

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,**  
**METALÚRGICA E MATERIAIS (PPGE3M)**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CASCA CERÂMICA DE**  
**MICROFUSÃO NO CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO GRAÚDO**  
**E MIÚDO NATURAL**

**Marina Tedesco**

**Porto Alegre, 27 de outubro de 2016**

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E MATERIAIS (PPGE3M)**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CASCA CERÂMICA DE  
MICROFUSÃO NO CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO GRAÚDO  
E MIÚDO NATURAL**

**Marina Tedesco**

**Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Rejane Maria Candiota Tubino**

**Banca Examinadora:**

**Claudio Luis Crescente Frankenberg**

**Feliciane Andrade Brehm**

**Luiz Carlos Pinto da Silva Filho**

**Trabalho de Conclusão do Curso de Mestrado em Engenharia como requisito parcial à  
obtenção do título de Mestre em Engenharia**

**Porto Alegre (RS), 27 de outubro de 2016**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Luiz Carlos Pinto da Silva filho

Vice-Diretor: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

Vice-Coordenador: Afonso Reguly

CIP - Catalogação na Publicação

Tedesco, Marina

Estudo da utilização de resíduo de casca cerâmica de microfusão no concreto em substituição ao agregado graúdo e miúdo natural / Marina Tedesco. -- 2016. 114 f.

Orientadora: Rejane Maria Candiota Tubino.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Casca cerâmica. 2. Concreto. 3. Resíduo. 4. Agregado reciclado. I. Tubino, Rejane Maria Candiota, orient. II. Título.

Este Trabalho de Conclusão foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de mestre em ENGENHARIA e aprovado em sua forma final pelos orientadores e pelo coordenador do Doutorado em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Profa. Dra. Rejane Maria Candiota Tubino  
Orientador  
Escola de Engenharia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador  
Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Banca Examinadora

---

**Claudio Luis Crescente Frankenberg**  
**Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Química**

---

**Feliciane Andrade Brehm**  
**Universidade do Vale do Rio dos Sinos**  
**Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil**

---

**Luiz Carlos Pinto da Silva Filho**  
**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Civil**

Dedico aos meus pais, Vania e Gilmar.

“O covarde nunca começa,o fracassado nunca termina,  
O vencedor nunca desiste...”

Norman Vicente Peale

## **AGRADECIMENTOS**

As nossas conquistas são fruto de grande esforço pessoal e colaboração de muitas pessoas. O apoio de todos foi fundamental para realização desta pesquisa e não é possível encerrá-lo sem antes agradecer especialmente a algumas destas pessoas.

A Professora Dra. Rejane Tubino pela orientação, ajuda e compreensão em todos os momentos desta caminhada, sempre pronta a ajudar no que fosse possível.

A Professora Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin por toda a ajuda e apoio ao longo das dificuldades encontradas com o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores Luiz Carlos Pinto da Silva Filho e Luciane Fonseca Caetano pela ajuda e disponibilidade.

Aos colegas Lucas e Michel por terem disponibilizado muito de seu tempo para me ajudar nos testes, à Débora, ao Marcos e Andressa pelo auxílio nas dosagens e rupturas.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da UFRGS pela oportunidade e apoiado no transcorrer do curso.

A empresa MGA pelo incentivo e disponibilidade de horários para poder conciliar o trabalho e o desenvolvimento do Mestrado.

Aos professores Drs. Claudio Luis, Feliciane e Luiz Carlos pela disponibilidade em participar da banca.

Agradeço também as pessoas mais importantes da minha vida, sem as quais eu não teria conseguido. Primeiramente, aos meus pais Vania e Gilmar pelo apoio nos momentos difíceis e pelas comemorações em cada conquista ao longo desta jornada, sendo sempre o melhor abraço para recarregar as energias. Aos meus irmãos Micheli e Natan que me ajudaram com os testes, com troca de ideias e carinho, nunca me deixando desistir. Aproveito também para deixar o meu “muito obrigada” para a minha sogra Dona Luiza que sempre preocupada acompanhou esta caminhada. Ao meu amigo, companheiro e incentivador Vinícius, que deixou toda esta fase mais leve e mais feliz, mesmo quando precisei me afastar para estudar ou viajar, abdicando de suas coisas para viver comigo este sonho.

Obrigada a cada um de vocês que fizeram parte de mais esta conquista. Eu não teria conseguido sem o apoio recebido.

