se uma leve queda na tensão sofrida pelo núcleo de aço, em duas idades distintas, sendo estas aos 23 e aos 71 dias, respectivamente. Tal comportamento representa o acontecimento de um alívio das tensões geradas sobre o anel de aço e das deformações do compósito cimentício, o qual evidencia a ocorrência de fissuração no concreto referência.

Como explicitado no item 3.5.2.2, a abertura das fissuras presentes no concreto referência foram medidas com o auxílio de um fissurômetro. Tais medições foram realizadas em três locais distintos da fissura, sendo estas em sua parte superior, em um ponto central e em um parte inferior, assim visando avaliar o ponto em que apresentava a maior abertura.

Desta forma, foi definida a abertura da fissura como sendo a maior leitura obtida no comprimento da mesma, conforme mencionado anteriormente. Para o concreto referência, as fissuras apresentaram abertura de 0,10 mm e 0,20 mm, correspondente às idades de 23 e 71 dias, respectivamente. Na figura 56 são demonstradas tais aberturas das fissuras presentes no concreto referência, as quais apresentam uma abertura total de 0,30mm.

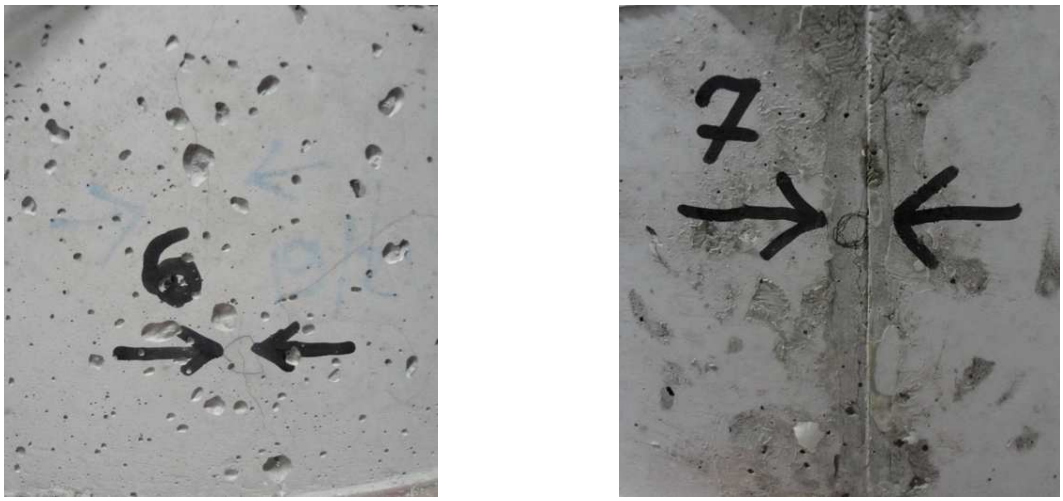
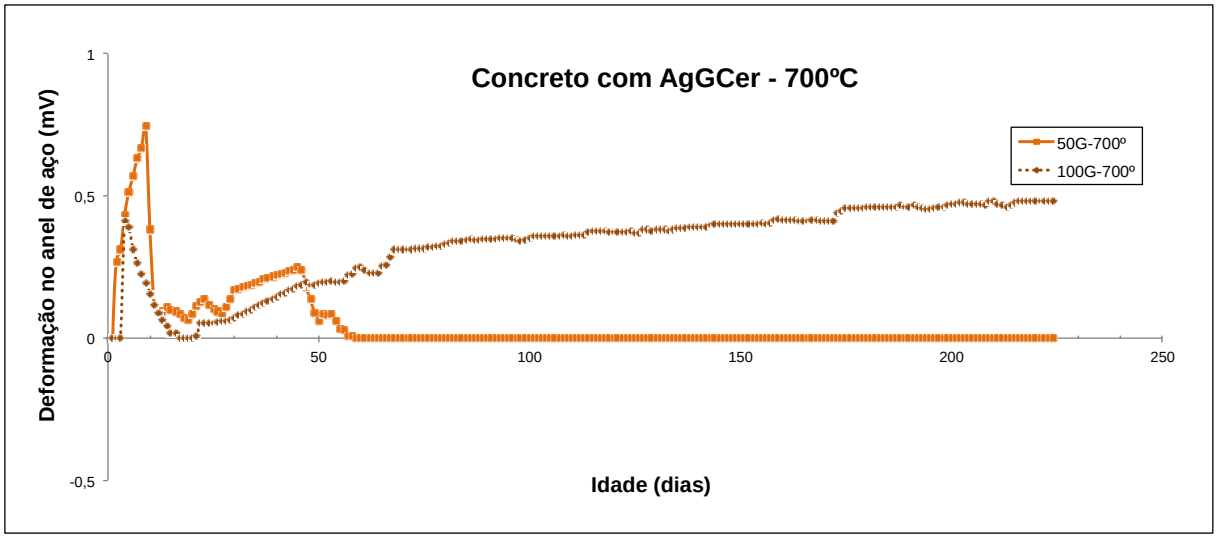


Figura 56: abertura das fissuras do concreto referência

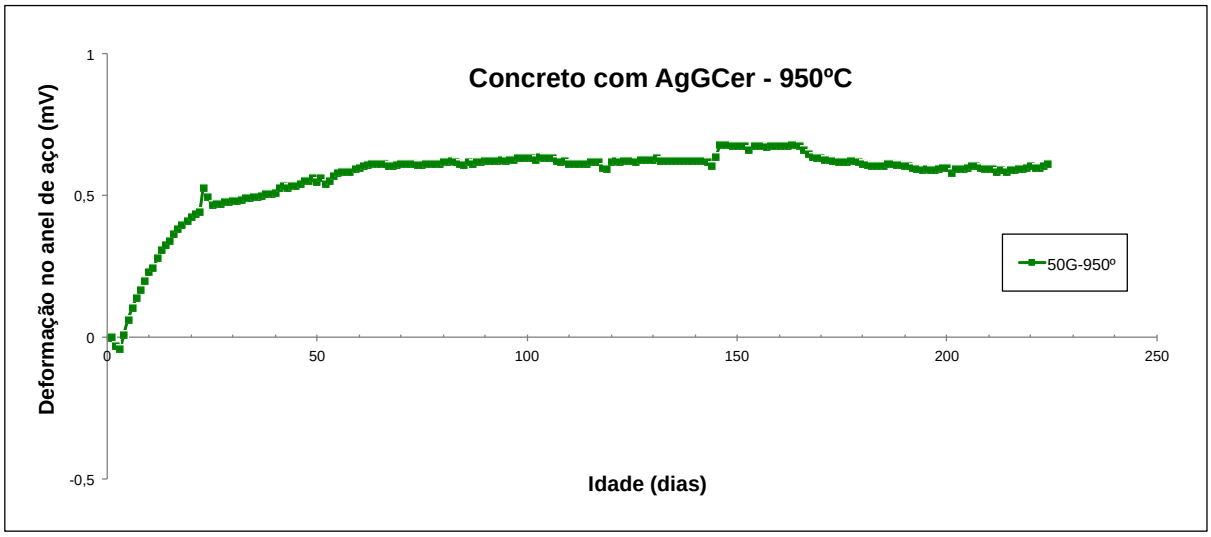
Na figura 57 são apresentados os resultados médios diários obtidos no ensaio de retração por secagem restringida, para os concretos com substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo cerâmico (AgGCer). De forma a facilitar a visualização dos resultados, as figuras foram plotadas agrupando-se os traços com mesma temperatura de queima dos agregados graúdos cerâmicos empregados nos compósitos. Os resultados individuais diários deste ensaio encontram-se no Apêndice F.

Os resultados obtidos no ensaio de retração por secagem restringida para os concretos 100G-950ºC, 50G-1100ºC e 100G-1100ºC, foram descartados devido a uma falha do sistema de medição. Neste sentido, os mesmos foram desconsiderados para a análise dos resultados, somente sendo apresentados os resultados referentes ao número e a abertura de fissuras presentes nestes concretos.

A figura 57(a) apresenta os resultados médios diários dos concretos com agregados graúdos cerâmicos produzidos à 700ºC. Analisando tal figura, percebe-se que o traço 50G-700ºC apresentou duas quedas de tensão nas idades de 9 e 45 dias, o que representa as idades em que ocorreram as aberturas das fissuras no concreto. No entanto, para o traço 100G-700ºC, observa-se somente em um momento a ocorrência da queda de tensão, sendo esta ocorrida na idade de 4 dias, conforme pode ser observado ao analisar a figura 57(a).



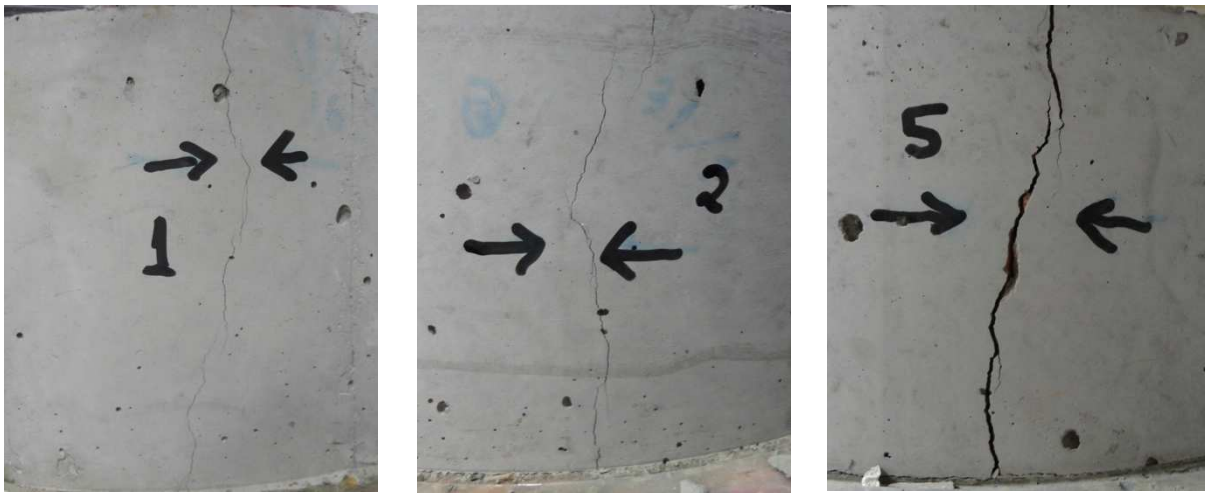
(a)



(b)

Figura 57: resultados médios diários da deformação do concreto no anel de aço, com a presença de agregados graúdos cerâmicos, com temperatura de queima de (a) 700ºC. (b) 950ºC

Como mencionado anteriormente, a abertura das fissuras foi medida com o auxílio de um fissurômetro. A abertura das duas fissuras presentes no concreto 50G-700ºC foram de 0,35 mm, correspondente às duas idades, sendo estas de 9 e 45 dias; enquanto que o concreto 100G-700ºC apresentou somente 1 fissura, contudo a abertura desta foi superior, sendo de 3,70 mm. Na figura 58 são demonstradas as aberturas das fissuras existentes nos concretos 50G-700ºC e 100G-700ºC, as quais totalizam aberturas de 0,70mm e 3,70mm, respectivamente, até a idade analisada neste estudo (224 dias).



(a) (b)

Figura 58: abertura das fissuras nos traços com substituição de agregado graúdo natural por cerâmico (700ºC), com teores de substituição de (a) 50%. (b) 100%

Comparando os resultados obtidos entre o concreto referência e os concretos com presença de agregado graúdo produzido à 700ºC, observa-se que a substituição parcial (50%) do agregado graúdo causou um comportamento semelhante ao concreto, uma vez que o número de fissuras foi análogo. No entanto, a abertura das fissuras do concreto 50G-700ºC foram levemente superiores, quando comparadas com as aberturas das fissuras do concreto referência.

Contudo, quando analisado o resultado do concreto com substituição total (100%) do agregado graúdo, percebe-se que mesmo havendo uma redução no número de fissuras, a abertura desta foi muito superior, como pode ser verificado na figura 58(b). Assim sendo, a substituição total do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo cerâmico (700ºC) gerou uma redução das restrições internas do concreto, devido às características do próprio agregado cerâmico. Desta forma, mesmo que o agregado cerâmico tenha auxiliado na ocorrência do procedimento de cura interna, acredita-se que as suas propriedades mecânicas foram o fator preponderante para o aumento da abertura da fissura, parâmetro prejudicial para a durabilidade do compósito cimentício.

Na figura 57(b) são apresentados os resultados médios diários do concreto com substituição parcial (50%) dos agregados graúdos cerâmicos produzidos a 950ºC. Analisando a figura, observa-se que o traço 50G-950ºC apresentou uma queda de tensão aos 2 dias, o que representa a idade em que ocorreu a abertura de uma fissura no concreto, figura 57(b).

A abertura da fissura presente no concreto 50G-950ºC foi de 0,15 mm, correspondente a idade de 2 dias. Já no traço 100G-950ºC, a abertura das fissuras foram de 1,90 mm, 0,10 mm e 0,25 mm, correspondente as idades de 2, 4 e 13 dias, respectivamente. A figura 59

demonstra algumas das fissuras existentes nos concretos 50G-950ºC e 100G-950ºC, as quais totalizam aberturas de 0,15mm e 2,25mm, respectivamente, até a idade analisada neste estudo (224 dias).

(a) (b)

Figura 59: abertura das fissuras nos traços com substituição de agregado graúdo natural por cerâmico (950ºC), com teores de substituição de (a) 50%. (b) 100%

De acordo com os resultados, observa-se que a substituição total do agregado graúdo natural pelo agregado cerâmico, produzido à 950ºC, apresentou um número de fissuras superior (3) quando comparado ao concreto com substituição parcial (1). Acredita-se que tal comportamento esteja diretamente relacionado com as propriedades mecânicas do agregado cerâmico, conforme mencionado anteriormente.

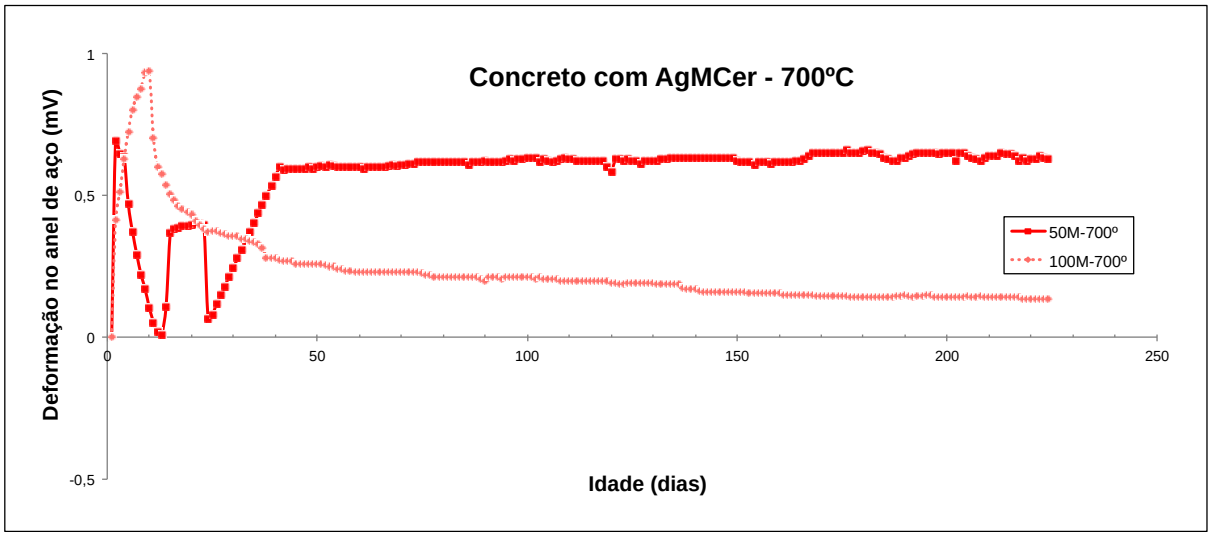
Desta forma, mesmo que o agregado cerâmico possibilite a ocorrência do procedimento de cura interna do concreto, suas características mecânicas inferiores (resistência mecânica e, por consequência, o módulo de elasticidade) quando comparadas às do agregado natural, acabam por reduzir o módulo de elasticidade do compósito cimentício, assim gerando uma maior tendência de fissuração. Logo, o concreto com total substituição do agregado graúdo apresentou maior fissuração.

Entretanto, quando comparados os resultados do concreto referência com o concreto de traço 50G-950ºC, verificou-se uma redução no número de fissuras geradas no concreto, com abertura semelhante. Portanto, conjectura-se que tenha ocorrido um equilíbrio entre a ocorrência do procedimento de cura interna e o não prejuízo das propriedades mecânicas do concreto, em função das propriedades do agregado cerâmico, assim reduzindo a fissuração do compósito cimentício.

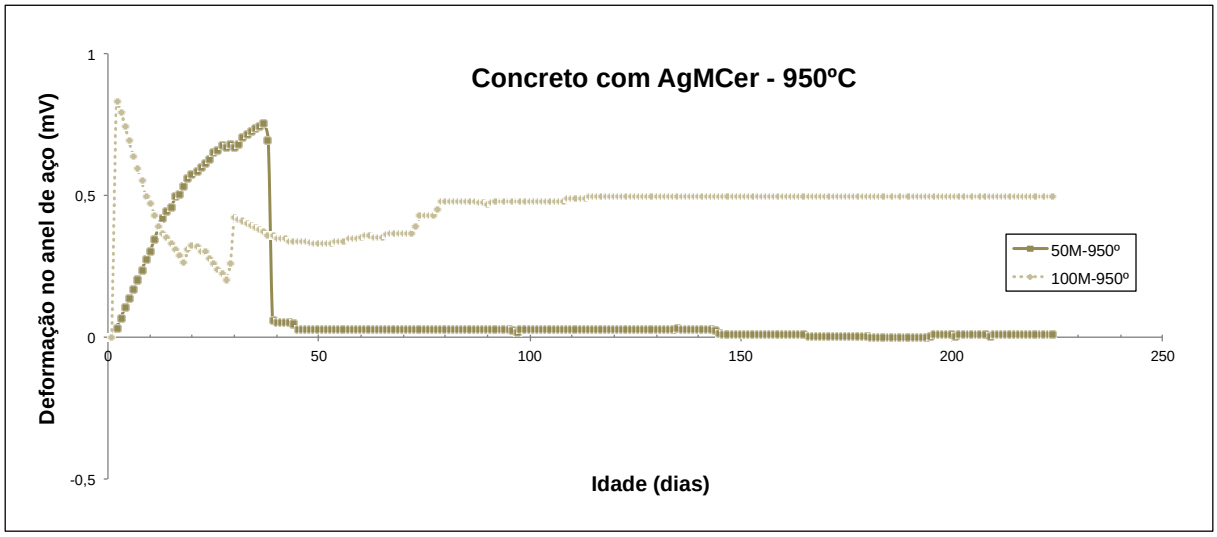
Portanto, pressupõem-se que tal comportamento esteja diretamente relacionado com as propriedades do agregado cerâmico. Onde, a taxa de absorção de água do grão possibilitou a ocorrência da cura interna, bem como as suas propriedades mecânicas, como a resistência mecânica e o módulo de elasticidade, relacionadas com a temperatura de queima da cerâmica, não acarretaram danos significativos às propriedades do concreto, as quais geram uma maior tendência de fissuração do compósito cimentício estudado.

Na figura 60 são apresentados os resultados médios diários obtidos no ensaio de retração por secagem restringida, para os concretos com substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo cerâmico (AgMCer). Igualmente ao mencionado na análise anterior, os resultados foram plotados agrupando-se os traços com mesma temperatura de queima dos agregados miúdos cerâmicos empregados nos compósitos, visando facilitar a visualização dos resultados. Os resultados individuais diários deste ensaio encontram-se no Apêndice F.

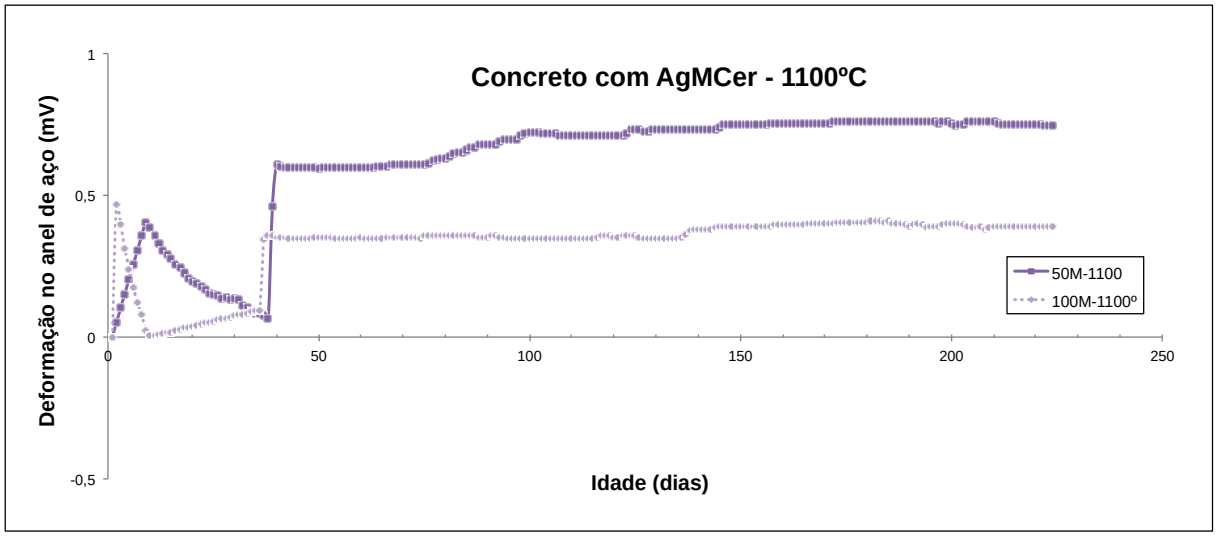
A figura 60(a) apresenta os resultados médios diários dos concretos com agregados miúdos cerâmicos produzidos com uma temperatura de queima de 700ºC. Analisando tal figura, percebe-se que o traço 50M-700ºC apresentou duas quedas de tensão nas idades de 4 e 23 dias, o que representa as idades em que ocorreram fissuras no concreto. Para o traço 100M-700ºC, observa-se somente uma queda de tensão significativa até a idade de 40 dias. No entanto, quando realizada uma análise visual nos corpos de prova, percebeu-se a presença de duas fissuras neste concreto.



(a)



(b)



(c)

Figura 60: resultados médios diários da deformação do concreto no anel de aço, com a presença de agregados miúdos cerâmicos, com temperatura de queima de (a) 700ºC. (b) 900ºC. (c) 1100ºC

Como realizado nas análises anteriores, a abertura das fissuras dos concretos foram avaliadas, com o auxilio de um fissurômetro. Para o traço 50M-700ºC, a abertura das fissuras foram de 0,50 mm e 0,10 mm, correspondente às idades de 4 e 23 dias, respectivamente; enquanto que para o traço 100M-700ºC, as aberturas das fissuras foram de 0,30 e 0,35 mm. Na figura 61 são apresentadas algumas das fissuras existentes nos concretos 50M-700ºC e 100M-700ºC, as quais totalizam aberturas de 0,60mm e 0,65mm, respectivamente, até a idade avaliada neste estudo (224 dias).

Analisando comparativamente os traços com substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo cerâmico produzido à 700ºC, nota-se que o número de fissuras presentes foi semelhante entre os concretos, contudo o traço 50M-700ºC apresentou fissuração com

abertura superior (0,50mm). Neste sentido, pressupõem-se que a substituição total do grão possibilitou a ocorrência mais eficiente do procedimento de cura interna, desta forma reduzindo a intensidade do fenômeno e, por consequência, a espessura da abertura das fissuras presentes no concreto.

(a) (b)

Figura 61: abertura das fissuras nos traços com substituição de agregado miúdo natural por cerâmico (700ºC), com teores de substituição de (a) 50%. (b) 100%

Cabe ressaltar ainda, que a menor influência do agregado miúdo no módulo de elasticidade do concreto, quando comparado com o agregado graúdo, acaba por não contribuir para o aumento da fissuração no compósito cimentício. Desta forma, as restrições impostas pelos grãos se mantem, devido a presença do agregado graúdo natural, e o agregado miúdo cerâmico acaba por ter a função da realização do procedimento de cura interna.

Quando comparados os resultados do traço 100M-700ºC e do concreto referência, percebe-se que o número de fissuras (duas) foi análogo entre os dois concretos. Entretanto, a abertura das fissuras do traço com agregado cerâmico foram levemente superiores.

A figura 60(b) apresenta os resultados médios diários dos concretos com agregados miúdos cerâmicos produzidos com uma temperatura de queima de 950ºC. Observando esta figura, nota-se que o traço 50M-950ºC apresentou somente uma queda de tensão aos 37 dias, comportamento que representa a ocorrência de fissuração no concreto. Contudo, no concreto com traço 100M-950ºC, observa-se duas quedas de tensão nas idades de 2 e 21 dias.

Igualmente as análise anteriores, as aberturas das fissuras foram medidas após o final das leituras, ou seja, após a idade de 224 dias. No concreto com 50% de substituição (50M-950ºC), a fissura apresentou abertura de 0,60 mm, enquanto que no concreto com 100% de

substituição (100M-950ºC), as duas fissuras apresentaram abertura de 0,20 mm, totalizando em 0,40mm de abertura de fissura, como demonstrado na figura 62.

(a) (b)

Figura 62: abertura das fissuras nos traços com substituição de agregado miúdo natural por cerâmico (950ºC), com teores de substituição de (a) 50%. (b) 100%

Analisando os resultados referentes ao concreto com substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo cerâmico (950ºC), percebe-se que a substituição parcial dos grãos resultou em menor fissuração do concreto. Contudo, a abertura desta fissura (0,60 mm) foi superior as aberturas das fissuras presentes no concreto com substituição total dos agregados miúdos (0,20 mm).

Portanto, como mencionado anteriormente, acredita-se que tal fato esteja associado à existência de um equilíbrio entre a ocorrência de cura interna, bem como a menor influência do agregado cerâmico, em função de suas propriedades físicas e mecânicas, nas propriedades mecânicas do concreto, principalmente no que se refere ao módulo de elasticidade. Portanto, reduzindo a intensidade do fenômeno da retração e da fissuração presente no concreto.

Conjuntamente, percebe-se que tal traço de concreto, 100M-950ºC, apresentou fissuração semelhante ao concreto referência. Assim, não somente o número de fissuras (duas) mas também a abertura das mesmas mostram-se análogas quando comparados estes dois traços de concretos estudados.

Dentro deste contexto, pode-se dizer que a substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo cerâmico, produzido à 950ºC, é possivelmente viável, uma vez que possibilita o emprego de um resíduo da construção civil na composição dos concretos e não

prejudica as propriedades do concreto, quando avaliado o fenômeno da retração por secagem restringida.

Na figura 60(c) são demonstrados os resultados médios diários obtidos para os concretos com presença de agregado miúdo cerâmico, produzido com uma temperatura de queima de 1100ºC. Analisando tal figura percebe-se que a fissuração no concreto de traço 50M-1100ºC, representada pela queda de tensão, ocorreu na idade de 9 dias; enquanto que para o traço 100M-1100ºC, a ocorrência da abertura da fissura foi evidenciada na idade de 2 dias.

Da mesma forma que o mencionado para as análises anteriores, a abertura das fissuras foram medidas com o auxílio de um fissurômetro. Onde, o ponto de maior abertura das fissuras foram de 0,70 mm para o traço de concreto 50M-1100ºC e de 0,40 mm para o traço de concreto 100M-1100ºC, conforme demonstrado na figura 63.

(a) (b)

Figura 63: abertura das fissuras nos traços com substituição de agregado miúdo natural por cerâmico (1100ºC), com teores de substituição de (a) 50%. (b) 100%

Igualmente ao comportamento observado para os demais concretos com substituição do agregado miúdo, percebe-se que a abertura da fissura foi superior para o concreto com substituição parcial, sendo esta de 0,70 mm, quando comparada com o concreto com substituição total, sendo a abertura da fissura de 0,40 mm. Assim, pressupõem-se que tal comportamento decorra em função da ocorrência de um equilíbrio entre o procedimento de cura interna e a menor influência do agregado miúdo cerâmico nas propriedades mecânicas do concreto, principalmente no módulo de elasticidade.

Contudo, para tais concretos com substituição do agregado miúdo cerâmico produzido à 1100ºC, mesmo ocorrendo somente uma fissura em cada um dos traços estudados, estas demonstraram ter abertura superior quando comparadas com os demais traços com

substituição de agregado miúdo cerâmico. Acredita-se que tal comportamento esteja diretamente relacionado com as características do material cerâmico, no que se refere à porosidade e consequentemente, a capacidade de absorção de água do grão. Desta forma, tendo uma menor capacidade para a ocorrência do procedimento de cura interna.

A fim de analisar conjuntamente tais resultados obtidos, na tabela 28 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de retração restringida, ao que se refere ao número de fissuras presentes em cada um dos traços de concreto estudados, bem com as suas respectivas aberturas. A inspeção nos corpos de prova foi realizada visualmente com o auxilio de uma luz fluorescente e uma lupa, enquanto a abertura das fissuras foi medida com o auxílio de um fissurômetro, como mencionado no item 3.5.2.2.

Analisando a tabela 28, percebe-se que o concreto que apresentou maior número de fissuras foi o de traço 100G-950ºC, como mencionado anteriormente. Contudo, o concreto que apresentou abertura de fissura mais significativa foi o 100G-700ºC.

Tabela 28: número de fissuras encontradas em cada traço de concreto estudado

Traço	Características dos concretos		N° de fissuras	Abertura das fissuras (mm)			
	Granulometria substituída	T. queima da cerâmica (ºC)		Individuais			Somatório
Referência	-	-	2	0,10	0,20	-	0,30
50G-700º	Graúdo	700	2	0,35	0,35	-	0,70
100G-700º			1	3,70	-	-	3,70
50G-950º		950	1	0,15	-	-	0,15
100G-950º			3	1,90	0,10	0,25	2,25
50G-1100º		1100	2	0,15	0,30	-	0,45
100G-1100º			2	0,15	0,15	-	0,30
50M-700º	Miúdo	700	2	0,50	0,10	-	0,60
100M-700º			2	0,30	0,35	-	0,65
50M-950º		950	1	0,60	-	-	0,60
100M-950º			2	0,20	0,20	-	0,40
50M-1100º		1100	1	0,70	-	-	0,70
100M-1100º			1	0,40	-	-	0,40

Dentro deste contexto, é possível observar que a substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo cerâmico causa uma maior influência no compósito cimentício, ao que se relaciona a intensidade do fenômeno da retração por secagem restringida. Assim,

pressupõe-se que a existência de um equilíbrio entre a ocorrência da cura interna e o não prejuízo das propriedades do concreto seja dificultada, portanto causando uma maior tendência de fissuração no compósito cimentício.

No entanto, quando ocorreu a substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo cerâmico, percebeu-se que o número de fissuras, bem como as aberturas destas, demonstraram-se inferiores, como apresentado na tabela 28. Conjuntamente, observa-se que a substituição total dos grãos (100%) acarretou em uma redução da espessura de abertura das fissuras, para todos os concretos estudados. Portanto, conjectura-se que tal comportamento esteja relacionado com a ocorrência de um equilíbrio entre a eficiência do procedimento de cura interna e do não prejuízo das propriedades do compósito cimentício, devido às características dos grãos, assim reduzindo a tendência de fissuração dos concretos estudados.

4.5 ENSAIOS MICROESTRUTRAIS

4.5.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os corpos de prova, preparados conforme descrito no item 3.5.3.1, foram submetidos à análise em um microscópio eletrônico de varredura por elétrons retroespalhados, onde também foi realizada a análise de EDS. A figura 64 ilustra os resultados obtidos para os concretos com agregados graúdos cerâmicos produzidos à 700ºC. Os demais resultados obtidos para estas amostras, a partir desta técnica, encontram-se no Apêndice G.

Analisando a figura 64(a), (b) e (c), notam-se características bem distintas com relação a composição química da matriz cimentícia e do agregado cerâmico. Os principais componentes da matriz cimentícia são o cálcio (Ca) e a sílica (Si), elementos constituintes dos produtos hidratados, enquanto que no agregado cerâmico, os principais componentes correspondem à sílica (Si) e ao alumínio (Al), conforme já havia sido demonstrado na caracterização química do material, tabela 12. Tal comportamento repete-se para todos os demais resultados demonstrados, independente do tipo de agregado cerâmico presente na composição do concreto, como era esperado.

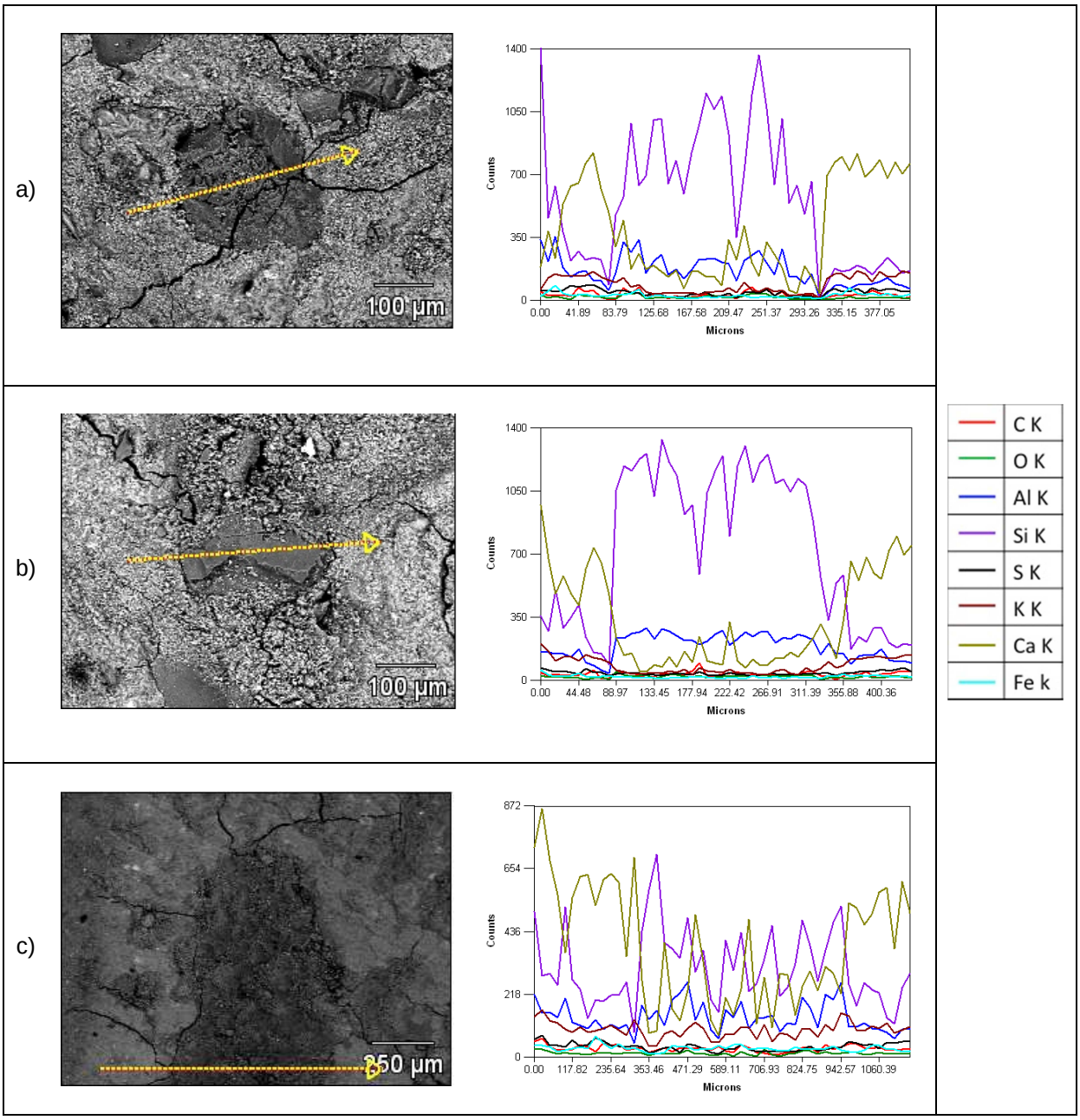


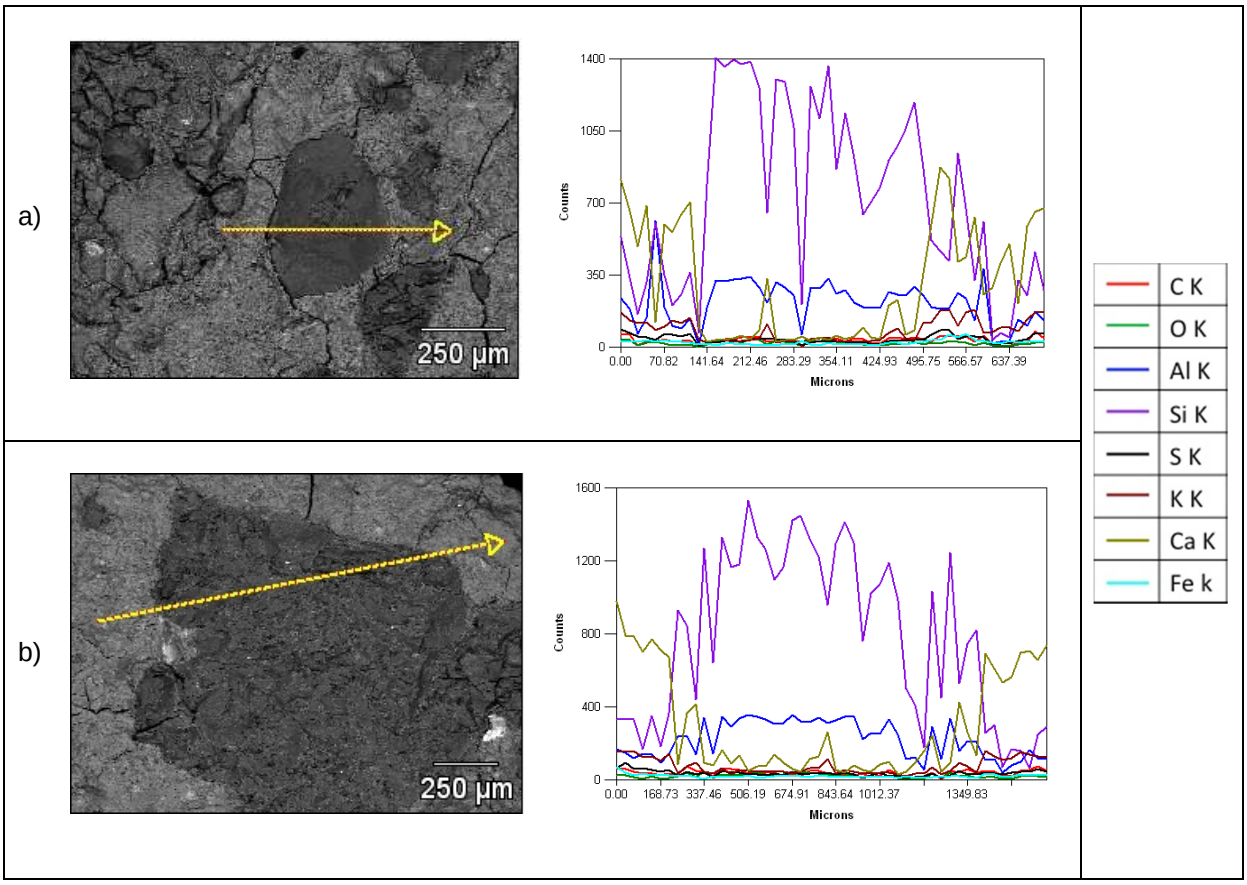
Figura 64: micrografias do concreto com substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo cerâmico, produzido a 700ºC. Com magnificação de: (a) 200x. (b) 200x. (c) 85x

A partir da análise realizada, figura 64, é possível observar a presença de cálcio (Ca) no agregado cerâmico, a partir da análise de EDS, sendo tal resultado observado em todas as amostras avaliadas, conforme demonstrado nas análises que seguem. Neste sentido, acredita-se que tal comportamento decorra da existência do transporte entre a matriz cimentícia e o agregado cerâmico. Assim, conjectura-se que há uma precipitação dos cristais formados pela hidratação do cimento no interior dos grãos, conjuntamente com um transporte de água do agregado cerâmico para a matriz cimentícia.

Desta forma, com a precipitação dos cristais é possível que tenha ocorrida uma melhora nas características mecânicas dos agregados cerâmicos, como mencionado nas análises anteriores, assim como o transporte de água possa auxiliar na redução da intensidade do fenômeno da retração por secagem nos concretos estudados.

O mesmo comportamento foi observado para todos os casos estudados. Assim, mesmo com a redução da porosidade (capacidade de absorção) em função do aumento da temperatura de queima da cerâmica, foi possível observar o transporte de cristais entre a matriz cimentícia e o agregado cerâmico, a partir das análises de EDS realizadas.

Na figura 65 são apresentados os resultados referentes aos concretos com a substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo cerâmico, produzido com temperatura de queima de 950ºC. Os demais resultados obtidos para tais amostras, a partir desta técnica, encontram-se no Apêndice G.



c)

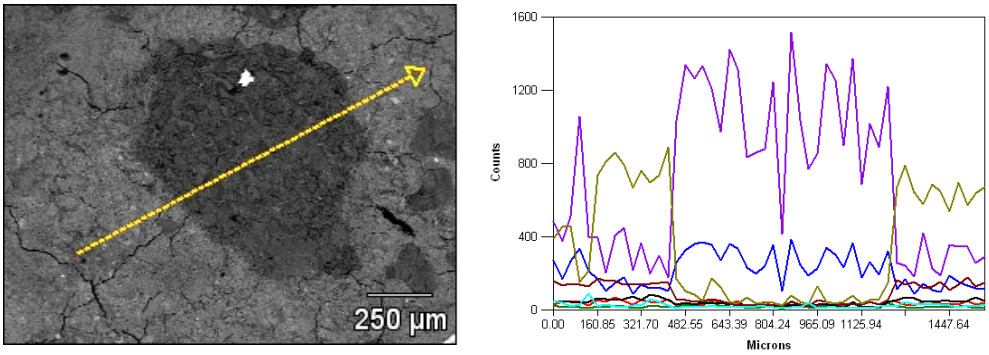
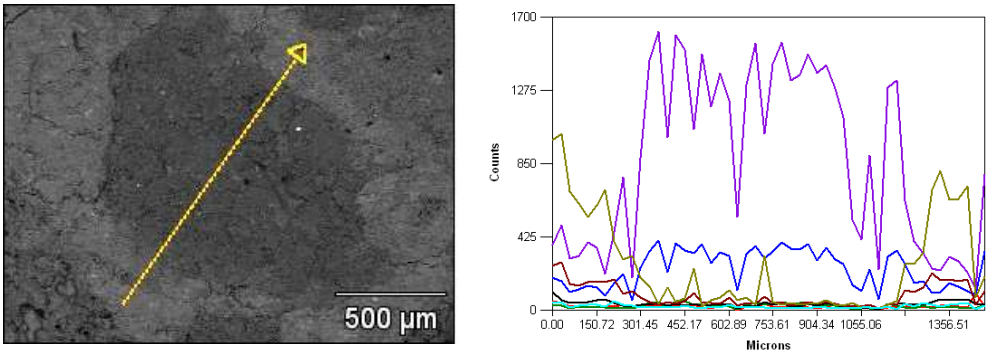


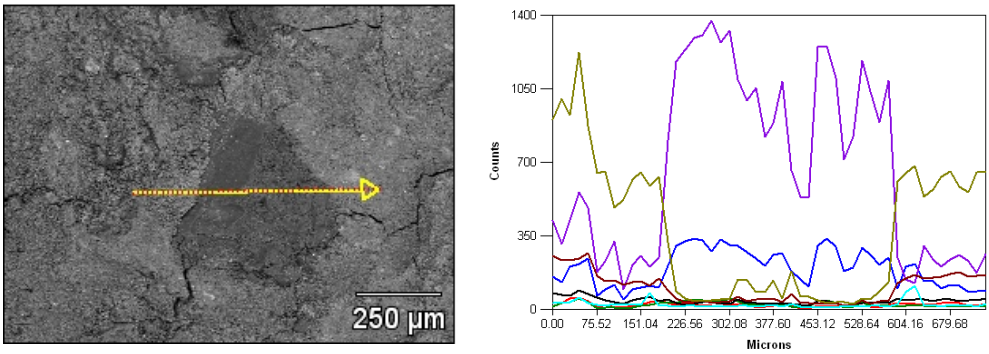
Figura 65: micrografias do concreto com substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo cerâmico, produzido a 950ºC. Com magnificação de: (a), (b) e (c) 100x

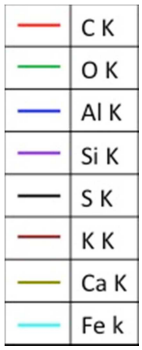
A figura 66 demonstra os resultados obtidos para os concretos com a presença de agregado graúdos cerâmicos com temperatura de queima de 1100ºC. As demais micrografias realizadas para estas amostras encontram-se no Apêndice G.

a)

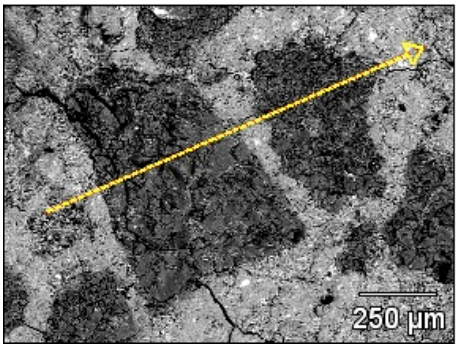


b)





c)



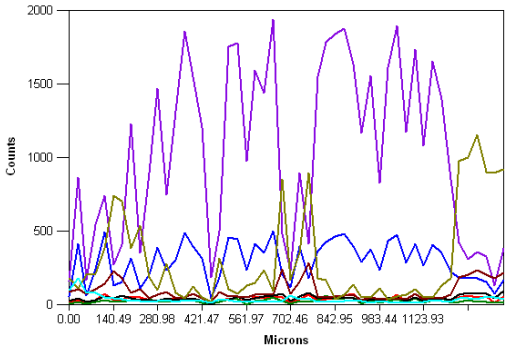


Figura 66: micrografias do concreto com substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo cerâmico, produzido a 1100ºC. Com magnificação de: (a) 65x. (b) 100x. (c) 90x

Analisando a figura 66 percebe-se que a quantidade de cálcio nos grãos cerâmicos, produzidos com temperatura de queima de 1100ºC, reduziu quando comparado com os resultados da microscopia com a presença de agregados cerâmicos queimados à 700ºC, figura 64. Como mencionado anteriormente, acredita-se que tal redução da quantidade de cristais, provenientes da hidratação do cimento, tenha diminuído em função da menor porosidade do material, como demonstrado pela avaliação da absorção de água do material, tabela 18.

Na figura 67 são apresentados os resultados obtidos para os concretos com agregados miúdos cerâmicos produzidos com uma temperatura de queima de 700ºC. Os demais resultados obtidos para estas amostras encontram-se no Apêndice G.

Igualmente ao mencionado para as amostras anteriores, percebe-se uma maior concentração de cálcio (Ca) na matriz cimentícia e de sílica (Si) no agregado cerâmico. Contudo, no agregado cerâmico nota-se a presença de cálcio (Ca), mesmo que seja em menores proporções (pequenos picos), quando comparado com a quantidade de sílica. No entanto, acredita-se que tal fato possa ser uma evidência da existência de transporte entre a matriz cimentícia e o agregado cerâmico. Tal tendência de comportamento foi verificada para todas as amostras com substituição de agregado miúdo natural por agregado miúdo cerâmico, independente da temperatura de queima da cerâmica.

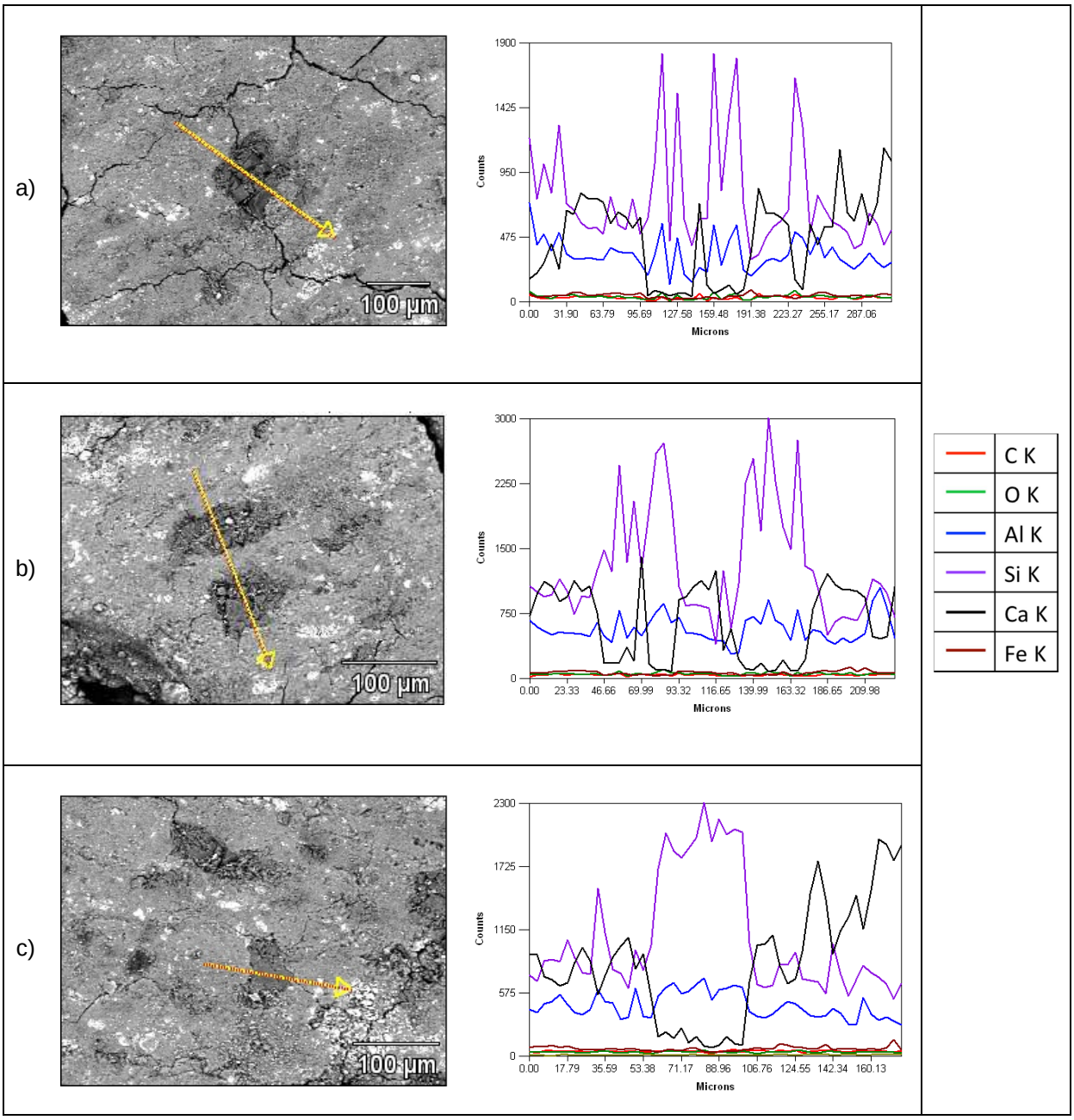


Figura 67: micrografias do concreto com substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo cerâmico, produzido a 700ºC. Com magnificação de: (a) 220x. (b) 330x. (c) 90x

A figura 68 demonstra os resultados obtidos para os concretos com agregados miúdos cerâmicos produzidos com uma temperatura de queima de 950ºC. Os demais resultados obtidos para estas amostras encontram-se no Apêndice G.

Igualmente ao verificado na análise anterior, quando observa-se a figura 68(a), (b) e (c) nota-se a elevada quantidade presente de sílica (Si), principal componente da cerâmica vermelha, assim como a presença de cálcio, em menor quantidade. Mesmo que a quantidade de cálcio seja em menor quantidade, é importante observar a existência deste

no grão cerâmico. Fato este que demonstra a existência de transporte entre a matriz cimentícia e o agregado cerâmico, queimado a temperatura de 950ºC.

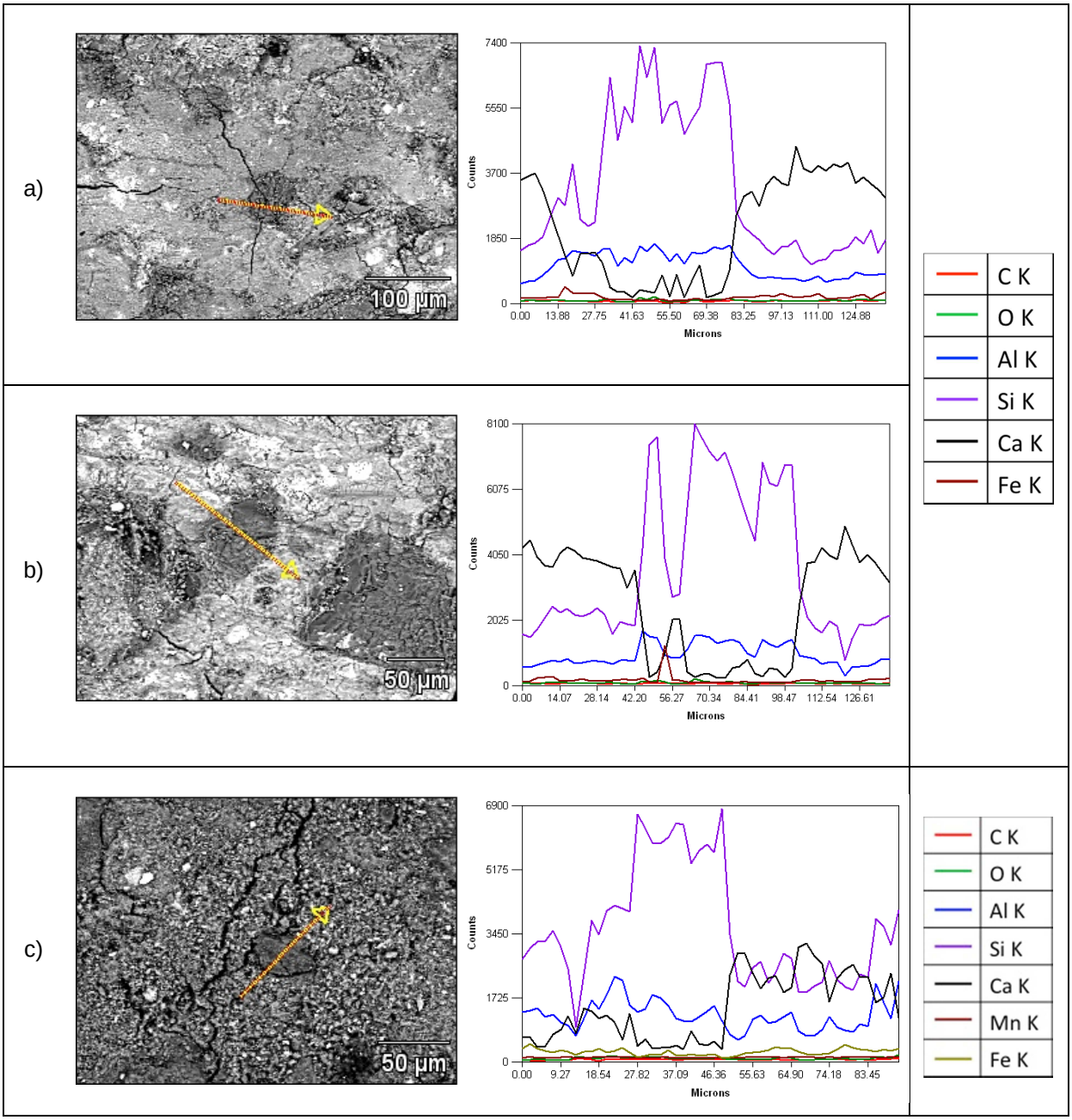


Figura 68: micrografias do concreto com substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo cerâmico, produzido a 950ºC. Com magnificação de: (a) 300x. (b) 400x. (c) 500x

Na figura 69 são apresentados os resultados de microscopia dos concretos produzidos com agregado miúdo cerâmico produzido com temperatura de queima de 1100ºC. Os demais resultados destas amostras encontram-se no Apêndice G. Da mesma forma ao observado nas amostras anteriores, percebe-se a presença de cálcio no grão cerâmico, produzido com temperatura de queima de 1100ºC. Logo, independente da temperatura de queima do

material cerâmico, o qual causa uma variação da porosidade e, consequentemente, da taxa de absorção, percebeu-se o mesmo comportamento.

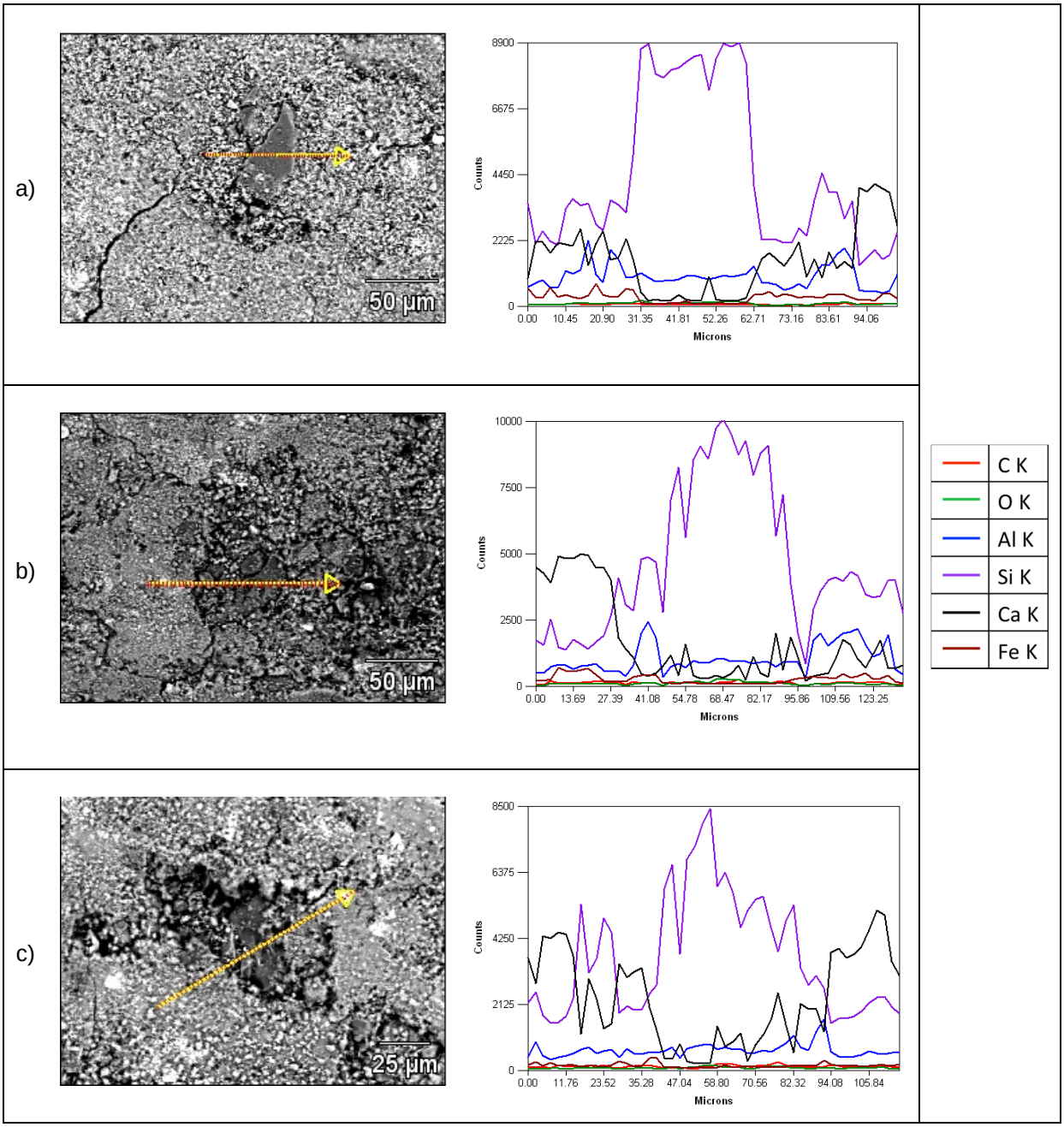


Figura 69: micrografias do concreto com substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo cerâmico, produzido a 1100ºC. Com magnificação de: (a) 500x. (b) 500x. (c) 700x

Assim sendo, acredita-se que com a realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi possível avaliar o comportamento dos concretos com a presença de agregados cerâmicos, independente de sua granulometria, frente ao transporte existente entre a matriz cimentícia e o agregado cerâmico. Desta forma, contribuindo para o entendimento e, posterior, viabilização do emprego de agregados cerâmicos não somente

como elementos constituintes do compósito cimentício, visando o desenvolvimento sustentável do setor, mas também como agentes de cura interna para concretos.

4.6 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A partir dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos (resistência à compressão e módulo de elasticidade) e de retração por secagem (livre e restringida) realizados, julgou-se interessante a elaboração de um quadro resumo, onde fosse possível analisar de forma conjunta as principais características dos agregados cerâmicos empregados na pesquisa, bem como a sua influência nos concretos estudados. A tabela 29 apresenta de forma sucinta os principais resultados (quantificáveis) obtidos neste estudo.

Analisando a resistência à compressão dos concretos estudados, conforme demonstrado na tabela 29, percebe-se que as características físicas e mecânicas do agregado cerâmico, como a porosidade (medida indiretamente pela absorção de água), a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, influenciaram no ganho de resistência dos concretos estudados. Assim, os concretos com a presença de agregados (miúdos ou graúdos) produzidos com temperatura de queima de 700ºC, apresentaram resultados de resistência à compressão inferiores quando comparados com os demais concretos com agregados cerâmicos.

Assim, a medida que a temperatura de queima da cerâmica foi aumentada, os agregados produzidos apresentaram características superiores, ao que se refere à redução de porosidade e ao aumento de resistência mecânica, desta forma influenciando no aumento da resistência mecânica dos concretos estudados. Em alguns traços, a resistência do concreto com a presença de agregados cerâmicos foi superior a do concreto referência, principalmente na idade de 28 dias. Acredita-se que tal comportamento tenha ocorrido devido à percolação dos cristais gerados pelas reações de hidratação para o interior dos grãos, assim melhorando a resistência dos agregados miúdos e a zona de transição entre o agregado graúdo cerâmico e a matriz cimentícia e, consequentemente, a resistência à compressão dos concretos estudados.

Tabela 29: quadro resumo dos resultados obtidos neste estudo

Traço do concreto	Características do agregado cerâmico			Propriedades do agregado cerâmico			Propriedades dos concretos										
							Mecânicas						Retração por secagem				
	Substituição		Temperatura de queima (ºC)	Resistência à compressão média (MPa)	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Absorção de água (%)	Resistência à compressão média (MPa)			Módulo de elasticidade médio (GPa)			Livre (µm)	Restringida			
	Teor (%)	Granulometria					Idade (dias)			Idade (dias)			Idade (dias)	Fissuras			
							3	7	28	3	7	28	224	Número	Aberturas (mm)		Somatório (mm)
Referência	-	-	-	-	-	-	43,21	51,34	62,79	28,23	28,00	34,20	-354,2	2	0,10	0,20	-	0,30
50G-700	50	Graúdo	700	10,9[1]	3,8	17,58	22,49	26,96	32,83	15,73	17,30	21,30	-627,9	2	0,35	0,35	-	0,70
100G-700	100						17,74	19,93	25,47	9,50	11,17	12,57	-1063,2	1	3,70	-	-	3,70
50G-950	50		950	24,0[1] / 32,4[2]	9,1	15,09	37,30	43,18	53,22	16,63	19,50	23,37	-396,6	1	0,15	-	-	0,15
100G-950	100						32,95	38,16	47,03	11,30	13,07	14,03	-483,4	3	1,90	0,10	0,25	2,25
50G-1100	50		1100	38,8[1] / 63,2[2]	28,2	9,13	42,09	51,92	66,47	21,60	25,00	26,73	-351,2	2	0,15	0,30	-	0,45
100G-1100	100						43,70	53,52	71,79	18,90	18,80	21,27	-347,6	2	0,15	0,15	-	0,30
50M-700	50	Miúdo	700	10,9[1]	3,8	14,95	34,02	44,86	58,05	22,23	24,70	28,40	-594,3	2	0,50	0,10	-	0,60
100M-700	100						32,52	43,84	55,86	17,27	22,37	25,17	-682,7	2	0,30	0,35	-	0,65
50M-950	50		950	24,0[1] / 32,4[2]	9,1	7,78	42,83	53,14	55,50	24,80	27,83	31,53	-490,5	1	0,60	-	-	0,60
100M-950	100						43,42	57,18	73,78	23,10	24,97	27,90	-354,1	2	0,20	0,20	-	0,40
50M-1100	50		1100	38,8[1] / 63,2[2]	28,2	2,13	43,52	52,92	59,09	27,93	31,77	33,93	-556,3	1	0,70	-	-	0,70
100M-1100	100						40,45	58,44	70,12	25,80	27,60	30,53	-291,9	1	0,40	-	-	0,40

Onde: [1] - produção das amostras a partir da metodologia de corte seguida por queima dos corpos de prova. [2] - produção das amostras a partir da metodologia de queima dos blocos cerâmicos seguida de corte dos corpos de prova.

Quando analisado o módulo de elasticidade dos concretos estudados, percebe-se que a substituição do agregado natural pelo agregado cerâmico causou uma redução desta propriedade nos concretos estudados. Contudo, quando a granulometria substituída foi a graúda o efeito negativo mostrou-se mais evidente. Nota-se ainda, que a substituição total (100%) reduziu o módulo de elasticidade de forma mais significativa que os concretos com substituição parcial (50%). Tal comportamento já era esperado, uma vez que as propriedades físicas e mecânicas do agregado cerâmico são inferiores às propriedades dos agregados naturais. Observando a tabela 29, percebe-se ainda que a redução desta propriedade mecânica dos concretos foi mais evidente para os traços com substituição do agregado graúdo. Tal comportamento pode ser explicado devido a maior influência desta granulometria do grão na redução do módulo de elasticidade dos concretos estudados, devido às suas características físicas e mecânicas.

Portanto, para as duas propriedades mecânicas estudadas, percebe-se a grande influência da qualidade do agregado cerâmico, oriunda da temperatura de queima do material, frente às propriedades do concreto. Assim, a escolha correta do agregado reciclado auxilia na viabilização do emprego do mesmo na composição dos compósitos cimentícios.

Com base no ensaio de retração por secagem livre dos concretos estudados, como demonstrado na tabela 29, nota-se igualmente a influência direta das características físicas e mecânicas do agregado cerâmico, decorrentes da variação da temperatura de queima dos mesmos, nos resultados obtidos para tal propriedade. Portanto, é possível verificar que os concretos com a presença de agregados (miúdos/graúdos) produzidos a 700ºC tiveram sua deformação unidimensional livre majorada.

A presença de tais agregados cerâmicos na composição dos concretos auxiliou para a redução das propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de elasticidade) dos compósitos cimentícios estudados. Logo, como consequência direta influenciou no aumento da retração por secagem, principalmente quando a substituição do agregado foi total (100%). Portanto, quando analisada a tabela 29, percebe-se que o traço de concreto 100G-700ºC apresentou a maior magnitude de retração por secagem livre ao final da avaliação, sendo esta de -1063,2 µm, bem como a maior abertura de fissura, sendo esta de 3,70 mm.

No entanto, quando a substituição dos agregados cerâmicos produzidos à 700ºC foi parcial (50%), o efeito negativo decorrente das propriedades físicas e mecânicos dos grãos não demonstrou-se tão evidente. Acredita-se que tal comportamento proceda da existência de um equilíbrio entre a eficiência do procedimento de cura interna e do menor prejuízo das

propriedades mecânicas do concreto, como a resistência mecânica e o módulo de elasticidade, em decorrência não somente da substituição parcial, mas também da ocorrência de precipitação dos cristais gerados pelas reações de hidratação para o interior dos agregados, assim possibilitando um aumento da rigidez e da resistência mecânica dos grãos cerâmicos.

Analisando os concretos com a presença de agregados cerâmicos produzidos com temperatura de queima de 950ºC e 1100ºC, nota-se que a intensidade do fenômeno da retração livre é minorada, assemelhando-se em alguns casos ou até mesmo reduzindo a magnitude do fenômeno encontrada para o concreto referência. Como mencionado anteriormente, conjectura-se que tal comportamento ocorra devido à melhora das propriedades físicas e mecânicas dos agregados cerâmicos, decorrente do aumento da temperatura de queima dos mesmos.

Portanto, acredita-se que seja possível a existência de um equilíbrio entre a ocorrência do procedimento de cura interna e a teoria de precipitação dos cristais gerados pelas reações de hidratação para o interior dos agregados cerâmicos. Deste modo, gerando uma menor influência nas propriedades mecânicas dos concretos, auxiliando para a menor variação volumétrica do concreto, possibilitando uma redução da tendência de fissuração do compósito cimentício.

Conjuntamente, a partir dos resultados obtidos na pesquisa, acredita-se ser possível o emprego de resíduos cerâmicos na composição dos concretos, visando a redução da tendência de fissuração e a manutenção das propriedades mecânicas do compósito cimentício. Portanto, contribuindo para a busca do desenvolvimento sustentável do setor da construção civil, uma vez que possibilita a reutilização do resíduo de construção gerado. Cabe salientar que tal potencialidade de aplicação foi verificada para agregados cerâmicos de propriedades específicas, avaliados nesta pesquisa, bem como da sua aplicação em concretos com resistência mecânica de 60MPa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fenômeno da retração, como discutido ao longo desta pesquisa, gera deformações ao longo do tempo em pastas, argamassas e concretos. Com o avanço da tecnologia do concreto e o emprego de compósitos cimentícios com baixa relação a/c (elevada resistência mecânica), as deformações provenientes do fenômeno da retração acentuam-se, aumentando a tendência de fissuração da estrutura. Desta forma, nos últimos anos a aplicação do procedimento de cura interna tem ganho significativa importância, quando procura-se reduzir as deformações geradas pelos diferentes tipos de retração. Conjuntamente, a busca pelo desenvolvimento sustentável no setor da construção civil tem adquirido notoriedade, em virtude da redução de áreas legais para deposição de resíduos, bem como devido ao grande volume de resíduos gerados e descartados pelo setor. Face a isto, esta pesquisa se propôs a investigar o comportamento de agregados cerâmicos como agentes de cura interna em concretos, buscando contribuir para a viabilização do emprego de resíduos cerâmicos na indústria da construção civil.

As conclusões apresentadas a seguir, apesar de estarem em consonância com a maior parte da bibliografia existente, não devem ser tomadas de forma absoluta, uma vez que se referem somente aos resultados obtidos referentes aos concretos produzidos com tipos, quantidades e qualidades específicas de materiais e técnicas de execução. A representatividade do comportamento destes concretos deve ser firmada pela realização de novas pesquisas, buscando confirmar e complementar os dados obtidos neste estudo.

5.1 CONCLUSÕES

Esta pesquisa avaliou o comportamento de concretos produzidos com diferentes teores de agregados cerâmicos miúdo e graúdo, bem como analisou algumas propriedades físicas dos agregados reciclados. A influência de diferentes teores de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado (50% ou 100%), da granulometria substituída (miúdo ou graúdo) e da temperatura de queima do agregado cerâmico (700ºC, 950ºC ou 1100ºC) sobre as propriedades dos concretos foram avaliadas, tais como a resistência à compressão axial, o módulo de elasticidade, a retração por secagem livre e a retração por secagem restringida.

Conjuntamente, uma análise da microestrutura dos concretos estudados foi realizada, através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), buscando avaliar o transporte de água/pasta de cimento existente entre o agregado cerâmico e a matriz cimentícia.

A partir do programa experimental proposto na pesquisa foi possível obter as seguintes conclusões:

A. Quanto à resistência à compressão:

- o efeito isolado da temperatura de queima da cerâmica influenciou diretamente no ganho de resistência à compressão dos concretos estudados, onde verifica-se um crescimento médio de 57,8% entre as resistências dos concretos com agregados produzidos à 700ºC e 1100ºC;

- o efeito isolado da granulometria substituída influenciou nos resultados obtidos, onde a substituição do agregado graúdo reduziu a resistência à compressão dos concretos em média em 23% em relação ao concreto referência; Contudo, a substituição do agregado miúdo não apresentou diferença significativa, pela análise do teste de Fisher, em relação ao concreto referência;

- o grau de hidratação (idade) do concreto com agregados cerâmicos (700ºC, 950ºC e 1100ºC) influenciou os resultados de resistência à compressão do mesmo modo que ocorreu com o concreto convencional (referência);

- avaliando a interação “Temperatura x Teor de substituição’ frente à resistência à compressão axial, observa-se que para os concretos com agregados cerâmicos produzidos à 700ºC, a substituição total dos grãos reduziu em 10,9% a resistência do concreto. Entretanto, para os agregados produzidos à 950ºC e 1100ºC percebe-se uma tendência de inversão de comportamento;

- analisando a interação ‘Temperatura x Granulometria’ frente à resistência à compressão axial, nota-se que a substituição dos agregados miúdos, produzidos à 700ºC e 950ºC, gerou um aumento da resistência à compressão de 85,1% e 29,4%, respectivamente, em relação aos concretos com substituição de agregados graúdos. Contudo, para os concretos com agregados cerâmicos produzidos à 1100ºC, tal comportamento foi distinto, uma vez que a granulometria substituída não mostrou ser um fator significativo, quando realizada uma análise estatística pelo teste de Fisher;

- analisando a interação ‘Teor de substituição x Granulometria’ frente à resistência à compressão axial, observa-se que a total substituição do agregado graúdo natural pelo cerâmico reduziu a resistência à compressão dos concretos estudados em 7%. Contudo a total substituição do agregado miúdo gerou um aumento da resistência à compressão dos concretos em 7,1%;

- avaliando a interação ‘Temperatura x Idade’ frente à resistência à compressão axial, percebe-se que com o aumento da idade, o ganho de resistência mecânica é acentuado para as três temperaturas avaliadas, onde observa-se um aumento de: 61,3%, 46,7% e 57,6%, dos 3 aos 28 dias, para os concretos com agregados produzidos à 700ºC, 950ºC e 1100ºC, respectivamente;

- considerando a interação ‘Teor de substituição x Idade’ frente à resistência à compressão axial, nota-se que o aumento do grau de hidratação do cimento possibilita uma majoração da resistência à compressão dos compósitos, independente do seu teor de substituição (parcial ou total). Contudo, aos 3 dias ocorre uma leve redução da resistência mecânica dos concretos com substituição total (100%), em relação aos concretos com substituição parcial (50%); com a idade de 7 dias, esta diferença não mostrou-se significativa, e aos 28 dias ocorre uma inversão de comportamento, onde a resistência mecânica dos concretos foi majorada com a substituição total dos agregados;

- analisando a interação ‘Granulometria x Idade’ frente à resistência à compressão axial, percebe-se que a resistência à compressão dos concretos estudados é superior quando a granulometria substituída é a do agregado miúdo, independente da idade avaliada;

- avaliando a interação ‘Temperatura x Teor de substituição x Granulometria’ frente à resistência à compressão axial, nota-se que quando ocorre a substituição total dos agregados graúdos, produzidos a 700ºC e 950ºC, ocorre a redução da resistência à compressão em 23,3% e 11,6%, respectivamente. Entretanto, com a melhora da qualidade do agregado graúdo cerâmico (1100ºC), obteve-se uma leve melhora (5,3%) na resistência mecânica dos concretos estudados. Quando analisada a substituição do agregado miúdo, percebe-se que a substituição total (100%) dos grãos produzidos à 700ºC reduziu em 3,4% a resistência à compressão dos concretos, porém para os concretos com a presença de agregados miúdos produzidos à 950ºC e 1100ºC, a resistência mecânica majorou em 15,1% e 8,7%, respectivamente;

- considerando a interação ‘Temperatura x Teor de substituição x Idade’ frente à resistência à compressão axial, observa-se que para os grãos produzidos à 700ºC, a substituição total reduziu em 11,1% (3d), 11,2% (7d) e 10,5% (28d) a resistência à compressão dos concretos. Contudo, com a melhora das características do grão cerâmico, percebe-se uma inversão de comportamento, onde a substituição total do AgCer-950º majorou a resistência aos 28 dias, enquanto a substituição total do AgCer-1100ºC aumentou a resistência mecânica a partir dos 7 dias;

- analisando a interação ‘Temperatura x Granulometria x Idade’ frente à resistência à compressão axial, nota-se que a substituição dos agregados graúdos de 700ºC e 1100ºC gera uma diferença na resistência à compressão dos concretos de 113,3%, 124,9% e 137,1%, aos 3, 7 e 28 dias, respectivamente. Contudo, com a substituição do agregado miúdo, tal diferença se mostra mais tênue, ocorrendo uma variação de 26,2%, 25,5% e 13,4%, aos 3, 7 e 28 dias, respectivamente;

- avaliando a interação ‘Teor de substituição x Granulometria x Idade’ frente à resistência à compressão axial, observa-se que a substituição total do agregado graúdo natural pelo cerâmico gerou uma redução da resistência mecânica dos concretos estudados, de 7,3%, 8,6% e 5,4%, para as idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente. Entretanto, quando substituído o agregado miúdo, aos 3 dias observa-se uma redução de 3,3%, porém aos 7 e aos 28 dias, nota-se um ganho na resistência mecânica dos concretos estudados de 5,7% e 15,7%, respectivamente;

B. Quanto ao módulo de elasticidade:

- o efeito isolado da temperatura influenciou de forma direta no aumento do módulo de elasticidade dos concretos estudados, onde verifica-se um crescimento médio de 36,1% entre os resultados obtidos para os concretos com agregados produzidos à 700ºC e 1100ºC;

- o efeito isolado da granulometria influenciou de forma direta nos resultados do módulo de elasticidade, onde verifica-se uma redução em média de 41,4%, com a substituição do agregado graúdo, e em média de 11,9% para a substituição do agregado miúdo, em relação ao concreto referência;

- o efeito isolado do teor de substituição do agregado cerâmico influenciou de forma significativa no módulo de elasticidade dos concretos estudados. A substituição total

ocasionou uma redução em média de 38%, enquanto a substituição parcial causou uma redução em média de 23,1%, em relação ao concreto referência;

- o grau de hidratação (idade) do concreto com a presença de agregados cerâmicos (700ºC, 950ºC e 1100ºC) influenciou os resultados do módulo de elasticidade do mesmo modo que ocorreu com o concreto convencional (referência);

- avaliando a interação 'Temperatura x Granulometria' frente ao módulo de elasticidade dos concretos, percebe-se que a qualidade do agregado cerâmico, influenciada pela temperatura de queima do mesmo, acarreta uma melhora significativa no módulo de elasticidade dos concretos estudados, independente da granulometria substituída. Contudo, tal comportamento é mais acentuado para as substituições de agregado graúdo, uma vez que o aumento do módulo de elasticidade foi de 11,8% e de 51,1%, para os concretos com AgGCer-950ºC e AgGCer-1100ºC, respectivamente, em relação ao concreto com AgGCer-700ºC; já para os concretos com AgMCer-950ºC e AgMCer-1100ºC, o aumento no módulo de elasticidade foi de 14,3% e de 26,7%, respectivamente, em relação ao concreto com AgMCer-700ºC;

- considerando a interação 'Teor de substituição x Granulometria' frente ao módulo de elasticidade dos concretos, nota-se que a substituição total do agregado graúdo natural pelo cerâmico acarreta uma redução mais significativa do módulo de elasticidade (30,2%), quando comparada com a redução em decorrência da substituição do agregado miúdo natural pelo cerâmico (11,2%);

- analisando a interação 'Teor de substituição x Idade' frente ao módulo de elasticidade dos concretos, observa-se que para todas as idades analisadas, o módulo de elasticidade é menor com a substituição total dos grãos naturais pelos grãos cerâmicos, sendo a diferença em relação aos concretos com substituição parcial de 17,9% (3d), 19,3% (7d) e 20,5% (28d);

- avaliando a interação 'Granulometria x Idade' frente ao módulo de elasticidade dos concretos, observa-se uma redução do módulo de elasticidade dos concretos com a substituição de agregado graúdo cerâmico, sendo tais variações de 50,7%, 51,9% e 48,7%, aos 3, 7 e 28 dias, respectivamente, em relação aos concretos com presença de agregado miúdo cerâmico;

- considerando a interação 'Temperatura x Teor de substituição x Idade' frente ao módulo de elasticidade dos concretos, percebe-se que com o aumento da

temperatura de produção da cerâmica, as diferenças dos resultados entre os concretos com substituição parcial (50%) e total (100%) são reduzidas para todas as idades analisadas, sendo mais evidentes aos 3 dias, em virtude da maior dependência da qualidade do agregado cerâmico, onde estas foram de 29,5% (700ºC), 17% (950ºC) e 9,8% (1100ºC). Contudo, quando avaliada cada uma das temperaturas de queima dos grãos cerâmicos, percebe-se que a variação entre os resultados de módulo de elasticidade, dos 3 aos 28 dias, está relacionada com a qualidade do agregado, sendo tais diferenças de 41% (700ºC), 21,9% (950ºC) e 15,9% (1100ºC);

C. Quanto ao fenômeno da retração por secagem livre e restringida:

- as características físicas e mecânicas dos agregados cerâmicos, oriundas da temperatura de queima do material, influenciaram nos resultados obtidos para os ensaios de retração por secagem livre e de retração por secagem restringida para os concretos estudados;

- a substituição total do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo cerâmico produzido à 700ºC, apresentou elevada intensidade de retração por secagem livre, bem como a maior abertura de fissura, sendo esta de 3,70 mm. Contudo, a substituição parcial deste tipo de agregado cerâmico (50G-700ºC) possibilitou um comportamento semelhante ao do concreto referência, no que se refere ao número de fissuras, porém com abertura levemente superior;

- nos concretos com substituição dos agregados graúdos naturais pelos cerâmicos produzidos à 950ºC e 1100ºC, percebe-se uma equiparação ou até mesmo uma ligeira redução da intensidade da retração por secagem livre, independente do teor de substituição, quando comparado com os resultados obtidos para o concreto referência;

- a substituição parcial do agregado graúdo natural pelo cerâmico produzido à 950ºC apresentou resultados superiores frente à retração por secagem restringida, quando comparado como concreto referência, onde verifica-se uma redução não somente no número de fissuras presentes no concreto (uma), mas também na abertura da mesma (0,15mm). Entretanto, para a substituição total deste tipo de agregado cerâmico, nota-se o aumento do número de fissuras (três) e da abertura das mesmas, quando comparado com o concreto referência;

- nos concretos com substituição do agregado miúdo natural pelo cerâmico produzido à 700ºC, nota-se o aumento da intensidade do fenômeno da retração por secagem livre quando comparado com o concreto referência, independente do teor de substituição do grão (50% ou 100%). Entretanto, o número de fissuras presentes nestes traços foram semelhantes às verificadas no concreto referência, porém com aberturas ligeiramente superiores;

- para a substituição do agregado miúdo natural pelo cerâmico, produzido com temperatura de queima de 950ºC, nota-se a semelhança entre a intensidade do fenômeno da retração por secagem livre do concreto com substituição total e do concreto referência. Conjuntamente percebe-se o número análogo de fissuras presentes, sendo de duas para cada traço de concreto, com aberturas semelhantes, sendo de 0,20mm (duas) para o concreto com agregado cerâmico, e de 0,10mm e 0,20mm para o concreto referência;

- para a substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo cerâmico, produzido com temperatura de queima de 1100ºC, percebe-se que a substituição total contribui para a equiparação da intensidade da retração por secagem livre, assim como para a redução do número de fissuras presentes no concreto (uma), quando comparado com os resultados obtidos para o concreto referência, onde verifica-se a presença de duas fissuras. Contudo, estas fissuras demonstraram ter abertura superior quando comparadas com os demais traços com substituição de agregado miúdo cerâmico;

D. Quanto ao transporte entre o agregado cerâmico e a matriz cimentícia:

- pelos resultados obtidos a partir da realização da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), pela técnica do espectro de raios-x característicos (EDS), percebe-se a existência de transporte da matriz cimentícia para o agregado cerâmico estudado, onde foi possível verificar a presença dos produtos hidratados gerados pelas reações de hidratação do cimento, como por exemplo o cálcio (Ca), evidenciado a ocorrência da precipitação dos cristais hidratados para o interior do agregado cerâmico. Em função do tamanho do agregado miúdo cerâmico, observou-se um preenchimento quase completo do grão, fortalecendo o mesmo por inteiro, enquanto para os agregados graúdos cerâmicos houve uma melhora importante da zona de transição, sendo que o interior do grão (miolo) permaneceu inalterado, devido a sua dimensão superior. Este comportamento justifica os resultados obtidos para as propriedades mecânicas avaliadas (resistência à compressão e módulo de

elasticidade), bem como para o fenômeno da retração por secagem livre e restringida;

- a redução da porosidade dos agregados cerâmicos, gerada pela variação da temperatura de queima do material, não foi um impedimento para a entrada dos produtos hidratados (presença de cálcio) no grão cerâmico.

De forma geral, conclui-se que foi possível verificar a potencialidade do emprego dos agregados cerâmicos como agentes de cura interna visando a redução da intensidade do fenômeno da retração por secagem em concretos. Contudo, há a necessidade de mais estudos nesta área do conhecimento, uma vez que tais resultados estão relacionados com um material cerâmico específico, bem como com o seu emprego em concretos com resistências próximas a 60 MPa.

Além disso, verifica-se ser perfeitamente plausível empregar agregados cerâmicos (graúdos ou miúdos) em substituição aos agregados naturais sem o prejuízo das propriedades mecânicas, como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, dos compósitos cimentícios. Contudo, outros estudos devem ser realizados com o objetivo de comprovar os resultados aqui apresentados, bem como outras propriedades ao que tange à durabilidade do concreto devem ser avaliadas.

Por fim, salienta-se que o uso de materiais alternativos (reciclados) na construção civil vai ao encontro do desenvolvimento sustentável do setor. Neste sentido, além de estudos que contribuam para esta área do conhecimento, julga-se ser relevante a elaboração de normatizações que auxiliem no controle das propriedades e características do material reciclado, bem como na disseminação do mesmo para novas tecnologias.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme ficou demonstrado, o emprego de resíduos cerâmicos, provenientes dos resíduos de construção e demolição (RCD), apresentam potencial frente ao uso como agentes de cura interna em concretos. Desta forma, tais materiais podem auxiliar não somente na redução da magnitude do fenômeno da retração, mas também no combate à fissuração gerada no compósito cimentício. No entanto, evidenciou-se a necessidade de continuidade de pesquisas científicas nesta área do conhecimento, visto que o presente estudo ficou limitado às variáveis controláveis propostas, bem como durante a sua realização surgiram

novos questionamentos. Para tanto, são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros, dentre outros:

- realizar estudos de caracterização de diversos agregados cerâmicos, com diferentes composições de argilas e temperaturas de queima, visando a análise de propriedades como a capacidade de absorção de água, a porosidade, a resistência mecânica e o módulo de elasticidade dos grãos;

- avaliar a aplicação de agregados cerâmicos, com propriedades distintas em relação a capacidade de absorção/desorção de água, resistência mecânica e módulo de elasticidade, como agentes de cura interna em concretos;

- avaliar diferentes teores de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado cerâmico, visando encontrar o teor ideal para reduzir a intensidade do fenômeno da retração em concretos;

- avaliar a aplicação de agregados reciclados cerâmicos como agentes de cura interna em concretos com diferentes classes de resistência (diferentes relações água/cimento);

- avaliar a aplicação de agregados reciclados cerâmicos como agentes de cura interna em concretos, produzidos com diferentes tipos de cimento;

- avaliar a eficiência do emprego de agregados reciclados cerâmicos visando reduzir o fenômeno da autodessecação e da retração autógena em concretos;

- realizar estudos mais aprofundados visando o total entendimento do transporte de água/pasta entre o agregado reciclado e a matriz cimentícia;

- realizar estudos com diferentes tipos de cerâmicas visando possibilitar a modelagem dos resultados, ao que diz respeito a relação das propriedades do agregado cerâmico frente às propriedades mecânicas e de variação de volume (retração livre e retração restringida) dos concretos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKER, P.; ULM, F.-J. Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements. **Nuclear Engineering and Design**, v. 203, n. 2-3, p. 143–158, jan. 2001.

AKCAY, B.; TASDEMIR, M. A. Effects of distribution of lightweight aggregates on internal curing of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 611–616, set. 2010.

ALVES, A. V.; VIEIRA, T. F.; BRITO J.; CORREIA J. R. Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 103–113, ago. 2014.

ALY, T. K.; SANJAYAN, J. G.; COLLINS, F. Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. **Materials and Structures**, v. 41, n. 10, p. 1741–1753, 2008.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **AASHTO PP34-99: Standard practice for estimating the cracking tendency of concrete**. Washington, D. C.: AASHTO, 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 116R-00 - Cement and Concrete Terminology**. Michigan: Farmington Hills, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **ASTM C157/C157M: Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete**. Philadelfia: ASTM, 2008.

_____. **ASTM E 1876: Standard test method for Dinamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. Philadelfia: ASTM, 2009.

AMORIM, P. M. E. **Influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados de betão**. 2008. 173 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

ANGULO, S. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 23: Cimento portland e outros materiais em pó -Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 27: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 45: Agregados - Determinaçao da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica , massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 5739: Concreto - Compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 5752: Materiais Pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 5752: Materiais Pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 8522: Concreto–Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 15270-3: Componentes cerâmicos. Parte 3 - Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedaçao - Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BARCELO, L.; MORANVILLE, M.; CLAVAUD, B. Autogenous shrinkage of concrete: a balance between autogenous swelling and self-desiccation. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 1, p. 177–183, jan. 2005.

BANTHIA, N.; YAN, C.; MINDESS, S. Restrained shrinkage cracking in fiber reinforced concrete: A novel test technique. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 1, p. 9–14, 1996.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1263–1267, 2006.

BAZANT, Z.; NAJJAR, L. Nonlinear water diffusion in nonsatured concrete. **Materials and Structures**, v. 5, n. 25, 1972.

BENBOUDJEMA, F.; MEFTAH, F.; TORRENTI, J.-M. A viscoelastic approach for the assessment of the drying shrinkage behaviour of cementitious materials. **Materials and Structures**, v. 40, n. 2, p. 163–174, 21 set. 2006.

BENTUR, A.; IGARASHI, S.; KOVLER, K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 11, p. 1587–1591, nov. 2001.

BENTZ D. P., JENSEN O. M. Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. **Cement and Concrete Research**, nº 26, pp. 677-685, 2004.

BENTZ, D. P.; SNYDER, K. A. Protected paste volume in concrete: Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 11, p. 1863–1867, nov. 1999.

BENTZ, D. P.; WEISS, W. J. Internal Curing : A 2010 State-of-the- Art Review. **NISTIR 7765**, February, 2011.

BISSCHOP, J.; VAN MIER, J. Effect of aggregates on drying shrinkage microcracking in cement-based composites. **Materials and Structures**, v. 35, n. 8, p. 453–461, 2002.

BJØNTEGAARD, Ø.; HAMMER, T. A.; SELLEVOLD, E. J. On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 427–435, jul. 2004.

BRITO, J. DE; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 4, p. 429–433, abr. 2005.

BURLION, N.; BOURGEOIS, F.; SHAO, J.-F. Effects of desiccation on mechanical behaviour of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 3, p. 367–379, 2005.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003.

220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 280 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.

CARRIJO, P. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto.** 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CASTRO, J.; DE LA VARGA, I.; GOLIAS, M.; WEISS, J. **Extending internal curing concepts to mixtures containing high volumes of fly ash.** International Bridge Conference. **Proceedings** ...Pittsburgh, PA: 2011.

CASTRO, J.; KEISER, L.; GOLIAS, M.; WEISS, J. Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 10, p. 1001–1008, nov. 2011.

CECONELLO, V. **AVALIAÇÃO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO E CINZA DE CASCA DE ARROZ, COM ÊNFASE NA RETRAÇÃO**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

COLINA, H.; ACKER, P. Drying cracks: Kinematics and scale laws. **Materials and Structures**, v. 33, n. 2, p. 101–107, 2000.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto**. 2013. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CORREIA, J. R.; BRITO, J. DE; PEREIRA, A. S. Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. **Materials and Structures**, v. 39, n. 2, p. 169–177, mar. 2006.

CRAEYE, B.; GEIRNAERT, M.; SCHUTTER, G. D. Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 1–13, jan. 2011.

CULTRONE, G. et al. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 24, n. 3, p. 547–564, mar. 2004.

DAL MOLIN, D. C. C.; KULAKOWSKI, M. P.; RIBEIRO, J. L. D. Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa em engenharia civil. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 2, p. 37–49, 2005.

DEBIEB, F.; KENAI, S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 5, p. 886–893, mai. 2008.

ESTEVES, L. P. **Internal curing in cement-based materials**. 2009. 190 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M.; HENDRIKS, C. F.; VAN MAASAKKERS, M. H. J. **The role and influence of recycled aggregate, in "recycled aggregate concrete"** PRO 40: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures (Volume 2). **Anais**...Barcelona: RILEM Publications, 2004. Disponível em: <http://congreso.cimne.com/rilem04/frontal/Papers.htm>. Acesso em: 17 fev. 2012

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735–742, mai. 2007.

FEDUMENTI, M. B. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ NO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO EM RELAÇÃO A PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE, COM ÊNFASE NO TRANSPORTE DE ÍONS CLORETO**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

FONSECA, N.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 6, p. 637–643, jul. 2011.

GOLIAS, M.; CASTRO, J.; WEISS, J. The influence of the initial moisture content of lightweight aggregate on internal curing. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 52–62, out. 2012.

GONÇALVES, A.; ESTEVES, A.; VIEIRA, M. **Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability.** PRO 40: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. **Anais**... Barcelona: RILEM Publications, 2004. Disponível em: <http://congreso.cimne.com/rilem04/frontal/Papers.htm>

GONZALEZ-COROMINAS, A.; ETXEBERRIA, M. Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 618-626, out. 2014.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 429–437, abr. 2008.

GRANGER, L.; TORRENTI, J.; ACKER, P. Thoughts about drying shrinkage: Scale effects and modelling. **Materials and Structures**, v. 30, n. 2, p. 96–105, 1997.

GUJEL, D. A. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DOS AGREGADOS GRAÚDOS NATURAIS POR RECICLADOS DE CONCRETO A PARTIR DE ENSAIOS ESTÁTICO E DINÂMICO**. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

HAN, Y.; ZHANG, J.; LUOSUN, Y.; HAO, T. Effect of internal curing on internal relative humidity and shrinkage of high strength concrete slabs. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 41–49, jun. 2014.

HENKENSIEFKEN, R.; BRIATKA, P.; BENTZ D.; NANTUNG, T.; WEISS, J. Plastic Shrinkage Cracking in Internally Cured Mixtures Made with Pre-wetted Lightweight Aggregate. **Concrete International**, v. 32, n. 2, p. 49–54, 2010.

HOLT, E. E. **Early age autogenous shrinkage of concrete**. Technical Research Centre of Finland, ESPOO, 2001.

HOLT, E. E.; LEIVO, M. Cracking risks associated with early age shrinkage. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 521–530, jul. 2004.

HUA, C.; ACKER, P.; EHRLACHER, A. Analyses and models of the autogenous hardening cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1457–1468, out. 1995.

JENSEN, O. M.; LURA, P. Techniques and materials for internal water curing of concrete. **Materials and Structures**, v. 39, n. 9, p. 817–825, 2006.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F.; LACHOWSKI, E. E.; GLASSER, F. P. Clinker mineral hydration at reduced relative humidities. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 9, p. 1505–1512, set. 1999.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 4, p. 647–654, abr. 2001.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials. II. Experimental observations. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 6, p. 973–978, jun. 2002.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. **Influence of recycled concrete properties aggregate quality.** PRO 40: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. **Anais**... Barcelona: RILEM Publications, 2004. Disponível em: <http://congreso.cimne.com/rilem04/frontal/Papers.htm> Acesso em: setembro de 2012.

KAUFMANN, J.; WINNEFELD, F.; HESSELBARTH, D. Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 541–549, 2004.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 763–769, abr. 2005.

KIM, H. **Crushed Returned Concrete Aggregate in New Concrete: Characterization, Performance, Modeling, Specification, and Application**. 2009. 238 f. Dissertation - College Park, University of Mariland, Mariland.

KIM, H.; BENTZ, D. P. Internal curing with crushed returned concrete aggregates for high performance concretes. **NRMCA Concrete Technology Forum: Focus on Sustainable Development**, p. 1–12, 2008.

KOHNO, K.; OKAMOTO, T.; ISIKAWA, Y.; SIBATA, T.; MORI, H. Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 4, p. 611–614, abr. 1999.

LAM, H. **Effects of Internal Curing Methods on Restrained Shrinkage and Permeability**. 2005. 134 f. Thesis. University of Toronto, Toronto.

LAURITZEN, E. K. **Recycling concrete - An overview of development and challenges.** PRO 40: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. **Anais**... Barcelona: RILEM Publications, 2004. Disponível em: <http://congreso.cimne.com/rilem04/frontal/Papers.htm>. Acesso em: 17 fev. 2012

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduaçao em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 439–449, fev. 2011.

LOPES, A. N. M. **Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura**. 2011. 281 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduaçao em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LURA, P. **Autogenous deformation and internal curing of concrete**. Delft University Press, Netherlands, abr. 2003.

LURA, P. Internal water curing with Liapor aggregates. **HERON**, v. 50, n. 1, p. 5–23, 2005.

LURA, P.; WYRZYKOWSKI, M.; TANG, C.; LEHMANN, E. Internal curing with lightweight aggregate produced from biomass-derived waste. **Cement and Concrete Research**, v. 59, p. 24–33, mai. 2014.

LURA, P.; JENSEN, O.; IGARASHI, S. Experimental observation of internal water curing of concrete. **Materials and Structures**, v. 40, n. 2, p. 211–220, 2007.

LURA, P.; JENSEN, O. M.; VAN BREUGEL, K. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 2, p. 223–232, fev. 2003.

MALISKA, A. **Microscopia eletrônica de varredura.** 2005. 98 f. Departamento de Engenharia Mecânica (EMC), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis. Disponível em: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Microscopia+Eletr□nica+de+Varredura#3>. Acesso em: 3 set. 2012.

MALTA, J. O. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição**. 2012. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisa, elaboração, análise e interpretação dos dados**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

MAS, B.; CLADERA, A.; OLMO, T.; PITARCH, F. Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 612–622, fev. 2012.

MECHTCHERINE, V.; DUDZIAK, L. **Effects of Superabsorbent Polymers on Shrinkage of Concrete: Plastic, Autogenous, Drying**. In: MECHTCHERINE, V.; REINHARDT, H.-W. (Eds.). RILEM State of the Art Reports. Springer Netherlands, 2012. v. 2p. 63–98.

MEHTA, P. K.; AITCIN, P. C. C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, 1990.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. California: McGraw-Hill, 2006.

MOKAREM, D. W.; WEYERS, R. E.; LANE, D. S. Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 918–925, mai. 2005.

MOREIRA, L. H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MELO NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada.** 2008. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

ORDÓÑEZ, S. T. L. **Mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência com adição de polimeros superabsorventes e aditivo redutor de retração**. 2013. 178 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasilia, Brasília.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete. **Materials and Structures**, v. 44, n. 1, p. 155–167, 2011.

PAGNUSSAT, D. T. **Efeito da temperatura de queima de blocos cerâmicos sobre a resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa**. 2013. 211 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. **Cerâmica** [online]. 2010, vol.56, n.339, pp. 237-243. ISSN 0366-6913.

PINTO, M. F.; SOUSA, S. J. G.; HOLANDA, J. N. F. Efeito do ciclo de queima sobre as propriedades tecnológicas de uma massa cerâmica vermelha para revestimento poroso. **Cerâmica** [online]. 2005, vol.51, n.319, pp. 225-229. ISSN 0366-6913.

PUREZA, J. C. C. **Granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha: aspectos tecnológicos e ambientais granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha: Aspectos tecnológicos e ambientais**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RIBEIRO, J. L. D.; TEN CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2001.

RILEM TECHNICAL COMMITTE 196-ICC. **Internal curing of concrete - RILEM TC 196-ICC: State-of-the-Art Report**. Bagneux, France: RILEM Publications, 2007. v. Cp. 139

ROHDEN, A. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SAHMARAN, M. et al. Internal curing of engineered cementitious composites for prevention of early age autogenous shrinkage cracking. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 10, p. 893–901, 2009.

SANT, G.; FERRARIS, C. F.; WEISS, J. Rheological properties of cement pastes: A discussion of structure formation and mechanical property development. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 11, p. 1286–1296, nov. 2008.

SENTHAMARAI, R.; MANOHARAN, P. D. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 9–10, p. 910–913, out. 2005.

SENTHAMARAI, R.; MANOHARAN, P. D.; GOBINATH, D. Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2413–2419, maio 2011.

SHAH, S.; WEISS, W. J.; YANG, W. Shrinkage Cracking - Can It Be Prevented? **Concrete International**, v. 20, n. 4, p. 51–55, 1998.

SHIOTANI, T.; BISSCHOP, J.; MIER, J. V. Temporal and spatial development of drying shrinkage cracking in cement-based materials. **Engineering fracture mechanics**, v. 70, n. 12, p. 1509–1525, 2003.

SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. 2007. 357 f.Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro.

SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali- agregado**. 2007. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SUZUKI, M.; MEDDAH, M. S.; SATO, R. Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 5, p. 373–381, mai. 2009.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 2, p. 281–287, fev. 1995.

VARGAS, M. **Metodologia da pesquisa tecnológica**. Rio de Janeiro: Globo, 1985.

VEJMELKOVÁ, E.; KEPPERT, M.; ROVNANÍKOVÁ, P.; ONDRÁCEK, M.; KERSNER, Z.; CERNY, R. Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 55–61, jan. 2012.

VICENZI, J. **Efeito da adição de chamota em uma massa cerâmica de argila vermelha**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2003. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WITTMANN, F.; BELTZUNG, F.; ZHAO, T.-J. Shrinkage mechanisms, crack formation and service life of reinforced concrete structures. **International Journal of Structural**, v. 1, n. 1, 2009.

ZHANG, M. H.; TAM, C. T.; LEOW, M. P. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 10, p. 1687–1694, out. 2003.

APÊNDICE A – ESTUDO PRELIMINAR

1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A pesquisa experimental é caracterizada como sendo uma sequência de ensaios estruturada, a qual possibilita a determinação entre a causa e o efeito de um determinado fenômeno. Esta metodologia está fortemente apoiada em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, a execução e a análise dos resultados de um experimento (VARGAS, 1985; RIBEIRO; TEN CATEN, 2001; CERVO; BERVIAN, 2002). Neste sentido, a etapa de planejamento do programa experimental, de forma organizada, foi indispensável para o bom andamento da pesquisa.

Este estudo está dividido em três grandes partes: Ensaios preliminares, Ensaios da Fase 1 (Entendimento) e Ensaios da Fase 2 (Aplicação). Na etapa de ensaios preliminares foram realizadas atividades iniciais a fim de beneficiar e de avaliar o resíduo cerâmico empregado, como descrito no item 0.

Na etapa denominada de Ensaios Fase 1, atividades relacionadas ao entendimento do transporte de pasta/água entre o agregado graúdo reciclado cerâmico (agente de cura interna) e a matriz cimentícia foram e continuam sendo desenvolvidas, buscando o real entendimento sobre este fenômeno. As atividades propostas são apresentadas nos itens que seguem o item 1.2.

A etapa chamada de Ensaios Fase 2 designa-se às atividades de aplicação do agente de cura interna estudado nesta pesquisa (agregado graúdo reciclado cerâmico – AGRC) em concretos, de forma a verificar se o mesmo auxilia a mitigar o fenômeno da retração por secagem. Assim sendo, conjuntamente, será realizado um estudo comparativo frente a agentes de cura interna já conhecidos, como os agregados leves e os polímeros superabsorventes, de modo que se verifique a real potencialidade do material estudado.

1.1 ENSAIOS PRELIMINARES

A etapa inicial do trabalho esteve relacionada com o processo de beneficiamento do resíduo cerâmico. Nesta fase foi realizada a britagem deste material, com o emprego de um britador

de mandíbula, figura 1, bem como o peneiramento do agregado obtido, figura 2, assim obtendo-se a separação granulométrica do agregado reciclado cerâmico.

Figura 1: britador de mandíbula

Figura 2: peneirador mecânico

Com o beneficiamento do material cerâmico realizado, partiu-se para a avaliação de características físicas (estado fresco) e mecânicas (estado endurecido) de um concreto com a incorporação de diferentes teores de agregado graúdo reciclado cerâmico (AGRC).

Assim sendo, foram avaliados três traços de concreto distintos, o referência, e dois com teores de substituição de agregado graúdo natural, de origem basáltica, por AGRC, sendo estes teores de 25% e 50%. Para realizar a substituição do agregado natural por AGRC foi composta a curva granulométrica de acordo com o agregado natural utilizado, a fim de manter constante a distribuição de granulometria.

Para a produção dos concretos foi empregado cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), com massa específica de 3,02 g/cm³, agregado miúdo, de origem quartzosa, com massa específica de 2,62g/cm³, e agregado graúdo, de origem basáltica, com massa específica de 2,98g/cm³. Na tabela 1 é apresentado o proporcionamento dos materiais empregados para a produção dos concretos.

Tabela 1: proporcionamento dos materiais

Traço	Parâmetros da mistura			Teor de substituição (%)	Traço (massa)		
	Teor de arg (%)	a/c	Ccim (kg/m³)		c	a	p
Referência	52	0,55	358	-	1	2,42	3,15
25% AGRC				25			
50% AGRC				50			

Antecedendo 72 horas da produção dos concretos, o agregado cerâmico foi submerso em água, mantendo-se neste local até o momento da mistura, assim, possibilitando o emprego do AGRC saturado. Desta forma, padronizou-se a metodologia, onde o AGRC seria retirado da água 10 minutos antes de ser inserido na mistura, a fim de ser possível retirar o excesso de água presente nos grãos, figura 3.

A colocação dos materiais na betoneira seguiu a ordem convencional de produção, onde a única exceção foi o emprego do AGRC no momento final da mistura, figura 4. Tal procedimento foi baseado em estudo de CORDEIRO (2012)[16], onde a ordem de colocação dos materiais na betoneira influenciou na distribuição granulométrica dos agregados na mistura. A metodologia de produção dos concretos foi mantida constante para todos os traços produzidos.

Figura 3: retirada do excesso de água do AGRC

Figura 4: colocação do AGRC na mistura

No estado fresco, realizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone dos concretos, segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998), onde foi possível avaliar a trabalhabilidade das misturas. Assim, mesmo com a realização da saturação do AGRC, a trabalhabilidade observada foi bastante variável, para os três concretos estudados. Na tabela 2 são

186

[16] Trabalho não publicado.

apresentados os resultados do abatimento de tronco de cone, bem como da massa específica dos concretos.

Tabela 2: resultados dos ensaios no estado fresco

Traço	Abatimento (cm)	Massa específica do concreto (g/cm³)	
		1	2
Referência	10,5	2,474	2,508
25% AGRC	4	2,423	2,431
50% AGRC	0	2,325	2,354

Com base nos resultados obtidos para o ensaio de abatimento de tronco de cone, percebeu-se uma grande diferença entre a trabalhabilidade dos concretos estudados. Sabendo que o agregado graúdo reciclado cerâmico (AGRC) estava saturado, acredita-se que tal comportamento deve-se ao formato do grão do AGRC (lamelar), assim influenciando diretamente na trabalhabilidade da mistura.

No entanto, optou-se em realizar os ensaios mecânicos definidos, a fim de avaliar a resistência à compressão uniaxial (NBR 5739/2007) e o módulo de elasticidade (NBR 8522/2004) dos concretos estudados. A tabela 3 apresenta os resultados obtidos nestes ensaios mecânicos.

Tabela 3: resultados obtidos das propriedades mecânicas avaliadas

Traço	Resistência à compressão (MPa)						Módulo de elasticidade (GPa)					
	1 dia		7 dias		14 dias		1 dia		7 dias		14 dias	
	Md	Pt	Md	Pt	Md	Pt	Md	Pt	Md	Pt	Md	Pt
Referência	19,34	19,72	32,10	32,45	32,17	32,59	31,09	33,68	39,49	40,28	38,40	40,90
25% AGRC	20,76	21,73	31,27	32,45	34,28	35,48	24,53	28,00	29,23	30,30	30,80	33,35
50% AGRC	24,52	25,32	35,53	36,19	38,12	40,35	21,32	23,69	30,69	33,06	27,48	28,85

Onde: Md – valor médio. Pt – valor potencial

Analisando os resultados obtidos, tabela 3, observa-se que com a incorporação do AGRC nos concretos, houve uma redução do módulo de elasticidade, contudo um aumento da resistência à compressão. Tal comportamento de redução do módulo de elasticidade ocorreu conforme esperado, visto que se realizou uma substituição do agregado graúdo

basáltico natural pelo agregado graúdo reciclado cerâmico, assim modificando a capacidade de deformação do compósito cimentício.

Entretanto o comportamento dos concretos com a relação à resistência à compressão não era esperado, uma vez que se obteve uma relação direta entre esta propriedade mecânica e o teor de AGRC nas misturas. Suponha-se que a trabalhabilidade das misturas influenciaria negativamente na resistência mecânica, já que gerou uma dificuldade de moldagem dos corpos de prova, no entanto tal comportamento não foi evidenciado.

Conjectura-se que tal fato decorreu das características inerentes do próprio agregado graúdo reciclado cerâmico, onde a porosidade elevada destes grãos possibilitou uma melhora das características da zona de transição do concreto estudado, assim permitindo uma migração de produtos aglomerantes para o interior do AGRC, majorando a sua resistência mecânica.

Tal comportamento de melhora da aderência entre o agregado reciclado cerâmico e a matriz cimentícia já foi observado por Leite (2001) e Cabral (2007), onde a porosidade do material cerâmico permitiu a entrada de produtos aglomerantes, provocando um aumento na resistência mecânica dos concretos avaliados, uma vez que possibilitou uma eliminação da zona de transição (zona frágil). Desta forma, os autores mencionam ainda que não somente a pozolanicidade do material estudado, mas também as características inerentes ao agregado reciclado cerâmico geraram uma melhora das propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios estudados.

Dentro deste contexto, considerou-se extremamente relevante procurar entender a cinética de transporte de pasta/água entre o agregado graúdo reciclado cerâmico e a matriz cimentícia, uma vez que se busca encontrar um equilíbrio entre as propriedades mecânicas e a capacidade de redução da magnitude do fenômeno da retração, através do emprego do procedimento de cura interna.

Portanto, julgou-se necessário iniciar uma investigação, a nível microestrutural, a qual avaliasse as características do AGRC que influenciam não só no procedimento de cura interna, mas também nas propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios, tais como o grau de saturação e a velocidade de absorção e desorção de água/pasta do grão.

1.2 FASE 1 - ENTENDIMENTO

1.2.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A correta execução de um planejamento experimental possibilita uma maior eficiência em termos de informação, se comparado com qualquer outra sequência de ensaios não-estruturada. Isto permite a otimização dos recursos e do tempo empregado na pesquisa, viabilizando em termos técnicos e econômicos a sua realização (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001; MARCONI; LAKATOS, 2002; DAL MOLIN et al., 2005).

Segundo Ribeiro e Ten Caten (2001), a realização de um projeto experimental adequado possibilita ao pesquisador encontrar o ajuste ótimo entre os parâmetros do sistema, maximizando o seu desempenho, reduzindo os custos e tornando-o pouco suscetível aos fatores não controláveis (fatores de ruído). Os parâmetros do sistema são definidos como os fatores que podem influenciar no desempenho do produto, processo ou serviço. Tais parâmetros são subdivididos em fatores controláveis, fatores de ruído e fatores constantes.

De forma geral, os fatores controláveis (variáveis independentes) exercem influência sobre as variáveis de resposta. Os fatores de ruído são variáveis que não podem ser controladas, sendo responsáveis pelo erro experimental e pela ocorrência de variabilidade residual no sistema. Já, os fatores constantes são aquelas variáveis que não foram escolhidas como prioritárias no desenvolvimento da pesquisa, entretanto, devem ser mantidas constantes, uma vez que influenciam nas variáveis de resposta do sistema (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001).

Portanto, quando o planejamento experimental é executado de forma correta, ele possibilita o cumprimento de uma sequência estruturada de ensaios, permitindo com que haja uma interpretação confiável dos dados finais. Desta forma, assegura-se a realização de uma análise estatística coerente e precisa dos resultados, com um maior embasamento científico. Nesta etapa do trabalho foram definidas as variáveis de resposta e os fatores controláveis a serem utilizados nesta fase inicial da pesquisa, bem como, na matriz experimental.

1.2.1.1 Determinação das variáveis de resposta

As variáveis de resposta (variáveis dependentes) são aspectos mensuráveis do produto, os quais possibilitam a quantificação de características e propriedades relacionadas à qualidade do mesmo (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001).

Desta forma, as variáveis dependentes, determinadas como resposta ao estudo deste projeto experimental inicial, estão relacionadas com as características do transporte de pasta/água entre o AGRC e a matriz cimentícia. Logo, estas estão vinculadas às análises de imagem e microscopia realizadas. As variáveis de resposta desta fase inicial da pesquisa são as seguintes:

a) Imagem da Lupa Estereoscópica;
b) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
    i. Obtenção de imagem - elétrons retro-espalhados (BSE);
    ii. Análise de EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*);
    iii. Mapeamento.

A pesquisa procurou avaliar a influência dos fatores controláveis no transporte de pasta/água existente entre o AGRC e a matriz cimentícia. Assim sendo, tais análises microscópicas foram priorizadas nesta fase da pesquisa.

A lupa estereoscópica foi empregada de modo a permitir a aquisição de imagens, assim, proporcionando uma visualização entre a zona de transição do AGRC e da matriz cimentícia. Tais análises foram realizadas após o período de cura, de 28 dias, das amostras estudadas.

As análises no microscópio eletrônico de varredura (MEV) ocorreram de modo a possibilitar a avaliação do transporte de pasta/água existente entre o agregado graúdo reciclado cerâmico (AGRC) e a matriz cimentícia. Tais análises foram realizadas de modo a prover a obtenção de imagens, no modo de exibição de elétrons retro-espalhados (BSE), a determinação da composição (quantitativa e semiquantitativa) das amostras, empregando um espectrômetro por dispersão em energia (EDS - *Energy Dispersive Spectroscopy*), bem como a formação de imagens, com o mapeamento por elementos. As análises de EDS e de mapeamento são realizadas a partir da análise do espectro de raios-x característicos da amostra avaliada.

1.2.1.2 Determinação dos fatores controláveis

Os fatores controláveis (variáveis independentes) são um subconjunto dos parâmetros do sistema, que podem exercer influência sobre as variáveis de resposta. A sua definição em diferentes níveis, significativos à pesquisa, e o seu total controle são necessários, pois,

desta forma, é possível verificar a sua real influência nas variáveis dependentes (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001).

Neste sentido, a partir dos resultados obtidos nos ensaios preliminares, as variáveis controláveis foram então definidas, para o planejamento do programa experimental. De modo a investigar o transporte de pasta/água existente entre o agregado graúdo reciclado cerâmico (AGRC) e a matriz cimentícia, é proposta, nesta fase inicial, a investigação dos efeitos das seguintes variáveis de controle, bem como de suas interações:

a) Tipo de argamassa - traços distintos (1:2; 1:3 e 1:4);
b) Reologia da argamassa - consistências distintas (20±1cm; 24±1cm; 28±1cm);
c) Tipo de AGRC - obtido a partir de temperaturas de queima distintas (800°C, 900°C, 1000°C);
d) Grau de saturação do AGRC.

Tais variáveis controláveis foram escolhidas de modo a possibilitar uma análise não só de matrizes cimentícias distintas, obtidas a partir de diferentes características reológicas das argamassas, avaliadas a partir de traços e consistências distintas, mas também pela diferenciação dos agregados graúdos reciclados cerâmicos (AGRC).

Neste sentido, optou-se em estudar os AGRC com diferença de porosidade, uma vez que se acredita que o tamanho do poro irá influenciar de forma significativa no transporte de pasta/água entre o agregado e a matriz cimentícia, fator este primordial para a ocorrência da cura interna. Para isso, os blocos cerâmicos, que posteriormente originam os AGRC, foram queimados em temperaturas variadas, conforme mencionado anteriormente.