A Deus pela fé, energia, perseverança e por estar presente em todos os momentos da minha vida.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
2.1	O PROCESSO DE MICROFUSÃO.....	3
2.2	A CASCA CERÂMICA.....	5
2.3	A IMPORTÂNCIA DA DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS PARA A INDÚSTRIA .....	7
2.4	INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	8
2.4.1	<i>Uso da casca cerâmica como agregado: Composição granulométrica .....</i>	<i>10</i>
2.4.2	<i>Uso da casca cerâmica como agregado: Forma e textura das partículas.....</i>	<i>11</i>
2.4.3	<i>Uso da casca cerâmica como agregado: Massa específica e massa unitária .....</i>	<i>12</i>
2.4.4	<i>Uso da casca cerâmica como agregado: Absorção de água.....</i>	<i>13</i>
2.4.5	<i>Uso da casca cerâmica como agregado: Resistência à compressão.....</i>	<i>14</i>
2.4.6	<i>Uso da casca cerâmica como agregado: Absorção de água do concreto .....</i>	<i>16</i>
2.4.7	<i>Uso da casca cerâmica como agregado: Carbonatação .....</i>	<i>17</i>
2.4.8	<i>Uso da casca cerâmica como agregado: Dosagem pelo método IPT/EPUSP.....</i>	<i>19</i>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS .....	26
3.1.1	<i>Cimento.....</i>	<i>26</i>
3.1.2	<i>Agregados Naturais – Agregado miúdo.....</i>	<i>26</i>
3.1.3	<i>Agregados Naturais – Agregado graúdo .....</i>	<i>26</i>
3.1.4	<i>Agregados Reciclados - Resíduo de casca cerâmica como agregado graúdo.....</i>	<i>27</i>
3.1.5	<i>Agregados Reciclados – Resíduo de casca cerâmica como agregado miúdo .....</i>	<i>28</i>
3.1.6	<i>Distribuição granulométrica, módulo de finura dos agregados miúdos e dimensão máxima característica dos agregados graúdos .....</i>	<i>31</i>
3.1.7	<i>Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa unitária, índice de forma e absorção de água.....</i>	<i>34</i>
3.1.8	<i>Agregado miúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água</i>	<i>35</i>
3.1.9	<i>Dosagem de concreto pelo método IPT/EPUSP .....</i>	<i>36</i>
3.1.10	<i>Resistência à compressão .....</i>	<i>41</i>
3.1.11	<i>Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto em estado seco .....</i>	<i>42</i>
3.1.12	<i>Carbonatação.....</i>	<i>43</i>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>45</b>



4.1	ESTUDO GRANULOMÉTRICO DOS AGREGADOS .....	45
4.1.1	<i>Agregado miúdo natural e reciclado – Areia e casca cerâmica .....</i>	45
4.1.2	<i>Agregado graúdo natural e reciclado – Brita 0 e casca cerâmica.....</i>	47
4.1.3	<i>Caracterização química da casca cerâmica .....</i>	50
4.2	CONCRETO PRODUZIDO PELO MÉTODO IPT EPUSP DE DOSAGEM .....	50
4.2.1	<i>Concreto em estado fresco – Massa específica aparente, relação a/c e consumo de cimento .....</i>	51
4.2.2	<i>Resistência à compressão .....</i>	55
4.2.3	<i>Concreto em estado endurecido – Absorção de água, índice de vazios e massa específica real e massa específica da amostra seca .....</i>	60
4.2.4	<i>Concreto em estado endurecido – Carbonatação.....</i>	65
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>68</b>
<b>6</b>	<b>ESTUDOS FUTUROS .....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>79</b>
	ANEXO 1 – LAUDO DE CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO.....	80
	ANEXO 2 – RELATÓRIO DE ENSAIOS DO CIMENTO CPV-ARI .....	83
	ANEXO 3 – RELATÓRIO DE ENSAIOS DA BRITA 0 .....	84
	ANEXO 4 – ÍNDICE DE FORMA DOS AGREGADOS GRAÚDOS .....	85
	ANEXO 5 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	92
	ANEXO 6 – CÁLCULOS ESTATÍSTICOS.....	94
	ANEXO 7 – ANÁLISE FRX .....	100