1.2.2 MATRIZ EXPERIMENTAL

Após a definição das variáveis de resposta e dos fatores controláveis, partiu-se para a elaboração da matriz experimental a ser empregada na etapa inicial deste estudo. Na tabela 4 é apresentada a matriz experimental proposta para a análise do transporte de água/pasta entre o agregado reciclado (graúdo cerâmico) e a matriz cimentícia. Os números assinalados (cor vermelha) ao lado das variáveis controláveis designam a nomenclatura das misturas.

Tabela 4: matriz experimental

Misturas (nomenclaturas)	Fatores controláveis				Variáveis de resposta			
	Características da argamassa		Características do AGRC		Análise de MEV			Análise na Lupa
	Traço	Consistência	Temperatura de queima (°C)	Tempo de secagem (min)	Imagem	EDS	Mapeamento	Imagem
A2 - 1	1:2 (2)	20±1 (1)	800 (A)	seco 5 10 15 20	x	x	x	x
A2 - 2		24±1 (2)						
A2 - 3		28±1 (3)						
B2 - 1		20±1	900 (B)					
B2 - 2		24±1						
B2 - 3		28±1						
C2 - 1		20±1	1000 (C)					
C2 - 2		24±1						
C2 - 3		28±1						
A3 - 1	1:3 (3)	20±1 (1)	800 (A)	seco 5 10 15 20	x	x	x	x
A3 - 2		24±1 (2)						
A3 - 3		28±1 (3)						
B3 - 1		20±1	900 (B)					
B3 - 2		24±1						
B3 - 3		28±1						
C3 - 1		20±1	1000 (C)					
C3 - 2		24±1						
C3 - 3		28±1						
A4 - 1	1:4 (4)	20±1 (1)	800 (A)	seco 5 10 15 20	x	x	x	x
A4 - 2		24±1 (2)						
A4 - 3		28±1 (3)						
B4 - 1		20±1	900 (B)					
B4 - 2		24±1						
B4 - 3		28±1						
C4 - 1		20±1	1000 (C)					
C4 - 2		24±1						
C4 - 3		28±1						

Onde: F – temperatura de queima empregada pela empresa fornecedora da cerâmica

1.2.3 MATERIAIS UTILIZADOS

1.2.3.1 Cimento Portland

A fim de caracterizar o cimento empregado na pesquisa, solicitou-se junto à empresa fabricante a caracterização química, física e mecânica do material. Contudo, no sentido de complementar as características obtidas, alguns ensaios laboratoriais encontram-se em andamento, no laboratório do NORIE (UFRGS). As características químicas (tabela 5), físicas (tabela 6) e mecânicas (tabela 7) dos cimentos utilizados na pesquisa são apresentadas a seguir.

Tabela 5: caracterização química

Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - CP V-ARI														
Características avaliadas (% da massa)	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CO_2	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	MnO	P_2O_5	Perda ao fogo	CaO livre	Resíduo Insolúvel	Equivalente alcalino (Na_2O_{eq})*
Resultados (fabricante)	-	-	-	1,02	1,49	3,02	-	-	-	-	2,56	-	0,38	-
Resultados obtidos														
Exigências da NBR 5733/91	-	-	-	≤ 3,0	≤ 6,50	≤ 4,50	-	-	-	-	≤ 4,50		≤ 1,0	-

Tabela 6: caracterização física

Características avaliadas		**CP V-ARI**		
		Resultados (fabricante)	Resultados obtidos	Exigências da NBR 5733/91
Massa específica (cm³/g)		3,11		-
Expansão à quente (mm)		0,0		≤ 5,0
Tempo de pega (h:min)	Início	02:20		≥ 1h
	Fim	03:07		≤ 10h
Consistência normal (%)		30,2		-
Finura Blaine (cm²/g)		4401		≥ 3000
Resíduo peneira #200µm (%)		0,1		≤ 6,0
Resíduo peneira #325µm (%)		1,02		-

Tabela 7: caracterização mecânica

Características avaliadas (MPa)		**CP V-ARI**	
		Resultados (fabricante)	Exigências da NBR 5733/91
Resistência à compressão	1 dia	27,6	≥ 14,0
	3 dias	40,4	≥ 24,0
	7 dias	46,0	≥ 34,0
	28 dias	55,3	-

1.2.3.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo empregado na pesquisa é uma areia de quartzo, de origem natural, selecionada entre um grupo de areias comercializadas no município de Porto Alegre (RS). A

escolha do agregado miúdo foi baseada na distribuição granulométrica, sendo preferida uma distribuição mais contínua.

A areia foi caracterizada quanto as suas propriedades físicas, seguindo os ensaios de determinação da composição granulométrica (NBR NM 248/2003), determinação da massa unitária (NBR NM 45/2006) e determinação de massa específica (NBR NM 52/2009). Para a execução dos ensaios de caracterização, as amostras foram submetidas a um processo de quarteamento, a fim de possibilitar que as mesmas representassem o material em sua totalidade.

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), da UFRGS. Os resultados da caracterização física do agregado miúdo são apresentados tabela 8.

Tabela 8: caracterização física do agregado miúdo

AGREGADO MIÚDO						
Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2005)			
			Retida Acumulada (%) - em massa			
			Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Zona utilizável	Zona ótima	Zona utilizável	Zona ótima
4,75	1	1	0	0	5	10
2,36	4	5	0	10	20	25
1,18	11	16	5	20	30	50
0,60	19	35	15	35	55	70
0,30	34	69	50	65	85	95
0,15	26	95	85	90	95	100
< 0,15	5	100	100	100	100	100
Módulo de Finura		2,21	1,55 - 2,20	2,2	2,90 - 3,50	2,9
Dimensão Máxima (mm)		2,4				
Massa Específica (g/cm³)		2,62				
Massa Unitária (g/cm³)		1,57				

1.2.3.3 Agregado Graúdo Reciclado Cerâmico (AGRC)

Os ensaios de caracterização do agregado graúdo reciclado cerâmico encontram-se em andamento.

1.2.3.4 Pigmento

O pigmento empregado para produção das argamassas foi um pigmento vermelho, próprio para materiais cimentícios. Tal material é a base de óxido de ferro (Fe_2O_3). As caracterizações físicas e químicas deste material encontram-se em andamento.

1.2.3.5 Água

A água empregada na pesquisa, para a produção das argamassas, bem como para realizar a saturação dos agregados graúdos reciclados cerâmicos (AGRC), foi proveniente da rede de abastecimento público, da cidade de Porto Alegre (RS).

1.2.4 MÉTODO DE ENSAIO – TRANSPORTE DE PASTA/ÁGUA ENTRE O AGRC E A MATRIZ CIMENTÍCIA

A fim de avaliar o transporte de pasta/água entre o agregado graúdo reciclado cerâmico (AGRC) e a matriz cimentícia, elaborou-se um método de avaliação. Tal método consistiu na moldagem de uma placa de argamassa, na qual foram imersos agregados graúdos reciclados cerâmicos com diferentes graus de saturação.

Portanto, o ensaio consistiu na moldagem de uma placa de argamassa colorida, com dimensões de 35cm (comprimento) x 18cm (largura) x 7cm (altura), na qual foi inserido o AGRC, com diferentes graus de saturação. Os agregados foram avaliados com 5 formas de saturação distintas, sendo estas: completamente seco (sem saturação) e com tempos de escorrimento (secagem ao ar) de 5, 10, 15 e 20 minutos. A figura 5 demonstra, de forma esquemática, tal método de ensaio empregado.

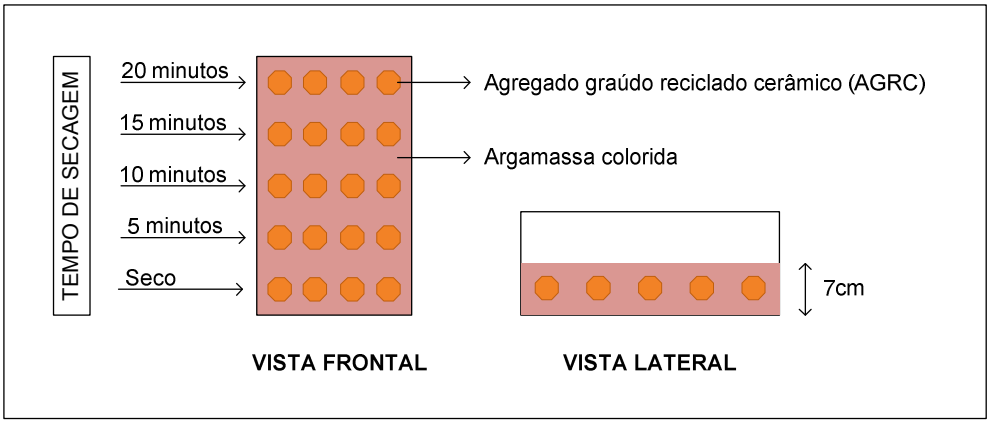


Figura 5: representação esquemática do ensaio de avaliação do transporte pasta/água entre o AGRC e a matriz cimentícia

Optou-se em produzir argamassas coloridas visando à facilidade de obtenção de imagens na lupa estereoscópica. Desta forma, facilitando a análise das imagens obtidas por esta avaliação.

Neste procedimento de ensaio, o AGRC empregado possuiu dimensão característica de agregado graúdo, sendo esta de 19mm, figura 6. Já o procedimento de saturação do AGRC foi realizado do mesmo modo ao mencionado anteriormente, onde os mesmos

permaneceram submersos em água pelo período de 72 horas, conforme demonstrado na figura 7. Cabe ressaltar ainda, que a secagem dos agregados (processo de escorrimento) e a moldagem dos corpos de prova foram realizadas em câmara climatizada, com temperatura (23±2°C) e umidade (70±4%) controladas.

Figura 6: AGRC empregado no ensaio

Figura 7: saturação dos AGRC

1.2.4.1 Produção e Moldagem das Misturas

A produção das argamassas foi definida de forma aleatória, onde a primeira argamassa a ser estudada foi a de traço 1:3 (massa). Esta aleatorização teve por finalidade reduzir qualquer interferência ou possibilidade de erro no processo de produção das misturas, assim minimizando os fatores de ruído presentes no experimento.

A operação de mistura dos materiais foi realizada em uma argamassadeira universal com turbilhonador, com capacidade de 40 litros e rotação de 50rpm. A ordem de colocação dos materiais seguiu os mesmos critérios para as três argamassas produzidas, onde tal sequencia de mistura foi adotada: cimento, água, agregado miúdo, pigmento (vermelho) e o restante de água até atingir a consistência determinada.

O índice de consistência das argamassas foi avaliado segundo as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1996). Na tabela 9 é demonstrado o proporcionamento das argamassas avaliadas (traço 1:3), bem como os resultados obtidos, referentes ao índice de consistência destas misturas.

A moldagem da argamassa foi realizada imediatamente após a produção da mistura. O processo de adensamento adotado foi mecânico, com o auxílio de uma mesa vibratória, na qual foi adensada por 15 segundos, figura 8. Anteriormente a este processo, aplicou-se desmoldante (óleo mineral) em todas as fôrmas, a fim de facilitar a desfôrma dos corpos de prova, após um período de cura de 24h.

Tabela 9: características das argamassas de traço 1:3, com AGRC (T queima de 900°C)

Dados:	Traço argamassa	1:3
	Temperatura de queima - AGRC	900°C

Mistura	Traço - Quantidade de materiais (kg)				Índice de Consistência (cm)	
	Cimento	Areia	Pigmento	Água	Teórico	Obtido (médio)
B3 - 1	3,3	10	0,3	1,54	20±1	21
B3 - 2				1,53	24±1	23
B3 - 3				1,75	28±1	27

Após o adensamento, o corpo de prova foi levado à câmara climatizada para a inserção dos AGRC, com diferentes níveis de saturação. Dentro da câmara climatizada, os agregados graúdos reciclados cerâmicos foram submetidos ao processo de secagem (escorrimento), conforme os tempos mencionados anteriormente, figura 9. Assim, após o período de secagem, pré-determinado, os AGRC foram incorporados à mistura de forma manual, figura 10. Posteriormente, a argamassa foi aplicada, manualmente, de forma a manter o AGRC submerso na mistura, figura 11.

Figura 8: adensamento da argamassa

Figura 9: processo de escorrimento dos AGRC

Figura 10: incorporação do AGRC na argamassa

Figura 11: aplicação final da argamassa

Após 24 horas, os corpos de prova foram desformados e mantidos na câmara climatizada com temperatura e umidade controladas, até a idade de execução dos ensaios mencionados anteriormente.

1.2.4.2 Preparação inicial das amostras para análises

Após a idade de cura (28 dias), as amostras foram preparadas a fim de possibilitar a realização das análises não só na lupa estereoscópica, mas também no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Como durante o procedimento de concretagem haviam sido marcadas as posições onde tinha sido inserido cada um dos tipos de AGRC, com diferentes saturações, como apresentado na figura 11, foi simples a etapa de separação das amostras. Tal atividade de corte foi realizada com o auxílio de uma serra de corte circular (disco diamantado), onde as amostras foram cortadas sobre cada um dos agregados, assim possibilitando a análise da zona de transição entre o AGRC e a matriz cimentícia, conforme demonstra a figura 12.

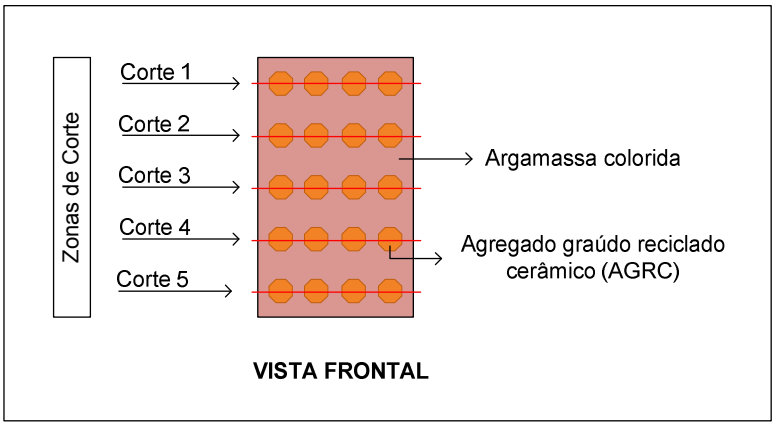


Figura 12: representação esquemática da preparação das amostras (cortes)

Para a análise no microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi necessário reduzir ainda mais as dimensões das amostras. Logo, com o auxílio da serra de corte circular (disco diamantado) foram produzidas amostras com dimensões próximas de 1cm x 1cm x 1cm. Após o corte foi necessário lixar as amostras a fim de padronizar as suas dimensões. Cabe salientar ainda, que o processo de lixamento não foi realizado na superfície a ser analisada no MEV.

A etapa final de preparação das amostras para a análise no MEV foi realizada no Centro de Microscopia Eletrônica, da UFRGS.

1.2.5 MÉTODOS DE ENSAIO

Nesta fase inicial da pesquisa, os ensaios realizados visaram avaliar a microestrutura da zona de transição entre o agregado graúdo reciclado cerâmico e a matriz cimentícia. Para isso, foram obtidas imagens a partir da análise com a lupa estereoscópica, bem como análises a partir da microscopia eletrônica de varredura. Tais métodos de ensaio empregados serão especificados nos itens que seguem.

1.2.5.1 Análise com Lupa Estereoscópica

A análise com a lupa estereoscópica foi realizada com o equipamento de modelo TA-0124 XS OPTON, juntamente com o software HDCE-10A, no laboratório do NORIE (UFRGS). Amostras da zona de transição entre o AGRC e a matriz cimentícia foram analisadas, para as misturas produzidas nesta fase inicial da pesquisa. A figura 13 apresenta o equipamento empregado nesta análise.

Figura 13: lupa estereoscópica

Durante estas análises foi realizado um registro fotográfico, o qual auxiliará no momento de análise dos resultados obtidos. Neste sentido, acredita-se que juntamente com os resultados obtidos pela análise de MEV, seja possível obter respostas que auxiliem o entendimento do transporte de pasta/água entre o AGRC e a matriz cimentícia.

1.2.5.2 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises de microscopia eletrônica de varredura, bem como a preparação das amostras, foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação e resolução limitada pelo volume do feixe de elétrons e o micro volume de interação com a amostra (SILVEIRA, 2007). Segundo Maliska (2005), na microscopia eletrônica de varredura (MEV), os sinais de elétrons secundários (SE) e de elétrons retroespalhados (BSE) são os de maior interesse para a formação das imagens. Assim, a medida que o feixe de elétrons vai varrendo a superfície da amostra analisada, os sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície.

Assim sendo, os elétrons secundários (SE) possibilitam a formação de uma imagem de topografia da superfície da amostra, sendo os responsáveis pela obtenção de imagens de alta resolução, enquanto os elétrons retroespalhados (BSE) fornecem uma imagem característica da variação de composição da amostra, pela diferenciação de tons de cinza (MALISKA, 2005). Onde, os tons claros correspondem às porções constituídas por elementos com número atômico médio maior do que aquelas com tons mais escuros, com número atômico médio menor (SILVEIRA, 2007).

Nesta pesquisa utilizou-se a obtenção de imagem por elétrons retroespalhados (BSE), a determinação da composição qualitativa e semiquantitativa das amostras, bem como a formação de imagens pelo mapeamento de elementos. Para a realização das duas últimas análises mencionadas, é necessária uma análise do espectro de raios-x característicos, o qual utiliza um espectrômetro por dispersão de energia ou EDS (*Energy-Disperse X-Ray Spectroscopy*).

As imagens desta pesquisa foram obtidas com o equipamento Jeol – JSM 5800 Scanning Microscope, do Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CME). As seguintes condições analíticas foram utilizadas para as análises realizadas: tensão de 20kV e vácuo de 10^{-4} Pa. O tempo de contagem do EDS foi de 60s por análise (*livetime*), regulando a intensidade do feixe para obter entre 20% e 30% de tempo morto (*deadtime*), para a obtenção do espectro. Para a análise para a obtenção do perfil microanalítico de EDS (*linescan*), o tempo de contagem foi de 90s, com uma intensidade do feixe regulada para obter um tempo morto de 50% (*deadtime*). Igualmente ao empregado para a realização do mapeamento, contudo com um tempo de contagem de 390s por análise (*livetime*).

Para as análises, as amostras foram preparadas no próprio CME. Onde estas foram secas em estufa, coladas nos porta-amostras de alumínio (*stub*), com auxílio de uma fita de carbono, e metalizadas com carbono. Até a idade de análise, as amostras ficaram armazenadas em dessecadores.

2 RESULTADOS PRELIMINARES

Neste capítulo são demonstrados os resultados preliminares obtidos, a partir das análises realizadas na lupa estereoscópica e no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Conjuntamente, uma breve análise dos resultados obtidos é realizada a fim de verificar se é possível observar a existência do transporte de pasta/água entre o agregado graúdo reciclado cerâmico (AGRC) e a matriz cimentícia.

2.1 LUPA ESTEREOSCÓPICA

A partir da análise com a lupa estereoscópica foram obtidas imagens das diferentes interações analisadas. As figuras 15 e 16 apresentam duas imagens obtidas da zona de transição entre o agregado graúdo reciclado cerâmico (AGRC) e a matriz cimentícia.

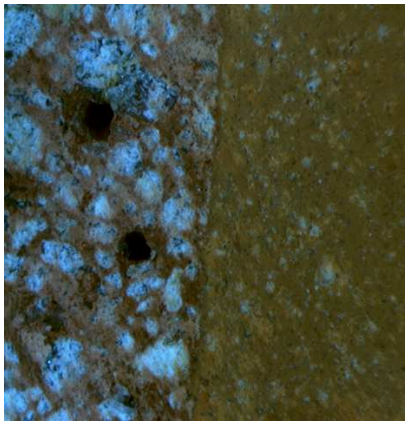


Figura 15: amostra B3-3, com AGRC seco

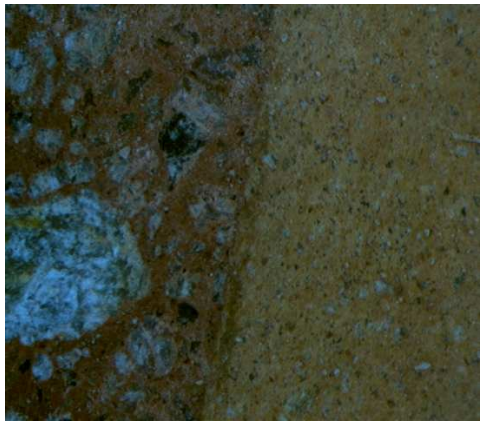


Figura 16: amostra B3-3, com AGRC com 5 minutos de secagem

Analisando as imagens obtidas, não é possível observar nenhum comportamento relacionado com o transporte de pasta/água entre o AGRC e a matriz cimentícia, sendo tal fato observado em todas as imagens obtidas. Nota-se que a pigmentação vermelha na argamassa não é uniformemente distribuída em toda a matriz cimentícia. Entretanto não se pode afirmar se tal fato decorre da homogeneização incorreta do pigmento na argamassa ou se ocorreu devido ao transporte de fluidos entre os dois materiais. Acredita-se que tal ensaio possa ser realizado de forma complementar a outras análises, visto que os resultados obtidos não demonstraram respostas significativas frente ao fenômeno estudado.

2.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A zona de transição entre o AGRC e a matriz cimentícia foi analisada a partir de imagens obtidas por elétrons retroespalhados (BSE). Realizou-se um perfil microanalítico por EDS

(*linescan*) desta zona de transição. A microanálise foi realizada com um tempo de aquisição de 90s para cada um dos pontos. Na primeira análise foi empregada uma magnificação de 100x para todas as amostras avaliadas.

A fim de verificar a potencialidade do ensaio foram realizadas as análises somente em algumas amostras. As amostras definidas buscaram avaliar as condições extremas, de modo que as argamassas definidas foram as com maior e menor consistência, nos casos em que o AGRC incorporado possuía condições distintas de saturação, sendo estas: seco, completamente saturado (5 minutos) e próximo à situação de saturado superfície seca (20 minutos). A tabela 10 demonstra as combinações avaliadas nesta fase inicial da pesquisa.

Tabela 10: amostras avaliadas por MEV - fase 1

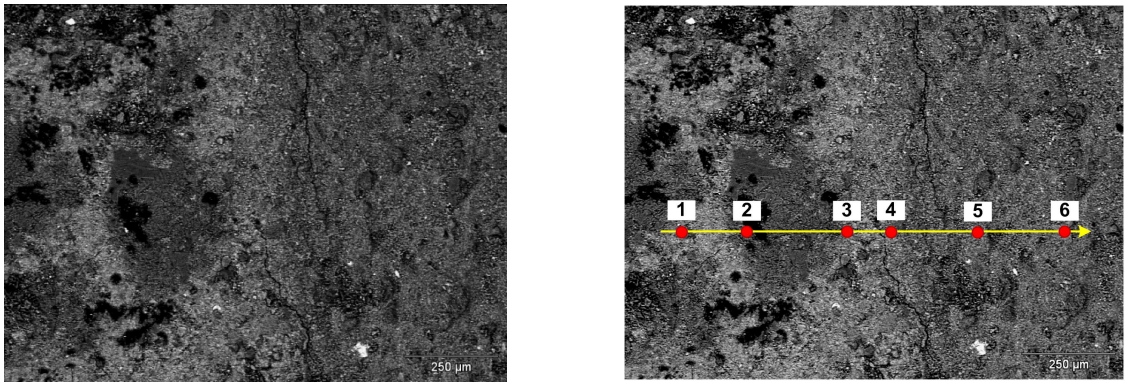
Traços	Fatores controláveis				Variáveis de resposta		
	Argamassa		AGRC		Análise de MEV		
	Traço	Consistência	T de queima (°C)	Tempo de secagem (min)	Imagem	EDS	Mapeamento
B3 - 1	1:3	20±1	900	seco	x	x	x
				5	x	x	x
				10			
				15			
				20	x	x	x
B3 - 2		24±1		seco			
				5			
				10			
				15			
				20			
B3 - 3		28±1		seco	x	x	x
				5	x	x	x
				10			
				15			
				20	x	x	x

2.2.1 Argamassas do tipo B3-1

Neste subitem serão realizadas as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras produzidas com argamassa de consistência de 20±1cm, ou seja, argamassas com menor fluidez.

Na figura 14(a) é demonstrada a imagem obtida por elétrons retroespalhados para a amostra B3-1, com a incorporação de AGRC seco. Com base nesta imagem da zona de transição foram realizadas as análises de EDS e de mapeamento. Na figura 14(b) é demonstrada a microanálise de EDS realizada em linha, já na figura 15 é demonstrado o perfil de distribuição dos elementos na zona de transição dos materiais analisados.

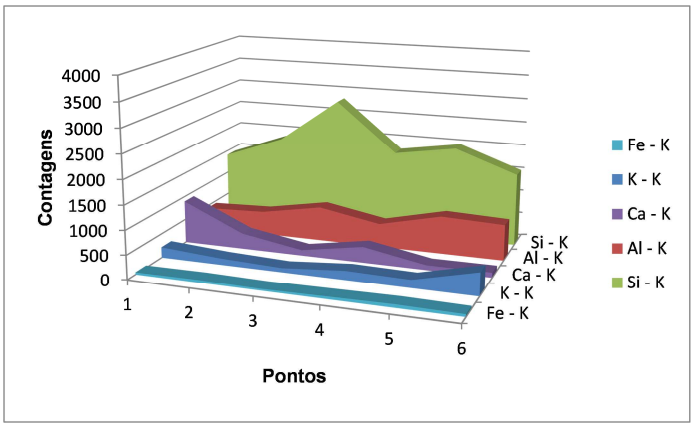
A partir da análise da figura 15, observam-se baixas concentrações de ferro (Fe) e potássio (K) em toda a amostra. Igualmente, de forma distribuída na amostra, notam-se as concentrações de alumínio (Al) e silício (Si). Já o teor de cálcio demonstrou-se mais acentuado no ponto 1, onde encontra-se a matriz cimentícia.



(a) (b)

Figura 14: (a) imagem da zona de transição da amostra B3 - 1, com AGRC seco. Aumento de 100x. (b) microanálise de EDS em linha realizada no material. Aumento de 100x

Conjuntamente, realizou-se um mapeamento de elementos das amostras analisadas, representado na figura 16. Pelas imagens obtidas, nota-se que o elemento ferro (Fe) está distribuído de forma uniforme pela amostra. No entanto, elementos como o cálcio (Ca) e o potássio (K) estão concentrados na matriz cimentícia. Já o alumínio (Al) está mais presente no agregado graúdo reciclado cerâmico, enquanto o silício (Si) concentra-se nos agregados miúdos da matriz cimentícia.

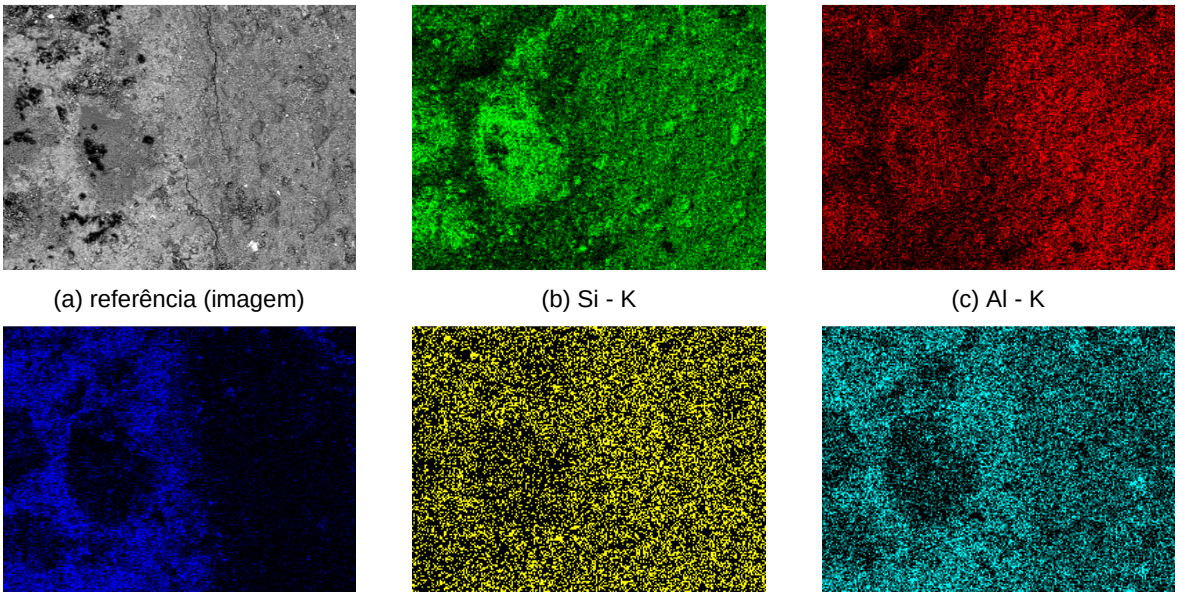


(a)

Elementos	Pontos					
	1	2	3	4	5	6
Fe - K	46	55	35	53	71	54
K - K	222	135	89	190	168	478
Ca - K	897	331	118	335	103	108
Al - K	450	496	726	497	796	752
Si - K	1409	1876	2808	1774	1981	1523

(b)

Figura 15: perfil de distribuição de alguns elementos (Ca, Si, Al, Fe, K) realizado na zona de transição da amostra B3-1, com AGRC seco. (a) demonstração gráfica. (b) representativo dos dados



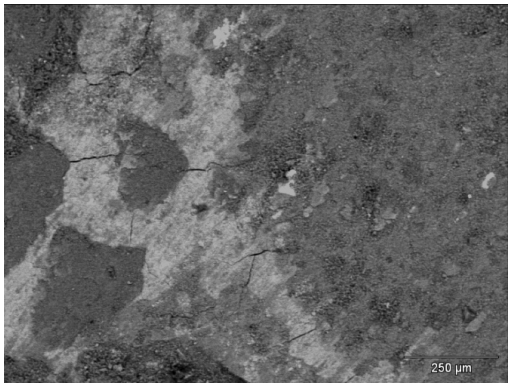
(a) referência (imagem) (b) Si - K (c) Al - K

(d) Ca - K (e) Fe - K (f) K - K

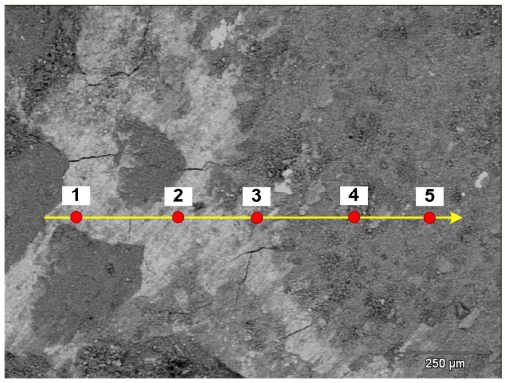
Figura 16: mapeamento dos elementos químicos presentes na amostra B3-1, com AGRC seco. (a) imagem de referência obtida em MEV da zona de transição. (b) mapa identificando a localização de Si. (c) mapa identificando a localização de Al. (d) mapa identificando a localização de Ca. (e) mapa identificando a localização de Fe. (f) mapa identificando a localização de K

Na figura 17(a) é demonstrada a imagem obtida por elétrons retroespalhados da amostra B3-1, com AGRC com secagem de 5 minutos. Nesta imagem é evidenciada a diferença de composição existente entre o AGRC e a matriz cimentícia, demonstrado pelos tons de cinza da imagem. Na figura 17(b) é apresentada a zona em que foi realizada a microanálise de EDS em linha, enquanto o perfil de distribuição obtido é demonstrado na figura 18.

A partir do perfil de distribuição, figura 18, observa-se a grande concentração de cálcio nos pontos 1, 2 e 3, os quais representam a matriz cimentícia. Contudo, nos pontos 4 e 5 nota-se uma queda na presença de cálcio, mas um aumento na concentração de sílica e de alumínio. Uma análise conjunta pode ser realizada a partir do mapeamento desta amostra.

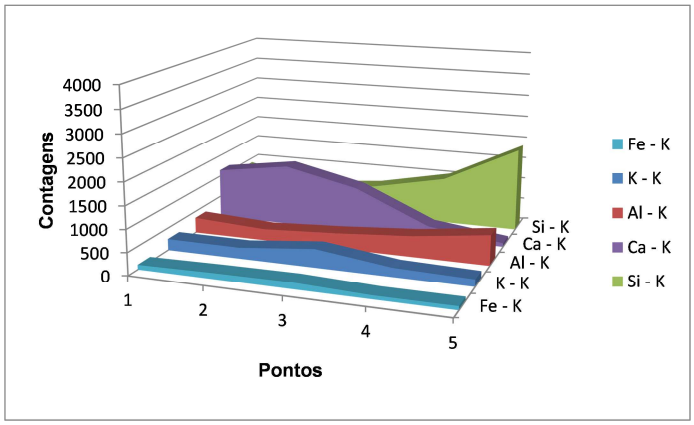


(a)



(b)

Figura 17: (a) imagem da zona de transição da amostra B3 - 1, com AGRC de 5 minutos (tempo de secagem). Aumento de 100x. (b) microanálise de EDS em linha realizada no material. Aumento de 100x



(a)

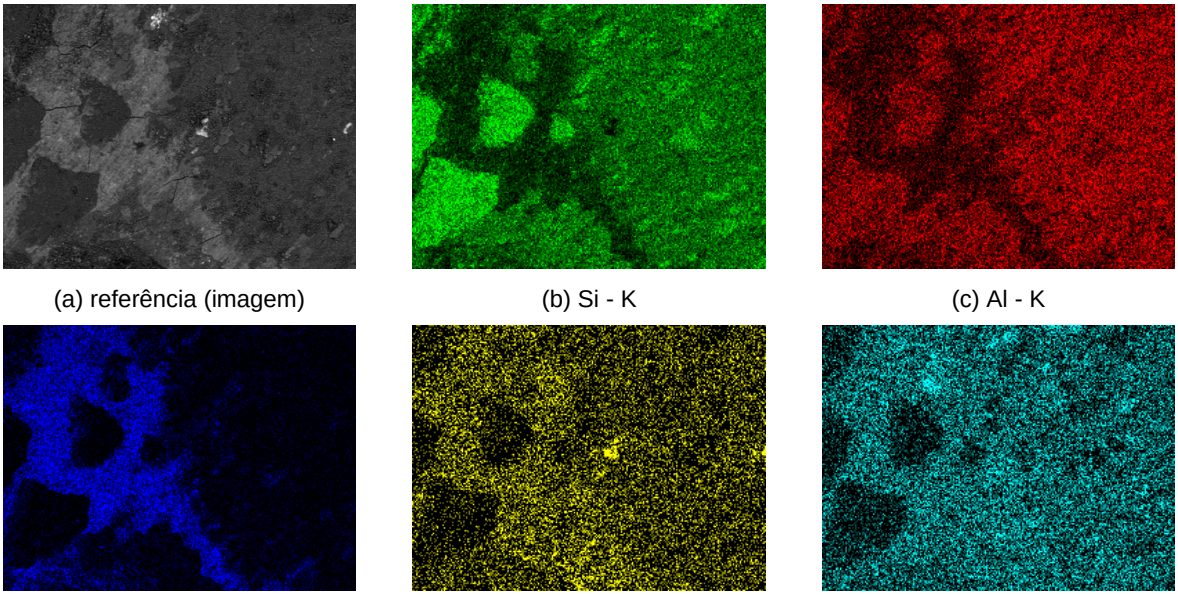
Elementos	Pontos				
	1	2	3	4	5
Fe - K	106	133	146	84	85
K - K	255	250	416	203	161
Ca - K	1145	1387	1018	291	84
Al - K	350	261	351	473	682
Si - K	892	562	713	1057	1888

(b)

Figura 18: perfil de distribuição de alguns elementos (Ca, Si, Al, Fe, K) realizado na zona de transição da amostra B3-1, com AGRC 5 minutos (tempo de secagem). (a) demonstração gráfica. (b) representativo dos dados

Na figura 19 é apresentado o resultado obtido pelo mapeamento dos elementos na amostra B3-1, com AGRC com tempo de secagem de 5 minutos. Pelas imagens obtidas pelo mapeamento, figura 19, observa-se que elementos como ferro (Fe) e potássio (K) estão distribuídos de forma uniforme na amostra. No entanto, o cálcio (Ca) apresenta-se concentrado somente na matriz cimentícia, enquanto que o silício (Si) demonstra-se

acentuadamente presente nos agregados miúdos, e o alumínio (Al) ausente na matriz cimentícia.

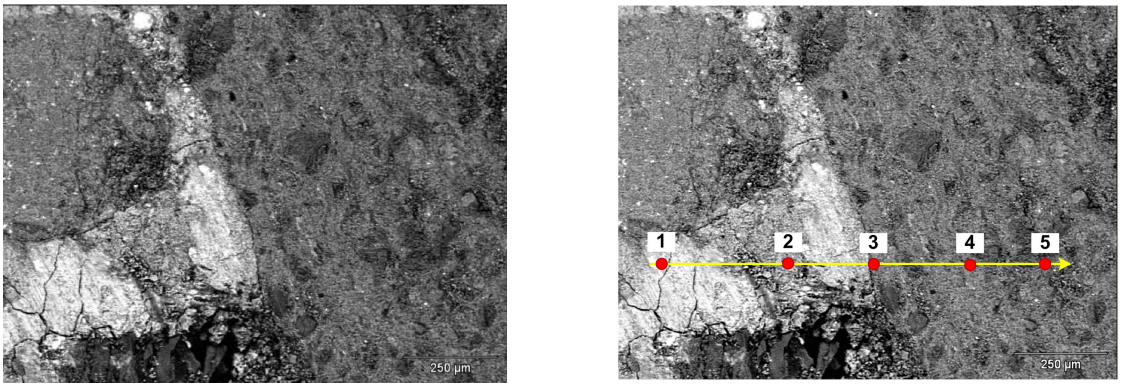


(a) referência (imagem) (b) Si - K (c) Al - K

(d) Ca - K (e) Fe - K (f) K - K

Figura 19: mapeamento dos elementos químicos presentes na amostra B3 - 1, com AGRC 5 minutos (tempo de secagem). (a) imagem de referência obtida em MEV da zona de transição. (b) mapa identificando a localização de Si. (c) mapa identificando a localização de Al. (d) mapa identificando a localização de Ca. (e) mapa identificando a localização de Fe. (f) mapa identificando a localização de K

Na figura 20(a) é apresentada a imagem obtida por elétrons retroespalhados da amostra B3-1, com AGRC com 20 minutos de secagem. Na figura 20(b) é demonstrada a zona de transição em que foi realizada a microanálise de EDS em linha. Na figura 21 é demonstrado o perfil de distribuição obtido a partir da análise realizada.

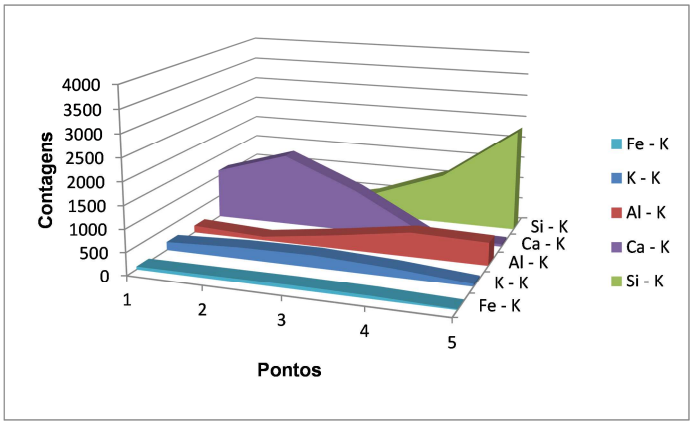


(a) (b)

Figura 20: (a) imagem da zona de transição da amostra B3-1, com AGRC de 20 minutos (tempo de secagem). Aumento de 100x. (b) microanálise de EDS em linha realizada no material. Aumento de 100x

Novamente observa-se uma grande concentração de cálcio (Ca) na matriz cimentícia, pontos 1 e 2. Entretanto, quando próximo ao agregado graúdo reciclado cerâmico, a concentração de cálcio reduz significativamente, enquanto as concentrações de silício (Si) e alumínio (Al) aumentam, pontos 4 e 5. Nas figuras 22(a), (b), (c), (d), (e) e (f) é apresentado o mapeamento de elementos da amostra B3-1, com a inserção de AGRC com tempo de secagem de 20 minutos.

Analisando as figuras obtidas, percebe-se uma distribuição homogênea de elementos como o ferro (Fe) e o potássio (K). No entanto, a distribuição de cálcio (Ca) concentra-se na matriz cimentícia, enquanto que as distribuições de silício (Si) e alumínio (Al) estão mais evidentes nos agregados miúdos e no AGRC.

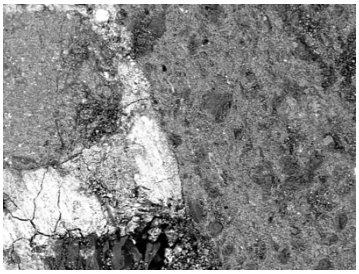


(a)

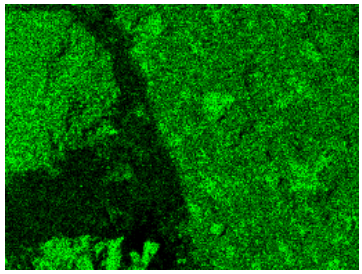
Elementos	Pontos				
	1	2	3	4	5
Fe - K	67	74	83	69	20
K - K	185	257	273	194	61
Ca - K	1136	1637	961	76	60
Al - K	159	81	302	551	512
Si - K	360	152	520	1129	2318

(b)

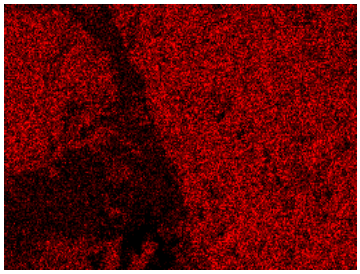
Figura 21: perfil de distribuição de alguns elementos (Ca, Si, Al, Fe, K) realizado na zona de transição da amostra B3-1, com AGRC 20 minutos (tempo de secagem). (a) demonstração gráfica. (b) representativo dos dados



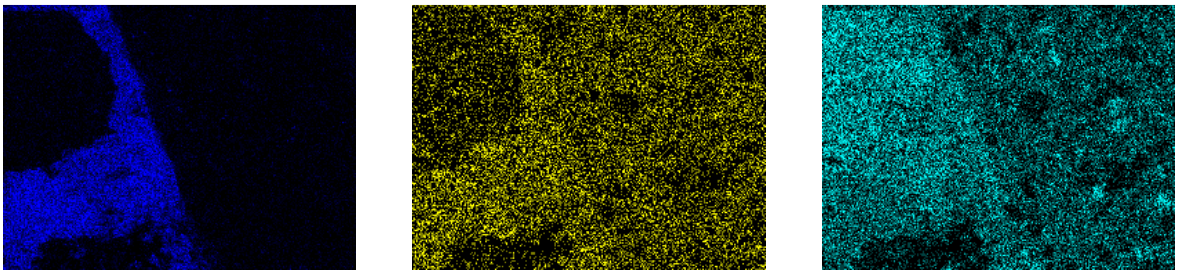
(a) referência (imagem)



(b) Si - K



(c) Al - K



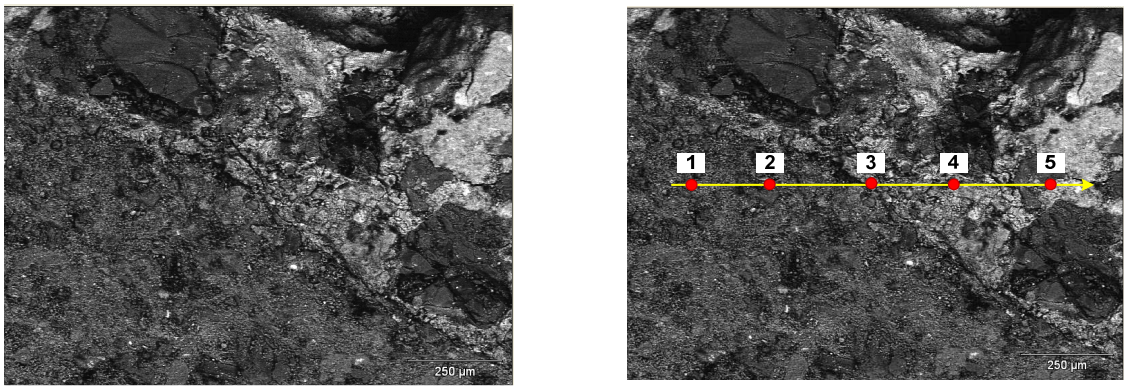
(d) Ca - K (e) Fe - K (f) K - K

Figura 22: mapeamento dos elementos químicos presentes na amostra B3 - 1, com AGRC 20 minutos (tempo de secagem). (a) imagem de referência obtida em MEV da zona de transição. (b) mapa identificando a localização de Si. (c) mapa identificando a localização de Al. (d) mapa identificando a localização de Ca. (e) mapa identificando a localização de Fe. (f) mapa identificando a localização de K

2.2.2 Argamassas do tipo B3-3

Neste subitem serão demonstrados os resultados obtidos na análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras produzidas com argamassa de consistência de 28±1cm, ou seja, das argamassas com maior fluidez.

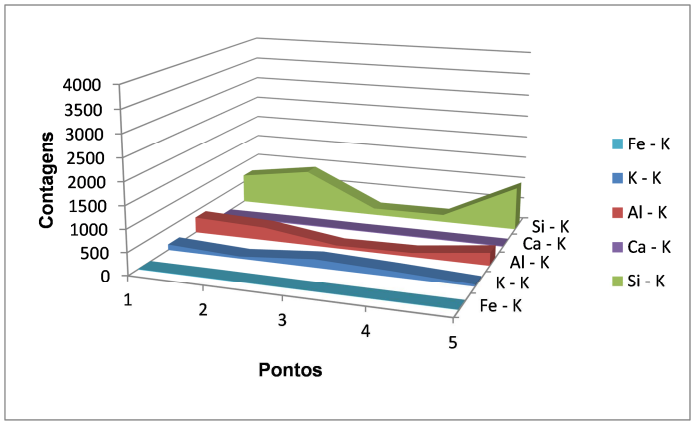
A figura 23(a) é apresentada a imagem obtida por elétrons retroespalhados da amostra B3-3, com AGRC seco. Na figura 23(b) é demonstrada a zona de transição em que foi realizada a microanálise de EDS, em linha. Enquanto, o perfil de distribuição obtido a partir dos resultados da microanálise de EDS, em linha (*linescan*), é apresentado na figura 24.



(a) (b)

Figura 23: (a) imagem da zona de transição da amostra B3-3, com AGRC seco. Aumento de 100x. (b) microanálise de EDS em linha realizada no material. Aumento de 100x

Diferentemente do observado, nesta microanálise de EDS em linha da amostra B3-3, com AGRC seco, não obtivemos diferenças significativas nas concentrações de cálcio (Ca), alumínio (Al) e silício (Si), quando analisada a zona de transição. Contudo, no mapeamento dos elementos presentes na amostra, tal diferenciação de concentração foi verificada, como demonstrado pelas figuras 25(a), (b), (c), (d), (e) e (f).

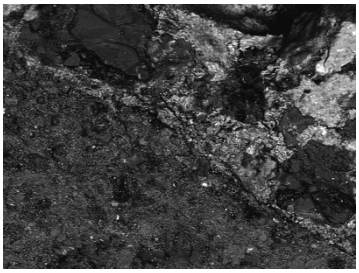


(a)

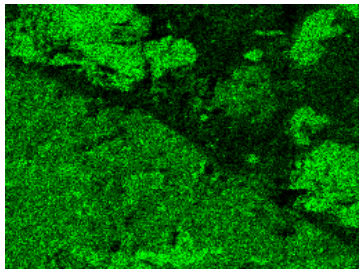
Elementos	Pontos				
	1	2	3	4	5
Fe - K	12	14	7	9	9
K - K	128	49	187	126	47
Ca - K	17	25	16	21	19
Al - K	354	295	66	91	289
Si - K	669	914	156	169	983

(b)

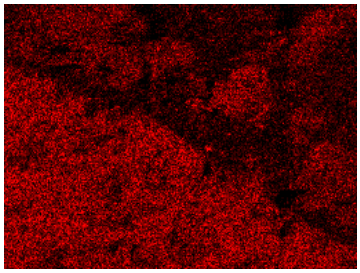
Figura 24: perfil de distribuição de alguns elementos (Ca, Si, Al, Fe, K) realizado na zona de transição da amostra B3-3, com AGRC seco. (a) demonstração gráfica. (b) representativo dos dados



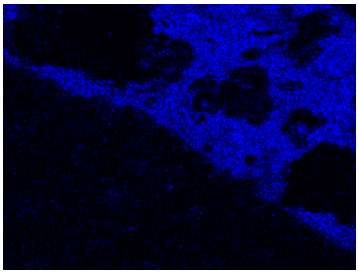
(a) referência (imagem)



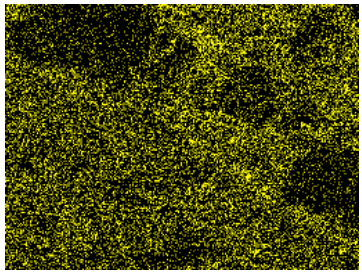
(b) Si - K



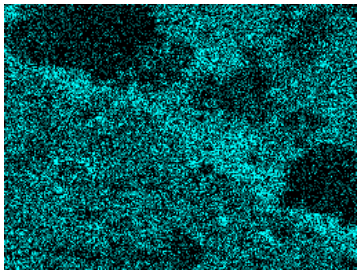
(c) Al - K



(d) Ca - K



(e) Fe - K



(f) K - K

Figura 25: mapeamento dos elementos químicos presentes na amostra B3-3, com AGRC seco. (a) imagem de referência obtida em MEV da zona de transição. (b) mapa identificando a localização de Si. (c) mapa identificando a localização de Al. (d) mapa identificando a localização de Ca. (e) mapa identificando a localização de Fe. (f) mapa identificando a localização de K

Assim sendo, verificamos que a concentração de ferro (Fe) e potássio (K) está distribuída uniformemente na amostra; que o elemento cálcio (Ca) está concentrado na matriz cimentícia, diferentemente do silício (Si) e do alumínio (Al), os quais são mais evidentes nos agregados miúdos e no agregado graúdo reciclado cerâmico (AGRC).

Na figura 26(a) é apresentada a imagem obtida por elétrons retroespalhados da amostra B3-3, com AGRC com secagem de 5 minutos. Na figura 26(b) é demonstrada a zona de transição na qual foi realizada a microanálise de EDS, em linha (*linescan*).

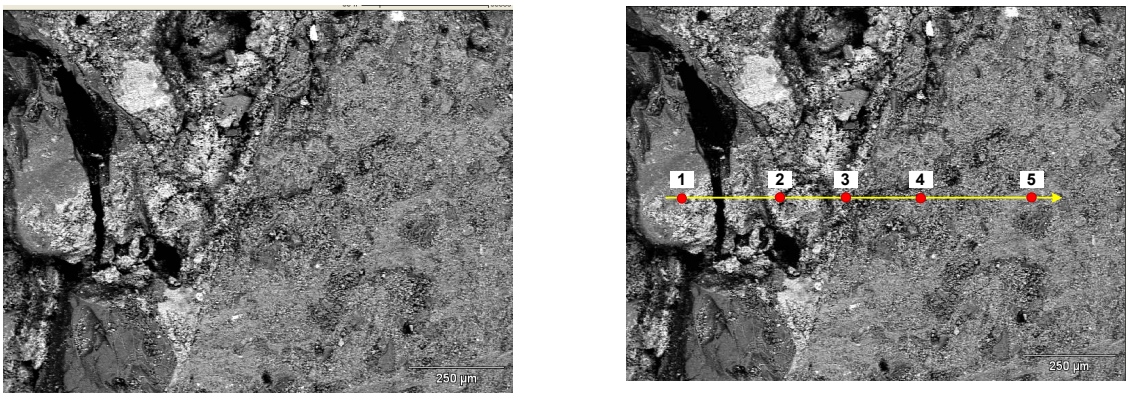
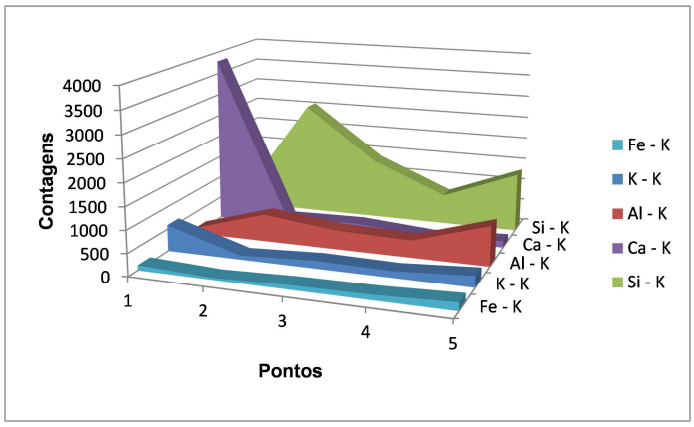


Figura 26: (a) imagem da zona de transição da amostra B3 - 3, com AGRC de 5 minutos (tempo de secagem). Aumento de 100x. (b) microanálise de EDS em linha realizada no material. Aumento de 100x

O perfil de distribuição obtido, a partir dos resultados da microanálise de EDS em linha, é apresentado na figura 27, enquanto que o mapeamento dos elementos é demonstrado na figura 28.

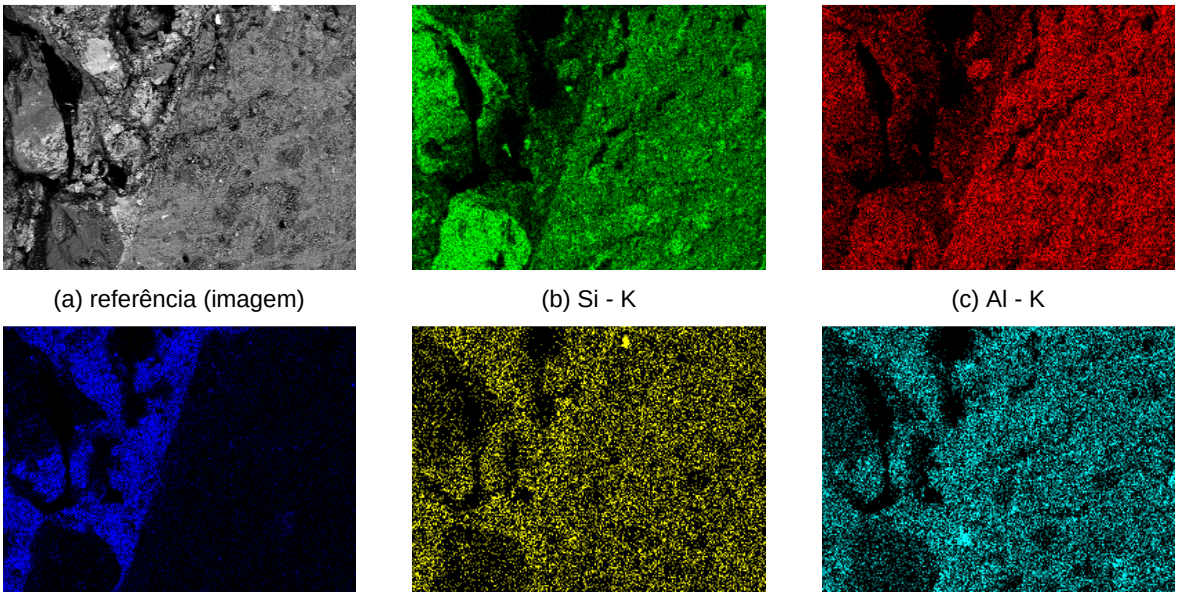


(a)

Elementos	Pontos				
	1	2	3	4	5
Fe - K	116	45	100	117	180
K - K	595	95	174	150	255
Ca - K	3789	165	198	74	153
Al - K	132	622	431	394	901
Si - K	263	2565	1371	680	1333

(b)

Figura 27: perfil de distribuição de alguns elementos (Ca, Si, Al, Fe, K) realizado na zona de transição da amostra B3-3, com AGRC 5 minutos. (a) demonstração gráfica. (b) representativo dos dados



(a) referência (imagem) (b) Si - K (c) Al - K

(d) Ca - K (e) Fe - K (f) K - K

Figura 28: mapeamento dos elementos químicos presentes na amostra B3-3, com AGRC de 5 minutos (tempo de secagem). (a) imagem de referência obtida em MEV da zona de transição. (b) mapa identificando a localização de Si. (c) mapa identificando a localização de Al. (d) mapa identificando a localização de Ca. (e) mapa identificando a localização de Fe. (f) mapa identificando a localização de K

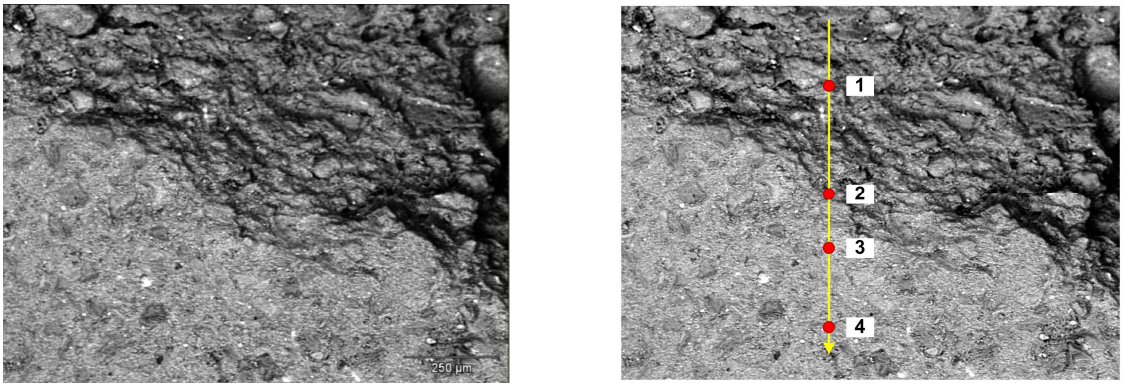
Analisando conjuntamente os resultados obtidos na microanálise de EDS, figura 27, e no mapeamento dos elementos, figura 28, observa-se que a distribuição de ferro (Fe) e potássio (K) é uniforme na amostra, bem como que a concentração de cálcio é acentuada na matriz cimentícia. Já a distribuição de silício (Si) e alumínio (Al) é baixa na matriz cimentícia, estando evidentemente presente nos agregados miúdos e no AGRC.

Na figura 29(a) é demonstrada a imagem obtida por elétrons retroespalhados para a amostra B3-3, com a incorporação de AGRC com tempo de secagem de 20 minutos. Com base nesta imagem da zona de transição foram realizadas as análises de EDS e de mapeamento. Na figura 29(b) é demonstrada a microanálise de EDS realizada em linha,

enquanto na figura 30 é demonstrado o perfil de distribuição dos elementos na zona de transição dos componentes analisados.

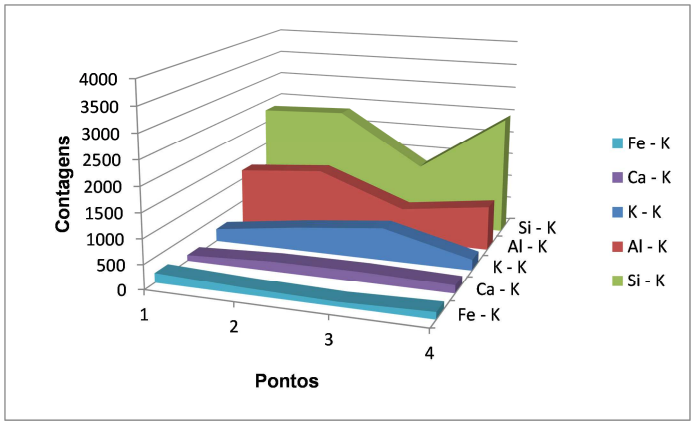
Observando a figura 29(b), nota-se que somente quatro (04) pontos foram avaliados na microanálise de EDS, em linha. Tal fato ocorreu devido a falhas no software empregado, visto que cinco (05) pontos foram selecionados para análise, igualmente às amostras anteriormente citadas.

Analisando os resultados obtidos, observa-se uma tendência de comportamento distinta desta amostra em relação às demais analisadas. Neste caso, de uma forma geral, a concentração de cada um dos elementos (Fe, K, Ca, Si e Al) manteve-se uniforme pela amostra. Assim, não demonstrando nenhuma grande diferença de distribuição dos elementos entre a matriz cimentícia e o agregado graúdo reciclado cerâmico (AGRC).



(a) (b)

Figura 29: (a) imagem da zona de transição da amostra B3 - 3, com AGRC de 20 minutos (tempo de secagem). Aumento de 100x. (b) microanálise de EDS em linha realizada no material. Aumento de 100x



(a)

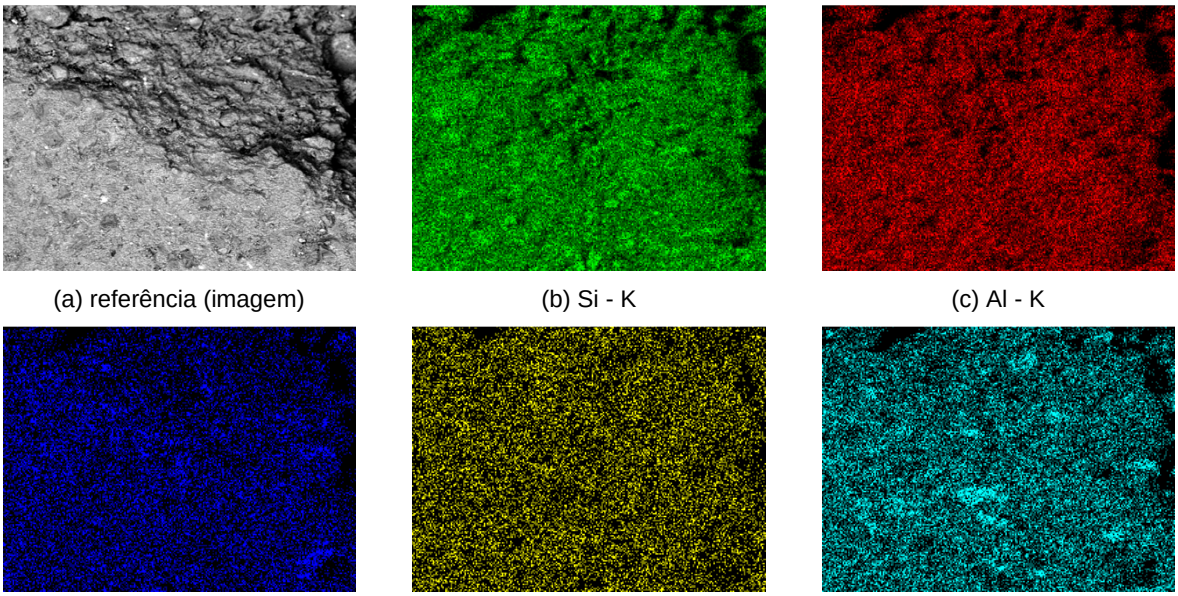
Elementos	Pontos			
	1	2	3	4
Fe - K	199	131	94	142
K - K	258	487	669	220
Ca - K	119	199	207	163
Al - K	1197	1340	683	909
Si - K	2286	2351	1270	2456

(b)

Figura 30: perfil de distribuição de alguns elementos (Ca, Si, Al, Fe, K) realizado na zona de transição da amostra B3-3, com AGRC 20 minutos. (a) demonstração gráfica. (b) representativo dos dados

A fim de complementar esta análise também foi realizado um mapeamento dos elementos, nesta mesma imagem obtida. O mapeamento dos elementos da amostra B3-3, com AGRC incorporado com 20 minutos de secagem, é apresentado na figura 31.

Com os resultados obtidos pelo mapeamento, tal comportamento fica mais evidente. Onde a concentração, de todos os elementos avaliados (Fe, K, Ca, Si e Al), manteve-se uniformemente distribuída em toda a extensão da amostra. Neste sentido, demonstrando a ausência de qualquer concentração tanto na matriz cimentícia quanto no AGRC.



(a) referência (imagem) (b) Si - K (c) Al - K

(d) Ca - K (e) Fe - K (f) K - K

Figura 31: mapeamento dos elementos químicos presentes na amostra B3-3, com AGRC de 20 minutos (tempo de secagem). (a) imagem de referência obtida em MEV da zona de transição. (b) mapa identificando a localização de Si. (c) mapa identificando a localização de Al. (d) mapa identificando a localização de Ca. (e) mapa identificando a localização de Fe. (f) mapa identificando a localização de K

Cabe salientar, que de forma a comprovar tal comportamento, as mesmas análises foram repetidas em outra área da mesma amostra, originando uma imagem distinta da

combinação B3-3, com AGRC incorporado com secagem de 20 minutos. Os resultados desta segunda análise demonstraram comportamento semelhante, onde a distribuição dos elementos manteve-se uniformemente distribuída na totalidade da amostra analisada.

Portanto, acredita-se na potencialidade desta análise, visto que foi possível observar diferenças de comportamento, resultantes do transporte de pasta/água entre a matriz cimentícia e o AGRC. Conjuntamente, acredita-se que fatores relacionados com a reologia da argamassa e com características do agregado graúdo reciclado cerâmico (porosidade), bem como suas interações exercem influência direta na cinética de transporte de pasta/água.

APÊNDICE B – RESULTADOS INDIVIDUAIS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO MATERIAL CERÂMICO

	Produção dos corpos de prova				
	Método 1		Método 2		
Temperatura de queima da cerâmica (ºC)	950º	1100º	700º	950º	1100º
Resistência à compressão do material cerâmico (MPa)	23,23	64,46	11,56	21,65	38,93
	30,93	61,98	9,57	23,03	30,21
	36,29	57,65	9,79	21,17	36,90
	32,38	46,75	10,61	25,61	32,41
	37,33	43,63	11,41	26,99	42,13
	37,08	82,24	10,51	22,14	36,46
	34,32	46,04	10,99	22,00	39,28
	35,35	81,17	9,20	25,37	41,69
	37,89	57,77	11,30	24,79	38,99
	27,10	54,49	11,71	24,19	31,48
	32,00	51,89	11,44	26,60	41,61
	38,19	79,55	10,33	22,74	37,53
	34,39	81,63	9,64	21,78	41,04
	26,49	47,95	10,20	25,02	43,49
	34,64	52,76	12,51	23,22	32,08
	37,57	74,10	10,71	26,16	30,49
	25,42	47,88	11,75	22,05	44,06
	33,65	42,56	11,86	24,99	36,96
	31,29	50,93	11,17	21,77	29,35
	32,72	71,10	9,33	22,82	32,87
	22,91	58,21	9,19	25,42	31,12
		79,49	10,97	26,88	31,09
		71,60			30,76
		73,05			41,03
		67,99			41,76
		81,03			
		71,03			
		71,14			

APÊNDICE C – RESULTADOS INDIVIDUAIS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Traços	Resistência à compressão axial média (MPa)																	
	Idade (dias)																	
	3			Média	Desvio padrão	Coef. variação (%)	7			Média	Desvio padrão	Coef. variação (%)	28			Média	Desvio padrão	Coef. variação (%)
Referência	42,62	43,44	43,57	**43,21**	**0,51**	**1,19**	51,76	52,19	50,07	**51,34**	**1,12**	**2,18**	64,84	58,99	64,55	**62,79**	**3,30**	**5,25**
50G-700	23,24	22,33	21,90	**22,49**	**0,68**	**3,04**	27,21	27,41	26,26	**26,96**	**0,62**	**2,30**	32,14	33,00	33,37	**32,83**	**0,63**	**1,92**
100G-700	17,35	18,64	17,23	**17,74**	**0,78**	**4,40**	19,77	20,10	19,91	**19,93**	**0,17**	**0,85**	25,47	24,94	26,02	**25,47**	**0,54**	**2,10**
50G-900	38,78	35,98	37,15	**37,30**	**1,41**	**3,78**	44,50	43,98	41,06	**43,18**	**1,86**	**4,30**	51,61	53,75	54,30	**53,22**	**1,42**	**2,68**
100G-900	34,23	32,60	32,03	**32,95**	**1,14**	**3,46**	37,50	39,14	37,85	**38,16**	**0,86**	**2,26**	47,74	46,70	46,64	**47,03**	**0,62**	**1,32**
50G-1100	42,06	44,10	40,11	**42,09**	**2,00**	**4,74**	49,70	50,32	55,74	**51,92**	**3,32**	**6,40**	67,80	65,86	65,76	**66,47**	**1,15**	**1,74**
100G-1100	41,49	46,18	43,44	**43,70**	**2,35**	**5,38**	54,15	51,85	54,56	**53,52**	**1,46**	**2,73**	69,07	74,66	71,63	**71,79**	**2,80**	**3,90**
50M-700	34,09	34,03	33,94	**34,02**	**0,07**	**0,21**	44,61	45,64	44,34	**44,86**	**0,69**	**1,53**	58,01	61,10	55,04	**58,05**	**3,03**	**5,23**
100M-700	33,42	30,66	33,49	**32,52**	**1,62**	**4,97**	43,89	43,83	43,81	**43,84**	**0,04**	**0,10**	57,39	56,14	54,05	**55,86**	**1,69**	**3,02**
50M-900	42,25	41,92	44,33	**42,83**	**1,31**	**3,05**	50,92	53,71	54,78	**53,14**	**2,00**	**3,76**	55,23	56,26	54,99	**55,50**	**0,67**	**1,22**
100M-900	44,44	41,93	43,88	**43,42**	**1,32**	**3,03**	56,45	56,64	58,45	**57,18**	**1,10**	**1,93**	75,70	72,54	73,08	**73,78**	**1,69**	**2,29**
50M-1100	43,99	42,78	43,79	**43,52**	**0,65**	**1,50**	51,07	54,23	53,47	**52,92**	**1,65**	**3,12**	59,61	61,82	55,85	**59,09**	**3,02**	**5,10**
100M-1100	37,44	42,23	41,69	**40,45**	**2,62**	**6,48**	56,31	58,99	60,02	**58,44**	**1,92**	**3,28**	72,90	70,71	66,76	**70,12**	**3,11**	**4,44**

APÊNDICE D – RESULTADOS INDIVIDUAIS OBTIDOS NO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

Traços	Módulo de elasticidade médio (GPa)																	
	Idade (dias)																	
	3			Média	Desvio padrão	Coef. variação (%)	7			Média	Desvio padrão	Coef. variação (%)	28			Média	Desvio padrão	Coef. variação (%)
Referência	27,7	29,3	27,7	**28,23**	**0,92**	**3,27**	30,3	30,1	23,6	**28,00**	**3,81**	**13,61**	33	37,3	32,3	**34,20**	**2,71**	**7,92**
50G-700	15,6	15,3	16,3	**15,73**	**0,51**	**3,26**	17,6	17	17,3	**17,30**	**0,30**	**1,73**	19,7	23,2	21	**21,30**	**1,77**	**8,31**
100G-700	9,4	9,8	9,3	**9,50**	**0,26**	**2,79**	11,1	10,8	11,6	**11,17**	**0,40**	**3,62**	13,5	12,9	11,3	**12,57**	**1,14**	**9,05**
50G-900	17,3	17	15,6	**16,63**	**0,91**	**5,46**	19,9	19,4	19,2	**19,50**	**0,36**	**1,85**	24,2	23,3	22,6	**23,37**	**0,80**	**3,43**
100G-900	10,9	11,7	11,3	**11,30**	**0,40**	**3,54**	13,3	12,7	13,2	**13,07**	**0,32**	**2,46**	13,6	14,4	14,1	**14,03**	**0,40**	**2,88**
50G-1100	18,2	23,2	23,4	**21,60**	**2,95**	**13,64**	25,3	23,4	26,3	**25,00**	**1,47**	**5,89**	26,8	27,5	25,9	**26,73**	**0,80**	**3,00**
100G-1100	20,6	17,9	18,2	**18,90**	**1,48**	**7,83**	19	18,5	18,9	**18,80**	**0,26**	**1,41**	20,6	21,5	21,7	**21,27**	**0,59**	**2,76**
50M-700	22,2	21,8	22,7	**22,23**	**0,45**	**2,03**	23,6	24	26,5	**24,70**	**1,57**	**6,36**	28,9	28,2	28,1	**28,40**	**0,44**	**1,53**
100M-700	16,3	19,2	16,3	**17,27**	**1,67**	**9,70**	22,3	23,5	21,3	**22,37**	**1,10**	**4,92**	25	24,3	26,2	**25,17**	**0,96**	**3,82**
50M-900	24,8	24,5	25,1	**24,80**	**0,30**	**1,21**	27,6	28	27,9	**27,83**	**0,21**	**0,75**	32,4	29,8	32,4	**31,53**	**1,50**	**4,76**
100M-900	22,5	22,9	23,9	**23,10**	**0,72**	**3,12**	25,4	25,9	23,6	**24,97**	**1,21**	**4,85**	28,9	26,6	28,2	**27,90**	**1,18**	**4,23**
50M-1100	27,8	29,2	26,8	**27,93**	**1,21**	**4,32**	30,7	34,4	30,2	**31,77**	**2,29**	**7,22**	33,3	36,4	32,1	**33,93**	**2,22**	**6,54**
100M-1100	24,3	25,8	27,3	**25,80**	**1,50**	**5,81**	29,7	26,7	26,4	**27,60**	**1,82**	**6,61**	31,6	28,5	31,5	**30,53**	**1,76**	**5,77**

APÊNDICE E – RESULTADOS DE RETRAÇÃO POR SECAGEM LIVRE

Traços	CP	Retração por secagem livre (µm)							
		Idades (dias)							
		1	4	7	14	28	56	112	224
Referência	1	35,1	-25,2	-70,2	2,0	-129,1	-185,8	-220,7	-305,1
	2	23,8	36,3	196,2	27,1	-278,4	-267,8	-409,9	-423,7
	3	112,4	97,2	86,7	115,8	-215,7	-257,5	-309,5	-333,9
50G-700	1	389,8	426,3	436,8	424,4	-	-601,8	-611,0	-615,0
	2	164,2	23,2	-842,9	126,8	-535,2	-702,4	-664,0	-640,9
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
100G-700	1	474,9	467,9	270,8	544,9	-871,9	-1099,5	-1048,6	-1055,2
	2	-89,3	-596,8	-353,6	0,0	-1015,5	-1134,0	-1031,8	-1032,5
	3	80,3	-24,5	-	106,2	-839,7	-1177,8	-1102,4	-1101,8
50G-900	1	34,1	150,0	36,2	53,3	-13,8	-271,3	-287,7	-339,8
	2	-187,7	-28,2	-118,7	-17,0	-211,8	-375,9	-380,0	-446,7
	3	45,4	82,4	131,3	120,1	-158,3	-338,5	-363,6	-403,2
100G-900	1	-99,6	17,7	19,7	29,6	-93,3	-286,6	-309,6	-345,8
	2	-175,1	127,4	207,7	188,6	-17,1	-289,9	-530,7	-587,8
	3	-211,7	-24,9	-75,6	-115,0	284,4	-267,5	-505,4	-516,7
50G-1100	1	116,6	-34,3	90,7	0,7	112,6	-199,6	-315,5	-375,1
	2	-126,3	-150,9	-304,4	-391,4	-691,1	-548,9	-340,0	-385,6
	3	-24,5	-2,0	0,7	12,7	228,6	-519,3	-187,0	-232,3
100G-1100	1	-207,7	-1,3	36,8	44,7	411,7	-229,3	-381,1	-376,5
	2	-289,5	-230,5	-220,8	-178,2	-353,3	-341,5	-300,7	-287,8
	3	-21,0	455,2	392,3	465,4	53,3	-218,6	-349,6	-378,6
50M-700	1	131,6	-	378,3	43,2	-337,1	-547,2	-539,3	-554,5
	2	147,0	-	-211,9	148,3	-237,1	-580,3	-557,1	-612,8
	3	-56,8	-	-380,3	89,1	-434,4	-616,7	-626,0	-615,4
100M-700	1	40,2	190,6	182,0	1,3	-410,5	-429,6	-535,9	-492,3
	2	14,4	195,7	182,0	-28,1	-552,8	-707,0	-861,2	-844,9
	3	62,6	154,8	101,5	-23,7	-456,9	-710,9	-717,5	-710,9
50M-900	1	71,0	-42,7	-206,0	13,8	-215,7	-460,4	-530,2	-521,7
	2	76,9	-78,2	-73,6	40,7	-268,7	-444,9	-427,8	-390,3
	3	34,8	-92,0	-62,5	19,1	-429,8	-525,2	-550,8	-559,4
100M-900	1	125,9	121,3	167,5	-1,3	-222,9	-304,7	-407,7	-380,0
	2	86,6	107,5	170,5	-4,6	-131,8	-289,3	-357,5	-343,1
	3	48,9	50,3	138,2	-19,2	-170,0	-306,9	-359,9	-339,4
50M-1100	1	98,5	-4,6	39,0	92,5	-277,0	-644,8	-581,3	-554,9
	2	11,9	-103,1	-157,7	-2,6	-292,1	-480,8	-476,9	-471,0
	3	-5,9	-44,2	-155,2	31,7	-307,6	-646,5	-659,0	-643,2
100M-1100	1	77,7	161,3	87,6	-77,7	-104,7	-185,1	-267,4	-228,6
	2	85,0	147,3	164,1	2,6	-233,3	-354,6	-400,1	-388,3
	3	57,4	149,9	95,2	-44,3	-127,1	-219,7	-264,1	-258,9

APÊNDICE F – RESULTADOS DE RETRAÇÃO POR SECAGEM RESTRINGIDA

Idades das leituras (dias)	RESULTADOS DE RETRAÇÃO POR SECAGEM RESTRINGIDA - TENSÕES (mV)										
	Traços de concreto estudados										
	Referência	50G - 700º	100G - 700º	50G - 950º	100G - 950º	50M - 700º	100M - 700º	50M - 950º	100M - 950º	50M - 1100º	100M - 1100º
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0136	0,4120	0,2690	-0,0295	5,5782	0,6940	0,0000	0,0340	0,8303	0,0509	0,4676
3	0,0271	0,3904	0,3097	-0,0444	-2,2548	0,6481	0,0966	0,0680	0,7939	0,1019	0,3985
4	0,0407	0,3107	0,4354	0,0114	19,9015	0,6366	0,2133	0,1020	0,7476	0,1528	0,3135
5	0,0542	0,2620	0,5137	0,0627	16,0550	0,4704	0,3111	0,1360	0,6911	0,2038	0,2411
6	0,0678	0,2264	0,5695	0,1034	10,9287	0,3732	0,3879	0,1700	0,6379	0,2547	0,1744
7	0,0813	0,1919	0,6321	0,1389	5,8513	0,2936	0,4315	0,2040	0,5943	0,3056	0,1245
8	0,0949	0,1554	0,6705	0,1659	4,7271	0,2238	0,4605	0,2380	0,5497	0,3566	0,0797
9	0,1084	0,1162	0,7450	0,2004	6,9096	0,1709	0,5179	0,2720	0,4953	0,4075	0,0226
10	0,1220	0,0898	0,3818	0,2296	10,3661	0,1050	0,5249	0,3034	0,4708	0,3873	0,0032
11	0,1355	0,0674	0,1139	0,2471	15,0603	0,0535	0,2852	0,3459	0,4301	0,3570	0,0067
12	0,1491	0,0418	0,0934	0,2771	24,6910	0,0199	0,1854	0,3845	0,3922	0,3301	0,0103
13	0,1626	0,0182	0,0961	0,3049	27,4798	0,0110	0,1612	0,4207	0,3675	0,3068	0,0139
14	0,1762	0,0207	0,1092	0,3236	25,4040	0,1077	0,1201	0,4424	0,3514	0,2909	0,0175
15	0,1897	0,0000	0,0997	0,3414	22,5448	0,3681	0,0871	0,4592	0,3280	0,2789	0,0210
16	0,2033	0,0000	0,0944	0,3655	33,8531	0,3800	0,0695	0,4940	0,3093	0,2548	0,0246
17	0,2168	0,0000	0,0870	0,3824	33,9658	0,3879	0,0487	0,5065	0,2893	0,2468	0,0282

18	0,2304	0,0000	0,0731	0,3982	33,9989	0,3898	0,0384	0,5317	0,2626	0,2283	0,0318
19	0,2440	0,0100	0,0643	0,4107	34,0065	0,3904	0,0297	0,5615	0,3122	0,2073	0,0353
20	0,2575	0,0500	0,0842	0,4243	34,0065	0,3970	0,0176	0,5769	0,3248	0,1962	0,0389
21	0,2711	0,0500	0,1137	0,4349	34,0065	0,3999	-0,0057	0,5864	0,3220	0,1866	0,0425
22	0,2757	0,0521	0,1293	0,4418	33,9893	0,4000	-0,0174	0,5994	0,3008	0,1790	0,0461
23	0,2881	0,0507	0,1356	0,5274	34,0165	0,3979	-0,0354	0,6120	0,3033	0,1699	0,0496
24	0,2160	0,0570	0,1200	0,4955	34,0165	0,0651	-0,0414	0,6296	0,2782	0,1573	0,0532
25	0,1874	0,0600	0,1053	0,4667	31,9368	0,0790	-0,0396	0,6505	0,2574	0,1495	0,0568
26	0,1898	0,0600	0,0931	0,4695	32,0747	0,1166	-0,0389	0,6619	0,2389	0,1445	0,0604
27	0,1842	0,0641	0,0800	0,4722	32,2127	0,1486	-0,0457	0,6767	0,2259	0,1365	0,0639
28	0,1812	0,0716	0,1096	0,4749	32,3507	0,1807	-0,0503	0,6693	0,2040	0,1400	0,0675
29	0,1852	0,0790	0,1391	0,4777	32,4887	0,2127	-0,0586	0,6799	0,2595	0,1306	0,0711
30	0,1788	0,0864	0,1687	0,4804	32,6267	0,2447	-1,3353	0,6694	0,4237	0,1385	0,0747
31	0,1774	0,0939	0,1740	0,4832	32,7647	0,2768	-1,3057	0,6796	0,4144	0,1306	0,0782
32	0,1757	0,1013	0,1793	0,4859	32,9026	0,3088	-1,2762	0,7010	0,4100	0,1133	0,0818
33	0,1770	0,1088	0,1846	0,4887	33,0406	0,3408	-1,2466	0,7164	0,4021	0,1055	0,0854
34	0,1853	0,1162	0,1899	0,4914	33,1786	0,3728	-1,2413	0,7287	0,3960	0,0951	0,0890
35	0,1823	0,1236	0,1951	0,4941	33,3166	0,4049	-1,2360	0,7362	0,3848	0,0862	0,0925
36	0,1905	0,1311	0,2004	0,4969	33,4546	0,4369	-1,2307	0,7435	0,3800	0,0833	0,0961
37	0,1931	0,1385	0,2057	0,4996	33,5926	0,4689	-1,2254	0,7547	0,3703	0,0765	0,3453
38	0,1956	0,1459	0,2110	0,5024	33,7305	0,5010	-1,2202	0,6949	0,3600	0,0649	0,3583
39	0,2016	0,1534	0,2163	0,5051	33,8685	0,5330	-1,2149	0,0594	0,3577	0,4609	0,3573

40	0,2014	0,1608	0,2216	0,5079	34,0065	0,5650	-1,2096	0,0521	0,3501	0,6098	0,3557
41	0,2016	0,1683	0,2269	0,5271	34,0065	0,5970	-1,2043	0,0500	0,3500	0,6051	0,3538
42	0,1995	0,1757	0,2322	0,5308	34,0065	0,5906	-1,1990	0,0500	0,3499	0,6006	0,3542
43	0,2035	0,1831	0,2375	0,5286	34,0065	0,5921	-1,1937	0,0499	0,3412	0,6001	0,3503
44	0,2064	0,1906	0,2427	0,5309	34,0065	0,5955	-1,1884	0,0457	0,3400	0,5999	0,3503
45	0,2078	0,1980	0,2480	0,5350	34,0065	0,5963	-1,1831	0,0301	0,3400	0,5998	0,3508
46	0,2019	0,1893	0,2427	0,5421	34,0065	0,5967	-1,1778	0,0301	0,3393	0,5998	0,3510
47	0,2022	0,1899	0,1807	0,5533	34,0065	0,5961	-1,1726	0,0302	0,3399	0,5987	0,3507
48	0,2024	0,1947	0,1365	0,5538	33,8355	0,5973	-1,1673	0,0301	0,3370	0,5979	0,3505
49	0,2026	0,1960	0,0910	0,5623	33,8362	0,5951	-1,1726	0,0296	0,3305	0,5978	0,3523
50	0,2029	0,1995	0,0590	0,5484	33,8368	0,6000	-1,2346	0,0300	0,3301	0,5966	0,3533
51	0,2031	0,2025	0,0857	0,5591	33,8375	0,6026	-1,2788	0,0300	0,3300	0,5986	0,3528
52	0,2034	0,1998	0,0800	0,5402	33,8382	0,6003	-1,3243	0,0300	0,3300	0,5994	0,3525
53	0,2036	0,1981	0,0867	0,5537	33,8388	0,6069	-1,3563	0,0300	0,3311	0,5997	0,3532
54	0,2038	0,2007	0,0629	0,5715	33,8395	0,6032	-1,3296	0,0300	0,3386	0,5997	0,3500
55	0,2041	0,2203	0,0320	0,5792	33,8402	0,6005	-1,3353	0,0300	0,3399	0,5996	0,3501
56	0,2043	0,2274	0,0282	0,5826	33,8408	0,6000	-1,3286	0,0300	0,3407	0,5995	0,3503
57	0,2046	0,2455	0,0111	0,5858	33,8415	0,6000	-1,3524	0,0300	0,3500	0,5992	0,3511
58	0,2048	0,2484	0,0078	0,5845	33,8422	0,6001	-1,3833	0,0300	0,3504	0,5992	0,3504
59	0,2050	0,2402	0,0010	0,5930	33,8428	0,6004	-1,3871	0,0300	0,3501	0,5996	0,3502
60	0,2053	0,2333	0,0000	0,5994	33,8435	0,5989	-1,4042	0,0300	0,3531	0,5994	0,3522
61	0,2055	0,2320	0,0000	0,6055	33,8434	0,5937	-1,4075	0,0300	0,3586	0,5992	0,3503

62	0,2058	0,2333	0,0000	0,6081	33,8433	0,5996	-1,4143	0,0300	0,3591	0,5997	0,3503
63	0,2060	0,2553	0,0000	0,6115	33,8433	0,5998	-1,4153	0,0297	0,3559	0,5999	0,3503
64	0,2062	0,2575	0,0000	0,6154	33,8432	0,5997	-1,4153	0,0300	0,3560	0,6036	0,3501
65	0,2113	0,2870	0,0000	0,6155	33,8431	0,5999	-1,4153	0,0300	0,3551	0,6054	0,3510
66	0,2141	0,3100	0,0000	0,6109	33,8430	0,6000	-1,4153	0,0300	0,3631	0,6054	0,3528
67	0,2093	0,3100	0,0000	0,6055	33,8430	0,6027	-1,4153	0,0297	0,3680	0,6078	0,3521
68	0,2084	0,3100	0,0000	0,6028	33,8429	0,6100	-1,4153	0,0300	0,3678	0,6072	0,3539
69	0,2081	0,3101	0,0000	0,6091	33,8316	0,6058	-1,4153	0,0300	0,3694	0,6081	0,3547
70	0,2166	0,3105	0,0000	0,6139	33,8202	0,6102	-1,4153	0,0300	0,3698	0,6083	0,3546
71	0,2144	0,3142	0,0000	0,6138	33,8089	0,6101	-1,4153	0,0300	0,3700	0,6098	0,3541
72	0,1657	0,3146	0,0000	0,6150	33,7976	0,6111	-1,4153	0,0300	0,3701	0,6099	0,3535
73	0,0697	0,3180	0,0000	0,6111	33,7862	0,6110	-1,4153	0,0300	0,3901	0,6100	0,3530
74	0,0663	0,3199	0,0000	0,6100	33,7749	0,6171	-1,4153	0,0300	0,4272	0,6100	0,3514
75	0,0709	0,3205	0,0000	0,6095	33,7635	0,6199	-1,4153	0,0300	0,4306	0,6104	0,3601
76	0,0663	0,3240	0,0000	0,6110	33,7522	0,6200	-1,4153	0,0300	0,4300	0,6150	0,3600
77	0,0650	0,3250	0,0000	0,6116	33,7409	0,6200	-1,4153	0,0299	0,4300	0,6218	0,3600
78	0,0665	0,3289	0,0000	0,6135	33,7295	0,6200	-1,4153	0,0300	0,4528	0,6282	0,3602
79	0,0604	0,3347	0,0000	0,6155	33,7182	0,6200	-1,4153	0,0300	0,4800	0,6299	0,3600
80	0,0614	0,3397	0,0000	0,6190	33,7069	0,6200	-1,4153	0,0300	0,4800	0,6304	0,3600
81	0,0654	0,3400	0,0000	0,6201	33,6955	0,6200	-1,4153	0,0300	0,4800	0,6364	0,3600
82	0,0688	0,3401	0,0000	0,6211	33,6842	0,6200	-1,4153	0,0283	0,4800	0,6478	0,3600
83	0,0725	0,3431	0,0000	0,6164	33,6729	0,6200	-1,4153	0,0300	0,4800	0,6500	0,3600

84	0,0657	0,3471	0,0000	0,6142	33,6615	0,6200	-1,4153	0,0299	0,4800	0,6507	0,3597
85	0,0656	0,3454	0,0000	0,6076	33,6502	0,6200	-1,4153	0,0288	0,4799	0,6599	0,3594
86	0,0653	0,3460	0,0000	0,6159	33,6515	0,6097	-1,4153	0,0296	0,4799	0,6681	0,3584
87	0,0651	0,3470	0,0000	0,6152	33,6528	0,6200	-1,4153	0,0296	0,4798	0,6714	0,3576
88	0,0648	0,3500	0,0000	0,6177	33,6541	0,6200	-1,4153	0,0295	0,4783	0,6771	0,3555
89	0,0636	0,3506	0,0000	0,6167	33,6554	0,6200	-1,4153	0,0300	0,4742	0,6796	0,3558
90	0,0688	0,3486	0,0000	0,6214	33,6567	0,6215	-1,4153	0,0300	0,4668	0,6800	0,3553
91	0,0636	0,3548	0,0000	0,6223	33,6580	0,6200	-1,4153	0,0294	0,4763	0,6801	0,3596
92	0,0664	0,3559	0,0000	0,6246	33,6593	0,6201	-1,4153	0,0300	0,4788	0,6808	0,3581
93	0,0665	0,3523	0,0000	0,6248	33,6606	0,6200	-1,4153	0,0300	0,4800	0,6877	0,3549
94	0,0663	0,3531	0,0000	0,6253	33,6619	0,6201	-1,4153	0,0300	0,4800	0,6978	0,3535
95	0,0725	0,3444	0,0000	0,6249	33,6632	0,6212	-1,4153	0,0300	0,4800	0,7000	0,3510
96	0,0735	0,3409	0,0000	0,6267	33,6645	0,6260	-1,4153	0,0256	0,4800	0,6992	0,3503
97	0,0691	0,3430	0,0000	0,6287	33,6658	0,6244	-1,4153	0,0183	0,4800	0,6980	0,3501
98	0,0649	0,3522	0,0000	0,6303	33,6671	0,6260	-1,4153	0,0300	0,4800	0,7120	0,3501
99	0,0628	0,3574	0,0000	0,6310	33,6684	0,6289	-1,4153	0,0300	0,4800	0,7164	0,3501
100	0,0608	0,3599	0,0000	0,6315	33,6697	0,6298	-1,4153	0,0300	0,4800	0,7204	0,3502
101	0,0637	0,3592	0,0000	0,6322	33,6710	0,6299	-1,4153	0,0299	0,4800	0,7214	0,3500
102	0,0690	0,3590	0,0000	0,6252	33,6723	0,6299	-1,4153	0,0300	0,4801	0,7205	0,3501
103	0,0636	0,3600	0,0000	0,6350	33,6404	0,6197	-1,4153	0,0300	0,4800	0,7189	0,3500
104	0,0614	0,3602	0,0000	0,6313	33,6086	0,6285	-1,4153	0,0300	0,4800	0,7185	0,3500
105	0,0666	0,3604	0,0000	0,6334	33,5767	0,6249	-1,4153	0,0300	0,4801	0,7177	0,3500

106	0,0737	0,3616	0,0000	0,6332	33,5449	0,6202	-1,4153	0,0300	0,4801	0,7161	0,3500
107	0,0726	0,3585	0,0000	0,6234	33,5130	0,6212	-1,4153	0,0300	0,4802	0,7135	0,3500
108	0,0633	0,3601	0,0000	0,6194	33,4811	0,6281	-1,4153	0,0300	0,4823	0,7120	0,3500
109	0,0650	0,3636	0,0000	0,6223	33,4493	0,6297	-1,4153	0,0300	0,4884	0,7111	0,3500
110	0,0654	0,3628	0,0000	0,6114	33,4174	0,6295	-1,4153	0,0300	0,4897	0,7104	0,3500
111	0,0732	0,3631	0,0000	0,6114	33,3856	0,6283	-1,4153	0,0300	0,4896	0,7105	0,3500
112	0,0733	0,3734	0,0000	0,6120	33,3537	0,6245	-1,4153	0,0300	0,4900	0,7103	0,3500
113	0,0680	0,3780	0,0000	0,6133	33,3219	0,6223	-1,4153	0,0300	0,4909	0,7101	0,3500
114	0,0703	0,3786	0,0000	0,6154	33,2900	0,6225	-1,4153	0,0300	0,4957	0,7100	0,3500
115	0,0664	0,3778	0,0000	0,6163	33,2582	0,6207	-1,4153	0,0300	0,4974	0,7100	0,3500
116	0,0750	0,3762	0,0000	0,6173	33,2263	0,6208	-1,4153	0,0300	0,3012	0,7100	0,3531
117	0,0730	0,3745	0,0000	0,6194	33,1945	0,6207	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7100	0,3599
118	0,0668	0,3743	0,0000	0,6009	33,1626	0,6212	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7100	0,3600
119	0,0649	0,3720	0,0000	0,5943	32,8262	0,5975	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7100	0,3600
120	0,0742	0,3724	0,0000	0,6199	33,1646	0,5861	-1,4153	0,0299	0,0000	0,7100	0,3558
121	0,0640	0,3742	0,0000	0,6211	33,5030	0,6253	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7100	0,3526
122	0,0675	0,3759	0,0000	0,6178	33,8414	0,6274	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7100	0,3585
123	0,0631	0,3702	0,0000	0,6210	33,7985	0,6228	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7161	0,3597
124	0,0651	0,3674	0,0000	0,6237	33,7556	0,6260	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7300	0,3591
125	0,0726	0,3799	0,0000	0,6238	33,7128	0,6207	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7300	0,3572
126	0,0694	0,3800	0,0000	0,6172	33,6699	0,6206	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7300	0,3528
127	0,0667	0,3795	0,0000	0,6254	33,6636	0,6115	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7287	0,3511

128	0,0692	0,3836	0,0000	0,6256	33,6574	0,6224	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7262	0,3502
129	0,0723	0,3812	0,0000	0,6273	33,6511	0,6238	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7300	0,3502
130	0,0785	0,3816	0,0000	0,6288	33,6449	0,6246	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7300	0,3501
131	0,0673	0,3790	0,0000	0,6301	33,6386	0,6246	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7300	0,3500
132	0,0677	0,3828	0,0000	0,6228	33,6324	0,6262	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7300	0,3500
133	0,0684	0,3859	0,0000	0,6222	33,6261	0,6294	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7300	0,3500
134	0,0701	0,3882	0,0000	0,6236	33,6199	0,6300	-1,4153	0,0304	0,0000	0,7300	0,3500
135	0,0754	0,3891	0,0000	0,6243	33,6136	0,6300	-1,4153	0,0309	0,0000	0,7300	0,3501
136	0,0715	0,3896	0,0000	0,6248	33,6073	0,6300	-1,4153	0,0301	0,0000	0,7300	0,3523
137	0,0703	0,3907	0,0000	0,6226	33,6011	0,6300	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7300	0,3631
138	0,0764	0,3923	0,0000	0,6221	33,5948	0,6300	-1,4153	0,0301	0,0000	0,7300	0,3759
139	0,0755	0,3924	0,0000	0,6226	33,5886	0,6300	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7299	0,3800
140	0,0729	0,3930	0,0000	0,6234	33,5823	0,6300	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7298	0,3800
141	0,0710	0,3960	0,0000	0,6219	33,5761	0,6300	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7295	0,3800
142	0,0697	0,3997	0,0000	0,6215	33,5698	0,6300	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7292	0,3801
143	0,0632	0,4000	0,0000	0,6172	33,5636	0,6301	-1,4153	0,0300	0,0000	0,7292	0,3830
144	0,0751	0,4002	0,0000	0,6048	33,5573	0,6300	-1,4153	0,0222	0,0000	0,7306	0,3876
145	0,0701	0,4001	0,0000	0,6377	33,5511	0,6300	-1,4153	0,0157	0,0000	0,7402	0,3900
146	0,0656	0,4000	0,0000	0,6772	33,5448	0,6300	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7482	0,3900
147	0,0698	0,4001	0,0000	0,6776	33,5386	0,6300	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7491	0,3900
148	0,0659	0,4000	0,0000	0,6785	33,5323	0,6300	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7496	0,3897
149	0,0686	0,3999	0,0000	0,6737	33,5261	0,6300	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7499	0,3899

150	0,0654	0,4001	0,0000	0,6763	33,5198	0,6214	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7500	0,3900
151	0,0741	0,4001	0,0000	0,6752	33,5135	0,6198	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7501	0,3900
152	0,0739	0,4016	0,0000	0,6747	33,5073	0,6202	-1,4153	0,0097	0,0000	0,7509	0,0000
153	0,0764	0,4047	0,0000	0,6619	33,5010	0,6201	-1,4153	0,0091	0,0000	0,7523	0,0000
154	0,0809	0,4013	0,0000	0,6738	33,5866	0,6064	-1,4153	0,0099	0,0000	0,7506	0,0000
155	0,0673	0,4065	0,0000	0,6738	33,6721	0,6200	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7504	0,0000
156	0,0691	0,4161	0,0000	0,6738	33,7577	0,6200	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7507	0,0000
157	0,0709	0,4199	0,0000	0,6699	33,8432	0,6200	-1,4153	0,0086	0,0000	0,7536	0,0000
158	0,0750	0,4140	0,0000	0,6739	33,8432	0,6151	-1,4153	0,0093	0,0000	0,7548	0,0000
159	0,0737	0,4165	0,0000	0,6741	33,8432	0,6200	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
160	0,0765	0,4150	0,0000	0,6748	33,8432	0,6200	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
161	0,0741	0,4130	0,0000	0,6759	33,8433	0,6200	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
162	0,0770	0,4094	0,0000	0,6765	33,8433	0,6201	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
163	0,0721	0,4115	0,0000	0,6774	33,8433	0,6201	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
164	0,0712	0,4124	0,0000	0,6781	33,8433	0,6205	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
165	0,0768	0,4129	0,0000	0,6766	33,8433	0,6210	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
166	0,0697	0,4131	0,0000	0,6601	33,8434	0,6255	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
167	0,0752	0,4109	0,0000	0,6461	33,8434	0,6397	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
168	0,0706	0,4104	0,0000	0,6353	33,8434	0,6491	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
169	0,0786	0,4100	0,0000	0,6331	33,8434	0,6500	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
170	0,0773	0,4117	0,0000	0,6317	33,8434	0,6500	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
171	0,0781	0,4403	0,0000	0,6287	33,8434	0,6500	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000

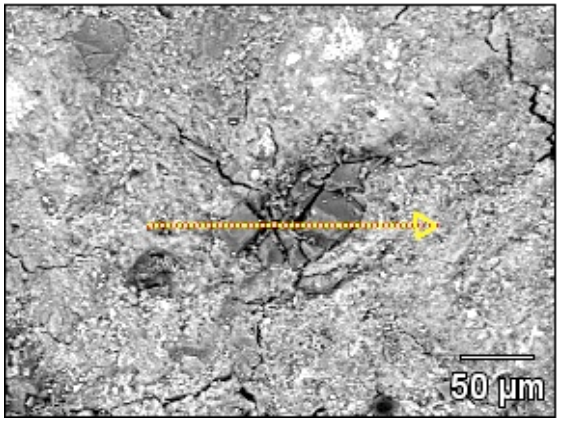
172	0,0779	0,4499	0,0000	0,6253	33,8435	0,6500	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
173	0,0838	0,4557	0,0000	0,6235	33,8435	0,6501	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
174	0,0808	0,4578	0,0000	0,6169	33,8435	0,6507	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
175	0,0832	0,4577	0,0000	0,6161	33,8435	0,6513	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
176	0,0840	0,4582	0,0000	0,6178	33,8435	0,6590	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
177	0,0815	0,4597	0,0000	0,6207	33,8435	0,6511	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
178	0,0863	0,4601	0,0000	0,6211	33,8435	0,6500	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
179	0,0892	0,4603	0,0000	0,6167	33,8435	0,6501	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
180	0,0832	0,4626	0,0000	0,6147	33,8435	0,6555	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
181	0,0861	0,4601	0,0000	0,6062	33,8435	0,6594	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
182	0,0901	0,4600	0,0000	0,6021	33,8435	0,6500	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
183	0,0833	0,4599	0,0000	0,6036	33,8435	0,6499	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,4095
184	0,0855	0,4603	0,0000	0,6036	33,8435	0,6467	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,4061
185	0,0881	0,4601	0,0000	0,6052	33,8435	0,6308	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,4097
186	0,0918	0,4670	0,0000	0,6133	33,8435	0,6297	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,4028
187	0,0912	0,4624	0,0000	0,6125	33,8435	0,6238	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,4000
188	0,0873	0,4641	0,0000	0,6065	33,8435	0,6215	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,3997
189	0,0920	0,4668	0,0000	0,6065	33,8435	0,6299	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,3960
190	0,0847	0,4608	0,0000	0,6049	33,8435	0,6316	-1,4153	-0,0005	0,0000	0,7601	0,3933
191	0,0793	0,4564	0,0000	0,6037	33,8435	0,6399	-1,4153	-0,0001	0,0000	0,7601	0,3970
192	0,0666	0,4512	0,0000	0,6011	33,8435	0,6451	-1,4153	0,0000	0,0000	0,7602	0,4000
193	0,0760	0,4543	0,0000	0,5955	33,8435	0,6500	-1,4153	0,0000	0,0000	0,7600	0,3968

194	0,0826	0,4589	0,0000	0,5911	33,8435	0,6500	-1,4153	0,0007	0,0000	0,7600	0,3887
195	0,0789	0,4600	0,0000	0,5929	33,8435	0,6500	-1,4153	0,0069	0,0000	0,7599	0,3901
196	0,0748	0,4620	0,0000	0,5917	33,8435	0,6500	-1,4153	0,0098	0,0000	0,7588	0,3900
197	0,0736	0,4682	0,0000	0,5901	33,8435	0,6500	-1,4153	0,0099	0,0000	0,7567	0,3908
198	0,0620	0,4702	0,0000	0,5946	33,6696	0,6450	-1,4153	0,0097	0,0000	0,7578	0,3951
199	0,0624	0,4722	0,0000	0,5978	33,4956	0,6500	-1,4153	0,0071	0,0000	0,7597	0,3987
200	0,0762	0,4742	0,0000	0,6007	33,3217	0,6500	-1,4153	0,0089	0,0000	0,7565	0,3999
201	0,0780	0,4754	0,0000	0,5802	33,1478	0,6500	-1,4153	0,0063	0,0000	0,7471	0,3996
202	0,0769	0,4715	0,0000	0,5955	33,1478	0,6248	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7511	0,3999
203	0,0701	0,4722	0,0000	0,5938	33,1478	0,6501	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7507	0,3980
204	0,0671	0,4703	0,0000	0,5947	33,1478	0,6501	-1,4153	0,0099	0,0000	0,7571	0,3902
205	0,0618	0,4709	0,0000	0,6005	33,1478	0,6421	-1,4153	0,0099	0,0000	0,7598	0,3879
206	0,0682	0,4663	0,0000	0,6034	33,1478	0,6300	-1,4153	0,0089	0,0000	0,7599	0,3888
207	0,0688	0,4795	0,0000	0,6029	33,1478	0,6264	-1,4153	0,0087	0,0000	0,7600	0,3893
208	0,0670	0,4794	0,0000	0,5995	33,1478	0,6230	-1,4153	0,0077	0,0000	0,7598	0,3838
209	0,0662	0,4736	0,0000	0,5952	33,1478	0,6311	-1,4153	0,0054	0,0000	0,7598	0,3873
210	0,0665	0,4670	0,0000	0,5952	33,1478	0,6400	-1,4153	0,0078	0,0000	0,7595	0,3893
211	0,0783	0,4627	0,0000	0,5952	33,1478	0,6400	-1,4153	0,0099	0,0000	0,7531	0,3893
212	0,0715	0,4654	0,0000	0,5868	33,1478	0,6400	-1,4153	0,0101	0,0000	0,7501	0,0000
213	0,0671	0,4745	0,0000	0,5879	33,1478	0,6489	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7500	0,0000
214	0,0611	0,4795	0,0000	0,5865	33,1478	0,6452	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7501	0,0000
215	0,0713	0,0000	0,0000	0,5877	33,1478	0,6460	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7496	0,0000

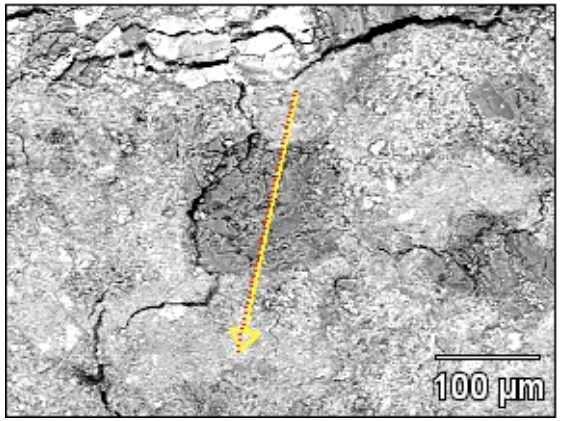
216	0,0631	0,0000	0,0000	0,5900	33,1478	0,6403	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7500	0,0000
217	0,0694	0,4803	0,0000	0,5936	33,1478	0,6235	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7500	0,0000
218	0,0642	0,4726	0,0000	0,5946	33,1478	0,6297	-1,4153	0,0100	0,0000	0,7500	0,0000
219	0,0597	0,4713	0,0000	0,5984	33,1478	0,6213	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
220	0,0590	0,4664	0,0000	0,6019	33,1478	0,6267	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
221	0,0615	0,4600	0,0000	0,6002	33,1478	0,6264	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
222	0,0663	0,4568	0,0000	0,5987	33,1478	0,6392	-1,4153	0,0093	0,0000	-0,4000	0,0000
223	0,0673	0,4514	0,0000	0,6059	33,1478	0,6341	-1,4153	-1,0500	0,0000	-0,4000	0,0000
224	0,0715	0,4501	0,0000	0,6125	33,1478	0,6275	-1,4153	-1,0500	0,0000	-0,4000	0,0000

APÊNDICE G – RESULTADOS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

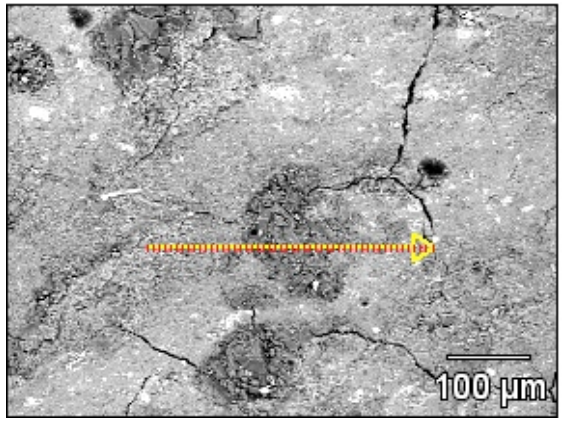
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 700°C (Grão inteiro)



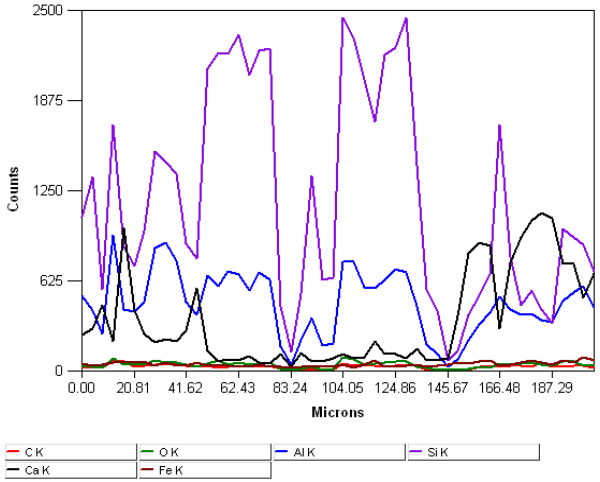
350x

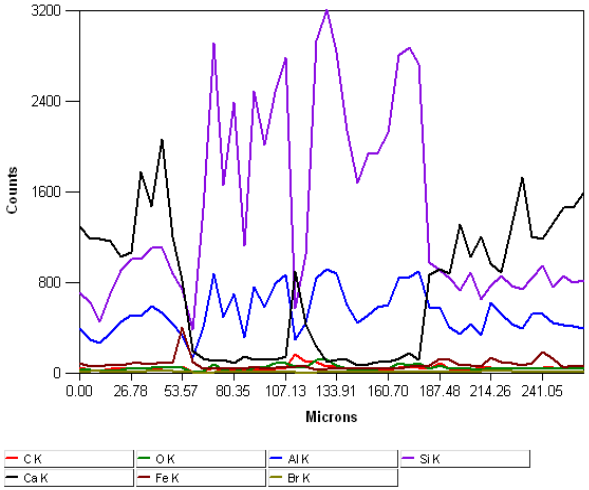


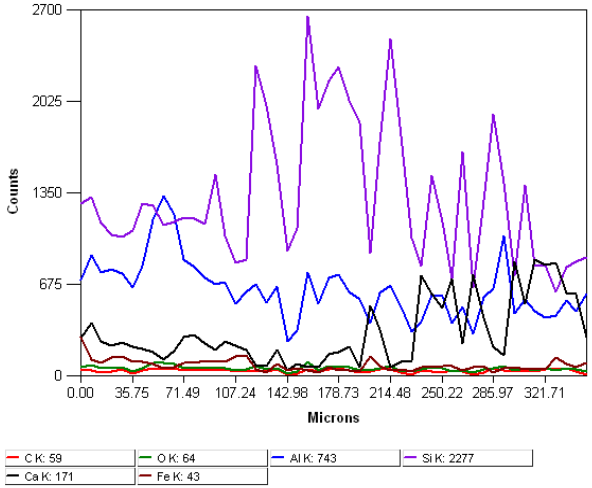
250x



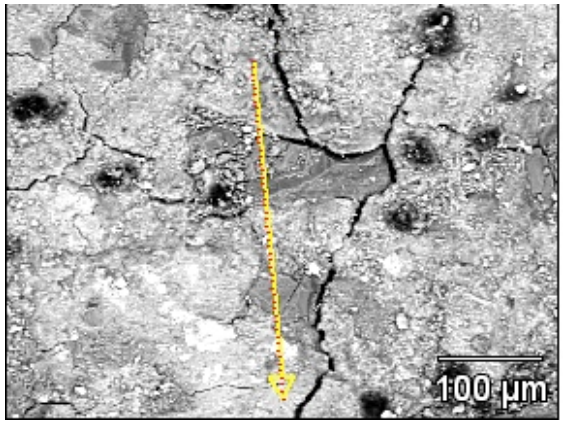
200x



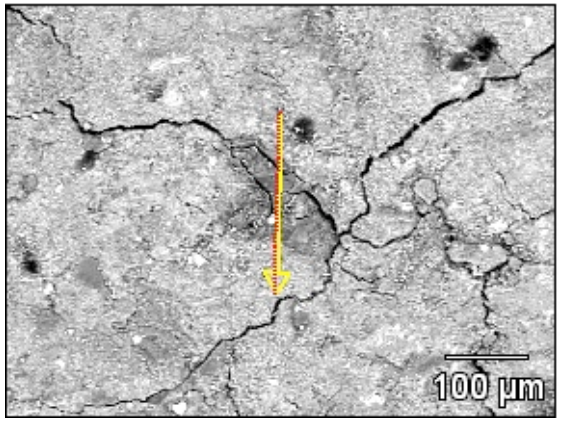




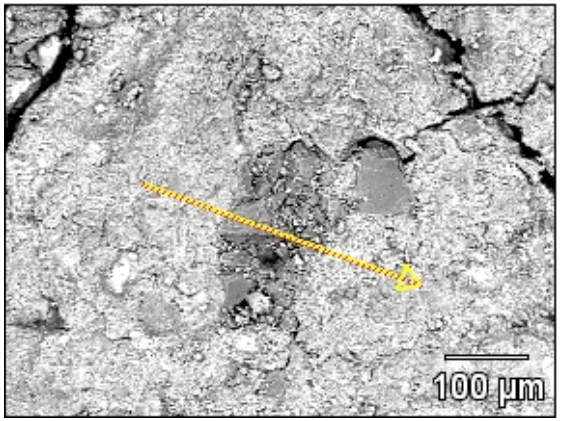
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 700°C (Grão inteiro)



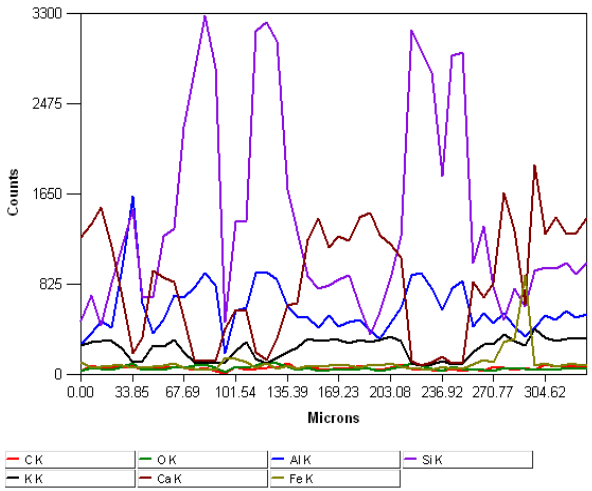
200x

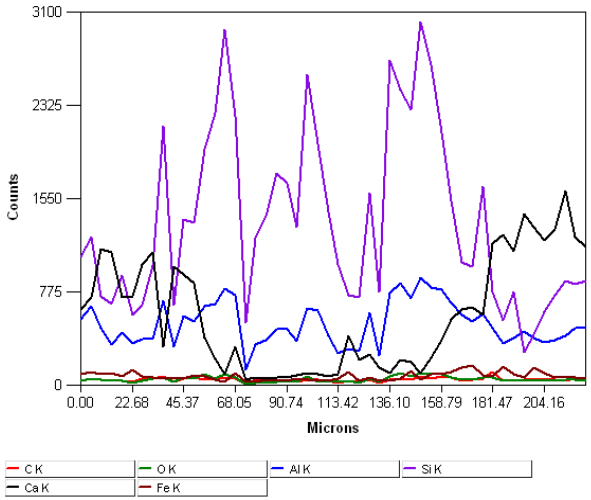


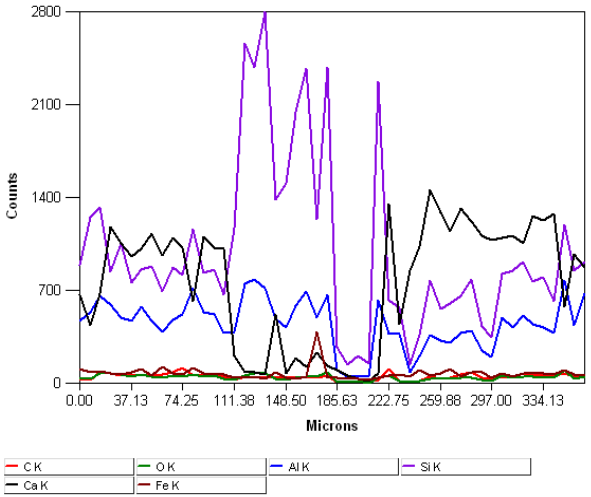
200x



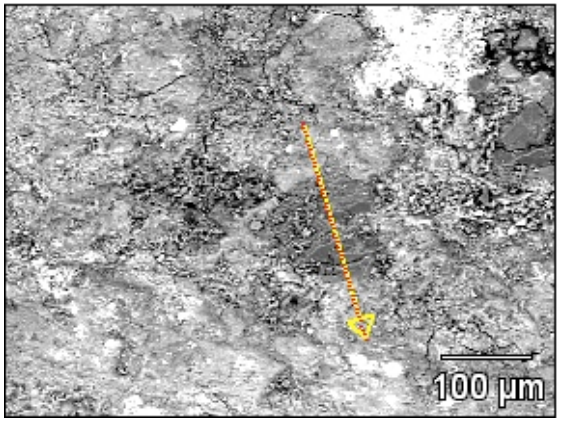
200x



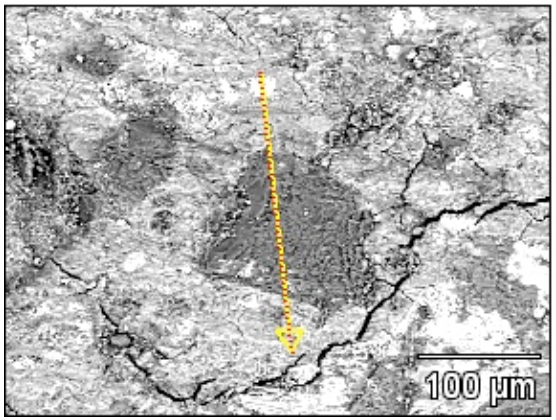




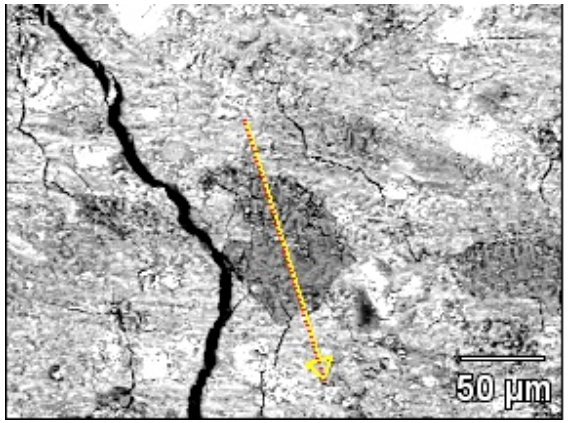
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 950°C (Grão inteiro)