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- ETAPAS DO PROCESSO DE MICROFUSÃO (FONTE: BIDWELL, 1997). .....	4
FIGURA 2 – ORDEM DE PRIORIDADE PARA A DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS (FONTE: MME, 2012). .....	7
FIGURA 3 – MODELO DE COMPORTAMENTO DO DIAGRAMA DE DOSAGEM (FONTE: HELENE, 1993). .....	21
FIGURA 4 – SÍMBOLOS INSERIDOS CONFORME O TEOR DE RESÍDUO INCORPORADO (FONTE: AUTOR). .....	23
FIGURA 5 – TESTES REALIZADOS E SUAS NORMAS DE REFERÊNCIA (FONTE: AUTOR). .....	24
FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DE TESTES E DAS ETAPAS REALIZADAS AO LONGO DO ESTUDO, COM SEUS MAIORES DETALHES (FONTE: AUTOR). .....	25
FIGURA 7 - METAIS PRESENTES NO RESÍDUO DE CASCA CERÂMICA (FONTE: AUTOR). .....	27
FIGURA 8 - BRITADOR DE MANDÍBULAS (FONTE: AUTOR). .....	28
FIGURA 9 – IMAGEM COMPARATIVA DO RESÍDUO (A) E DO AGREGADO GRAÚDO NATURAL (B) (FONTE: AUTOR). .....	28
FIGURA 10 - À ESQUERDA UMA VISÃO TOTAL DO MOINHO DE ROLOS E À DIREITA, UMA VISÃO DOS ROLOS DA MOAGEM (FONTE: AUTOR). .....	29
FIGURA 11 – (A) AGITADOR DE PENEIRAS COM O CONJUNTO DE PENEIRAS UTILIZADO. (B) VISÃO GERAL DO LABORATÓRIO LAPROM, SENDO VISUALIZADO O MOINHO DE ROLOS, O BRITADOR DE MANDÍBULAS E O CONJUNTO DE PENEIRAS COM O AGITADOR (FONTE: AUTOR). .....	30
FIGURA 12 - IMAGEM COMPARATIVA DO RESÍDUO (A) E DO AGREGADO MIÚDO NATURAL (B) (FONTE: AUTOR). .....	30
FIGURA 13 – CONJUNTO DE AGITADOR E PENEIRAS UTILIZADO NO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA (FONTE: AUTOR). .....	32
FIGURA 14 - DIMENSÕES DO GRÃO (FONTE: ITAMBÉ, 2011). .....	35
FIGURA 15–(A) BETONEIRA HORIZONTAL UTILIZADA NO ENSAIO; (B) MATERIAIS MISTURADOS NA BETONEIRA NO INÍCIO DO PROCESSO DE DOSAGEM; (C) CONCRETO COM TEOR IDEAL DE ARGAMASSA (FONTE: AUTOR). .....	37
FIGURA 16 – (A) APARÊNCIA DA MISTURA COM SUPERFÍCIE ÁSPERA PELA FALTA DE ARGAMASSA; (B) SUPERFÍCIE COM O TEOR IDEAL DE ARGAMASSA, APÓS NIVELAMENTO A SUPERFÍCIE ESTÁ COMPACTA, SEM VAZIOS; (C) SUPERFÍCIE EXPOSTA COM VAZIOS, INDICANDO A FALTA DE ARGAMASSA; (D) CONCRETO INDICANDO O TEOR DE ARGAMASSA IDEAL (FONTE: HELENE, 1993)...	38
FIGURA 17 – ETAPAS DO TESTE DE SLUMP (FONTE: ABESC, 2016). .....	39
FIGURA 18 – CORPOS DE PROVA APÓS ADENSAMENTO NA MESA VIBRATÓRIA PARA A DOSAGEM DO CONCRETO SEM ADIÇÃO DE RESÍDUO (FONTE: AUTOR). .....	40
FIGURA 19 – DIAGRAMA DE DOSAGEM, MÉTODO IPT/EPUSP, MODELO DE COMPORTAMENTO (FONTE: HELENE, 1993). .....	41
FIGURA 20 – EQUIPAMENTO UTILIZADO NA RUPTURA DOS CORPOS DE PROVA (FONTE: AUTOR). .....	42
FIGURA 21 – PONTO DE VIRAGEM DA FENOLFTALEÍNA (FONTE: CASTRO, 2003). .....	44
FIGURA 22 - IMPERMEABILIZAÇÃO DAS EXTREMIDADES DOS CORPOS DE PROVA PARA CARBONATAÇÃO (FONTE: AUTOR). .....	44
FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA COMPARATIVA DOS AGREGADOS MIÚDOS – AREIA E CASCA CERÂMICA (FONTE: AUTOR). .....	47

FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA COMPARATIVA DOS AGREGADOS GRAÚDOS – BRITA 0 E CASCA CERÂMICA (FONTE: AUTOR). .....	49
FIGURA 25 - CURVA DE DOSAGEM PARA O CC (FONTE: O AUTOR). .....	51
FIGURA 26 - MASSA ESPECÍFICA PARA O CONCRETO EM ESTADO FRESCO (FONTE: AUTOR). .....	52
FIGURA 27 - RELAÇÃO A/C PARA OS DIFERENTES CONCRETOS DOSADOS (FONTE: AUTOR). .....	52
FIGURA 28 - CONSUMO DE CIMENTO PARA OS DIFERENTES CONCRETOS DOSADOS (FONTE: AUTOR). .....	54
FIGURA 29 - CONSUMO DE CIMENTO PARA AS DOSAGENS, PARA UM CONCRETO DE 28 DIAS E 25 MPA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (FONTE: AUTOR). .....	55
FIGURA 30 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL PARA AS DOSAGENS E SEUS TRAÇOS AOS 7, 14 E 28 DIAS (FONTE: AUTOR). .....	56
FIGURA 31 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS PARA AS DOSAGENS COM RELAÇÃO A “M” (FONTE: AUTOR). .....	57
FIGURA 32 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS CORRELACIONADA A RELAÇÃO A/C (FONTE: AUTOR). .....	58
FIGURA 33 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS CORRELACIONADA AO CONSUMO DE CIMENTO (FONTE: AUTOR). .....	59
FIGURA 34 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS COMPARADO COM O PERCENTUAL DE ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA OS TRAÇOS POBRE, INTERMEDIÁRIO E RICO (FONTE: AUTOR). .....	60
FIGURA 35 – ABSORÇÃO DE ÁGUA AO LONGO DO TEMPO PARA O TRAÇO INTERMEDIÁRIO (1:5) DE CADA DOSAGEM (FONTE: AUTOR). .....	62
FIGURA 36 – ABSORÇÃO DE ÁGUA VERSUS RELAÇÃO AGREGADOS SECOS/CIMENTO EM MASSA (M), PARA OS TRAÇOS RICO, INTERMEDIÁRIO E POBRE, DE TODAS AS DOSAGENS (FONTE: AUTOR). .....	62
FIGURA 37 – ABSORÇÃO E RELAÇÃO A/C PARA OS TRAÇOS RICO, INTERMEDIÁRIO E POBRE PARA CADA DOSAGEM (FONTE: AUTOR). ..	63
FIGURA 38 – ÍNDICE DE VAZIOS COMPARADO À RELAÇÃO AGREGADOS SECOS/CIMENTO EM MASSA (M), PARA OS TRAÇOS RICO, INTERMEDIÁRIO E POBRE (FONTE: AUTOR). .....	64
FIGURA 39 – MASSA ESPECÍFICA REAL E MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA VERSUS RELAÇÃO AGREGADOS SECOS/CIMENTO EM MASSA (M), PARA OS TRAÇOS RICO, INTERMEDIÁRIO E POBRE (FONTE: AUTOR). .....	65
FIGURA 40 – (A) E (B) CC AOS 60 E 90 DIAS, RESPECTIVAMENTE; (C) E (D) 50M; (E) E (F) 50M25G; (G) E (H) 50M50G; (I) E (J) 50M75G; (K) E (L) 50M100G (FONTE: AUTOR). .....	66

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1– PENEIRAS DAS SÉRIES NORMAL E INTERMEDIÁRIA UTILIZADA NA SELEÇÃO DOS AGREGADOS (FONTE: NM 248, 2001). ..	31
TABELA 2– LIMITES DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO (FONTE: NBR 7211, 2009) .....	32
TABELA 3 - LIMITES DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO (FONTE: NBR 7211, 2009). .....	33
TABELA 4 - PROPRIEDADES DO AGREGADO MIÚDO – AREIA E CASCA CERÂMICA (FONTE: AUTOR). .....	45
TABELA 5 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO – AREIA E CASCA CERÂMICA (FONTE: AUTOR). .....	46
TABELA 6 - PROPRIEDADES DO AGREGADO GRAÚDO – BRITA 0 E CASCA CERÂMICA (FONTE: AUTOR). .....	48
TABELA 7– DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO – BRITA 0 E CASCA CERÂMICA (FONTE: AUTOR).....	48
TABELA 8 – DADOS DA ABSORÇÃO AO LONGO DO TEMPO PARA O TRAÇO INTERMEDIÁRIO (1:5) DE CADA DOSAGEM (FONTE: AUTOR). .....	61
TABELA 9 – CARBONATAÇÃO DOS TRAÇOS 1:5 AOS 60 E 90 DIAS DE IDADE (FONTE: AUTOR). .....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a: relação agregado miúdo seco / cimento em massa, em kg/kg;

Ag: quantidade de água utilizada na dosagem, em kg.

a/c: relação água/cimento em massa, em kg/kg;

C: consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto adensado em kg/m<sup>3</sup>;

Ca: consumo de água por m<sup>3</sup> de concreto adensado em kg/m<sup>3</sup>.