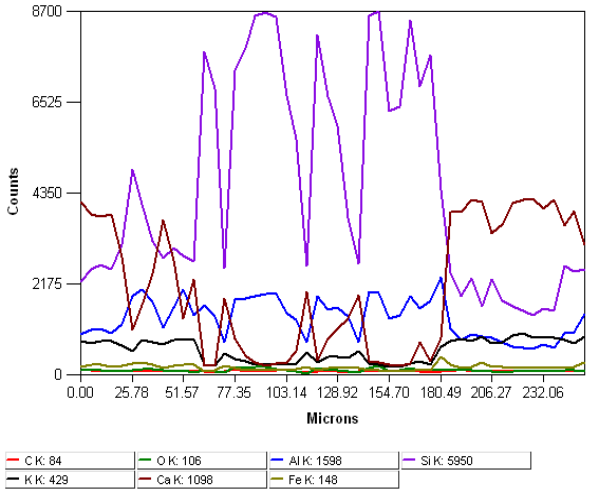
220x

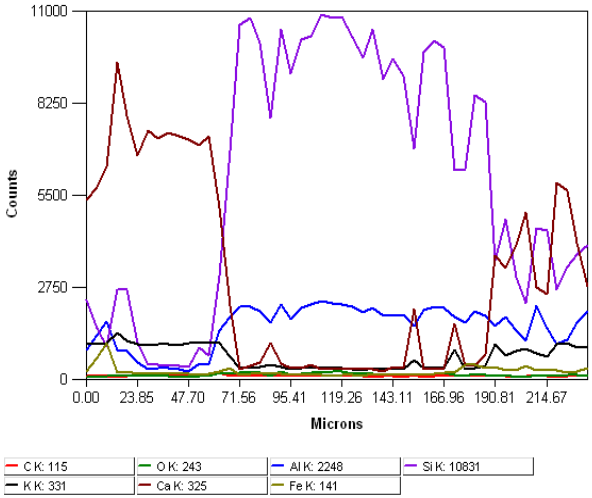


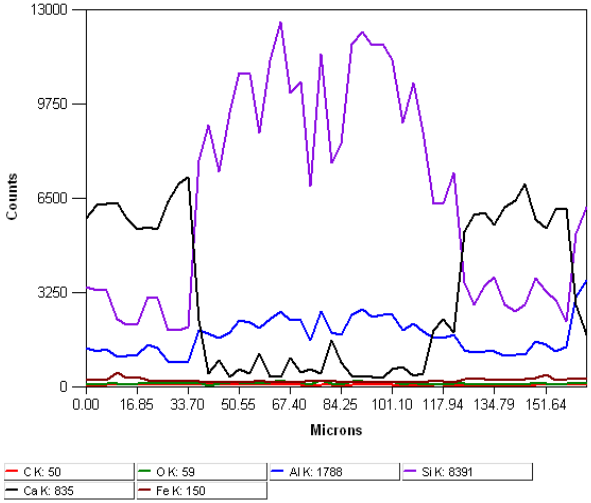
300x



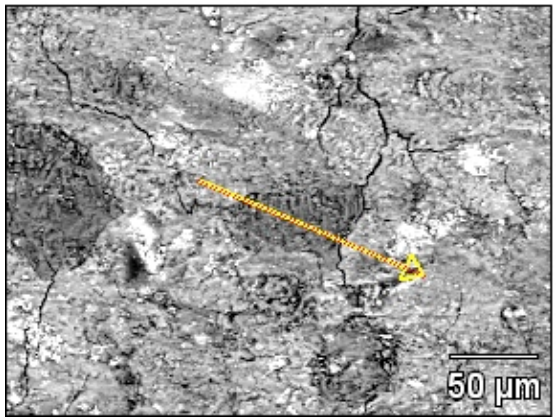
400x



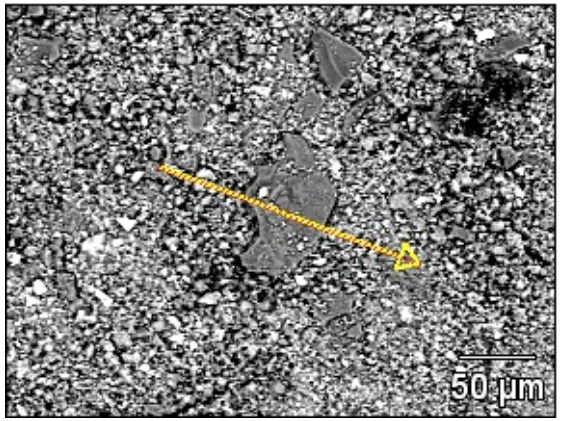




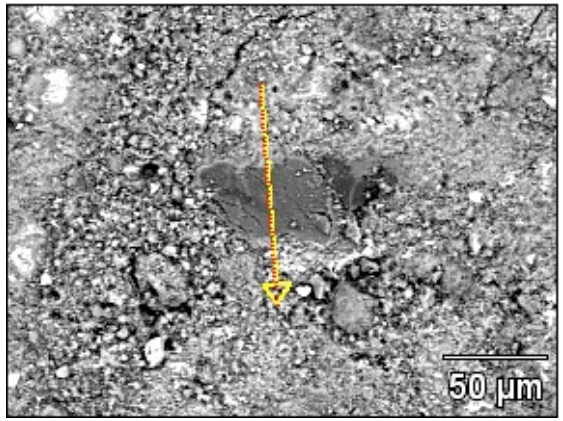
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 950°C (Grão inteiro)



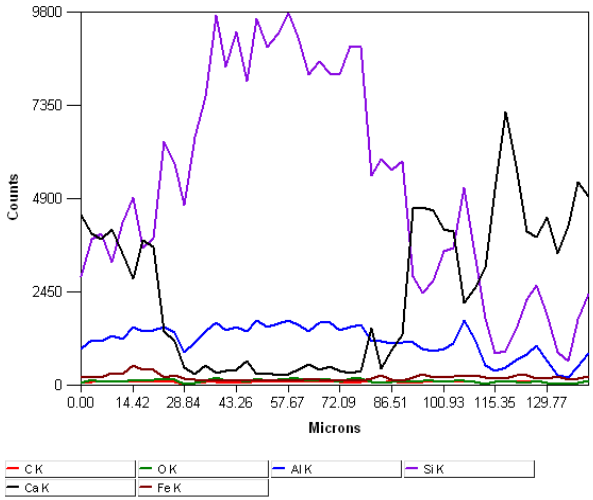
430x

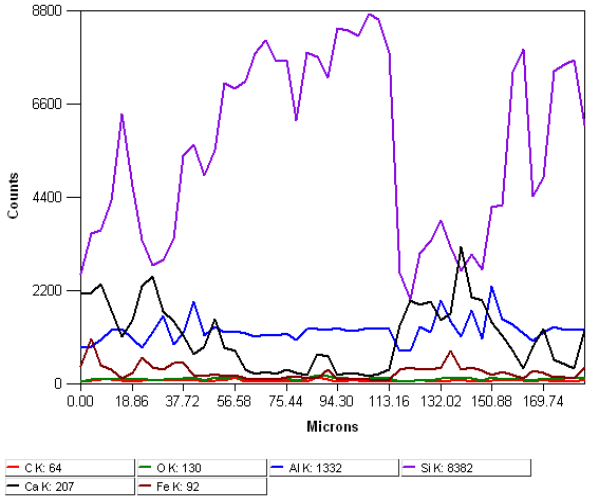


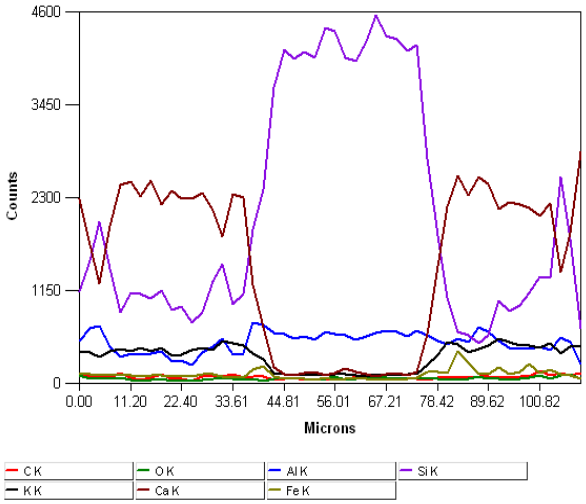
370x



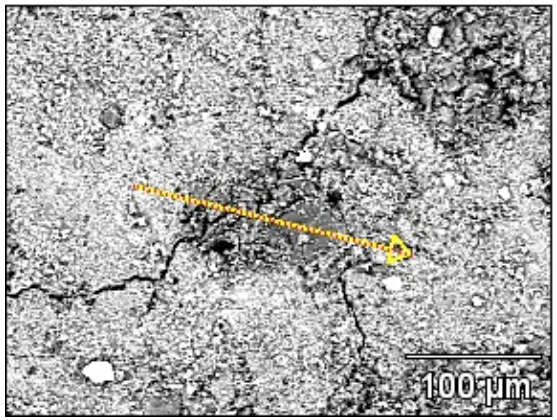
500x



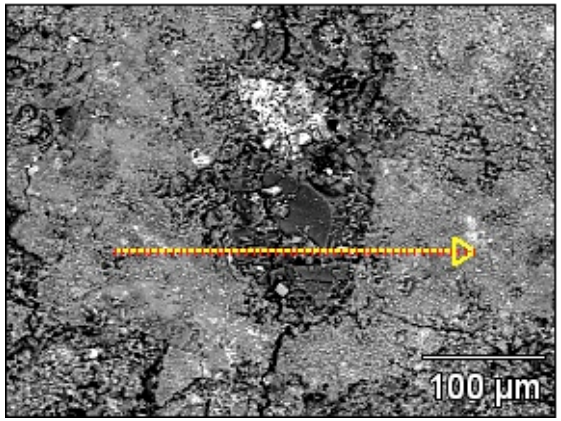




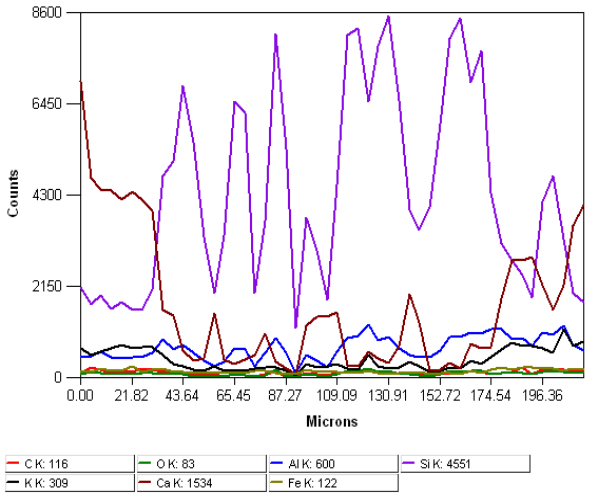
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 1100°C (Grão inteiro)

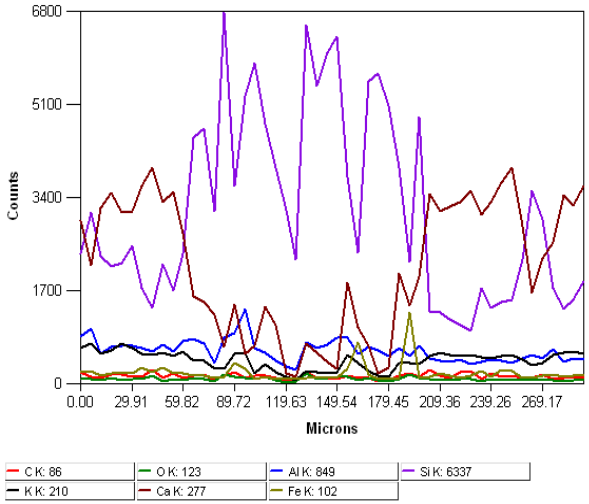


330x

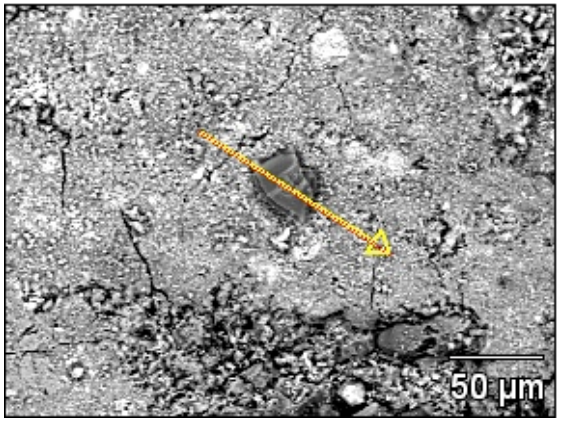


300x

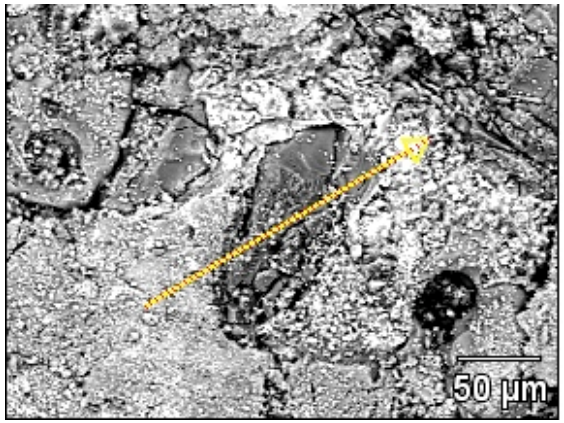




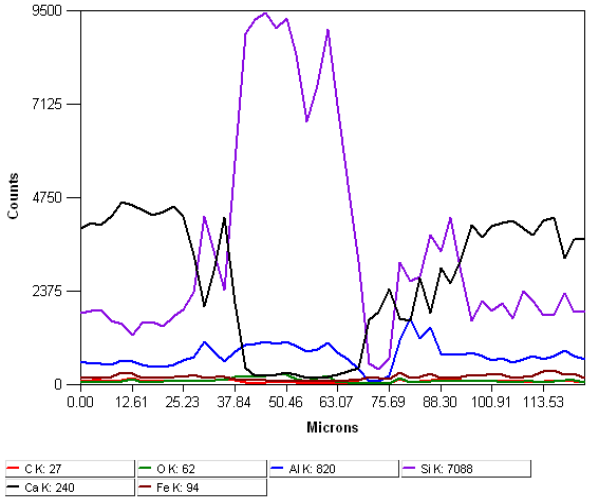
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 1100°C (Grão inteiro)

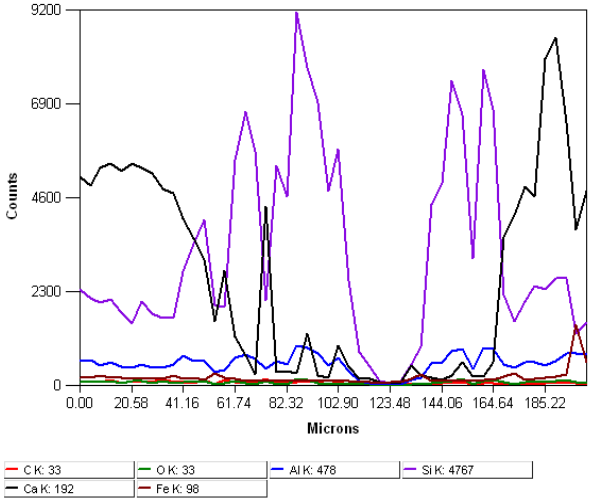


400x

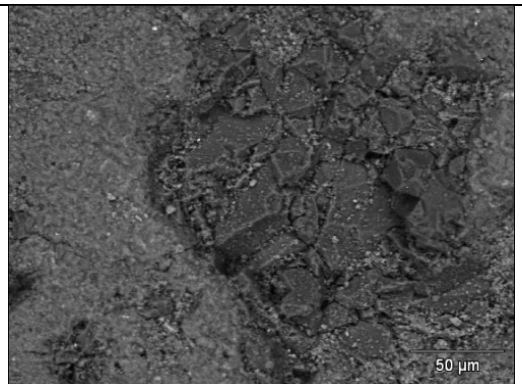


400x

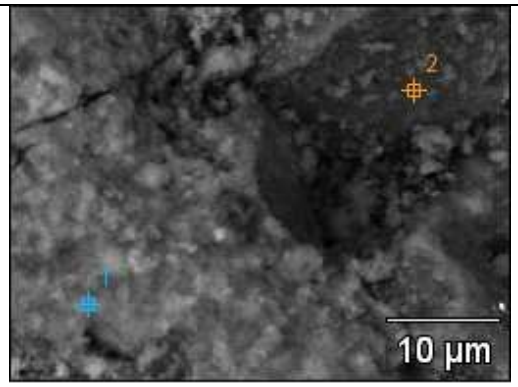




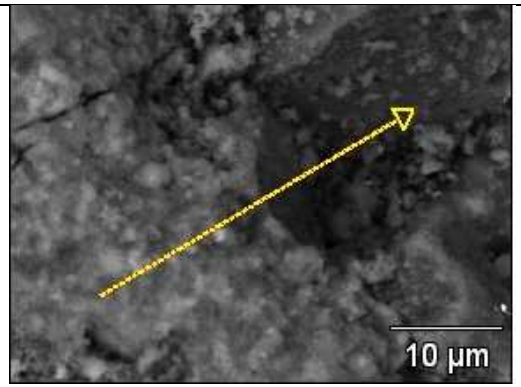
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO MIÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C(10)_pt1	433	1052	6433	1286	14326	224
1C(10)_pt2	193		7411		748	

Weight %

	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C(10)_pt1	35.32	2.49	13.27	3.30	44.16	1.45
1C(10)_pt2	62.45		31.72		5.84	

Atom %

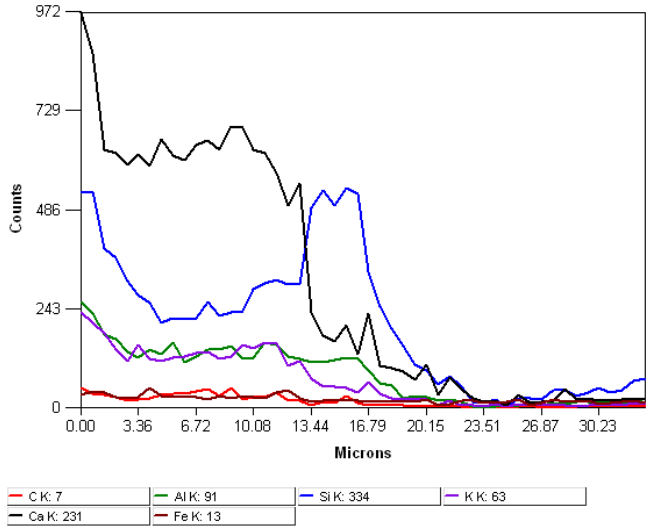
	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C(10)_pt1	62.33	1.96	10.02	1.79	23.35	0.55
1C(10)_pt2	80.31		17.44		2.25	

Formula

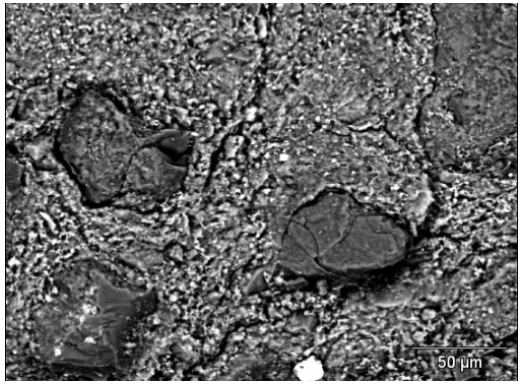
	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C(10)_pt1	C	Al	Si	K	Ca	Fe
1C(10)_pt2	C		Si		Ca	

Compound %

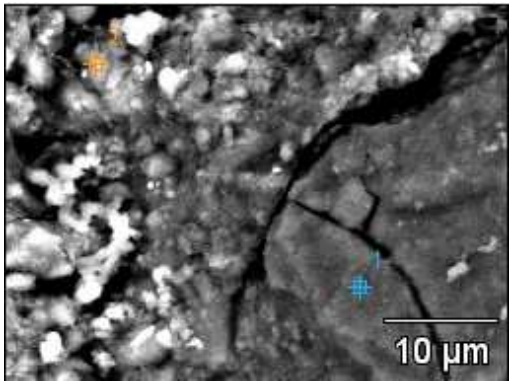
	C	Al	Si	K	Ca	Fe
1C(10)_pt1	35.32	2.49	13.27	3.30	44.16	1.45
1C(10)_pt2	62.45		31.72		5.84	



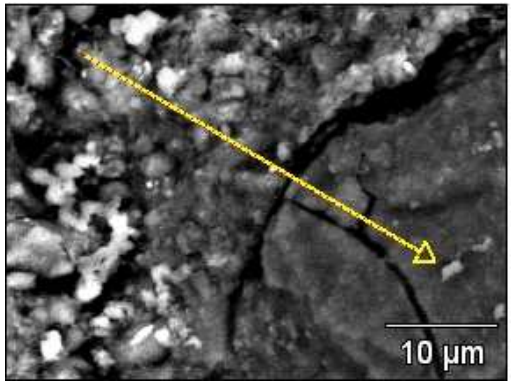
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO MIÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C1(23)_pt1		396		0	32044			
1C1(23)_pt2	325	618	493	5508	12434	2771	2228	1588

Weight %

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C1(23)_pt1		17.30		0.00	82.70			
1C1(23)_pt2	31.97	17.91	0.99	9.52	20.88	5.99	5.37	7.38

Atom %

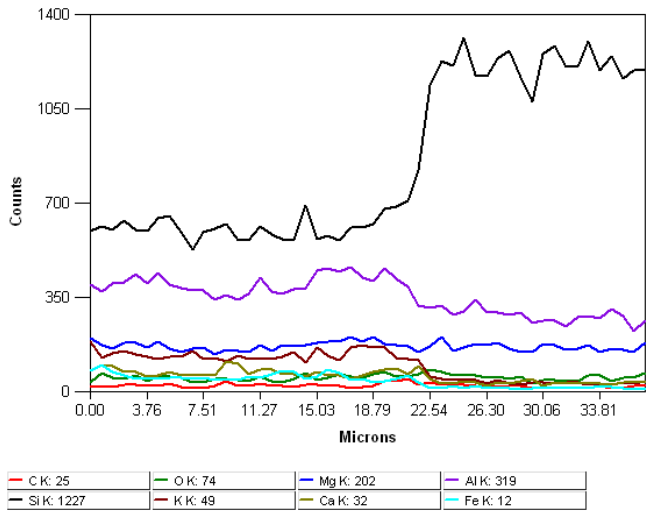
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C1(23)_pt1		26.86		0.00	73.14			
1C1(23)_pt2	49.87	20.98	0.76	6.61	13.93	2.87	2.51	2.48

Formula

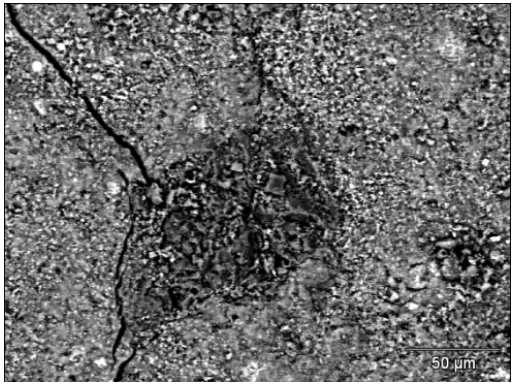
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C1(23)_pt1		O		Al	Si			
1C1(23)_pt2	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe

Compound %

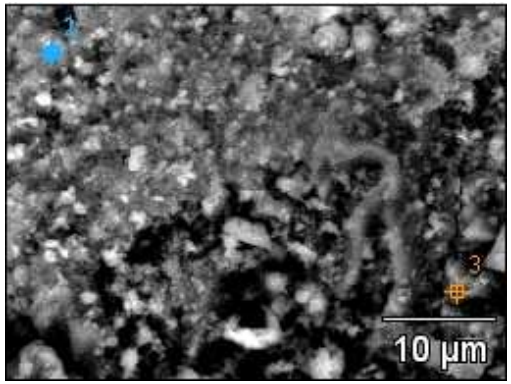
	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
1C1(23)_pt1		17.30		0.00	82.70			
1C1(23)_pt2	31.97	17.91	0.99	9.52	20.88	5.99	5.37	7.38



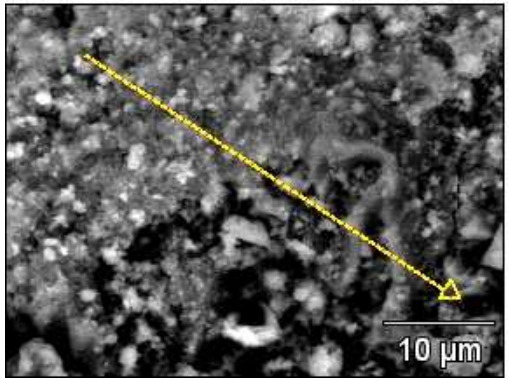
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO MIÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C2(5)_pt2	688	376	679	9421	419	16152	135
1C2(5)_pt3	146	249	0	27936		874	

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C2(5)_pt2	35.83	15.11	1.10	12.99	0.74	33.64	0.59
1C2(5)_pt3	32.73	11.00	0.00	53.07		3.19	

Atom %

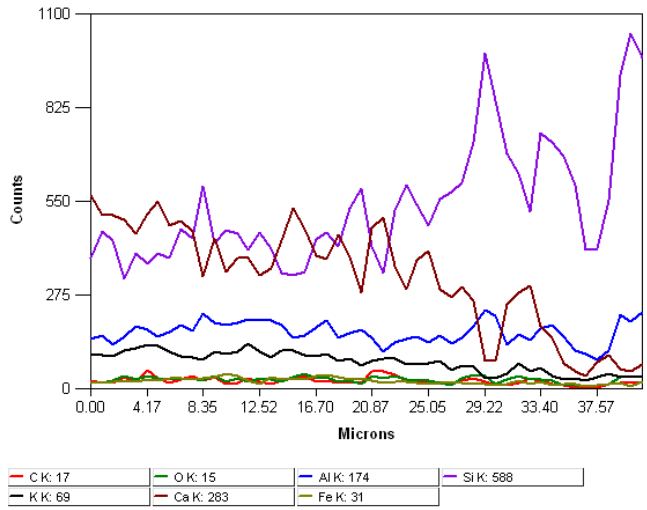
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C2(5)_pt2	56.28	17.82	0.77	8.73	0.36	15.84	0.20
1C2(5)_pt3	50.64	12.77	0.00	35.11		1.48	

Formula

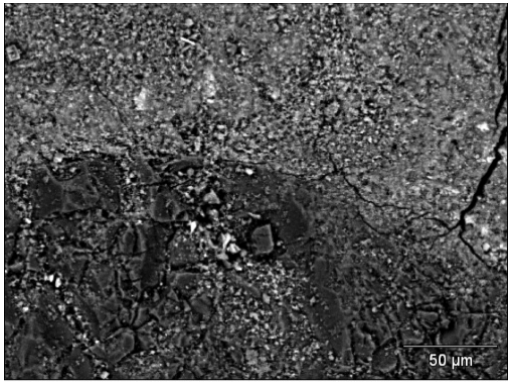
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C2(5)_pt2	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
1C2(5)_pt3	C	O	Al	Si		Ca	

Compound %

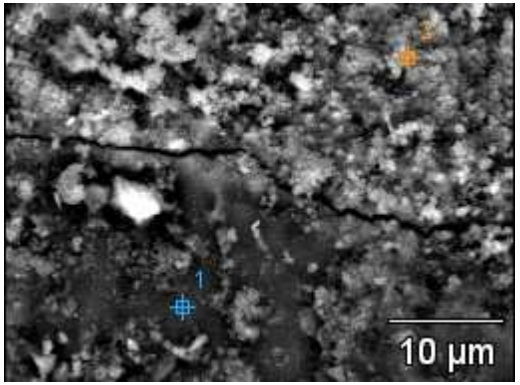
	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
1C2(5)_pt2	35.83	15.11	1.10	12.99	0.74	33.64	0.59
1C2(5)_pt3	32.73	11.00	0.00	53.07		3.19	



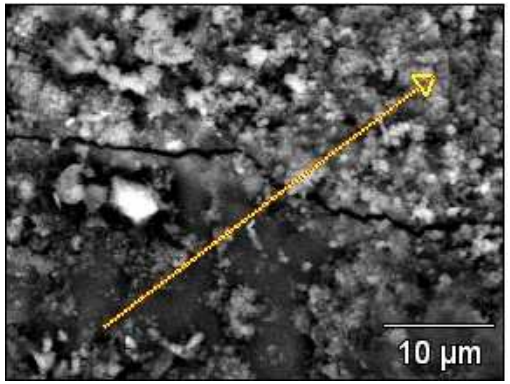
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO MIÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C2(10)_pt1		442	0	33073			
1C2(10)_pt2	227	443	726	6406	763	15499	433

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C2(10)_pt1		18.24	0.00	81.76			
1C2(10)_pt2	16.62	22.44	1.66	12.34	1.77	42.66	2.51

Atom %

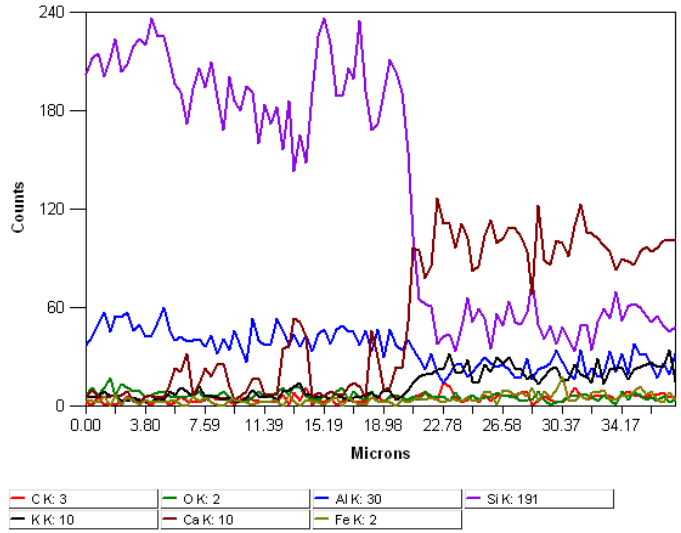
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C2(10)_pt1		28.14	0.00	71.86			
1C2(10)_pt2	31.15	31.58	1.39	9.89	1.02	23.96	1.01

Formula

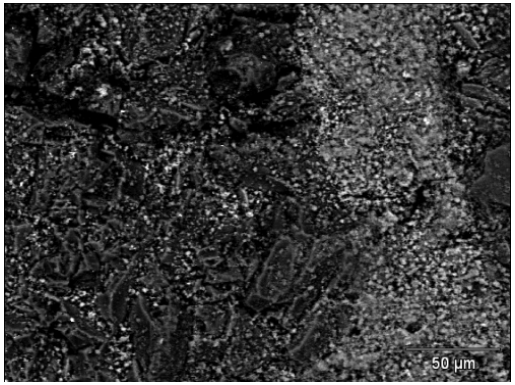
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1C2(10)_pt1		O	Al	Si			
1C2(10)_pt2	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe

Compound %

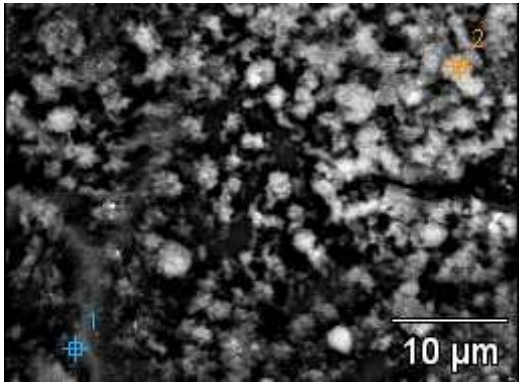
	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
1C2(10)_pt1		18.24	0.00	81.76			
1C2(10)_pt2	16.62	22.44	1.66	12.34	1.77	42.66	2.51



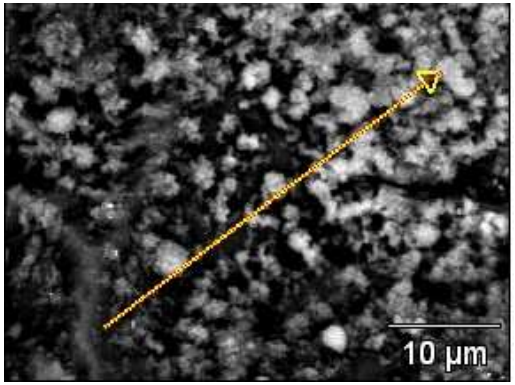
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO MIÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
1C3(2)_pt1		676		31647	697		34
1C3(2)_pt2	385	374	527	3529	18018	189	

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
1C3(2)_pt1		23.76		71.35	3.00		1.86
1C3(2)_pt2	21.52	20.71	1.22	6.80	45.65	1.10	

Atom %

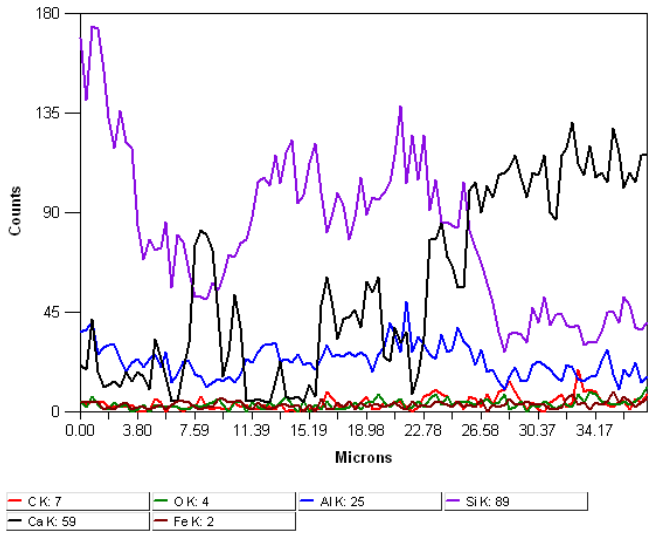
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
1C3(2)_pt1		36.01		61.61	1.82		0.57
1C3(2)_pt2	38.90	28.10	0.98	5.25	26.35	0.43	

Formula

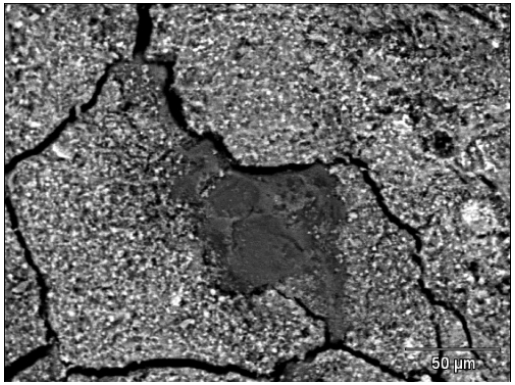
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
1C3(2)_pt1		O		Si	Ca		Se
1C3(2)_pt2	C	O	Al	Si	Ca	Fe	

Compound %

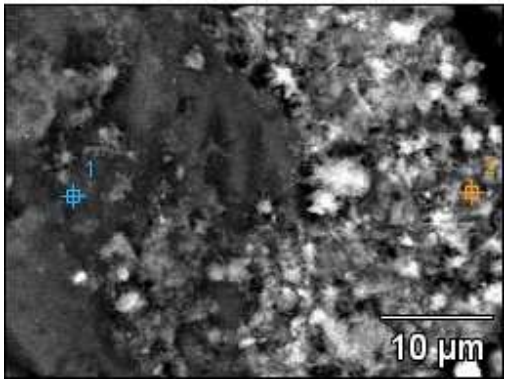
	C	O	Al	Si	Ca	Fe	Se
1C3(2)_pt1		23.76		71.35	3.00		1.86
1C3(2)_pt2	21.52	20.71	1.22	6.80	45.65	1.10	



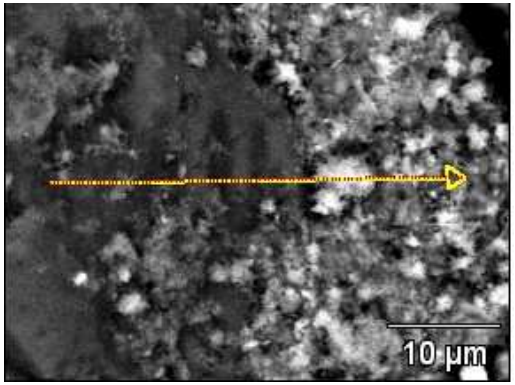
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO MIÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
1C3(7)_pt1		269		28812				0
1C3(7)_pt2	53	231	2341	11457	1418	8346	890	

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
1C3(7)_pt1		14.18		85.82				0.00
1C3(7)_pt2	8.95	13.28	6.45	28.99	4.65	31.13	6.54	

Atom %

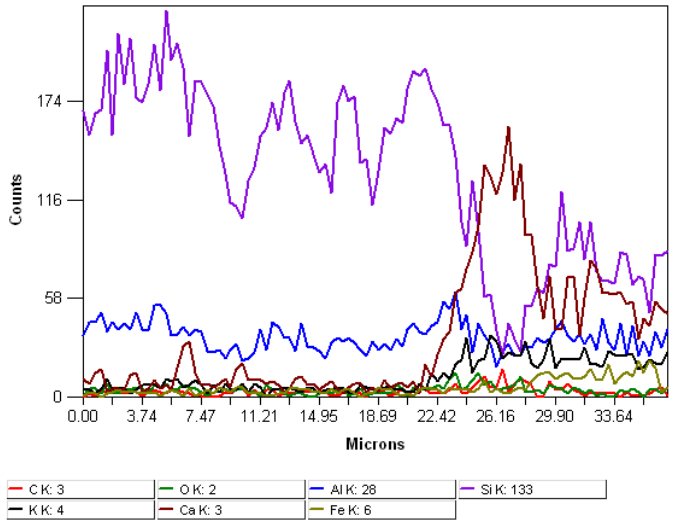
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
1C3(7)_pt1		22.48		77.52				0.00
1C3(7)_pt2	19.32	21.50	6.20	26.74	3.08	20.12	3.03	

Formula

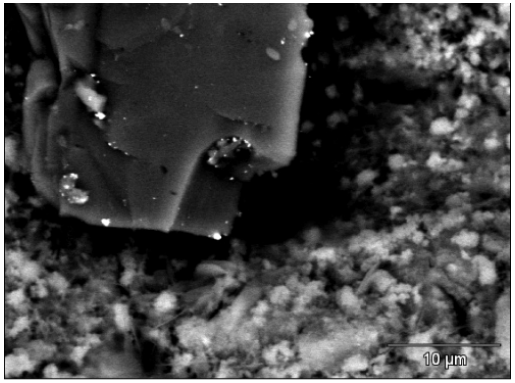
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
1C3(7)_pt1		O		Si				Se
1C3(7)_pt2	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe	

Compound %

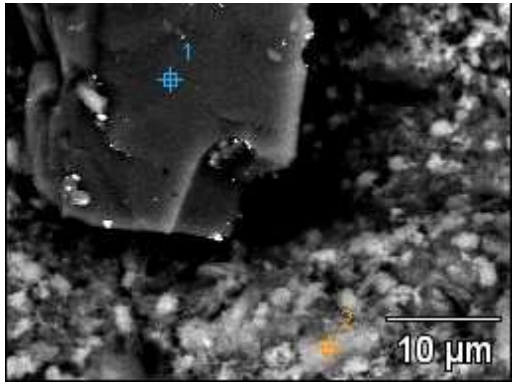
	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe	Se
1C3(7)_pt1		14.18		85.82				0.00
1C3(7)_pt2	8.95	13.28	6.45	28.99	4.65	31.13	6.54	



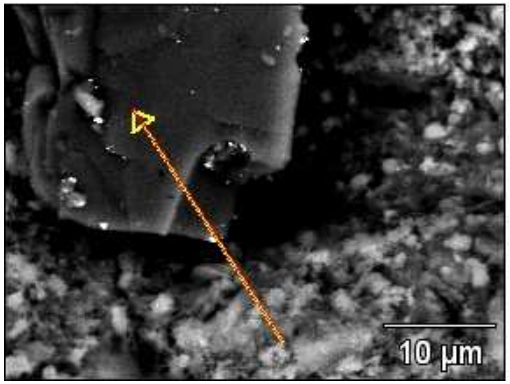
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO MIÚDO – 700°C (Zona de transição)



3000x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Fe-K	Se-K	Br-K
1C3(13)_pt1		645	0	30058	206		11	16
1C3(13)_pt2	111	343	960	8225	15166	189		

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Fe-K	Se-K	Br-K
1C3(13)_pt1		23.83	0.00	73.30	0.97		0.62	1.27
1C3(13)_pt2	11.21	20.08	2.42	17.77	47.27	1.24		

Atom %

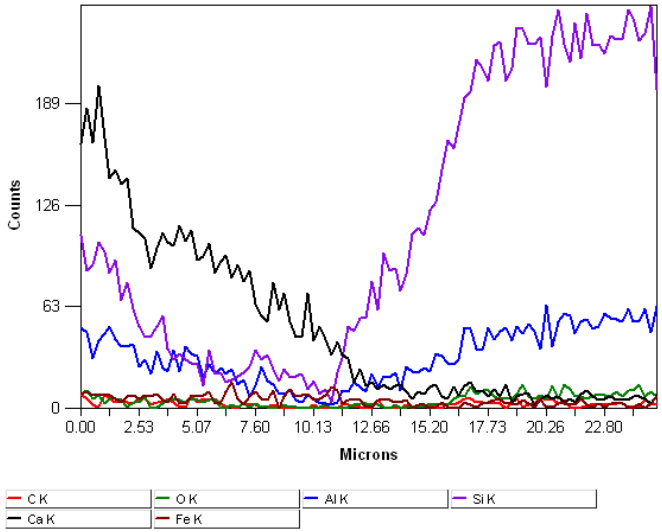
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Fe-K	Se-K	Br-K
1C3(13)_pt1		55.91	0.00	62.95	0.59		0.19	0.38
1C3(13)_pt2	22.70	30.51	2.18	15.39	28.68	0.54		

Formula

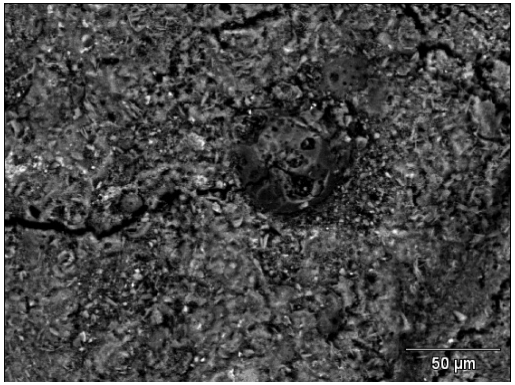
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Fe-K	Se-K	Br-K
1C3(13)_pt1		O	Al	Si	Ca		Se	Br
1C3(13)_pt2	C	O	Al	Si	Ca	Fe		

Compound %

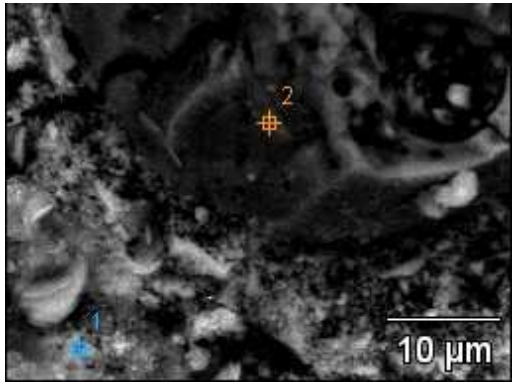
	C	O	Al	Si	Ca	Fe	Se	Br
1C3(13)_pt1		23.83	0.00	73.30	0.97		0.62	1.27
1C3(13)_pt2	11.21	20.08	2.42	17.77	47.27	1.24		



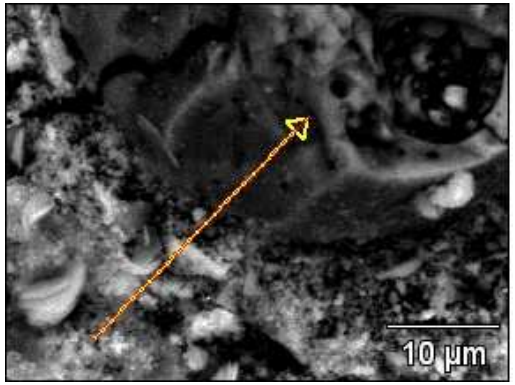
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO MIÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
2C(3)_pt1		1609	9263	321	982	16339	469	
2C(3)_pt2	459		33250			596		5

Weight %

	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
2C(3)_pt1		4.76	24.32	1.17	3.19	62.83	3.73	
2C(3)_pt2	18.34		78.45			2.87		0.32

Atom %

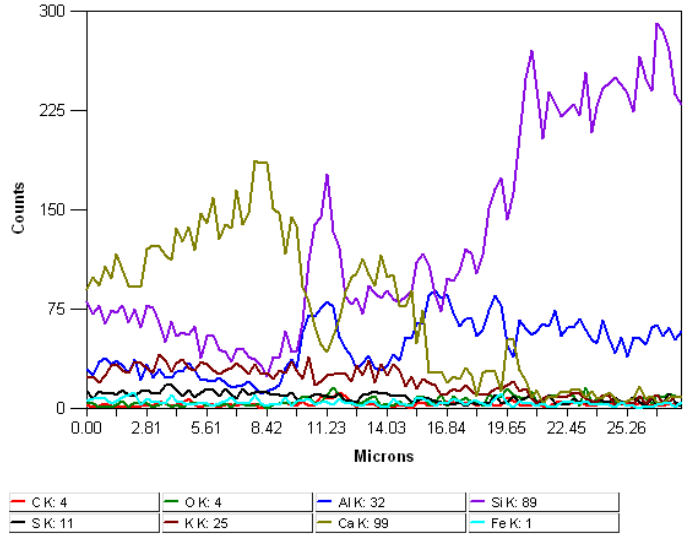
	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
2C(3)_pt1		6.32	30.95	1.30	2.92	56.09	2.39	
2C(3)_pt2	28.54		69.55			1.78		0.10

Formula

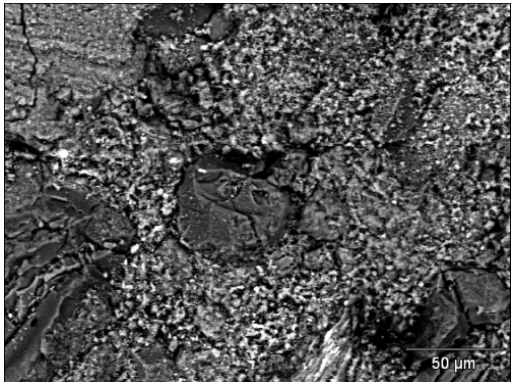
	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
2C(3)_pt1		Al	Si	S	K	Ca	Fe	
2C(3)_pt2	O		Si			Ca		Se

Compound %

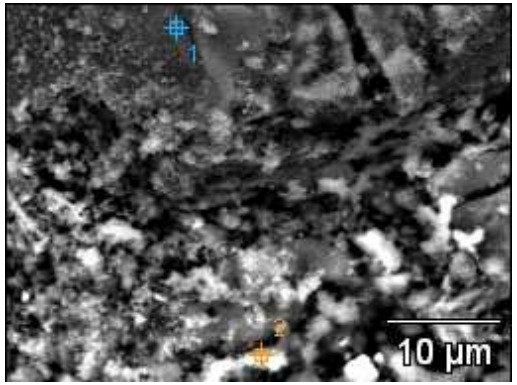
	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Se
2C(3)_pt1		4.76	24.32	1.17	3.19	62.83	3.73	
2C(3)_pt2	18.34		78.45			2.87		0.32



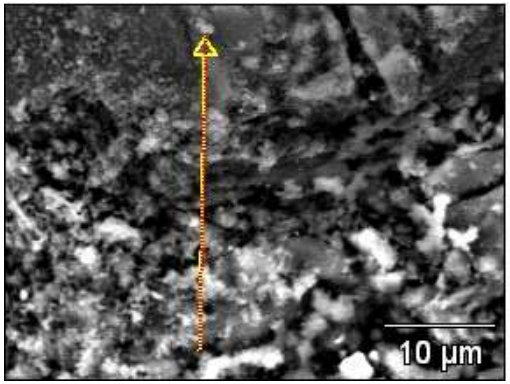
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO MIÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
2C2(3)_pt1		503		31822		1534		28
2C2(3)_pt2	381	429	2239	7929	1728	7397	661	

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
2C2(3)_pt1		20.24		71.61		6.61		1.53
2C2(3)_pt2	32.93	19.06	4.72	15.00	4.16	20.45	3.68	

Atom %

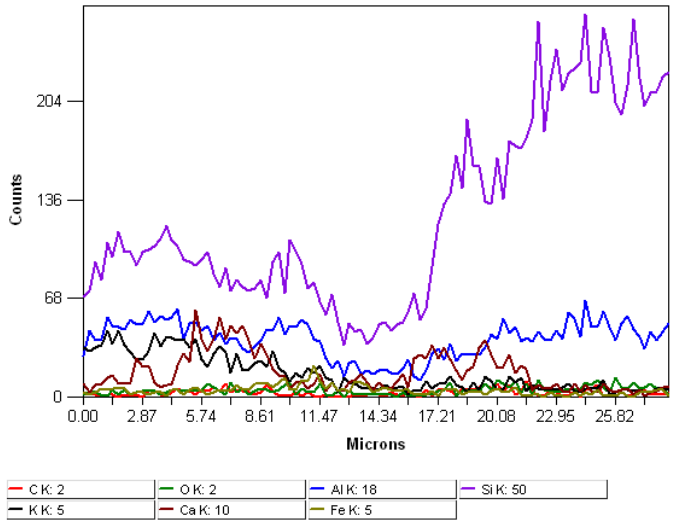
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
2C2(3)_pt1		31.63		63.75		4.13		0.49
2C2(3)_pt2	51.49	22.38	3.28	10.03	2.00	9.58	1.24	

Formula

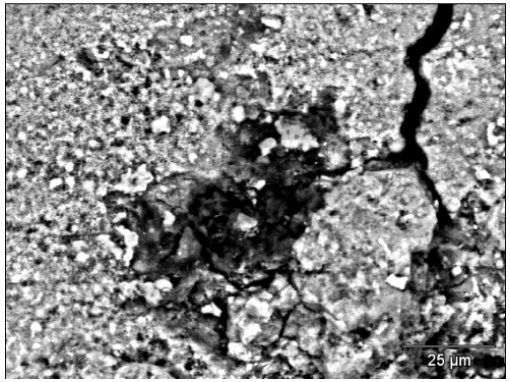
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
2C2(3)_pt1		O		Si		Ca		Se
2C2(3)_pt2	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe	

Compound %

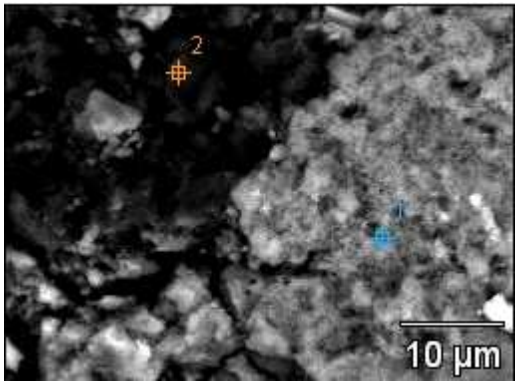
	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe	Se
2C2(3)_pt1		20.24		71.61		6.61		1.53
2C2(3)_pt2	32.93	19.06	4.72	15.00	4.16	20.45	3.68	



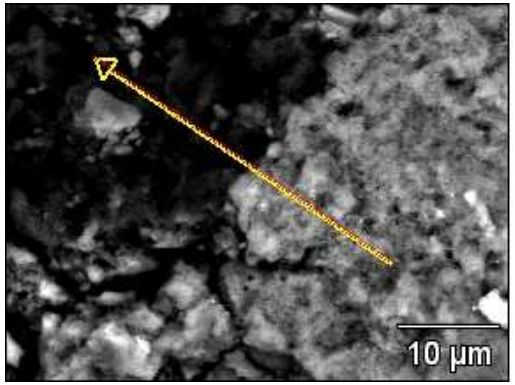
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO MIÚDO – 1100°C (Zona de transição)



1000x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
3C(3)_pt1	269	435	1294	7176	1229	16722	637
3C(3)_pt2	3174	168	646	2238	3683	8486	

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
3C(3)_pt1	18.42	20.04	2.63	12.40	2.53	40.74	3.24
3C(3)_pt2	69.21	6.41	0.85	2.55	5.60	15.37	

Atom %

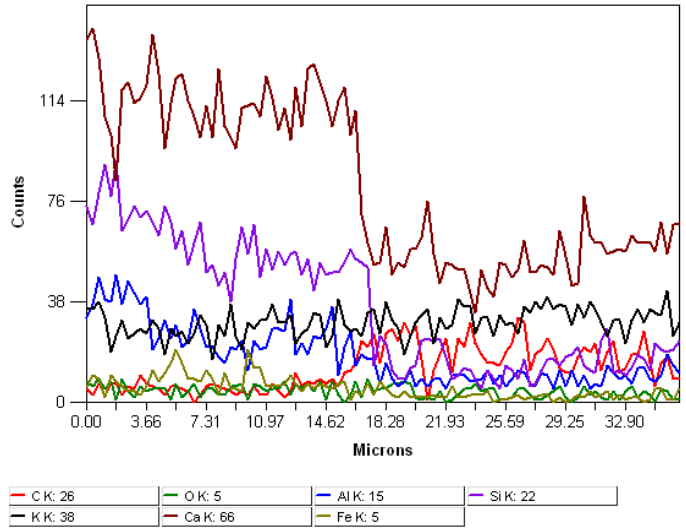
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
3C(3)_pt1	34.36	28.05	2.18	9.59	1.45	22.77	1.30
3C(3)_pt2	84.59	5.88	0.46	1.33	2.10	5.63	

Formula

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
3C(3)_pt1	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
3C(3)_pt2	C	O	Al	Si	K	Ca	

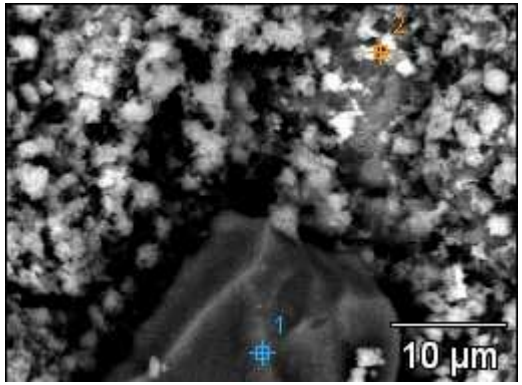
Compound %

	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
3C(3)_pt1	18.42	20.04	2.63	12.40	2.53	40.74	3.24
3C(3)_pt2	69.21	6.41	0.85	2.55	5.60	15.37	

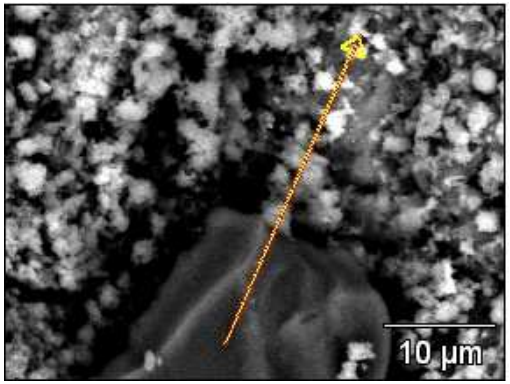


SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO MIÚDO – 1100°C (Zona de transição)

500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Se-K
3C(7)_pt1	16	402		33409		239	16
3C(7)_pt2			315	4383	885	15342	

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Se-K
3C(7)_pt1	6.07	16.52		75.40		1.08	0.93
3C(7)_pt2			1.36	15.77	3.67	79.20	

Atom %

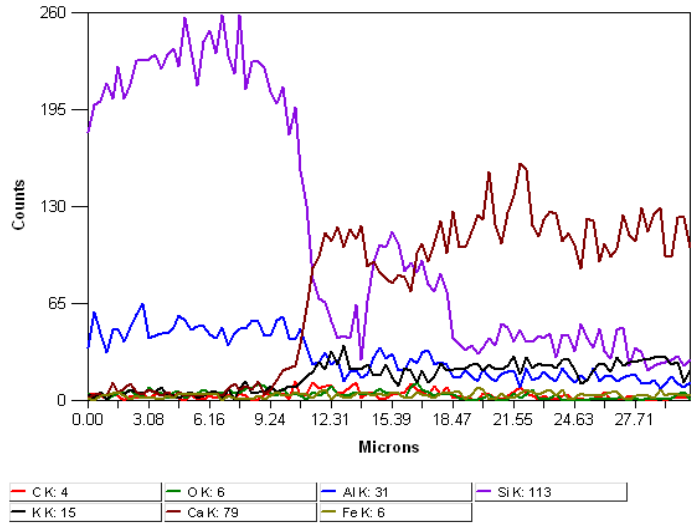
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Se-K
3C(7)_pt1	11.86	24.23		63.00		0.63	0.28
3C(7)_pt2			1.88	20.93	3.50	73.69	

Formula

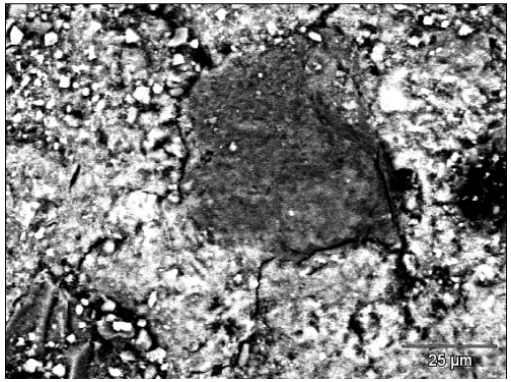
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Se-K
3C(7)_pt1	C	O		Si		Ca	Se
3C(7)_pt2			Al	Si	K	Ca	

Compound %

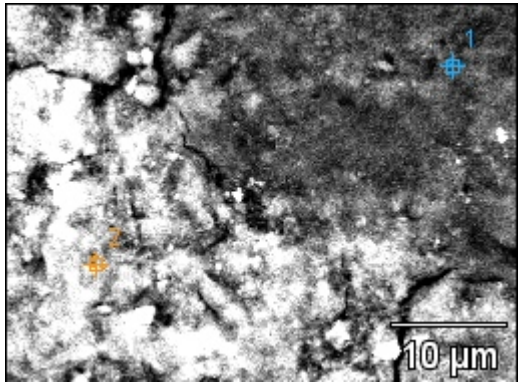
	C	O	Al	Si	K	Ca	Se
3C(7)_pt1	6.07	16.52		75.40		1.08	0.93
3C(7)_pt2			1.36	15.77	3.67	79.20	



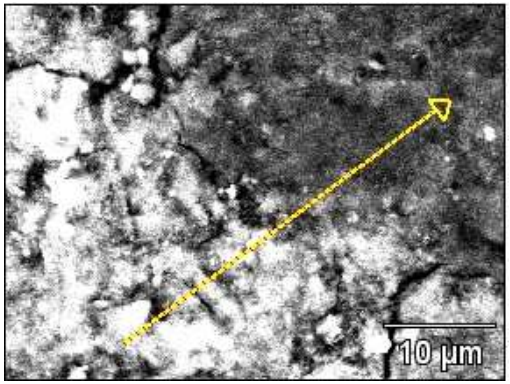
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 700°C (Zona de transição)



1000x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	Ca-K	Fe-K
1D3(2)_pt1	206	900		21225		1071	47
1D3(2)_pt2	255		1060	5329	503	11079	267

Weight %

	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	Ca-K	Fe-K
1D3(2)_pt1	46.90	2.27		46.10		4.37	0.37
1D3(2)_pt2	32.32		3.33	14.75	1.86	45.43	2.31

Atom %

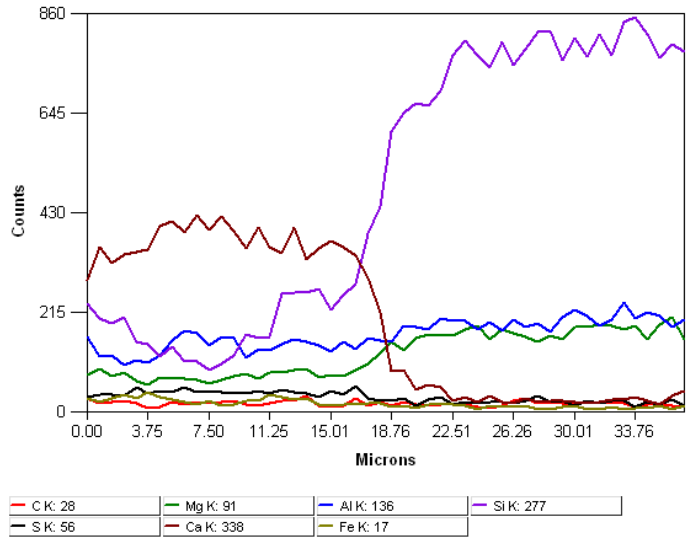
	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	Ca-K	Fe-K
1D3(2)_pt1	67.85	1.62		28.52		1.59	0.11
1D3(2)_pt2	58.85		2.70	11.49	1.27	24.79	0.91

Formula

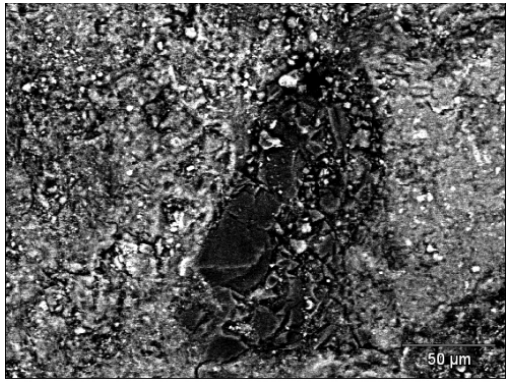
	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	Ca-K	Fe-K
1D3(2)_pt1	C	Mg		Si		Ca	Fe
1D3(2)_pt2	C		Al	Si	S	Ca	Fe

Compound %

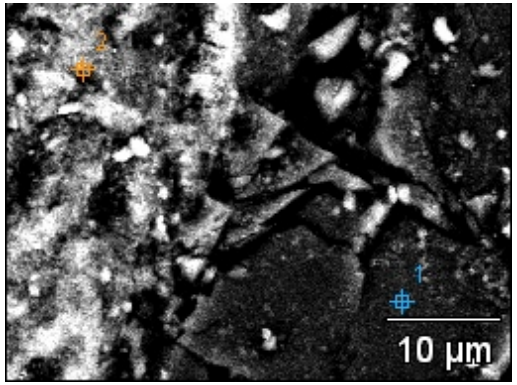
	C	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
1D3(2)_pt1	46.90	2.27		46.10		4.37	0.37
1D3(2)_pt2	32.32		3.33	14.75	1.86	45.43	2.31



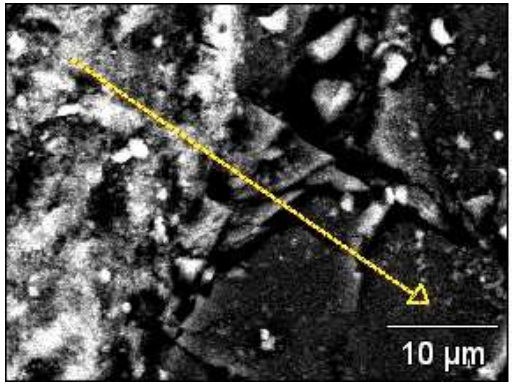
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1D4(4)_pt1	255	0	1167		25201		197	
1D4(4)_pt2	325			910	4042	416	11751	181

Weight %

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1D4(4)_pt1	50.34	0.00	2.45		46.52		0.69	
1D4(4)_pt2	33.59			2.96	11.49	1.43	48.91	1.61

Atom %

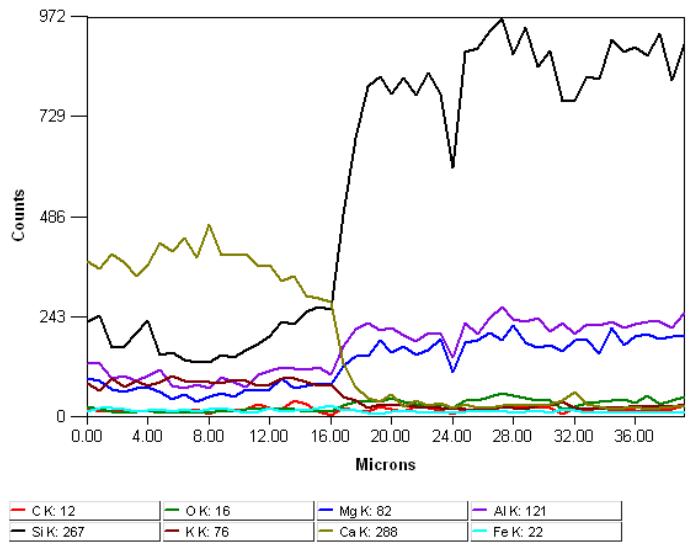
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1D4(4)_pt1	70.26	0.00	1.69		27.76		0.29	
1D4(4)_pt2	60.78			2.39	8.89	0.80	26.52	0.63

Formula

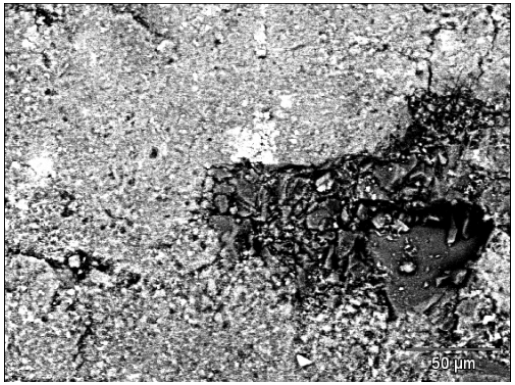
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1D4(4)_pt1	C	O	Mg		Si		Ca	
1D4(4)_pt2	C			Al	Si	K	Ca	Fe

Compound %

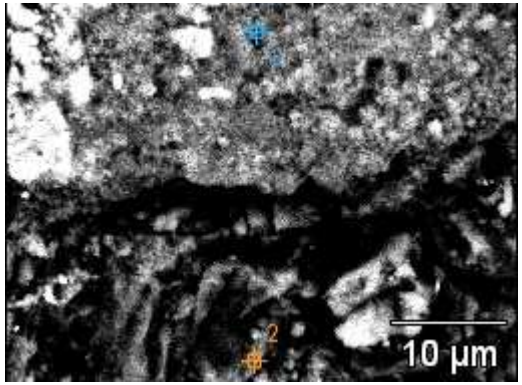
	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
1D4(4)_pt1	50.34	0.00	2.45		46.52		0.69	
1D4(4)_pt2	33.59			2.96	11.49	1.43	48.91	1.61



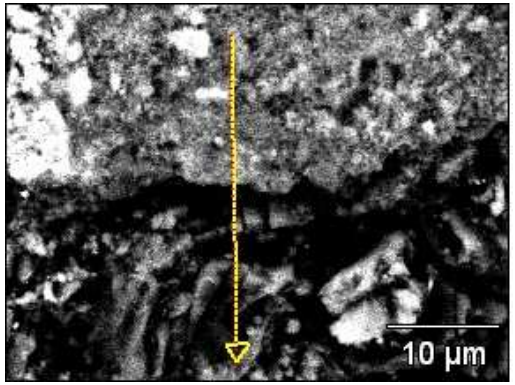
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
IDS(4)_pt1	525			1864	9797	1237	6390	385
IDS(4)_pt2	393	182	700		19701		1033	58

Weight %

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
IDS(4)_pt1	42.63			4.64	22.62	3.95	23.33	2.82
IDS(4)_pt2	53.17	8.03	1.47		33.81		3.17	0.35

Atom %

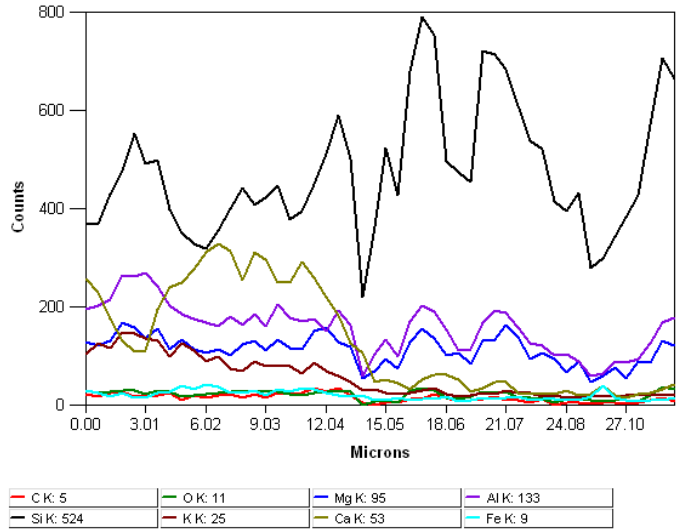
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
IDS(4)_pt1	67.47			5.27	15.51	1.92	11.07	0.96
IDS(4)_pt2	70.51	8.00	0.96		19.18		1.26	0.10

Formula

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
IDS(4)_pt1	C			Al	Si	K	Ca	Fe
IDS(4)_pt2	C	O	Mg		Si		Ca	Fe

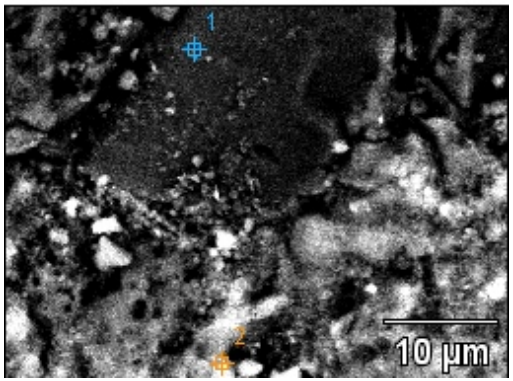
Compound %

	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
IDS(4)_pt1	42.63			4.64	22.62	3.95	23.33	2.82
IDS(4)_pt2	53.17	8.03	1.47		33.81		3.17	0.35

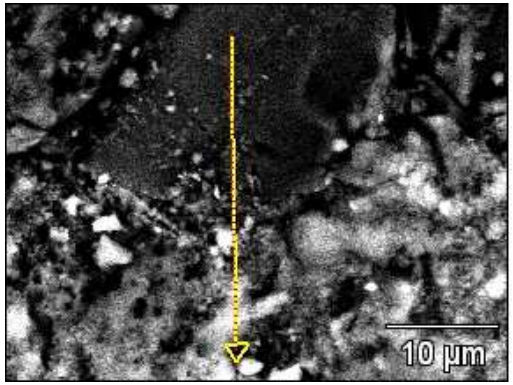


SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 950°C (Zona de transição)

500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K
2D(3)_pt1	308		769		22768		
2D(3)_pt2	753	119	290	798	4385	420	12987

Weight %

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K
2D(3)_pt1	56.10		1.64		42.26		
2D(3)_pt2	43.98	7.34	0.75	1.76	8.35	0.99	36.82

Atom %

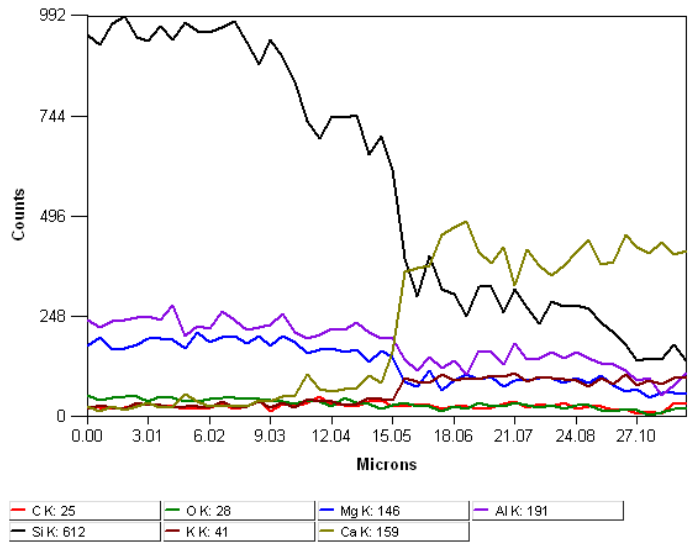
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K
2D(3)_pt1	74.82		1.08		24.10		
2D(3)_pt2	67.09	8.41	0.57	1.20	5.45	0.46	16.83

Formula

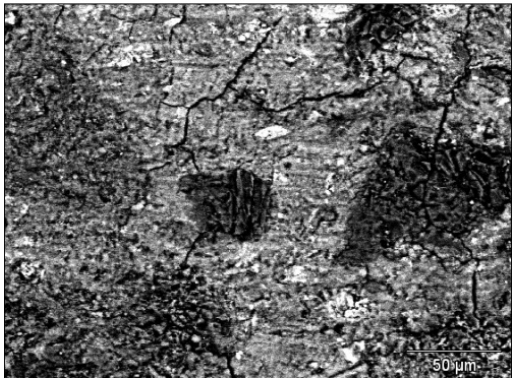
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K
2D(3)_pt1	C		Mg		Si		
2D(3)_pt2	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca

Compound %

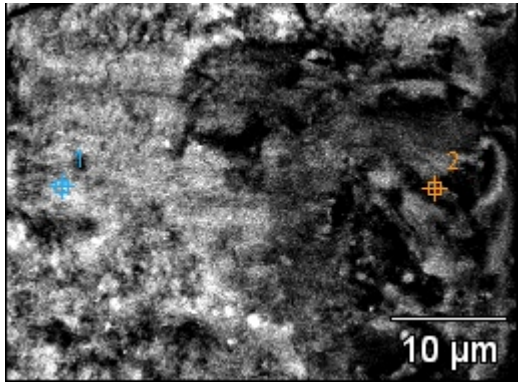
	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca
2D(3)_pt1	56.10		1.64		42.26		
2D(3)_pt2	43.98	7.34	0.75	1.76	8.35	0.99	36.82



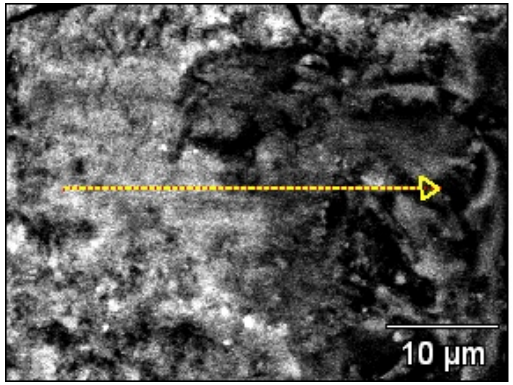
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2D1(3)_pt1	453	302	1309	9531	280	573	7083	462
2D1(3)_pt2	252	921		19810			233	

Weight %

	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2D1(3)_pt1	48.54	0.79	2.97	19.46	0.83	1.62	22.77	3.03
2D1(3)_pt2	53.96	2.28		42.81			0.95	

Atom %

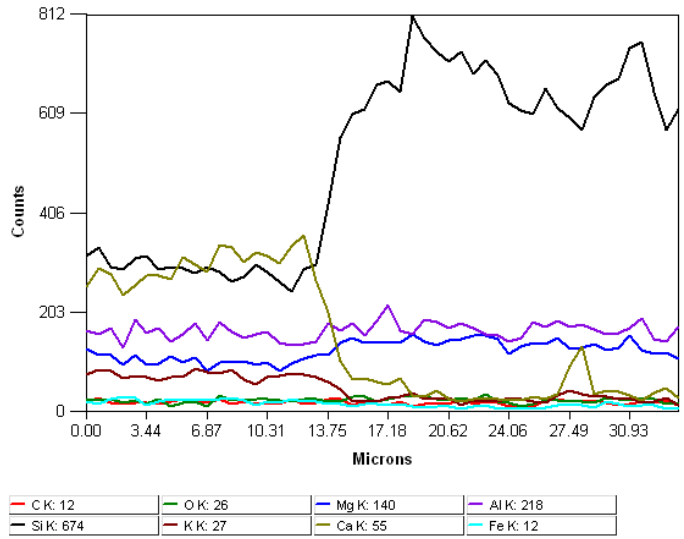
	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2D1(3)_pt1	72.60	0.58	1.98	12.45	0.46	0.74	10.21	0.97
2D1(3)_pt2	73.24	1.53		24.85			0.39	

Formula

	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2D1(3)_pt1	C	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
2D1(3)_pt2	C	Mg		Si			Ca	

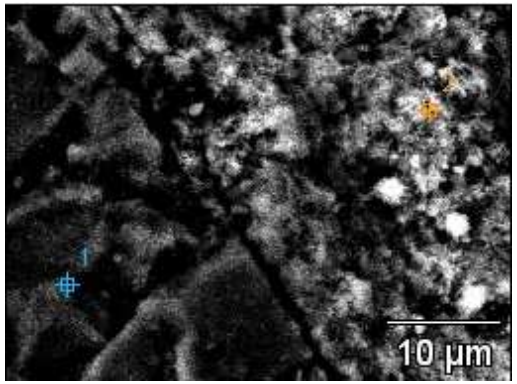
Compound %

	C	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
2D1(3)_pt1	48.54	0.79	2.97	19.46	0.83	1.62	22.77	3.03
2D1(3)_pt2	53.96	2.28		42.81			0.95	

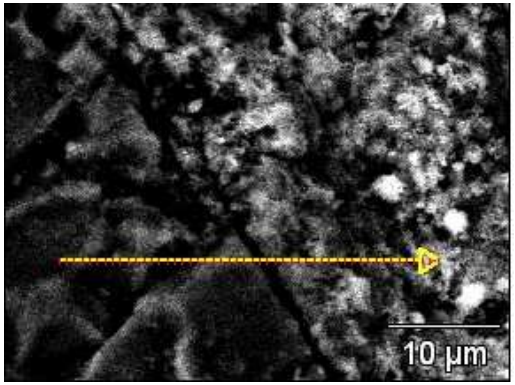


SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 950°C (Zona de transição)

500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2D2(4)_pt1	523	1154		24954			512	
2D2(4)_pt2	884		410	4583	214	953	13873	192

Weight %

	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2D2(4)_pt1	60.38	1.92		36.31			1.39	
2D2(4)_pt2	46.78		0.88	8.47	0.52	2.26	39.92	1.18

Atom %

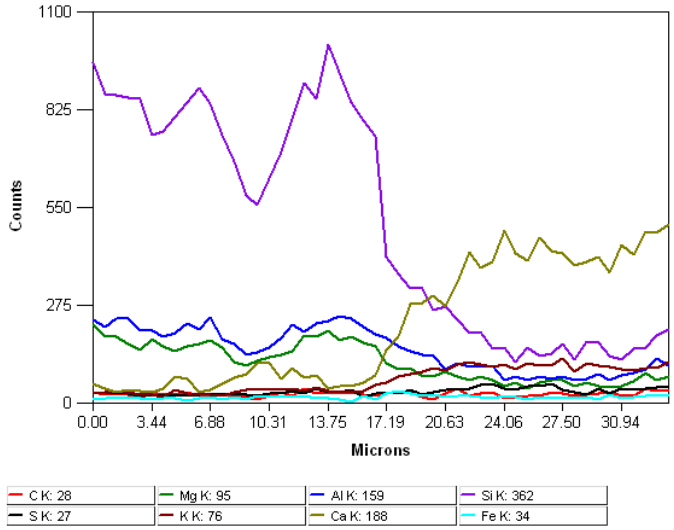
	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2D2(4)_pt1	78.14	1.23		20.09			0.54	
2D2(4)_pt2	73.21		0.61	5.67	0.30	1.09	18.72	0.40

Formula

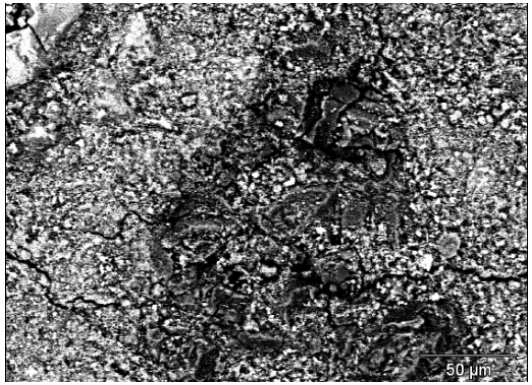
	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2D2(4)_pt1	C	Mg		Si			Ca	
2D2(4)_pt2	C		Al	Si	S	K	Ca	Fe

Compound %

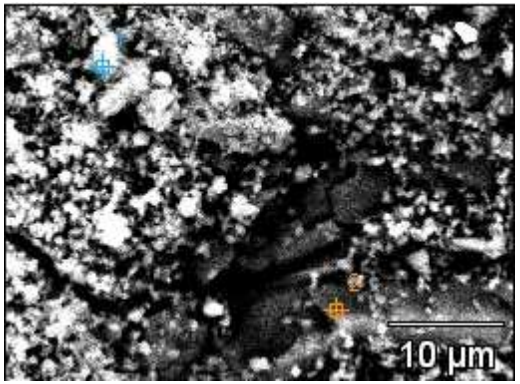
	C	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
2D2(4)_pt1	60.38	1.92		36.31			1.39	
2D2(4)_pt2	46.78		0.88	8.47	0.52	2.26	39.92	1.18



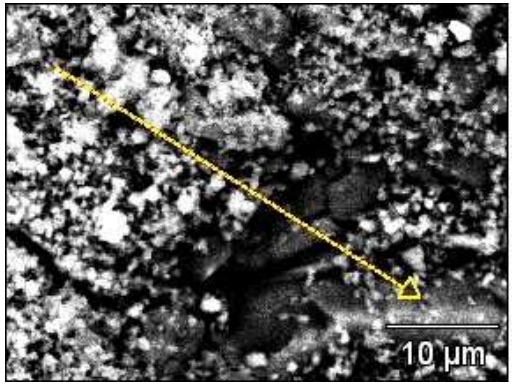
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2D4(4)_pt1	1135			702	2714	357	14617	133
2D4(4)_pt2	271	200	1327		26862		185	

Weight %

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2D4(4)_pt1	52.05			1.51	5.01	0.79	39.85	0.78
2D4(4)_pt2	45.22	7.97	2.54		43.71		0.55	

Atom %

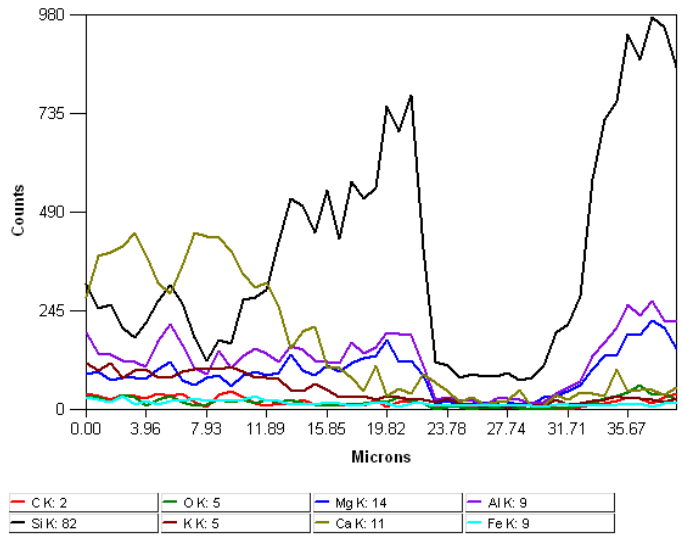
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2D4(4)_pt1	77.43			1.00	3.19	0.56	17.77	0.25
2D4(4)_pt2	63.41	8.39	1.76		26.21		0.23	

Formula

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2D4(4)_pt1	C			Al	Si	K	Ca	Fe
2D4(4)_pt2	C	O	Mg		Si		Ca	

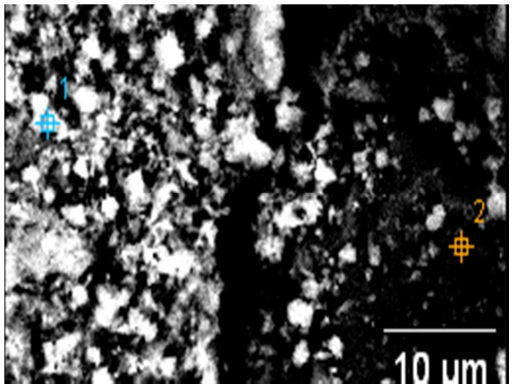
Compound %

	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
2D4(4)_pt1	52.05			1.51	5.01	0.79	39.85	0.78
2D4(4)_pt2	45.22	7.97	2.54		43.71		0.55	

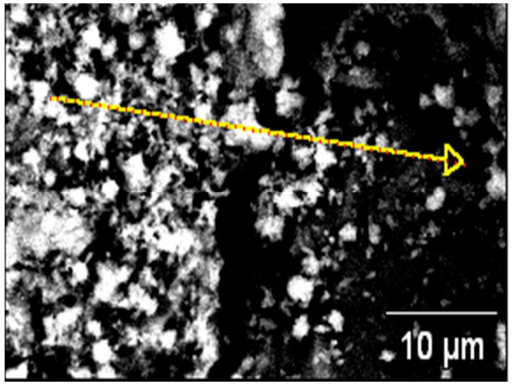


SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 1100°C (Zona de transição)

500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
3D1(2)_pt1	1200	246	495	5136	535	7984	145
3D1(2)_pt2	385	46	0	21478		266	

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
3D1(2)_pt1	58.20	10.39	0.80	11.36	1.02	17.56	0.66
3D1(2)_pt2	59.42	2.36	0.00	37.35		0.87	

Atom %

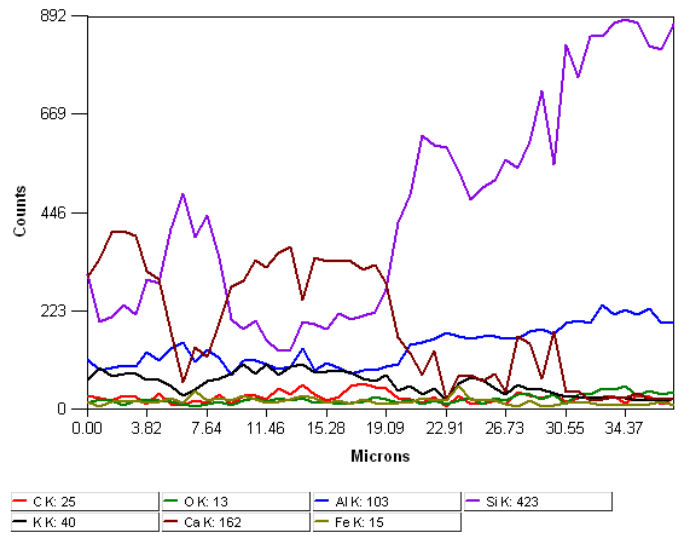
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
3D1(2)_pt1	75.65	10.14	0.46	6.31	0.41	6.84	0.19
3D1(2)_pt2	76.75	2.29	0.00	20.63		0.34	

Formula

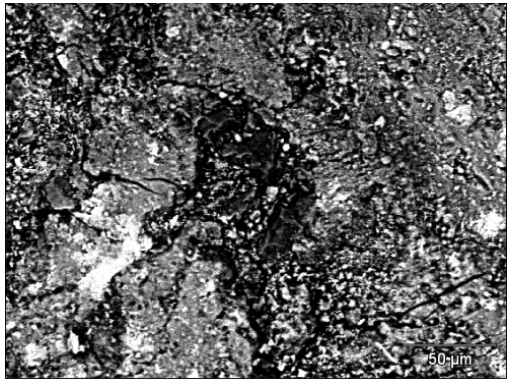
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
3D1(2)_pt1	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
3D1(2)_pt2	C	O	Al	Si		Ca	

Compound %

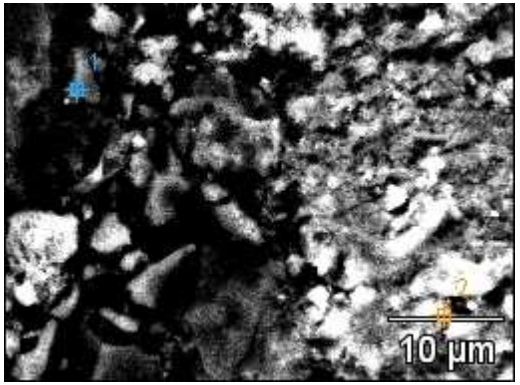
	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
3D1(2)_pt1	58.20	10.39	0.80	11.36	1.02	17.56	0.66
3D1(2)_pt2	59.42	2.36	0.00	37.35		0.87	



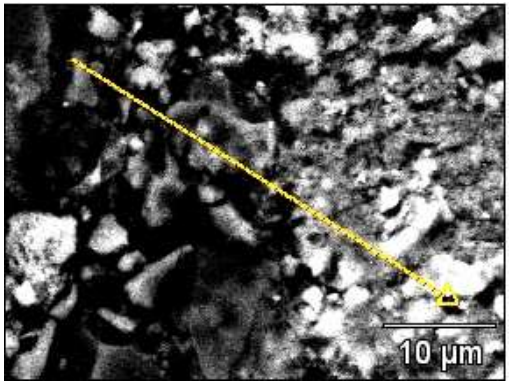
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO MIÚDO – 1100°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
3D3(3)_pt1	410		19808		350	
3D3(3)_pt2	572	541	5098	720	15318	581

Weight %

	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
3D3(3)_pt1	63.08		35.73		1.19	
3D3(3)_pt2	38.51	1.28	10.16	1.74	44.69	3.61

Atom %

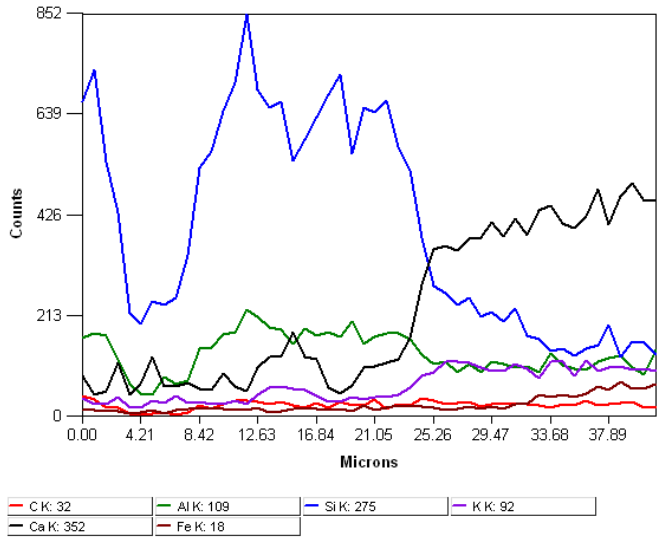
	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
3D3(3)_pt1	80.13		19.41		0.45	
3D3(3)_pt2	66.25	0.98	7.48	0.92	23.04	1.34

Formula

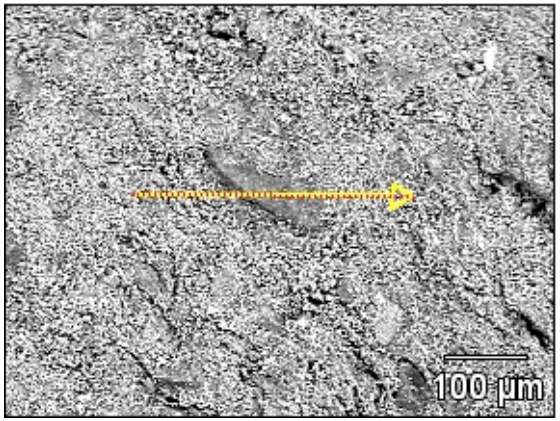
	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
3D3(3)_pt1	C		Si		Ca	
3D3(3)_pt2	C	Al	Si	K	Ca	Fe

Compound %

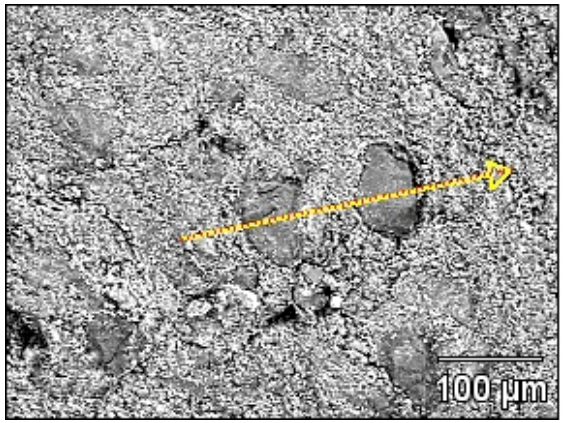
	C	Al	Si	K	Ca	Fe
3D3(3)_pt1	63.08		35.73		1.19	
3D3(3)_pt2	38.51	1.28	10.16	1.74	44.69	3.61



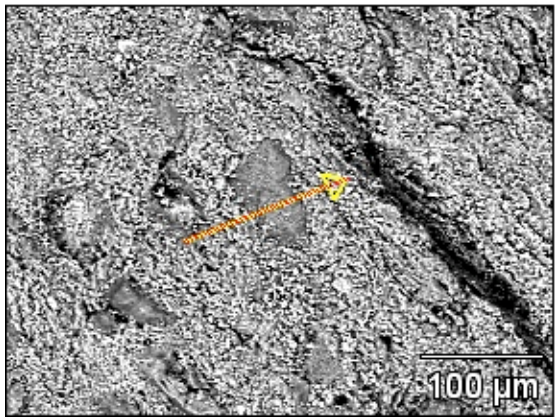
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 700°C (Grão inteiro)



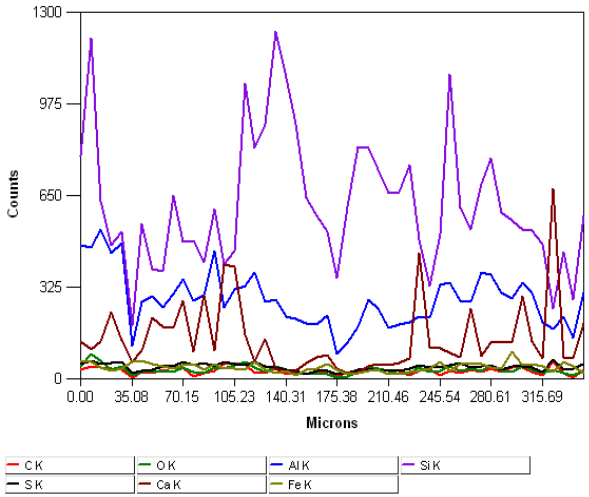
200x

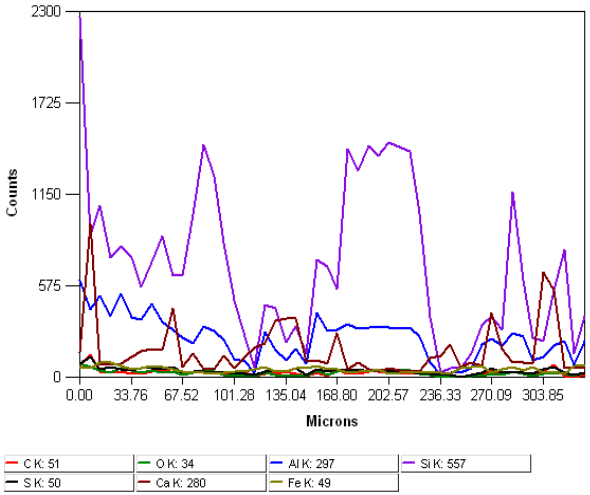


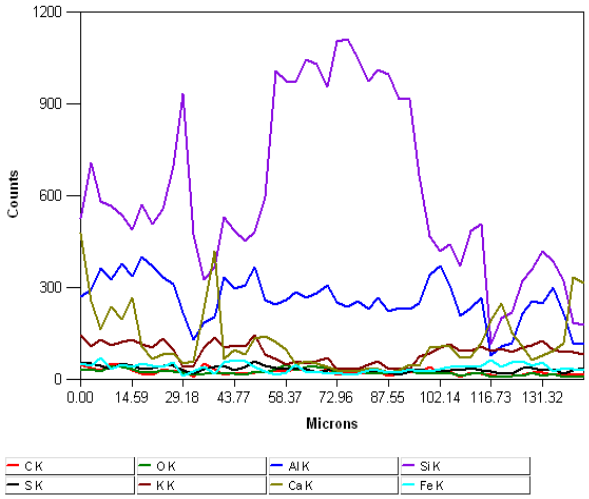
250x



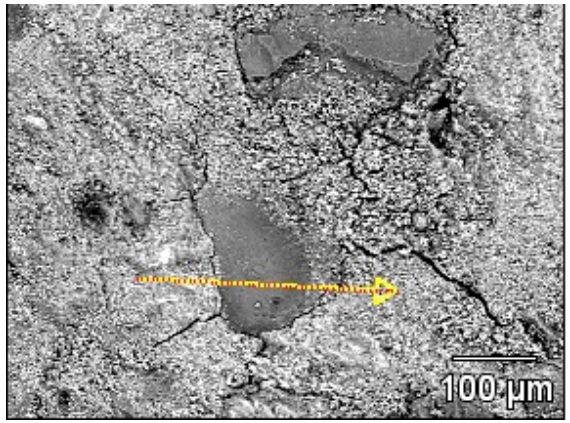
300x



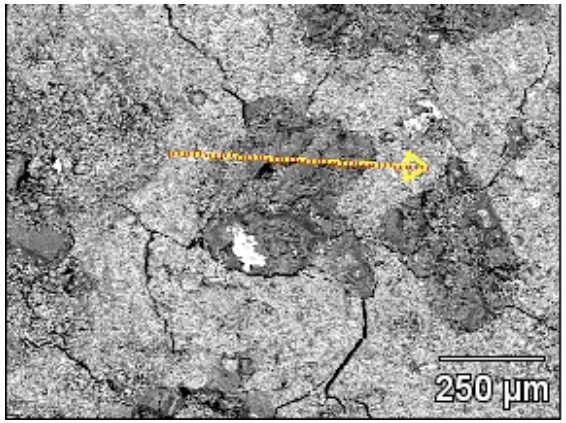




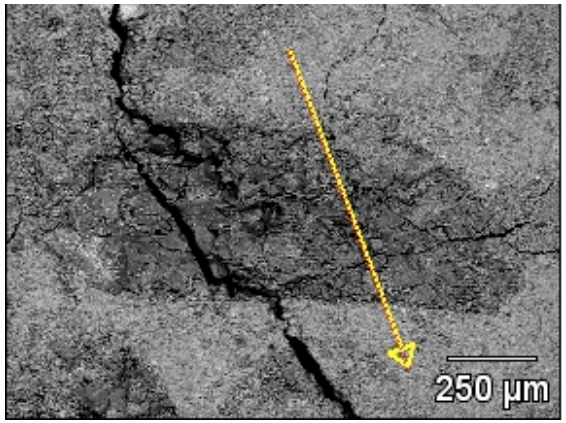
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 700°C (Grão inteiro)



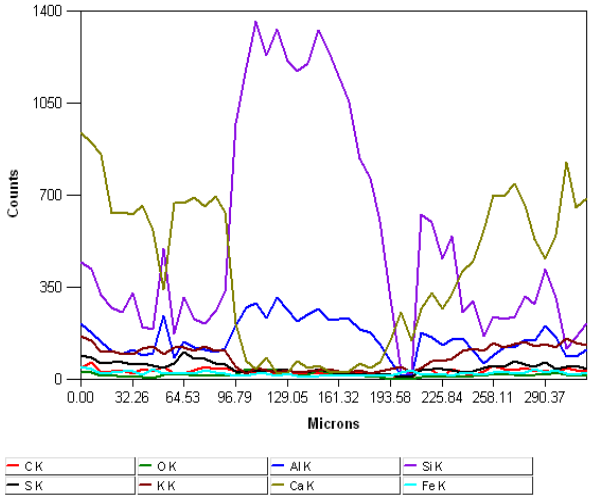
200x

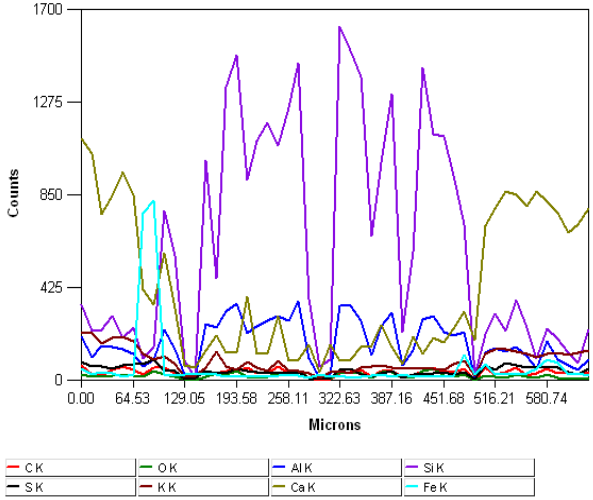


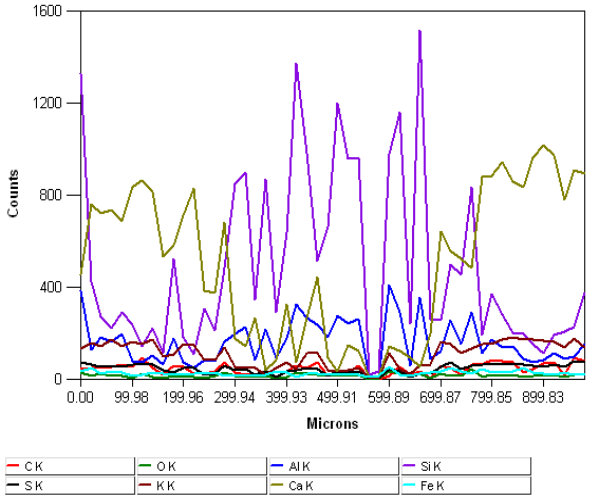
100x

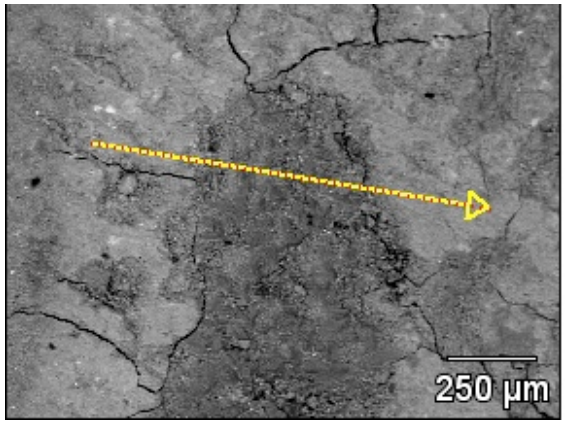
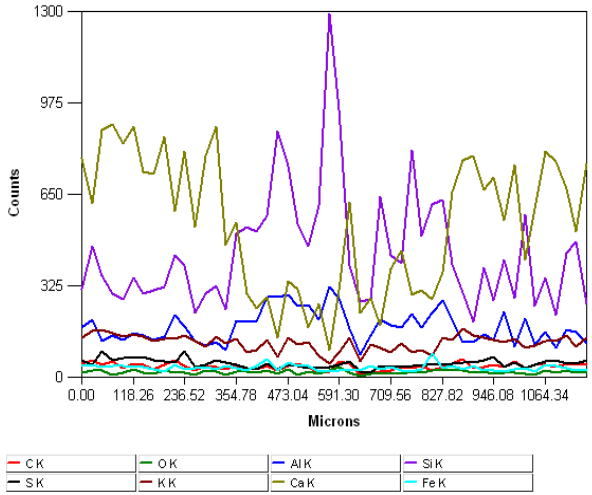


85x

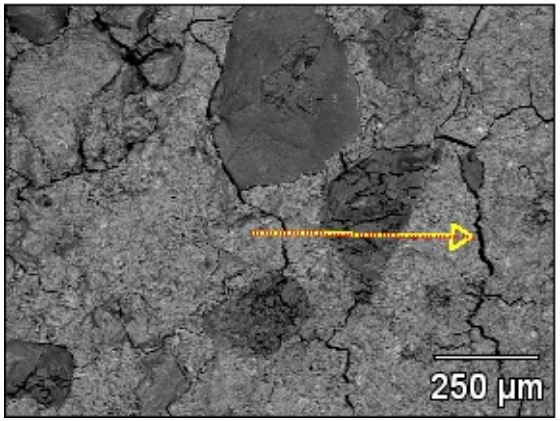




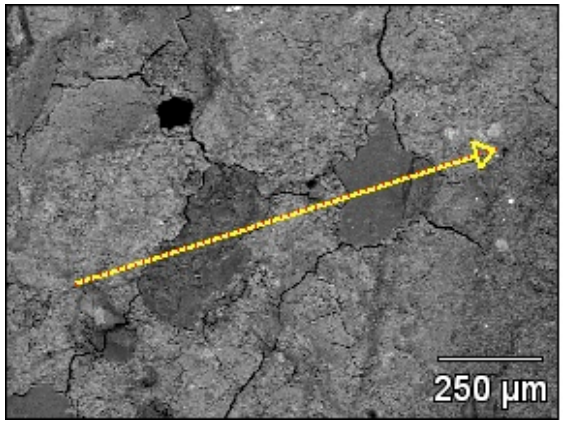


SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 700°C (Grão inteiro)		
		
	85x	
		

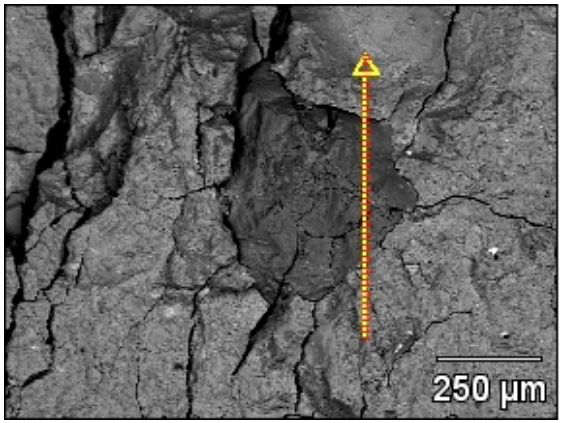
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 950°C (Grão inteiro)



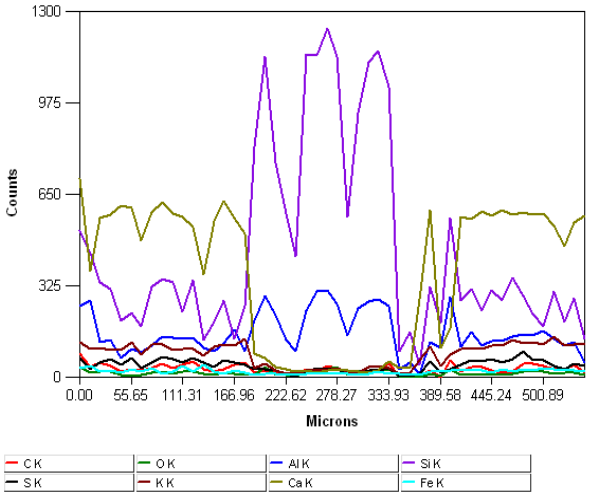
100x

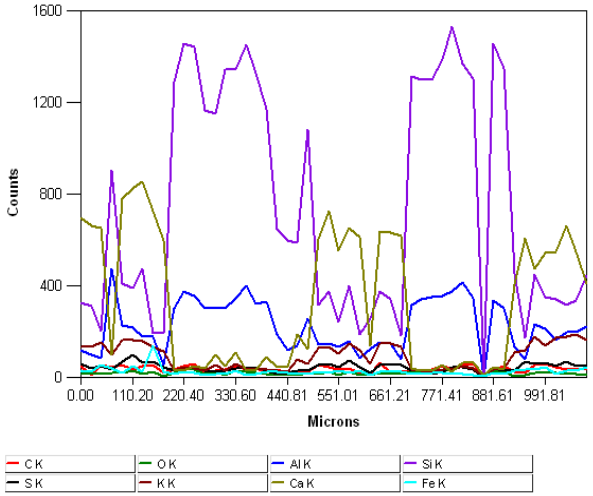


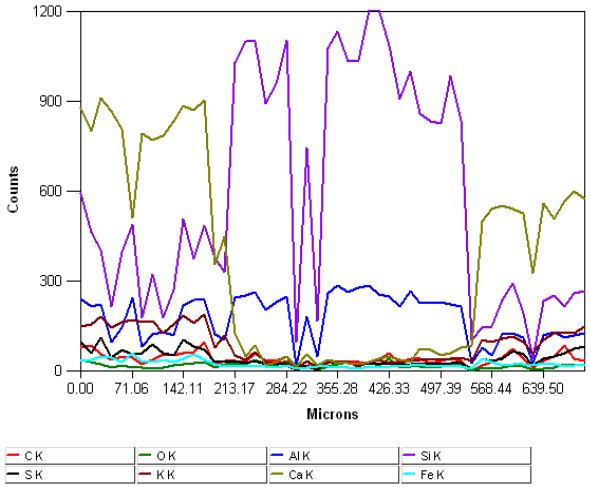
100x



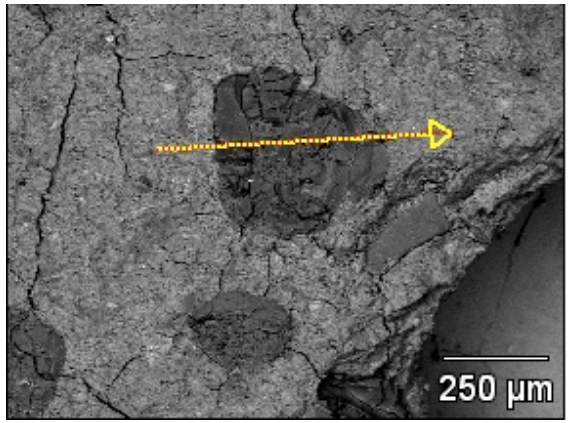
100x



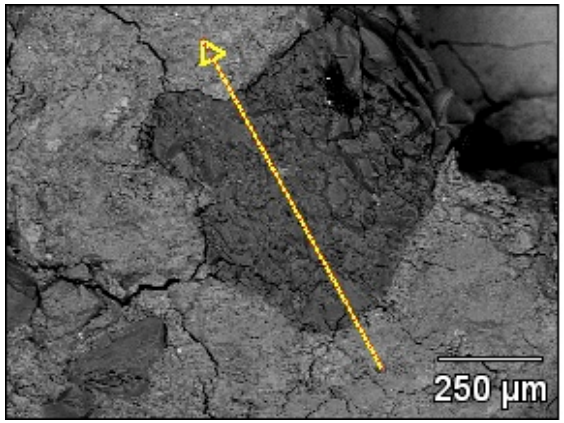




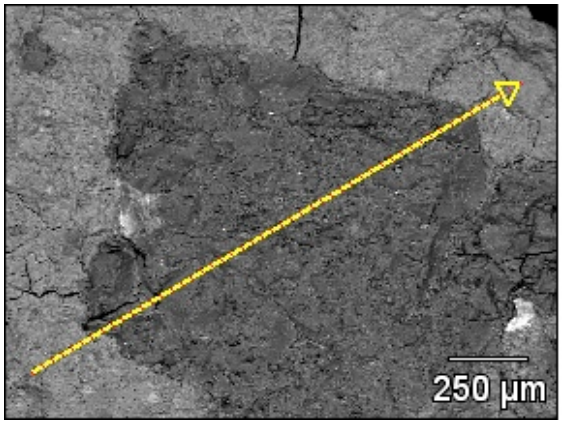
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 950°C (Grão inteiro)



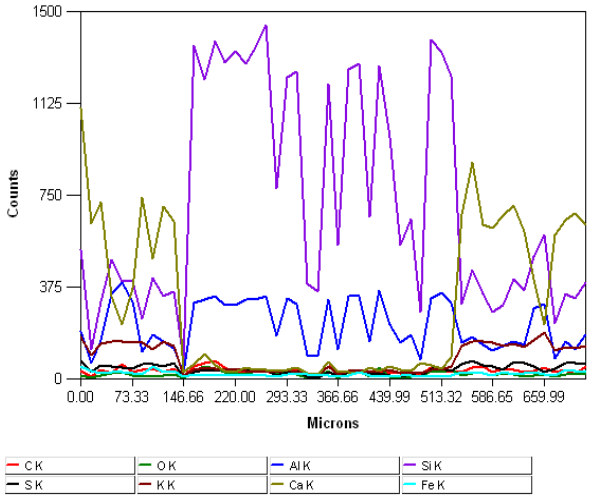
100x

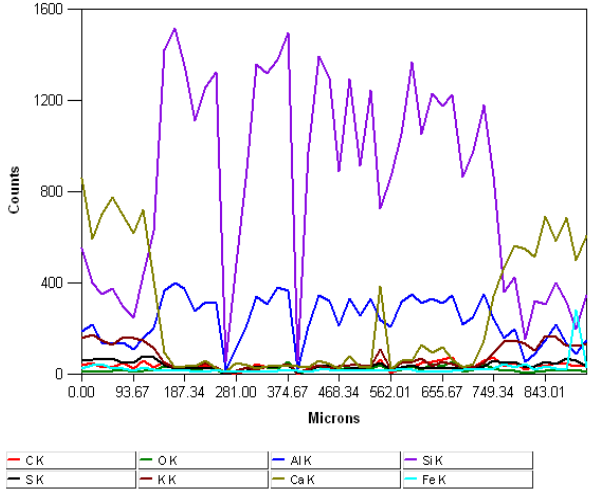


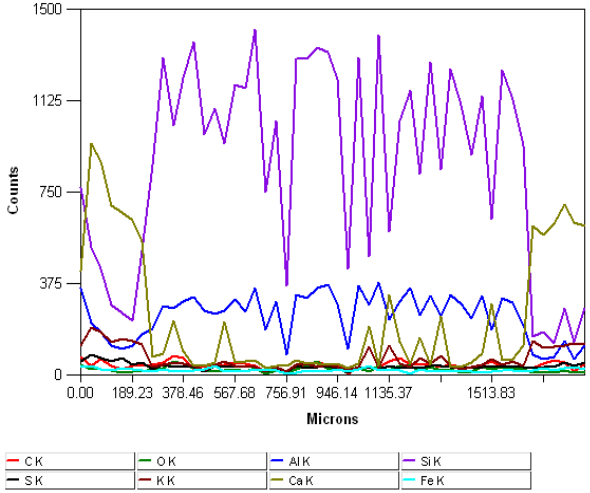
100x



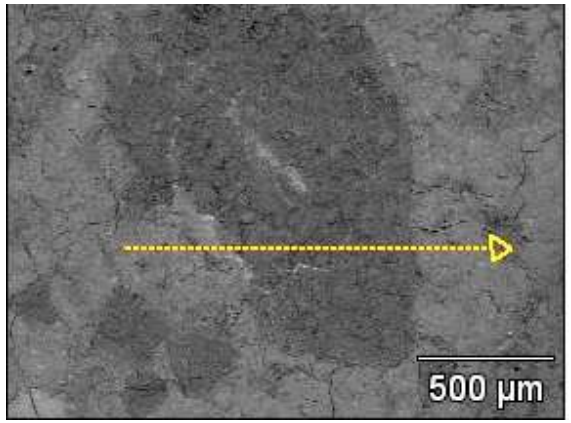
100x



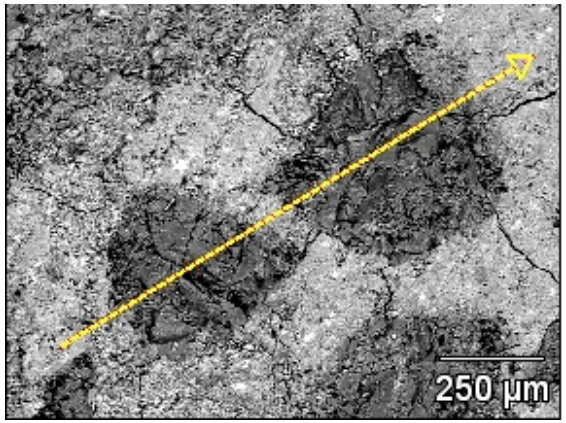




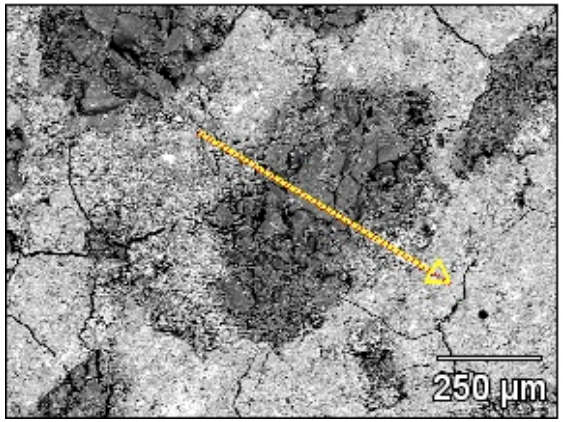
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Grão inteiro)



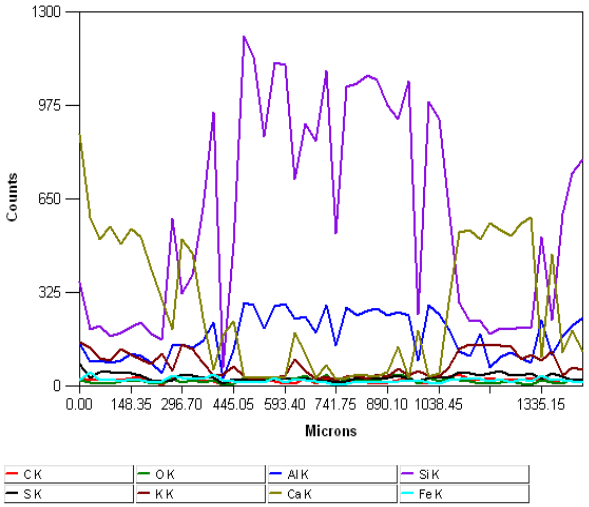
65x

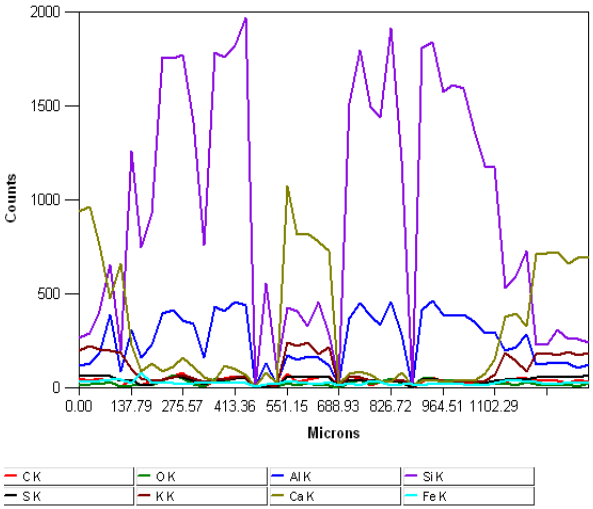


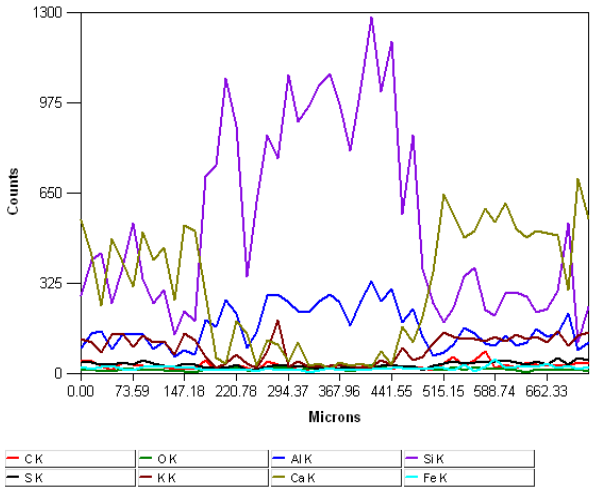
100x



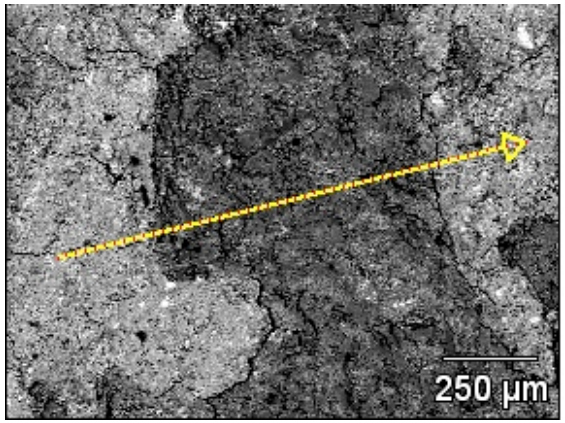
100x



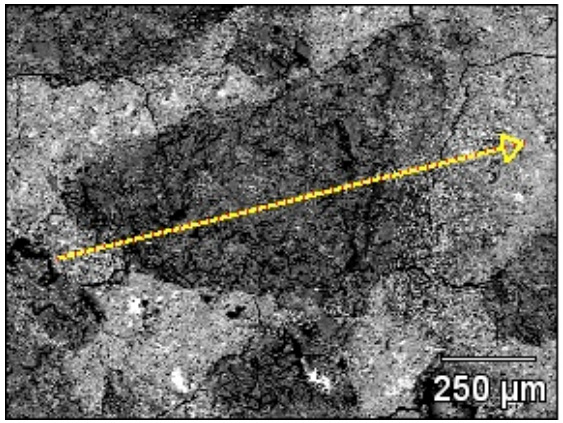




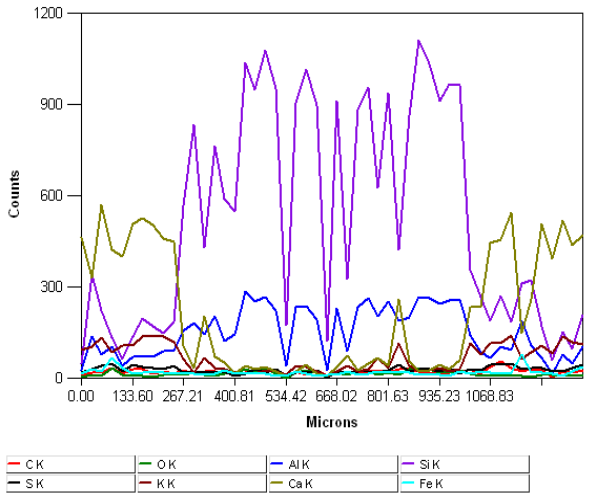
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Grão inteiro)

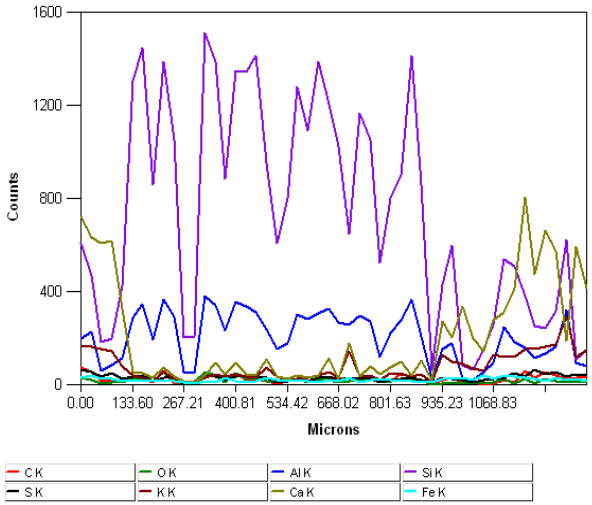


90x

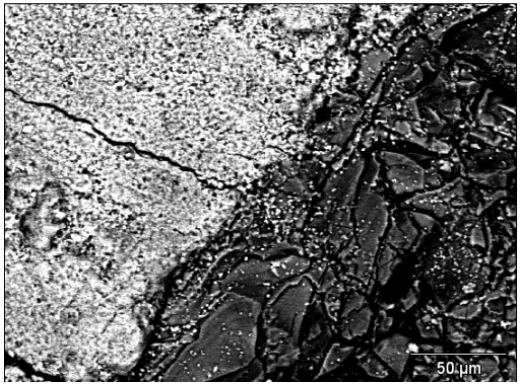


90x

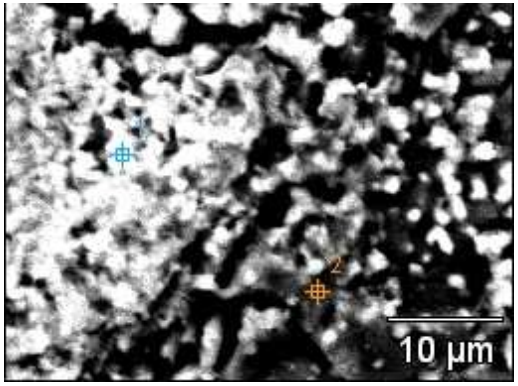




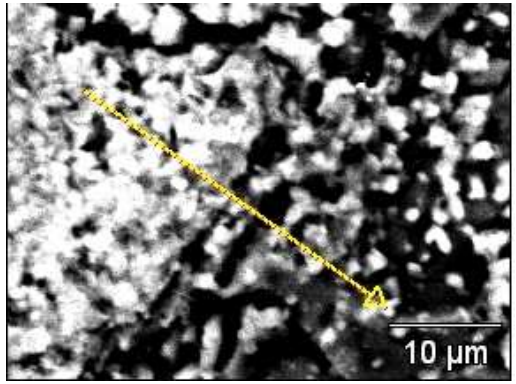
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Fe-K
1A2(3)_pt1	1790	667	1376	5938	36633	307
1A2(3)_pt2	620	557	1599	40239		

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Fe-K
1A2(3)_pt1	32.45	14.65	1.32	4.90	45.84	0.83
1A2(3)_pt2	47.60	10.78	1.66	39.96		

Atom %

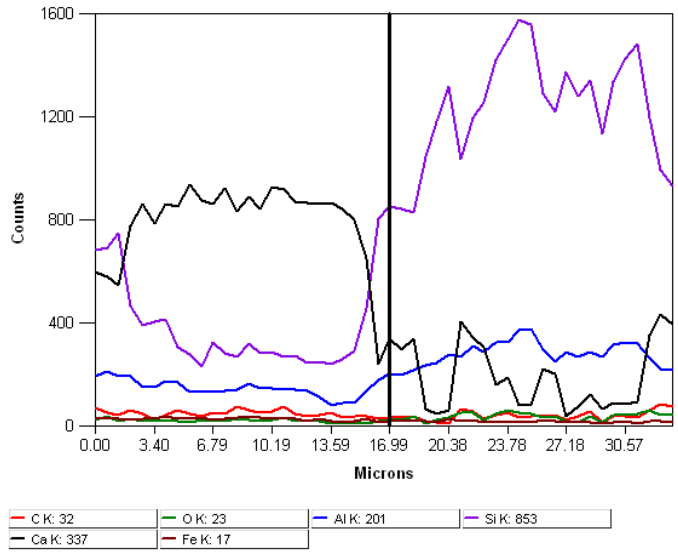
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Fe-K
1A2(3)_pt1	54.04	18.31	0.98	3.49	22.88	0.30
1A2(3)_pt2	64.74	11.00	1.01	23.24		

Formula

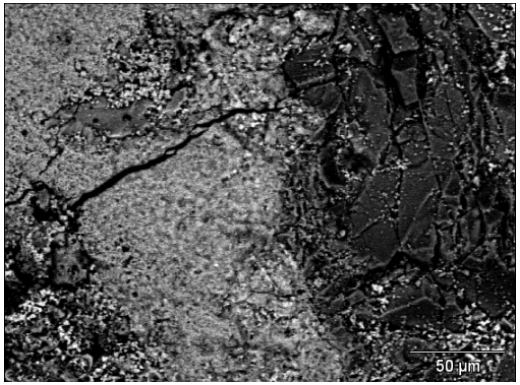
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Fe-K
1A2(3)_pt1	C	O	Al	Si	Ca	Fe
1A2(3)_pt2	C	O	Al	Si		

Compound %

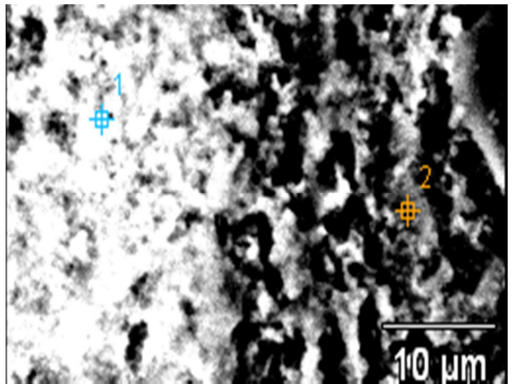
	C	O	Al	Si	Ca	Fe
1A2(3)_pt1	32.45	14.65	1.32	4.90	45.84	0.83
1A2(3)_pt2	47.60	10.78	1.66	39.96		



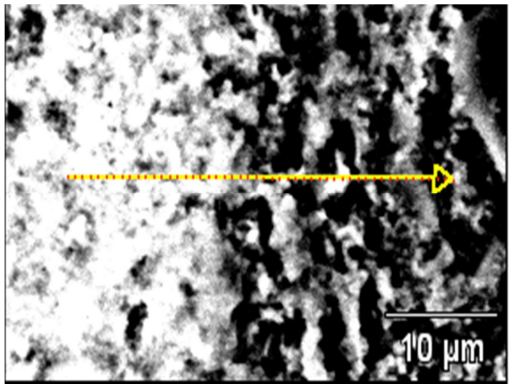
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1A4(5)_pt1	1156	358	1144	10020	656	29888	649
1A4(5)_pt2	723	1335	155	40705		449	

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1A4(5)_pt1	31.28	9.40	1.29	9.80	0.81	45.32	2.11
1A4(5)_pt2	43.10	20.30	0.15	35.73		0.72	

Atom %

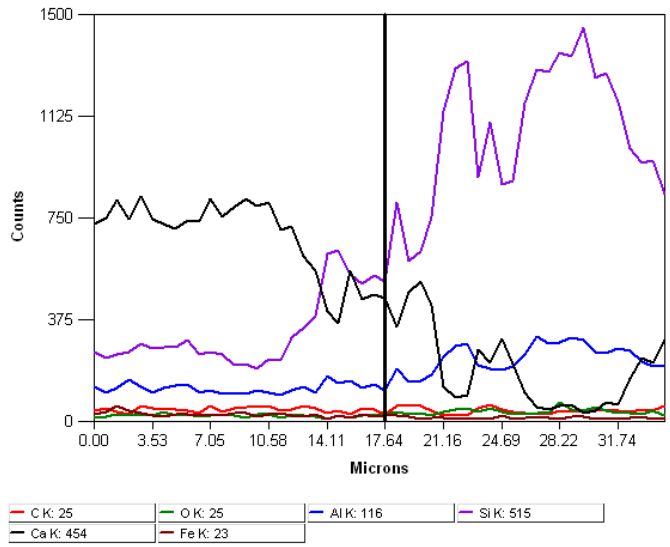
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1A4(5)_pt1	54.51	12.30	1.00	7.30	0.44	23.67	0.79
1A4(5)_pt2	58.32	20.62	0.09	20.68		0.29	

Formula

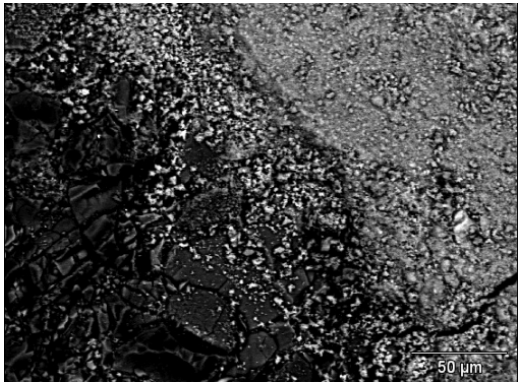
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1A4(5)_pt1	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
1A4(5)_pt2	C	O	Al	Si		Ca	

Compound %

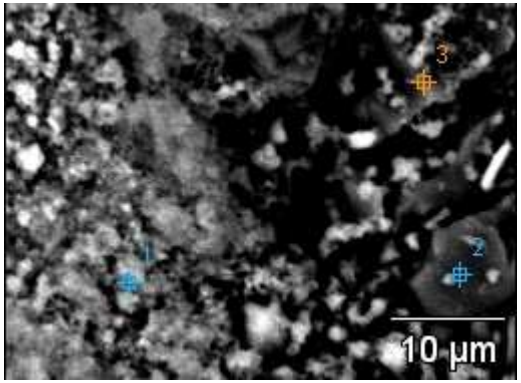
	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
1A4(5)_pt1	31.28	9.40	1.29	9.80	0.81	45.32	2.11
1A4(5)_pt2	43.10	20.30	0.15	35.73		0.72	



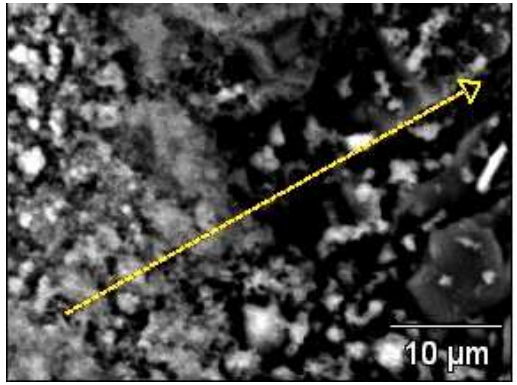
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K
1A5(5)_pt1	2839	1010	1300	28717	73458
1A5(5)_pt2	1079	2526	4349	99541	309
1A5(5)_pt3	1205	647	3183	70121	1802

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K
1A5(5)_pt1	32.94	11.19	0.58	11.09	44.20
1A5(5)_pt2	37.68	18.56	1.93	41.60	0.24
1A5(5)_pt3	50.58	7.68	1.82	38.12	1.81

Atom %

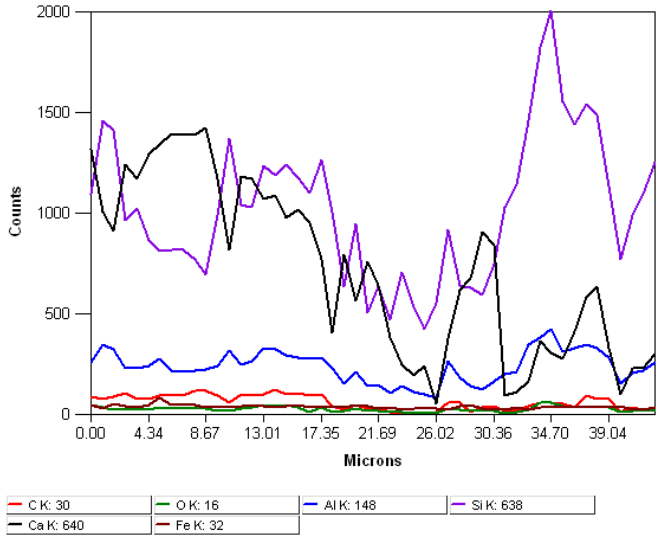
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K
1A5(5)_pt1	55.28	14.10	0.44	7.96	22.23
1A5(5)_pt2	53.57	19.81	1.22	25.30	0.10
1A5(5)_pt3	68.35	7.79	1.09	22.03	0.73

Formula

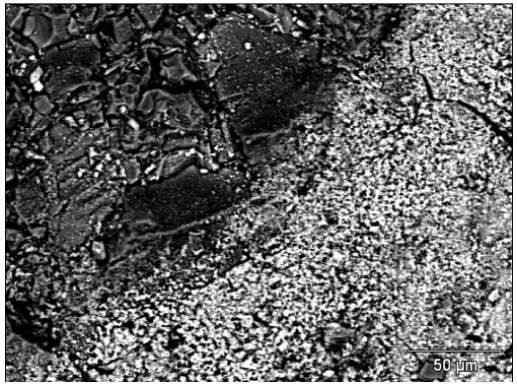
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K
1A5(5)_pt1	C	O	Al	Si	Ca
1A5(5)_pt2	C	O	Al	Si	Ca
1A5(5)_pt3	C	O	Al	Si	Ca

Compound %

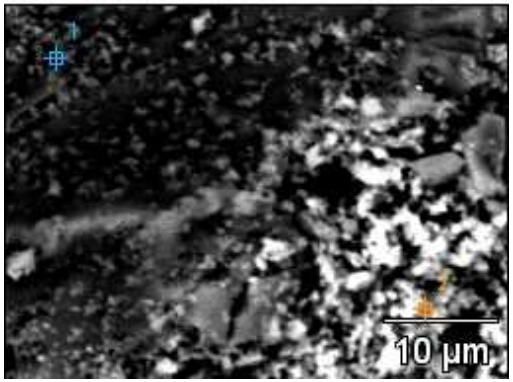
	C	O	Al	Si	Ca
1A5(5)_pt1	32.94	11.19	0.58	11.09	44.20
1A5(5)_pt2	37.68	18.56	1.93	41.60	0.24
1A5(5)_pt3	50.58	7.68	1.82	38.12	1.81



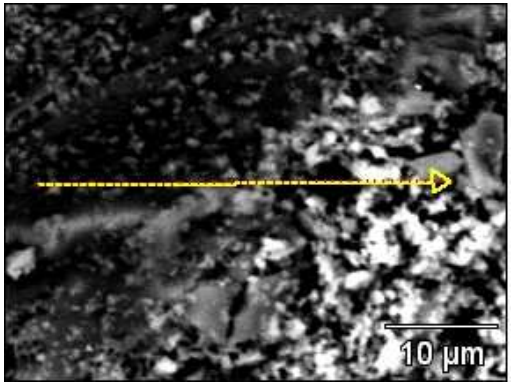
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2A(10)_pt1	3123	6496	14187	194785		10496	
2A(10)_pt2	1399		1741	17221	7120	95191	1084

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2A(10)_pt1	38.78	20.07	2.70	35.10		3.35	
2A(10)_pt2	16.96		0.96	8.10	4.01	68.29	1.68

Atom %

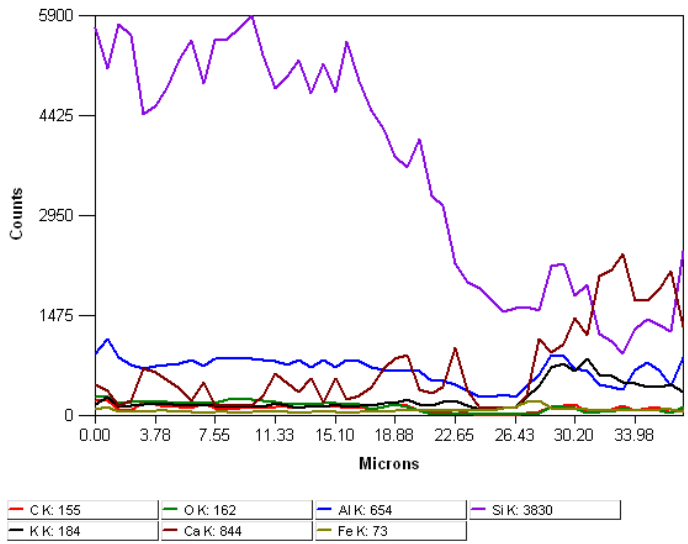
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2A(10)_pt1	54.57	21.20	1.69	21.12		1.41	
2A(10)_pt2	39.53		1.00	8.07	2.87	47.69	0.84

Formula

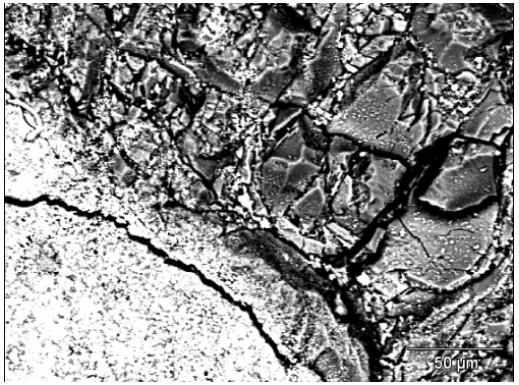
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2A(10)_pt1	C	O	Al	Si		Ca	
2A(10)_pt2	C		Al	Si	K	Ca	Fe

Compound %

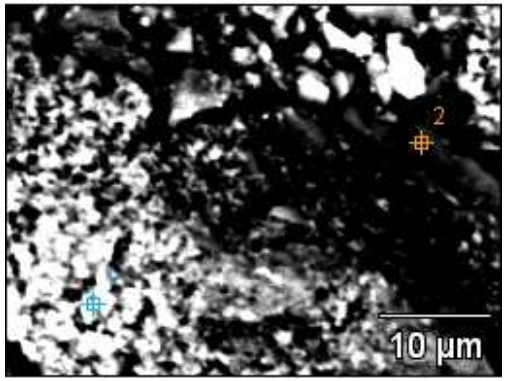
	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
2A(10)_pt1	38.78	20.07	2.70	35.10		3.35	
2A(10)_pt2	16.96		0.96	8.10	4.01	68.29	1.68



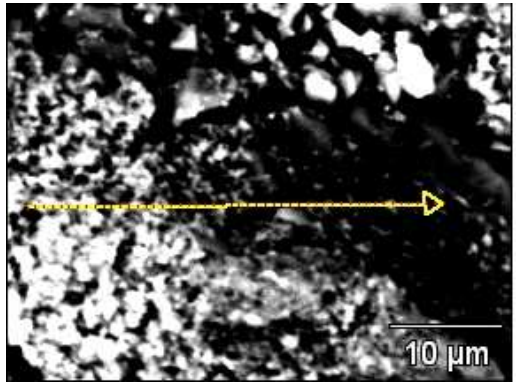
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Si-K	Ca-K	Fe-K
2A(21)_pt1	4070	4131	106645	193306	
2A(21)_pt2	1717	10891	327584	2427	780

Weight %

	C-K	O-K	Si-K	Ca-K	Fe-K
2A(21)_pt1	21.92	16.26	15.99	45.83	
2A(21)_pt2	24.46	24.79	49.64	0.69	0.43

Atom %

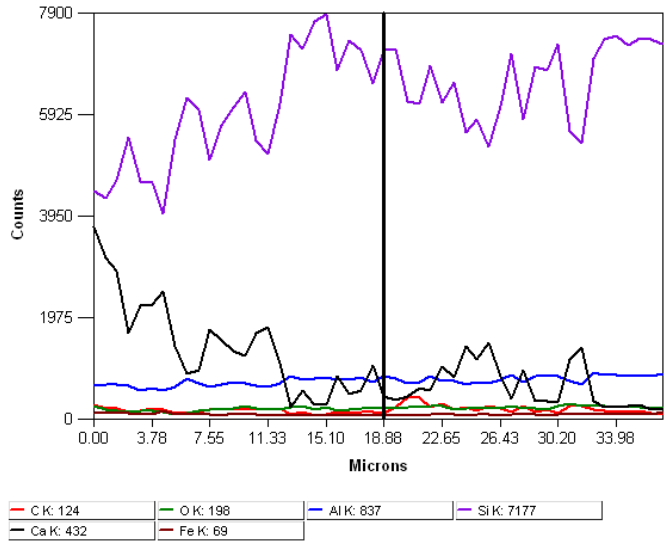
	C-K	O-K	Si-K	Ca-K	Fe-K
2A(21)_pt1	40.08	22.32	12.50	25.11	
2A(21)_pt2	37.86	28.81	32.87	0.32	0.14

Formula

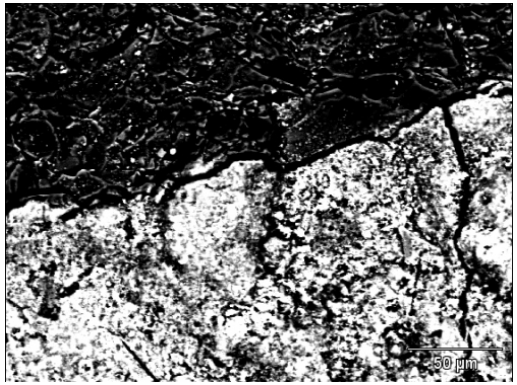
	C-K	O-K	Si-K	Ca-K	Fe-K
2A(21)_pt1	C	O	Si	Ca	
2A(21)_pt2	C	O	Si	Ca	Fe

Compound %

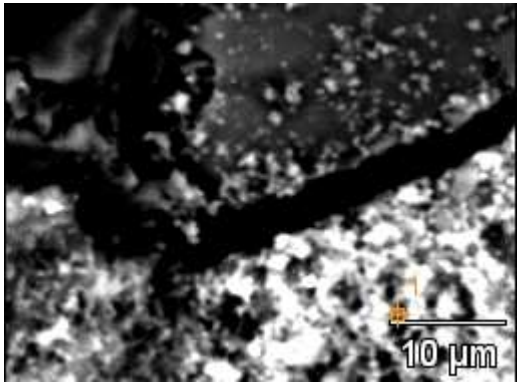
	C	O	Si	Ca	Fe
2A(21)_pt1	21.92	16.26	15.99	45.83	
2A(21)_pt2	24.46	24.79	49.64	0.69	0.43



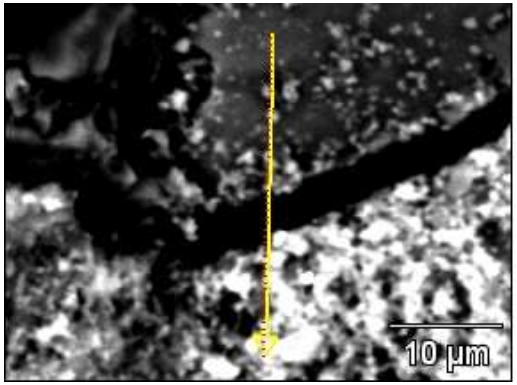
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	O-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2A(31)_pt1	5403	122987	18207	539222	8825

Weight %

	O-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2A(31)_pt1	13.46	10.90	1.91	71.21	2.52

Atom %

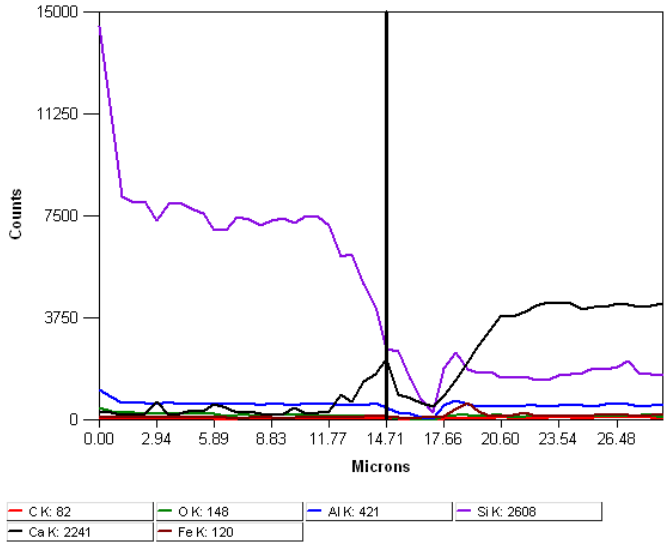
	O-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2A(31)_pt1	27.13	12.52	1.58	57.31	1.46

Formula

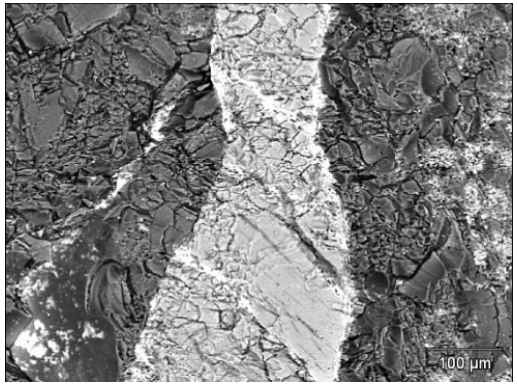
	O-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2A(31)_pt1	O	Si	K	Ca	Fe

Compound %

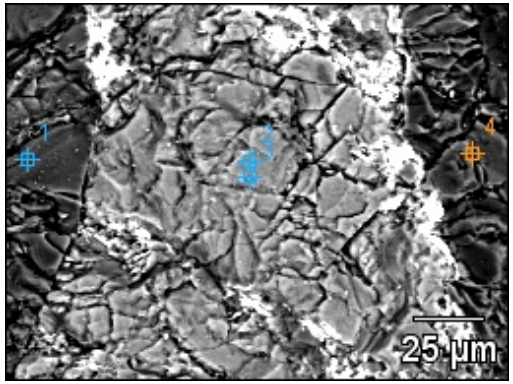
	O	Si	K	Ca	Fe
2A(31)_pt1	13.46	10.90	1.91	71.21	2.52



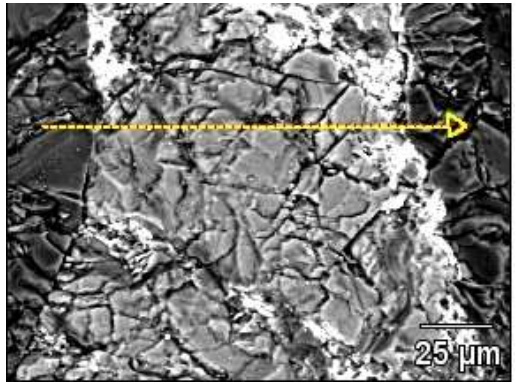
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 950°C (Zona de transição)



200x



750x



750x

Net Counts

	O-K	Na-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2A(37)_pt1		1086	607155			
2A(37)_pt3	4910	2793	206604	111906	3452	994
2A(37)_pt4	5313		427701			

Weight %

	O-K	Na-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2A(37)_pt1		0.35	99.65			
2A(37)_pt3	19.43	1.50	41.07	35.93	1.38	0.69
2A(37)_pt4	15.19		84.81			

Atom %

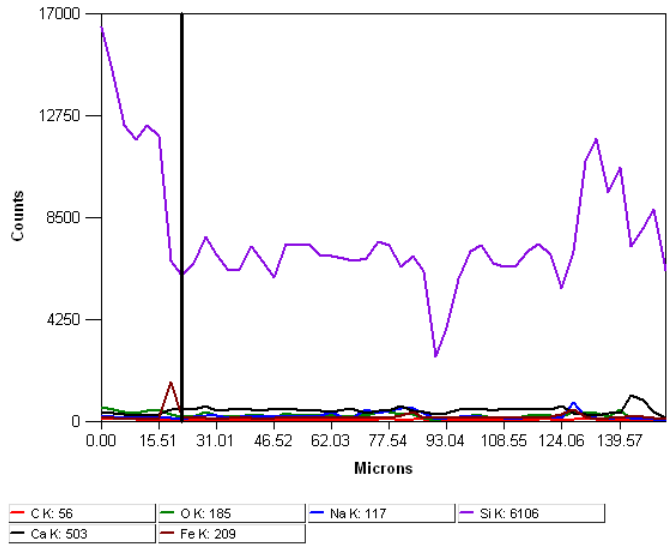
	O-K	Na-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2A(37)_pt1		0.43	99.57			
2A(37)_pt3	32.75	1.76	39.44	24.79	0.93	0.33
2A(37)_pt4	23.92		76.08			

Formula

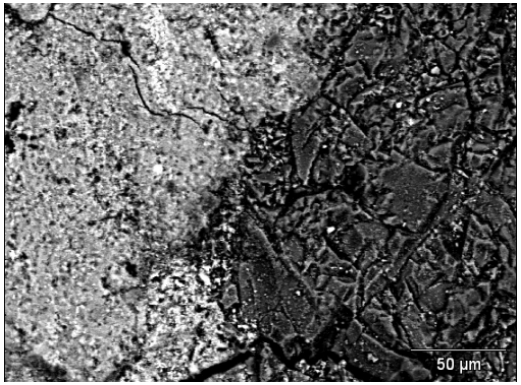
	O-K	Na-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2A(37)_pt1		Na	Si			
2A(37)_pt3	O	Na	Si	K	Ca	Fe
2A(37)_pt4	O		Si			

Compound %

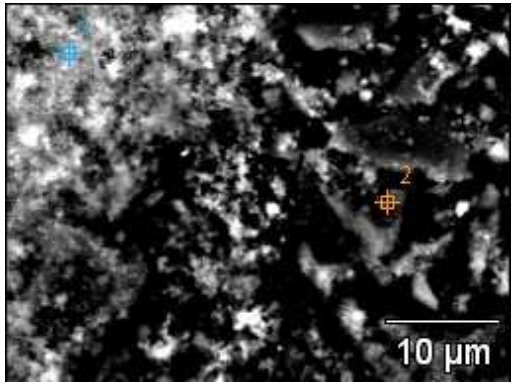
	O	Na	Si	K	Ca	Fe
2A(37)_pt1		0.35	99.65			
2A(37)_pt3	19.43	1.50	41.07	35.93	1.38	0.69
2A(37)_pt4	15.19		84.81			



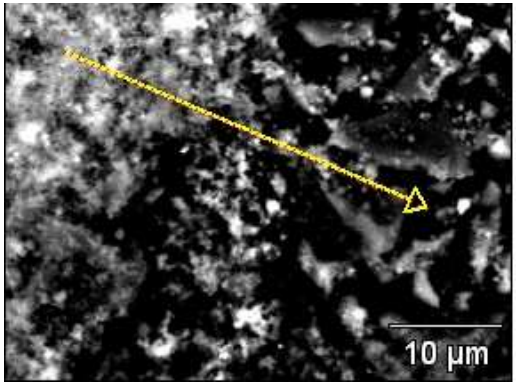
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A2 - dia2(3)_pt1	1339	817	8640	36439	3061	3176	86211	2346
A2 - dia2(3)_pt2	1138	1648	3232	91523			1184	

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A2 - dia2(3)_pt1	21.48	8.95	3.68	13.59	1.49	1.45	46.70	2.67
A2 - dia2(3)_pt2	43.13	15.22	1.49	39.25			0.92	

Atom %

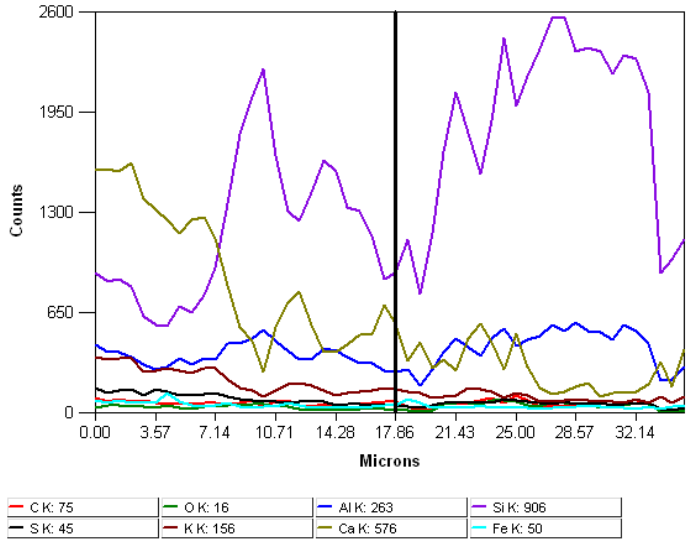
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A2 - dia2(3)_pt1	41.93	13.12	3.19	11.35	1.09	0.87	27.32	1.12
A2 - dia2(3)_pt2	59.67	15.81	0.92	23.22			0.38	

Formula

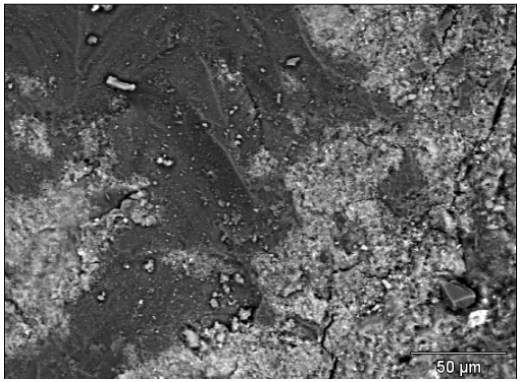
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A2 - dia2(3)_pt1	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe
A2 - dia2(3)_pt2	C	O	Al	Si			Ca	

Compound %

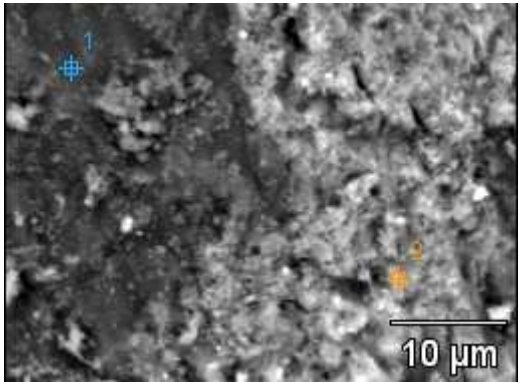
	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe
A2 - dia2(3)_pt1	21.48	8.95	3.68	13.59	1.49	1.45	46.70	2.67
A2 - dia2(3)_pt2	43.13	15.22	1.49	39.25			0.92	



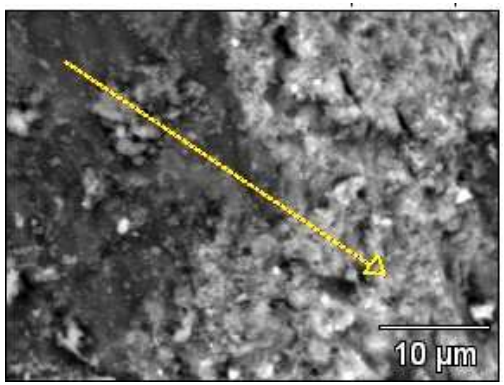
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A2 - dia2(7)_pt1	673	2439	12285	149016			
A2 - dia2(7)_pt2	1259	785	5172	28432	2438	23840	9743

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A2 - dia2(7)_pt1	27.25	15.85	4.40	52.50			
A2 - dia2(7)_pt2	33.42	9.37	3.48	16.53	1.76	19.38	16.06

Atom %

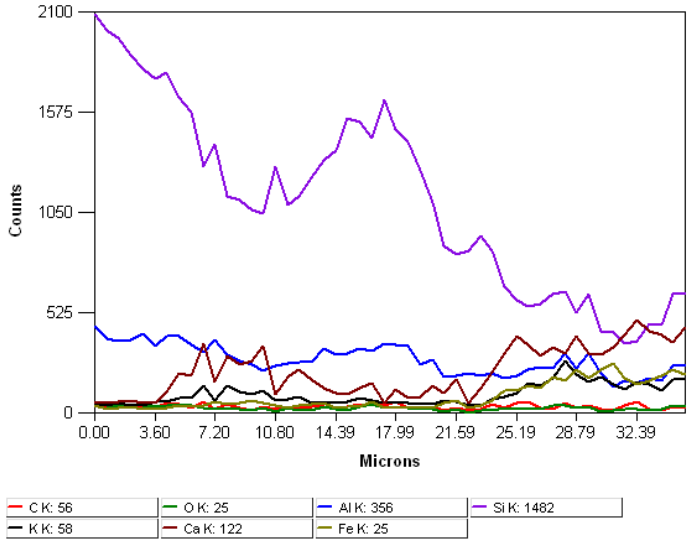
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A2 - dia2(7)_pt1	42.87	18.72	3.09	35.33			
A2 - dia2(7)_pt2	56.76	11.95	2.63	12.01	0.92	9.87	5.87

Formula

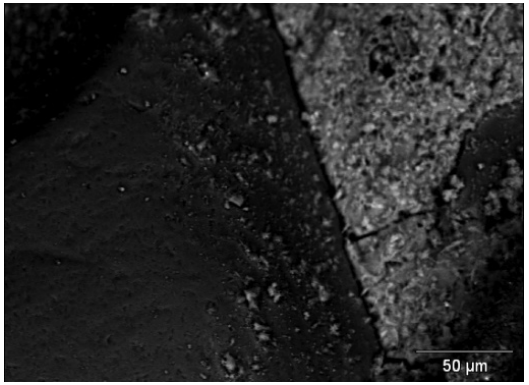
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A2 - dia2(7)_pt1	C	O	Al	Si			
A2 - dia2(7)_pt2	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe

Compound %

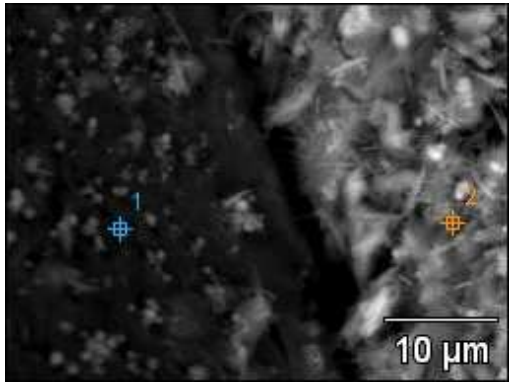
	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
A2 - dia2(7)_pt1	27.25	15.85	4.40	52.50			
A2 - dia2(7)_pt2	33.42	9.37	3.48	16.53	1.76	19.38	16.06



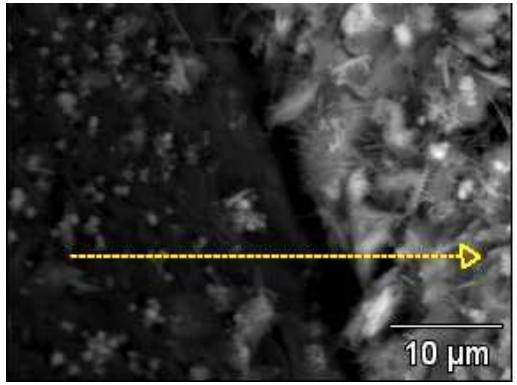
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A2 brita- dia2(4)_pt1	1696	1168	3597	20116	1240	753	25122	
A2 brita- dia2(4)_pt2	598	963	5664	21124	3304	1436	47332	1461

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A2 brita- dia2(4)_pt1	40.91	18.40	2.52	12.48	1.04	0.62	24.03	
A2 brita- dia2(4)_pt2	16.91	15.84	4.06	13.32	2.70	1.12	43.27	2.79

Atom %

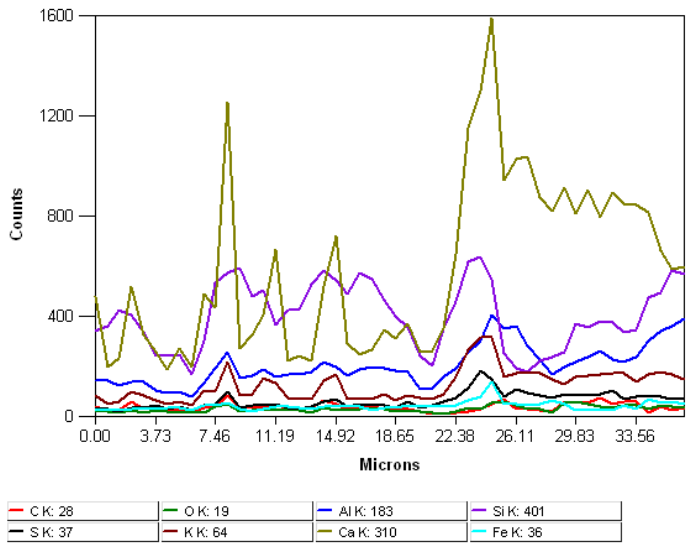
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A2 brita- dia2(4)_pt1	59.32	20.03	1.63	7.74	0.56	0.28	10.44	
A2 brita- dia2(4)_pt2	33.02	23.21	3.52	11.12	1.97	0.67	25.31	1.17

Formula

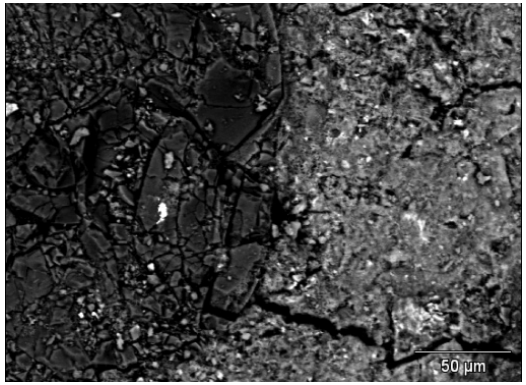
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A2 brita- dia2(4)_pt1	C	O	Al	Si	S	K	Ca	
A2 brita- dia2(4)_pt2	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe

Compound %

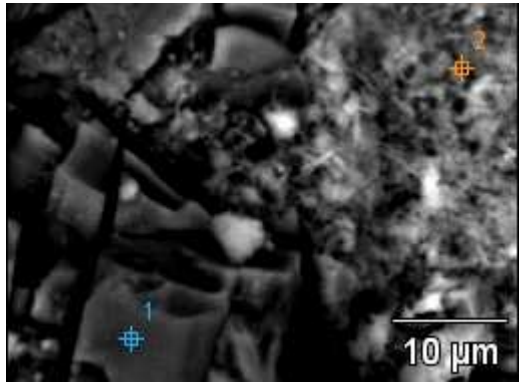
	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe
A2 brita- dia2(4)_pt1	40.91	18.40	2.52	12.48	1.04	0.62	24.03	
A2 brita- dia2(4)_pt2	16.91	15.84	4.06	13.32	2.70	1.12	43.27	2.79



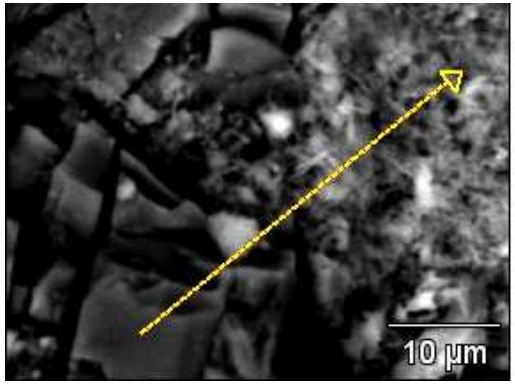
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3-dia2(4)_pt1	223	4501		181748			
A3-dia2(4)_pt2	326	388	4018	14095	10467	61828	1570

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3-dia2(4)_pt1	10.34	23.75		65.91			
A3-dia2(4)_pt2	6.82	7.64	3.13	9.48	8.32	61.34	3.27

Atom %

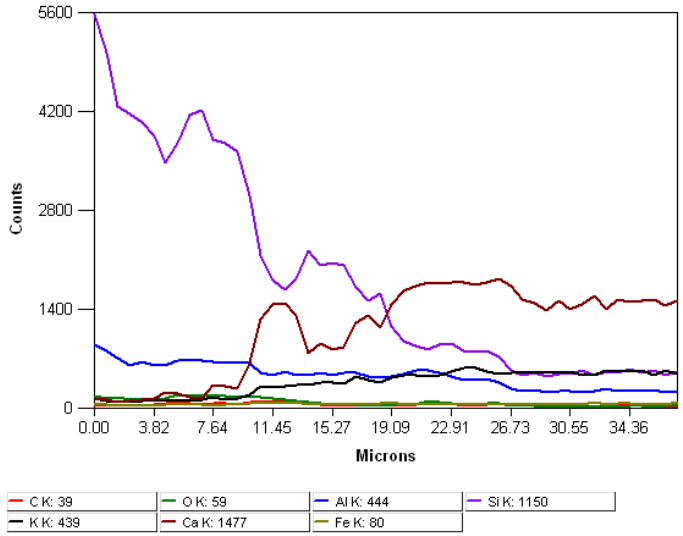
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3-dia2(4)_pt1	18.35	31.64		50.02			
A3-dia2(4)_pt2	17.20	14.46	3.52	10.23	6.44	46.37	1.77

Formula

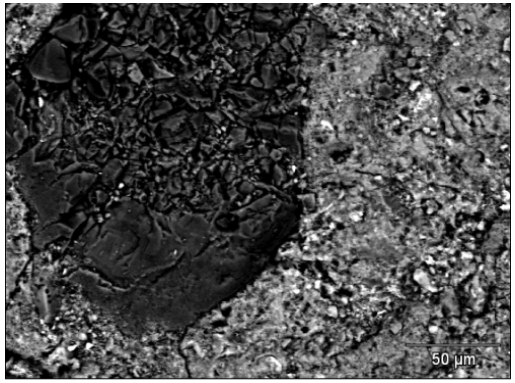
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3-dia2(4)_pt1	C	O		Si			
A3-dia2(4)_pt2	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe

Compound %

	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
A3-dia2(4)_pt1	10.34	23.75		65.91			
A3-dia2(4)_pt2	6.82	7.64	3.13	9.48	8.32	61.34	3.27

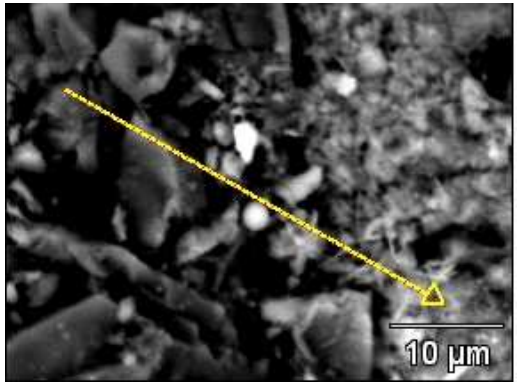


SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Zona de transição)



500x

3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3- dia2(13)_pt1	334	6276	22097	280666			11437	
A3- dia2(13)_pt2	1015	1979	9768	40144	2521	12583	124004	1293

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3- dia2(13)_pt1	8.64	20.55	4.88	61.32			4.60	
A3- dia2(13)_pt2	10.35	15.30	3.22	11.54	0.93	4.42	53.08	1.16

Atom %

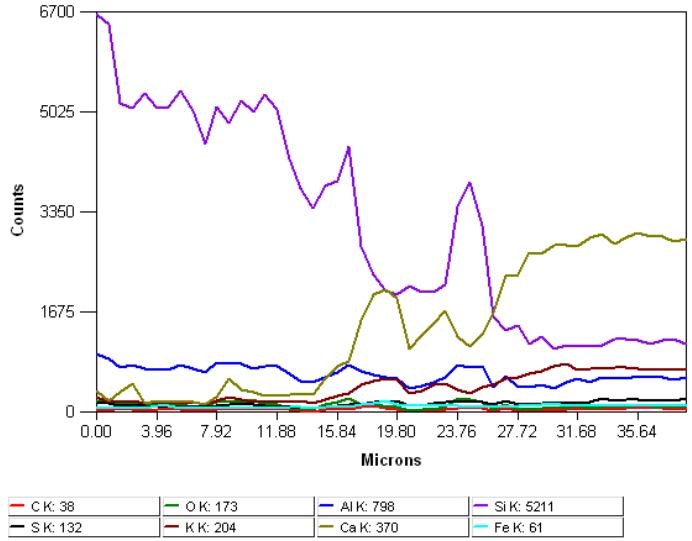
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3- dia2(13)_pt1	16.05	28.66	4.04	48.70			2.56	
A3- dia2(13)_pt2	22.47	24.94	3.11	10.71	0.75	2.95	34.53	0.54

Formula

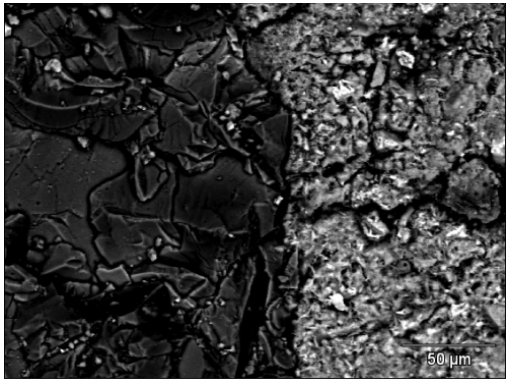
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3- dia2(13)_pt1	C	O	Al	Si			Ca	
A3- dia2(13)_pt2	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe

Compound %

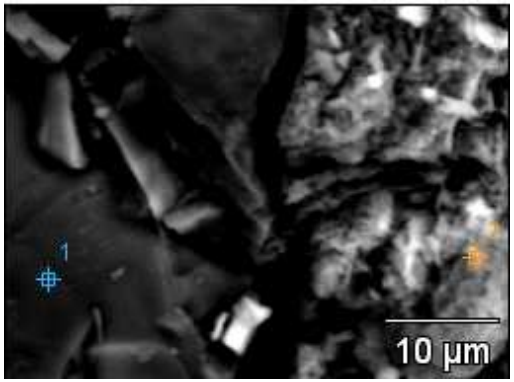
	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe
A3- dia2(13)_pt1	8.64	20.55	4.88	61.32			4.60	
A3- dia2(13)_pt2	10.35	15.30	3.22	11.54	0.93	4.42	53.08	1.16



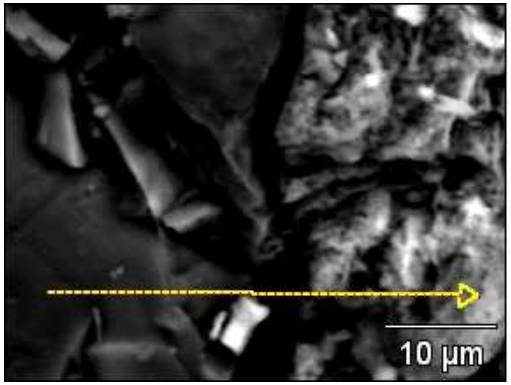
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3-dia2(22)_pt1		10845		353932				
A3-dia2(22)_pt2	684	2658	12328	51346	2951	17719	99950	2537

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3-dia2(22)_pt1		28.33		71.67				
A3-dia2(22)_pt2	8.41	18.92	4.07	14.98	1.13	6.48	43.73	2.28

Atom %

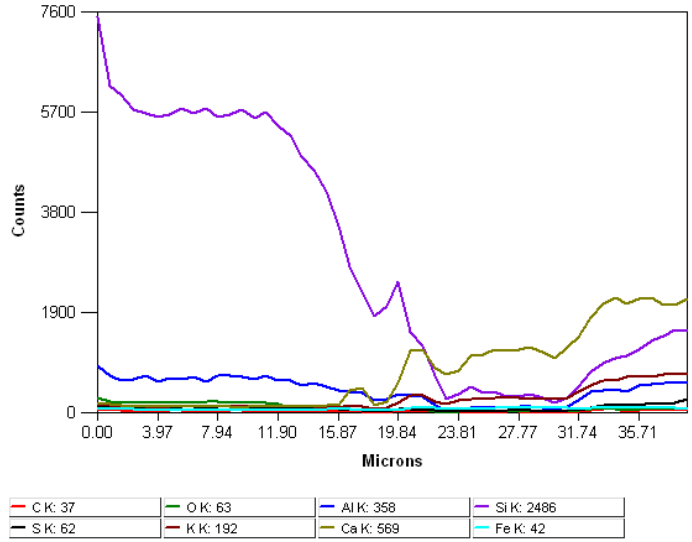
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3-dia2(22)_pt1		40.96		59.04				
A3-dia2(22)_pt2	17.95	30.32	3.87	13.68	0.90	4.25	27.98	1.05

Formula

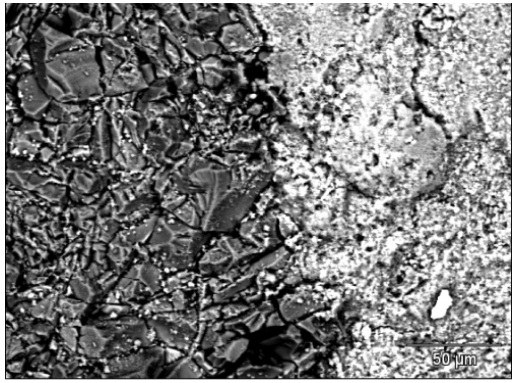
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3-dia2(22)_pt1		O		Si				
A3-dia2(22)_pt2	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe

Compound %

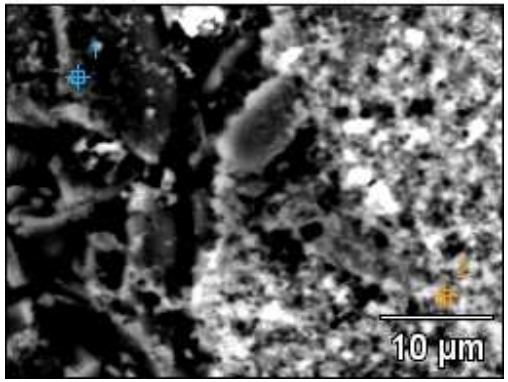
	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe
A3-dia2(22)_pt1		28.33		71.67				
A3-dia2(22)_pt2	8.41	18.92	4.07	14.98	1.13	6.48	43.73	2.28



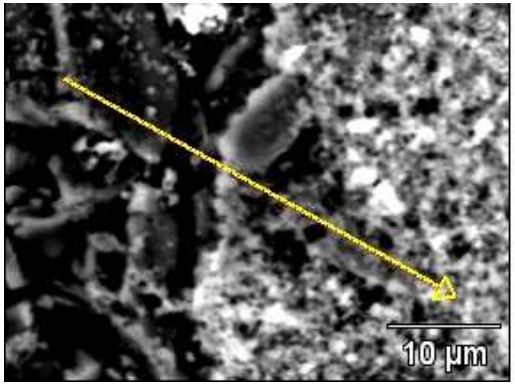
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO –1100°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Te-L
A3- dia2(32)_pt1					439212			9712		
A3- dia2(32)_pt2	1694	3884	1363	11389	95520	1093	18973	169657	2471	0

Weight %

	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Te-L
A3- dia2(32)_pt1					95.29			4.71		
A3- dia2(32)_pt2	12.87	17.90	0.75	2.29	16.56	0.25	4.13	43.92	1.32	0.00

Atom %

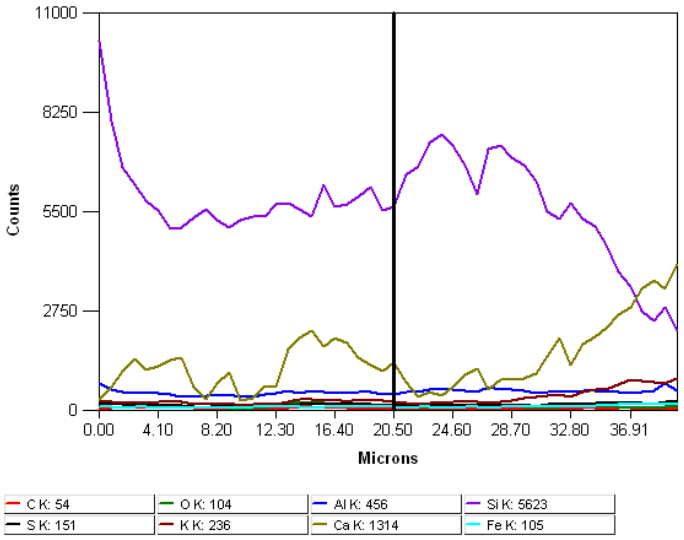
	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Te-L
A3- dia2(32)_pt1					96.65			3.35		
A3- dia2(32)_pt2	25.94	27.09	0.79	2.06	14.27	0.19	2.56	26.53	0.57	0.00

Formula

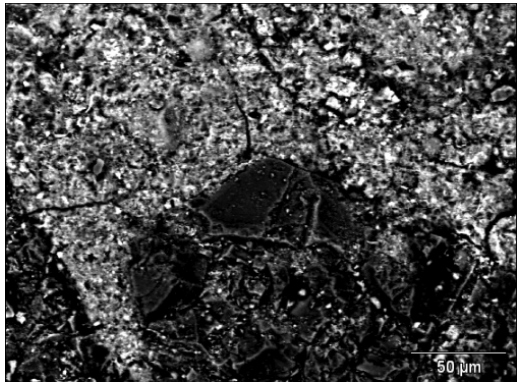
	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Te-L
A3- dia2(32)_pt1					Si			Ca		
A3- dia2(32)_pt2	C	O	Na	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Te

Compound %

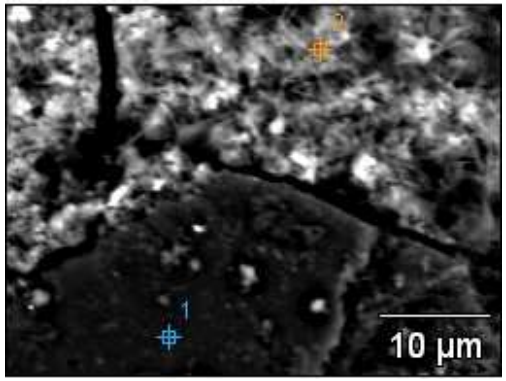
	C	O	Na	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Te
A3- dia2(32)_pt1					95.29			4.71		
A3- dia2(32)_pt2	12.87	17.90	0.75	2.29	16.56	0.25	4.13	43.92	1.32	0.00



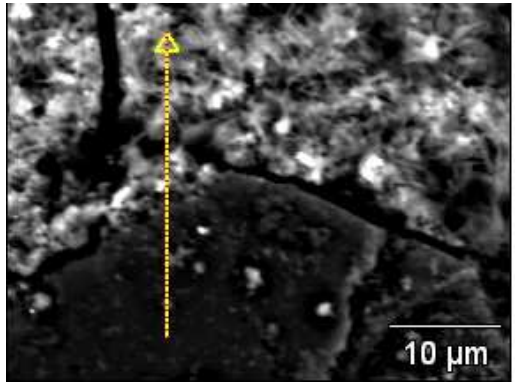
SUBSTITUIÇÃO DE 50% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3-dia2(38)_pt1	10600		556911				601
A3-dia2(38)_pt2	3115	27074	68831	4663	17345	149814	5716

Weight %

	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3-dia2(38)_pt1	22.40		77.30				0.30
A3-dia2(38)_pt2	17.97	7.03	16.14	1.40	4.78	48.86	3.81

Atom %

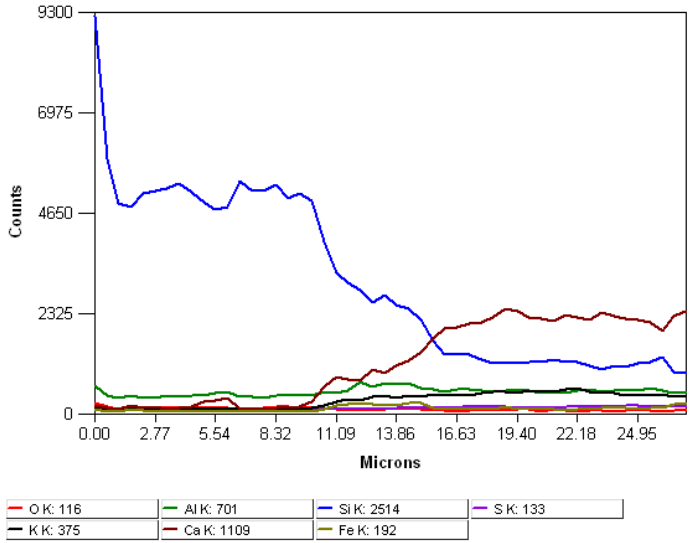
	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3-dia2(38)_pt1	33.67		66.20				0.13
A3-dia2(38)_pt2	32.92	7.64	16.85	1.28	3.59	35.73	2.00

Formula

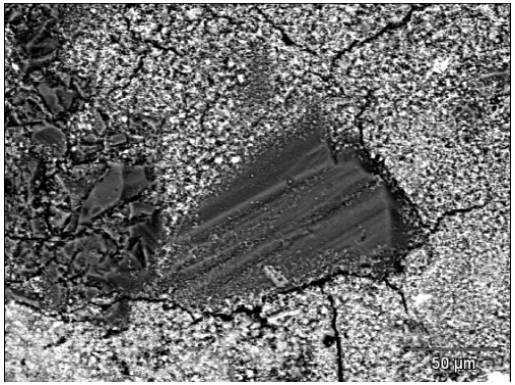
	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
A3-dia2(38)_pt1	O		Si				Fe
A3-dia2(38)_pt2	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe

Compound %

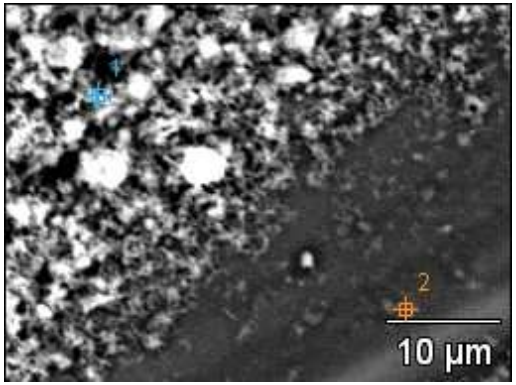
	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe
A3-dia2(38)_pt1	22.40		77.30				0.30
A3-dia2(38)_pt2	17.97	7.03	16.14	1.40	4.78	48.86	3.81



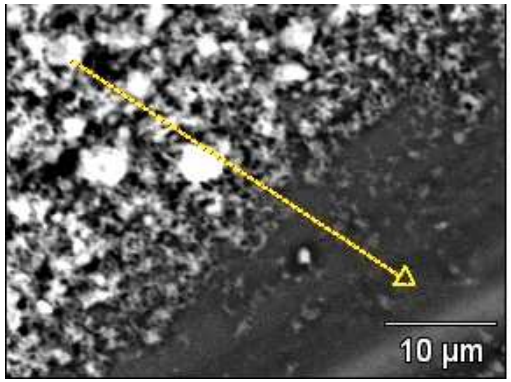
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1B(13)_pt1	2069	1078	12274	73890	89	4149	18785	2534
1B(13)_pt2	1914	2713	5401	108229			766	

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1B(13)_pt1	43.16	8.38	4.71	26.94	0.05	2.26	11.42	3.08
1B(13)_pt2	45.33	16.60	1.89	35.72			0.46	

Atom %

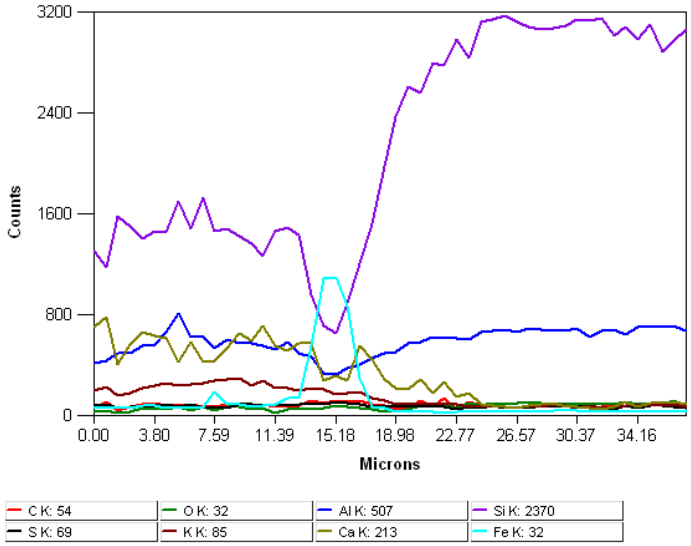
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1B(13)_pt1	63.60	9.27	3.09	16.97	0.03	1.02	5.04	0.98
1B(13)_pt2	61.22	16.83	1.14	20.63			0.18	

Formula

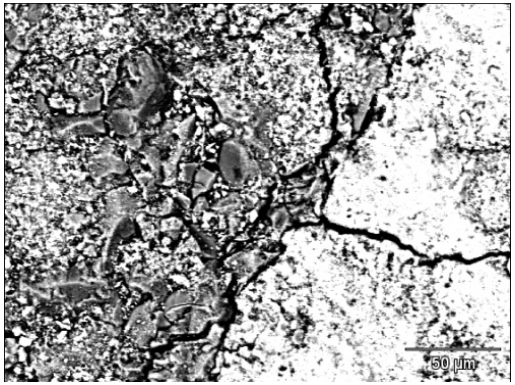
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1B(13)_pt1	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe
1B(13)_pt2	C	O	Al	Si			Ca	

Compound %

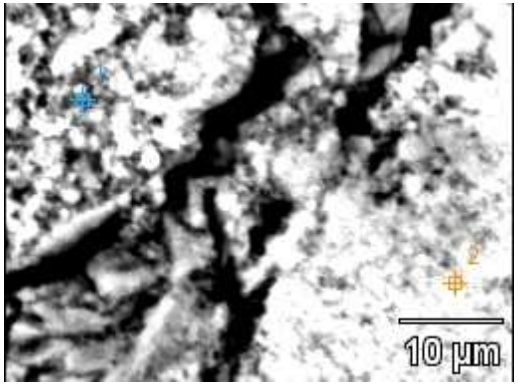
	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe
1B(13)_pt1	43.16	8.38	4.71	26.94	0.05	2.26	11.42	3.08
1B(13)_pt2	45.33	16.60	1.89	35.72			0.46	



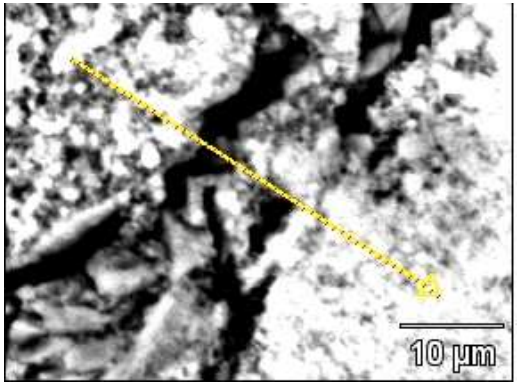
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 700°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1B2(8)_pd	895	2037		9143	93709		2197	18282	1430
1B2(8)_pt2	2217	753	874	2161	18111	1034	796	66839	859

Weight %

	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1B2(8)_pd	26.64	15.42		3.92	37.94		1.39	12.73	1.97
1B2(8)_pt2	29.28	9.87	0.56	1.18	8.54	0.63	0.47	48.15	1.33

Atom %

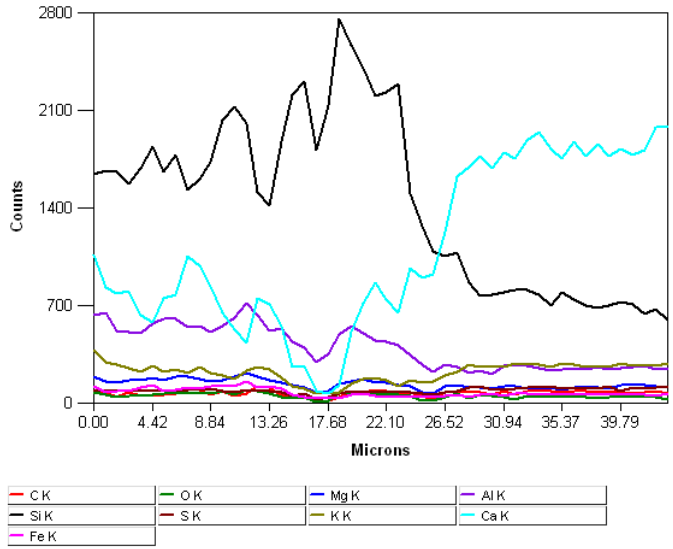
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1B2(8)_pd	43.79	19.02		2.87	26.66		0.70	6.27	0.70
1B2(8)_pt2	52.07	13.18	0.49	0.94	6.49	0.42	0.26	25.66	0.51

Formula

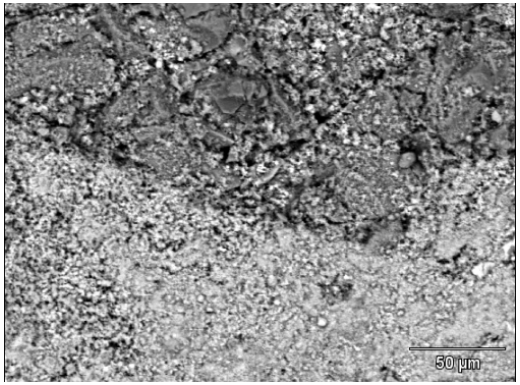
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1B2(8)_pd	C	O		Al	Si		K	Ca	Fe
1B2(8)_pt2	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe

Compound %

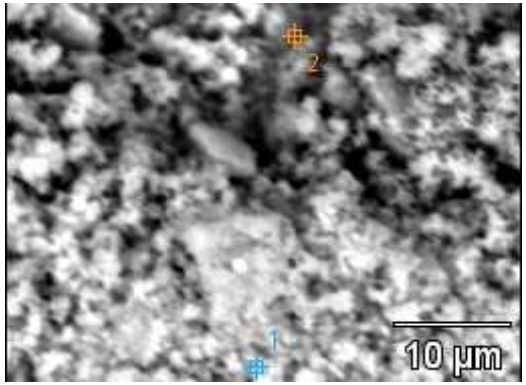
	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
1B2(8)_pd	26.64	15.42		3.92	37.94		1.39	12.73	1.97
1B2(8)_pt2	29.28	9.87	0.56	1.18	8.54	0.63	0.47	48.15	1.33



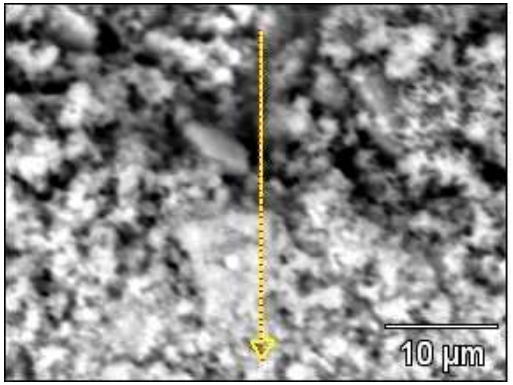
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2B(12)_pt1	1098		3505	26045	2279	168854	1595
2B(12)_pt2	2667	5187	24946	150308	3173	26709	958

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2B(12)_pt1	9.57		1.32	8.28	0.82	78.39	1.63
2B(12)_pt2	34.67	19.16	5.25	30.34	0.97	8.97	0.64

Atom %

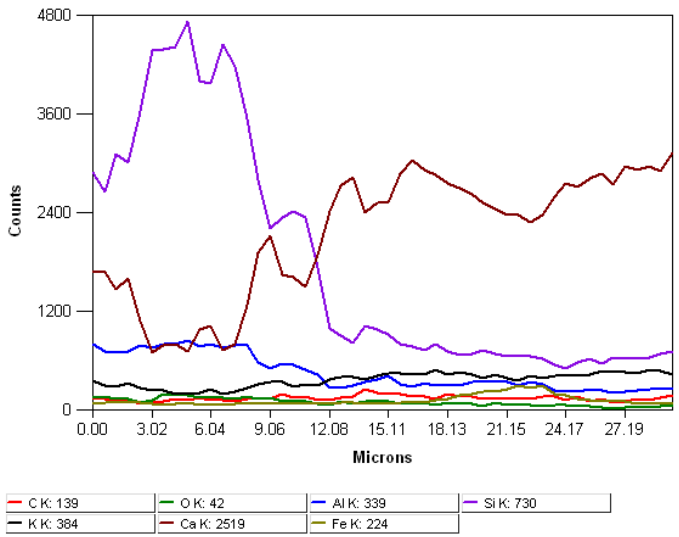
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2B(12)_pt1	25.32		1.55	9.37	0.67	62.17	0.93
2B(12)_pt2	51.37	21.31	3.46	19.23	0.44	3.98	0.20

Formula

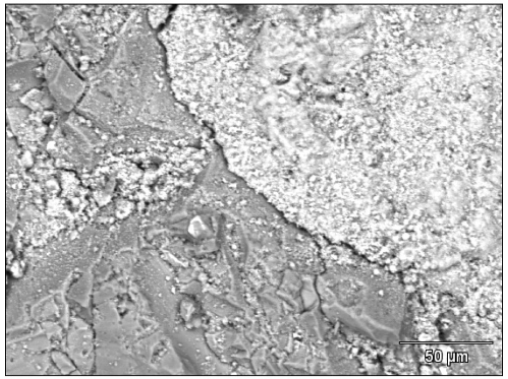
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
2B(12)_pt1	C		Al	Si	K	Ca	Fe
2B(12)_pt2	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe

Compound %

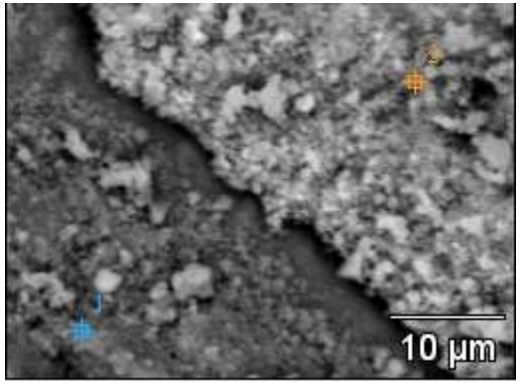
	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
2B(12)_pt1	9.57		1.32	8.28	0.82	78.39	1.63
2B(12)_pt2	34.67	19.16	5.25	30.34	0.97	8.97	0.64



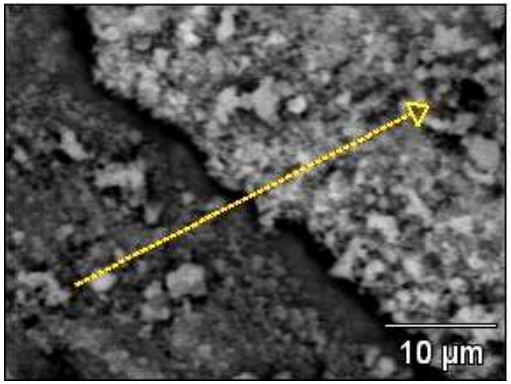
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1B(26)_pt1	2166	2370	14658	130648	1285	21206	481
1B(26)_pt2	2188	1668		82400	1174	46781	

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1B(26)_pt1	39.07	12.64	3.98	33.86	0.52	9.49	0.43
1B(26)_pt2	35.77	13.04		25.77	0.55	24.87	

Atom %

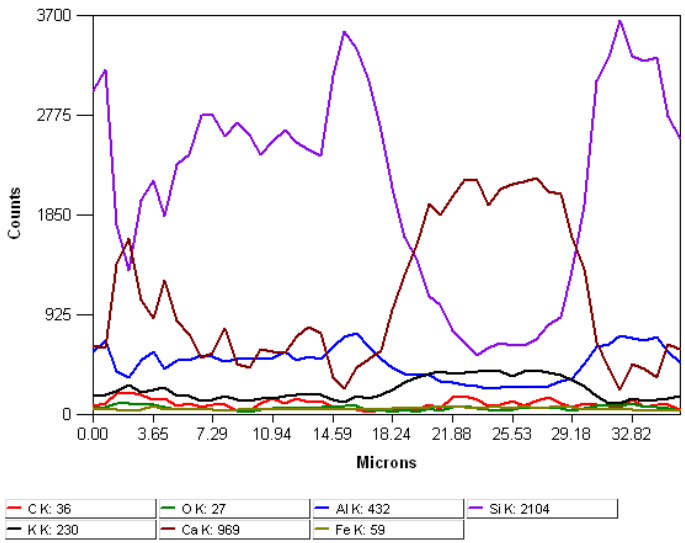
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1B(26)_pt1	57.53	13.98	2.61	21.32	0.24	4.19	0.14
1B(26)_pt2	55.71	15.25		17.16	0.26	11.61	

Formula

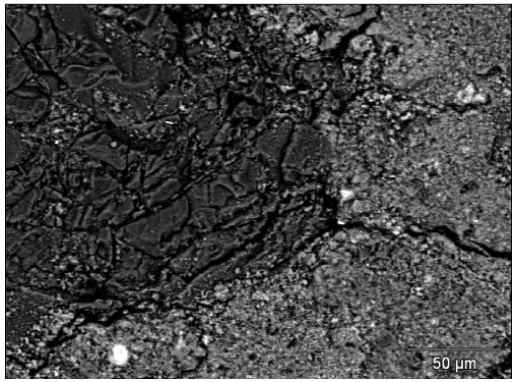
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
1B(26)_pt1	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
1B(26)_pt2	C	O		Si	K	Ca	

Compound %

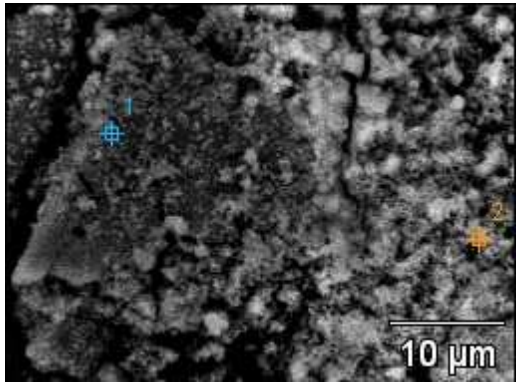
	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
1B(26)_pt1	39.07	12.64	3.98	33.86	0.52	9.49	0.43
1B(26)_pt2	35.77	13.04		25.77	0.55	24.87	



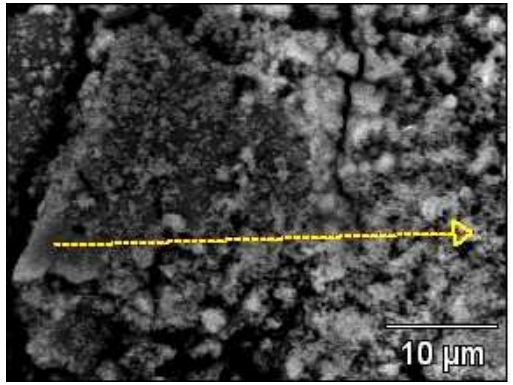
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-3(2)_pt1	444	394	0	28559		982	32
B3-3(2)_pt2	695		377	4069	1136	16517	122

Weight %

	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-3(2)_pt1	47.47	11.75	0.00	38.20		2.43	0.15
B3-3(2)_pt2	37.06		0.87	5.08	2.79	50.39	0.80

Atom %

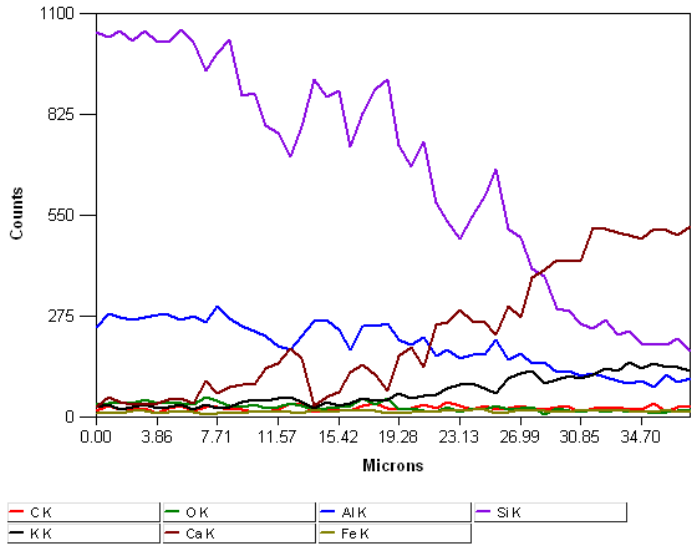
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-3(2)_pt1	64.68	12.02	0.00	22.26		0.99	0.05
B3-3(2)_pt2	64.98		0.68	6.05	1.50	26.48	0.30

Formula

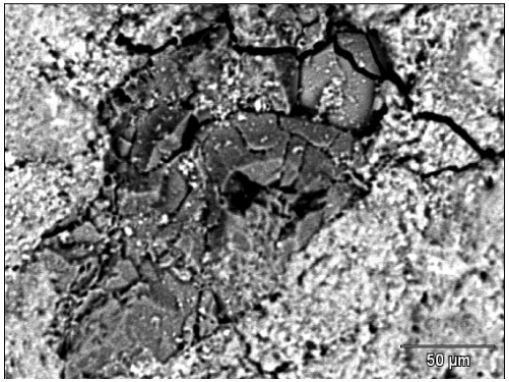
	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-3(2)_pt1	C	O	Al	Si		Ca	Fe
B3-3(2)_pt2	C		Al	Si	K	Ca	Fe

Compound %

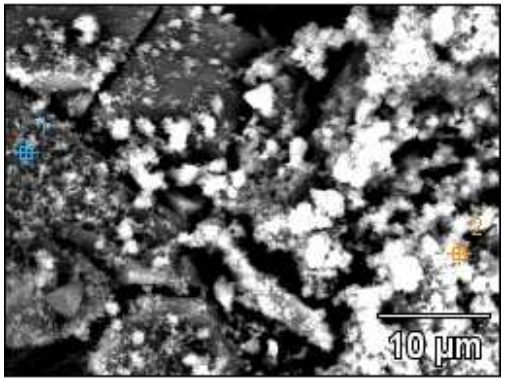
	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe
B3-3(2)_pt1	47.47	11.75	0.00	38.20		2.43	0.15
B3-3(2)_pt2	37.06		0.87	5.08	2.79	50.39	0.80



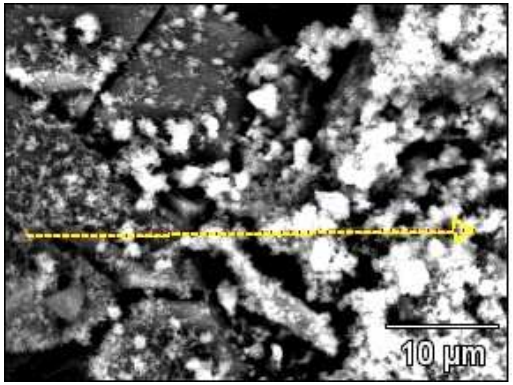
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	O-K	F-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-4(2)_pt1	716		232	0	29284		518	0
B3-4(2)_pt2	1151	158		364	2968	1110	15760	317

Weight %

	C-K	O-K	F-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-4(2)_pt1	62.75		3.42	0.00	32.77		1.06	0.00
B3-4(2)_pt2	45.20	8.41		0.70	4.76	2.15	37.18	1.60

Atom %

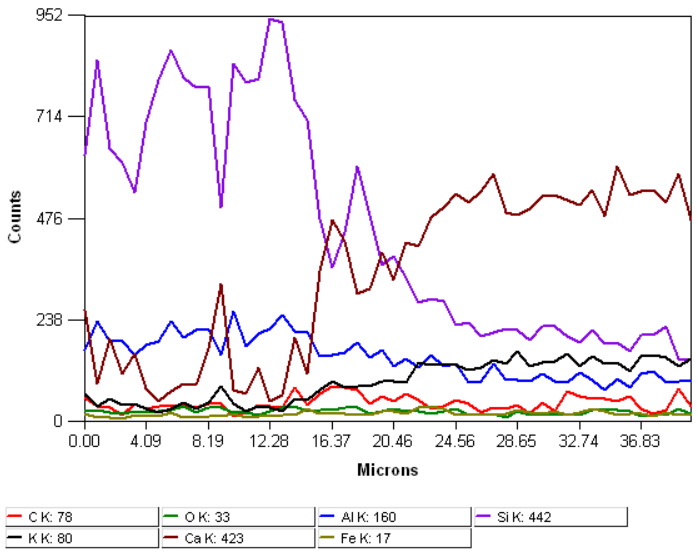
	C-K	O-K	F-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-4(2)_pt1	79.19		2.73	0.00	17.68		0.40	0.00
B3-4(2)_pt2	68.47	9.57		0.47	3.09	1.00	16.88	0.52

Formula

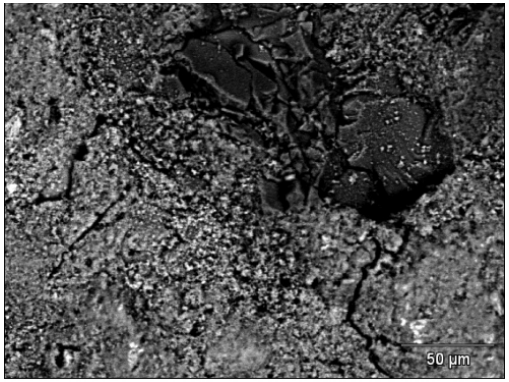
	C-K	O-K	F-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-4(2)_pt1	C		F	Al	Si		Ca	Fe
B3-4(2)_pt2	C	O		Al	Si	K	Ca	Fe

Compound %

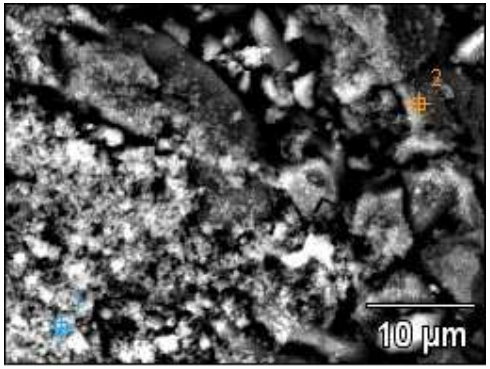
	C	O	F	Al	Si	K	Ca	Fe
B3-4(2)_pt1	62.75		3.42	0.00	32.77		1.06	0.00
B3-4(2)_pt2	45.20	8.41		0.70	4.76	2.15	37.18	1.60



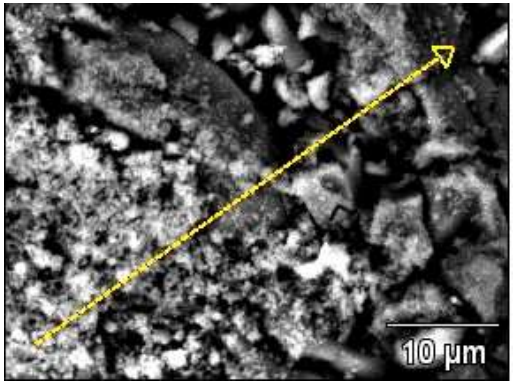
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-S(2)_pt1	864	920	7225	1641	13349	277
B3-S(2)_pt2	1078	0	26065		2232	

Weight %

	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-S(2)_pt1	49.07	1.69	11.53	3.40	32.89	1.43
B3-S(2)_pt2	69.50	0.00	26.42		4.08	

Atom %

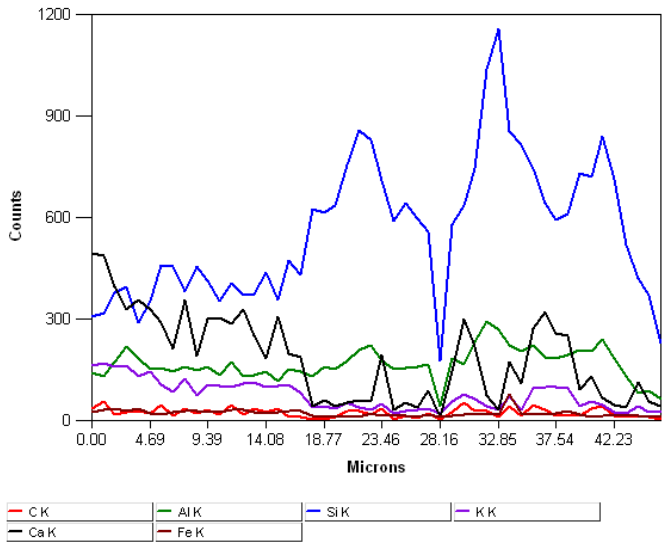
	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-S(2)_pt1	74.40	1.14	7.48	1.58	14.94	0.46
B3-S(2)_pt2	84.73	0.00	15.78		1.49	

Formula

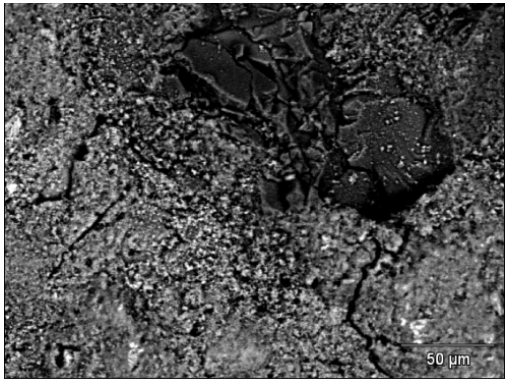
	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-S(2)_pt1	C	Al	Si	K	Ca	Fe
B3-S(2)_pt2	C	Al	Si		Ca	

Composed %

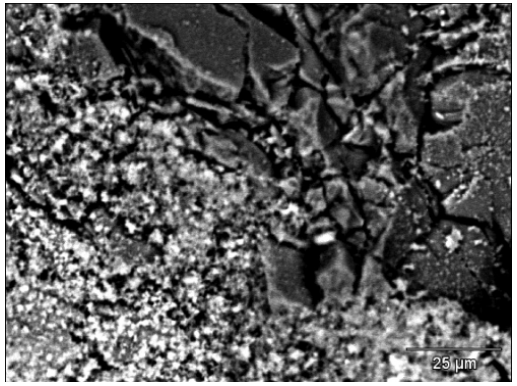
	C	Al	Si	K	Ca	Fe
B3-S(2)_pt1	49.07	1.69	11.53	3.40	32.89	1.43
B3-S(2)_pt2	69.50	0.00	26.42		4.08	



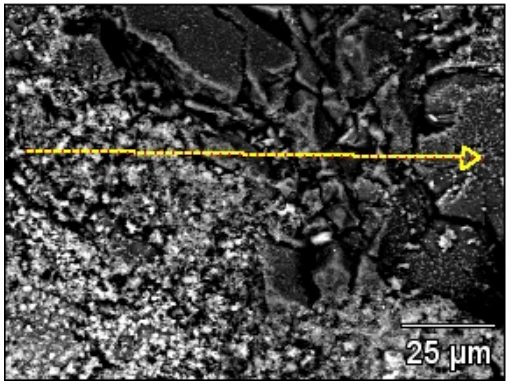
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Zona de transição)



500x



1000x



1000x

Net Counts

	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-S(2)_pt1	864	920	7225	1641	13349	277
B3-S(2)_pt2	1078	0	26065		2232	

Weight %

	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-S(2)_pt1	49.07	1.69	11.53	3.40	32.89	1.43
B3-S(2)_pt2	69.50	0.00	26.42		4.08	

Atom %

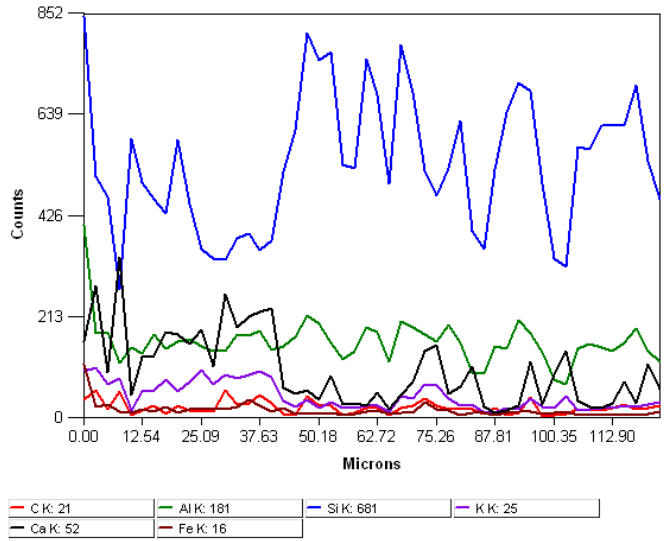
	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-S(2)_pt1	74.40	1.14	7.48	1.58	14.94	0.46
B3-S(2)_pt2	84.73	0.00	13.78		1.49	

Formula

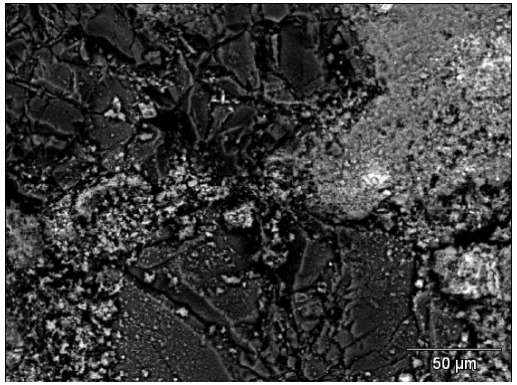
	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B3-S(2)_pt1	C	Al	Si	K	Ca	Fe
B3-S(2)_pt2	C	Al	Si		Ca	

Compound %

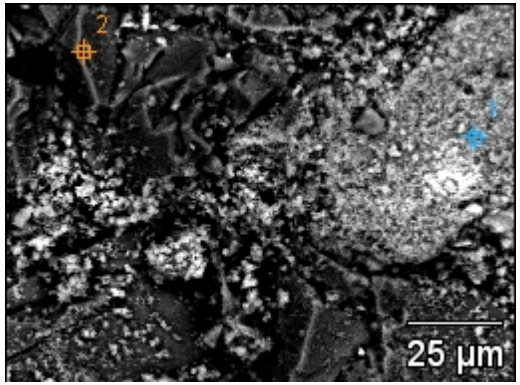
	C	Al	Si	K	Ca	Fe
B3-S(2)_pt1	49.07	1.69	11.53	3.40	32.89	1.43
B3-S(2)_pt2	69.50	0.00	26.42		4.08	



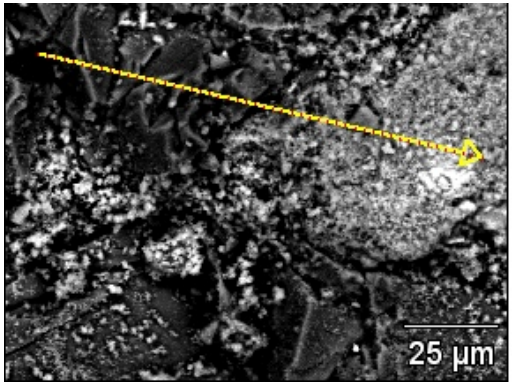
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
B3-6(2)_pt1	836	305	4354	300	1195	19011	149	
B3-6(2)_pt2	46		22317					0

Weight %

	C-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
B3-6(2)_pt1	38.18	0.61	7.40	0.65	2.52	49.81	0.84	
B3-6(2)_pt2	24.37		75.63					0.00

Atom %

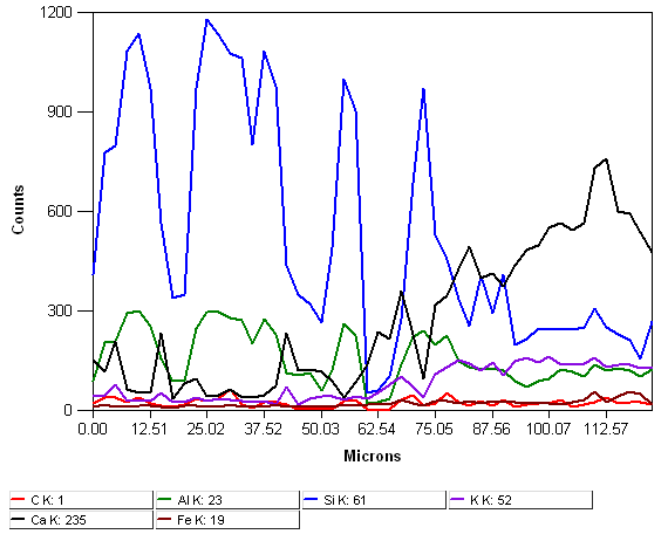
	C-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
B3-6(2)_pt1	66.13	0.47	5.48	0.42	1.34	25.85	0.31	
B3-6(2)_pt2	42.97		57.03					0.00

Formula

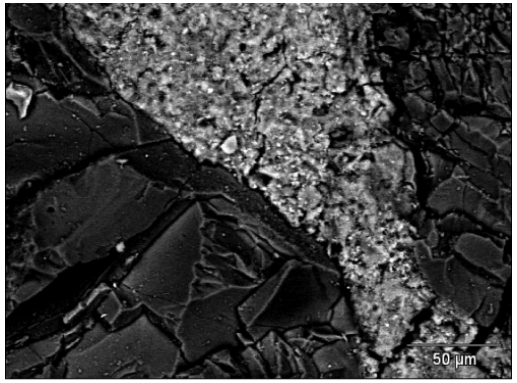
	C-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
B3-6(2)_pt1	C	Al	Si	S	K	Ca	Fe	
B3-6(2)_pt2	C		Si					Se

Compound %

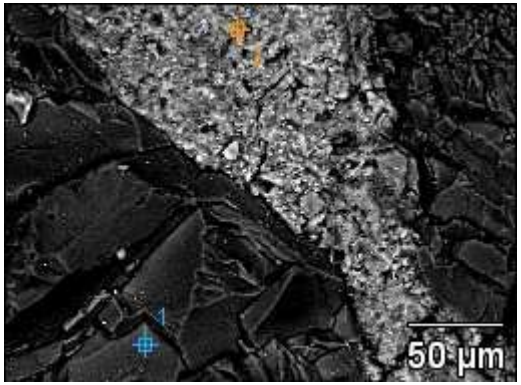
	C	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Se
B3-6(2)_pt1	38.18	0.61	7.40	0.65	2.52	49.81	0.84	
B3-6(2)_pt2	24.37		75.63					0.00



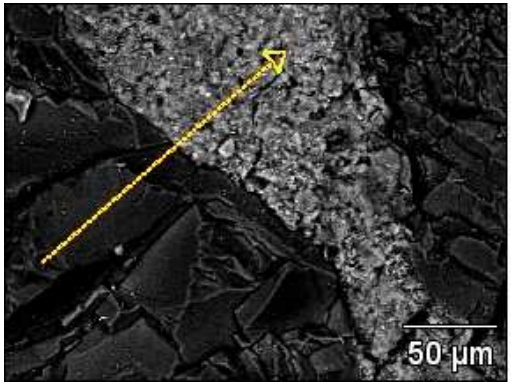
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Zona de transição)



500x



500x



500x

Net Counts

	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	As-K
B2(2)_pt1	425		29760				5
B2(2)_pt2	647	241	5300	605	12918	306	

Weight %

	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	As-K
B2(2)_pt1	56.92		42.95				0.13
B2(2)_pt2	42.57	0.59	11.09	1.63	42.00	2.12	

Atom %

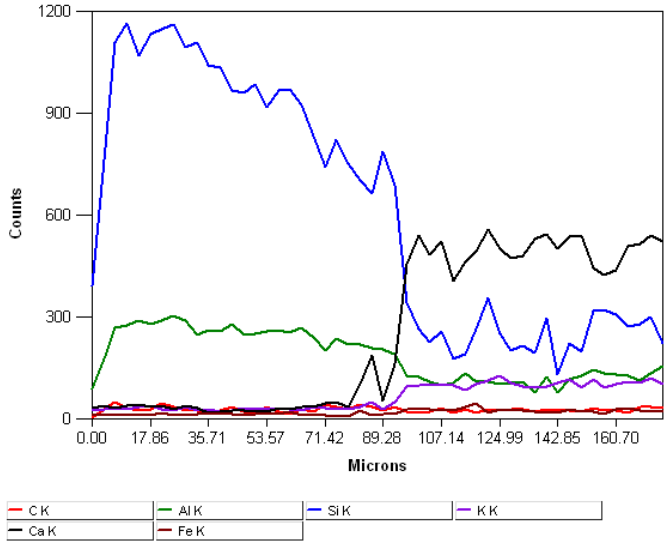
	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	As-K
B2(2)_pt1	75.58		24.39				0.03
B2(2)_pt2	69.65	0.43	7.76	0.82	20.59	0.75	

Formula

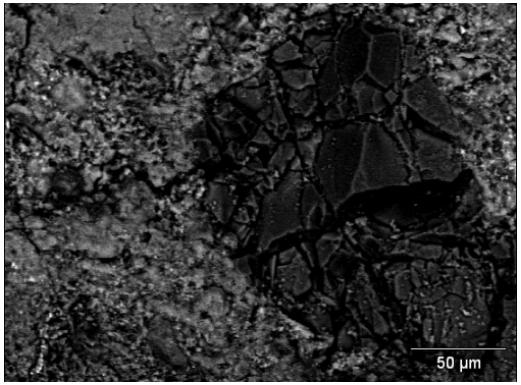
	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	As-K
B2(2)_pt1	C		Si				As
B2(2)_pt2	C	Al	Si	K	Ca	Fe	

Compound %

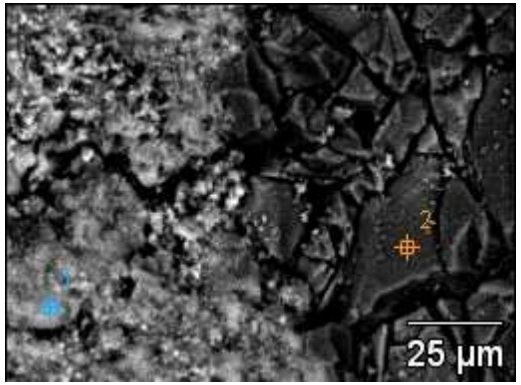
	C	Al	Si	K	Ca	Fe	As
B2(2)_pt1	56.92		42.95				0.13
B2(2)_pt2	42.57	0.59	11.09	1.63	42.00	2.12	



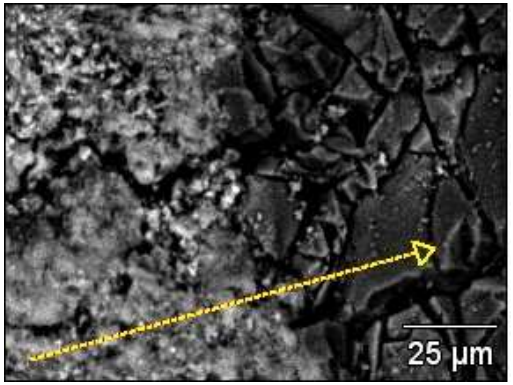
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 1100°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
B2-2(1)_pt1	903	182	10668	351	14521	113	
B2-2(1)_pt2	654		26948		492		0

Weight %

	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
B2-2(1)_pt1	48.54	0.30	15.50	0.70	34.38	0.57	
B2-2(1)_pt2	63.57		35.21		1.22		0.00

Atom %

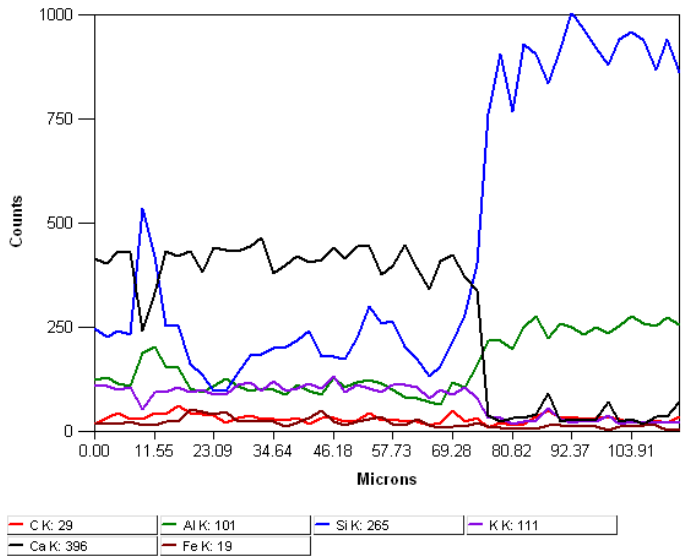
	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
B2-2(1)_pt1	73.61	0.20	10.05	0.33	15.62	0.19	
B2-2(1)_pt2	80.47		19.06		0.46		0.00

Formula

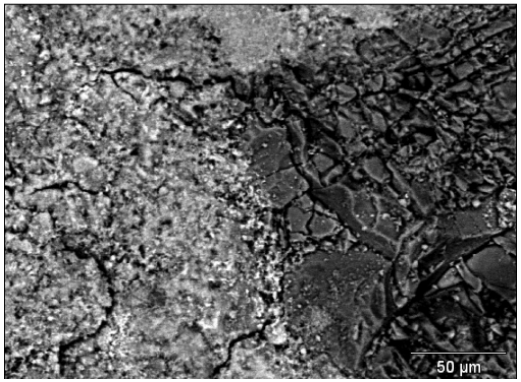
	C-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Se-K
B2-2(1)_pt1	C	Al	Si	K	Ca	Fe	
B2-2(1)_pt2	C		Si		Ca		Se

Compound %

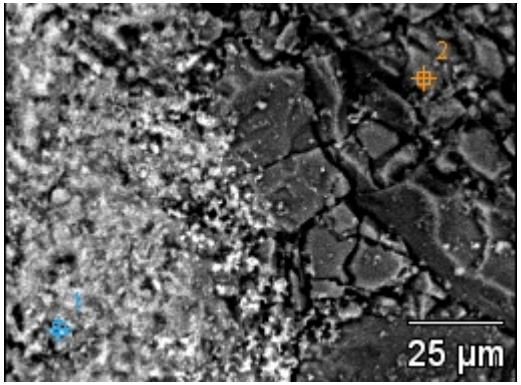
	C	Al	Si	K	Ca	Fe	Se
B2-2(1)_pt1	48.54	0.30	15.50	0.70	34.38	0.57	
B2-2(1)_pt2	63.57		35.21		1.22		0.00



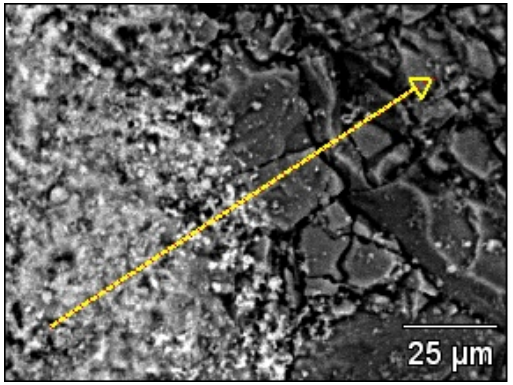
SUBSTITUIÇÃO DE 100% AGREGADO GRAÚDO – 950°C (Zona de transição)



500x



3000x



3000x

Net Counts

	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B2-3(1)_pt1	808	274	1519	4306	416	392	17812	231
B2-3(1)_pt2	313		0	29513				4

Weight %

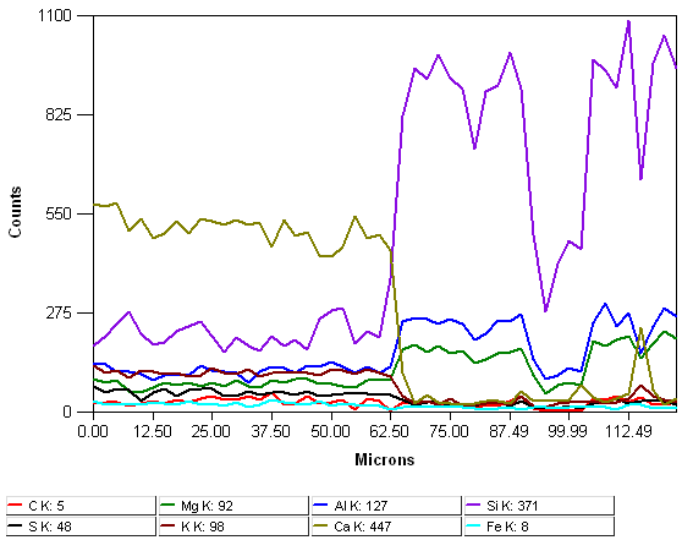
	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B2-3(1)_pt1	40.59	0.61	2.94	7.35	0.90	0.82	45.52	1.27
B2-3(1)_pt2	51.70		0.00	48.28				0.03

Atom %

	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B2-3(1)_pt1	67.82	0.51	2.18	5.25	0.56	0.42	22.80	0.46
B2-3(1)_pt2	71.46		0.00	28.54				0.01

Formula

	C-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Fe-K
B2-3(1)_pt1	C	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
B2-3(1)_pt2	C		Al	Si				Fe

Compound %

	C	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
B2-3(1)_pt1	40.59	0.61	2.94	7.35	0.90	0.82	45.52	1.27
B2-3(1)_pt2	51.70		0.00	48.28				0.03