CC: concreto convencional

Cp: corpo de prova

DMC: dimensão máxima característica, mm

f<sub>cj</sub>: resistência à compressão axial, à idade j, em MPa;

k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub>, k<sub>4</sub>, k<sub>5</sub> e k<sub>6</sub>: constantes que dependem dos materiais (cimento, agregados miúdos, graúdos e aditivos).

m: relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg;

p: relação agregados graúdos secos/cimento em massa, em kg/kg;

RCD: resíduos de construção e demolição

α: teor de argamassa seca, em kg/kg;

γ: massa específica do concreto, medida no local da dosagem em kg/m<sup>3</sup>;

50M: 50% de resíduo como agregado miúdo

50M25R: 50M mais 25% de resíduo como agregado graúdo

50M50R: 50M mais 50% de resíduo como agregado graúdo

50M75R: 50M mais 75% de resíduo como agregado graúdo

50M100R: 50M mais 100% de resíduo como agregado graúdo

## RESUMO

O Brasil destaca-se como o sétimo produtor mundial de fundidos, com mais de 30 empresas de microfusão localizadas nas regiões Sul e Sudeste do país e um dos grandes desafios é a gestão dos resíduos, entre eles, a casca cerâmica. Para a mitigação dos seus impactos é necessário o uso de técnicas de reciclagem que combinem desenvolvimento técnico com proteção ao meio ambiente e utilize a construção civil, mais especificamente o concreto, como fonte de incorporação do resíduo de casca cerâmica. Para isso, foi estudado o resíduo como agregado graúdo e miúdo em comparação com a areia e a brita 0. A massa específica do agregado seco e a massa unitária dos agregados foram avaliadas, sendo que o resíduo apresentou uma pequena redução para ambos os casos. A absorção de água foi maior para o agregado reciclado. O agregado miúdo reciclado apresentou resultados maiores para o módulo de finura e a massa específica. O índice de forma do agregado graúdo reciclado apresentou melhores resultados do agregado natural. Para avaliação do comportamento do resíduo no concreto foi utilizado o método de dosagem do IPT EPUSP. A relação água/cimento aumentou com a incorporação do resíduo. Ainda, houve redução do consumo de cimento com o resíduo incorporado. As adições com até 75% de substituição do agregado graúdo apresentaram maior resistência à compressão axial comparado ao concreto convencional e, quanto maior a relação a/c menor a resistência à compressão obtida. Para o concreto em estado endurecido a absorção de água aumentou com a adição de resíduo. O índice de vazios do concreto aumenta com a incorporação de resíduo na mistura. A incorporação de resíduo aumenta a massa específica real e da amostra seca das dosagens até a substituição de 50% do agregado graúdo e após esta, tem-se uma pequena redução nestes parâmetros. A espessura carbonatada aumentou com a idade e as dosagens até 50% de adição do agregado graúdo apresentaram valores menores do que o concreto convencional.

Palavras-chave: Casca cerâmica, concreto, resíduo, agregado reciclado.

## ABSTRACT

Brazil stands out as the seventh world-wide producer of castings, with more than 30 microfusion companies located in the South and Southeast regions of the country and one of the great challenges is waste management, among them the ceramic shell. To mitigate its impacts, it is necessary to use recycling techniques that combine technical development with protection of the environment and use civil construction, specifically concrete, as a source of incorporation of the residue of ceramic shell. For this, the residue was studied as a large aggregate and small compared to sand and gravel 0. The specific mass of the dry aggregate and the unit mass of the aggregates were evaluated, and the residue presented a small reduction for both cases. The water absorption was higher for the recycled aggregate. The recycled kid aggregate presented higher results for the modulus of fineness and the specific mass. The shape index of the recycled aggregate presented better results from the natural aggregate. To evaluate the behavior of the residue in the concrete, the IPT EPUSP dosing method was used. The water / cement ratio increased with the incorporation of the residue. Also, there was a reduction of the cement consumption with the incorporated residue. Additions with up to 75% of the large aggregate substitution showed greater resistance to axial compression compared to conventional concrete, and the higher the a / c ratio the lower the compressive strength obtained. For concrete in the hardened state the water absorption increased with the addition of residue. The void content of the concrete increases with the incorporation of residue into the mixture. Residue incorporation increases the actual specific mass and the dry sample of the dosages up to the replacement of 50% of the large aggregate and after this, a small reduction in these parameters is observed. The carbonate thickness increased with age and the dosages up to 50% addition of the coarse aggregate presented lower values than the conventional concrete.

Key words: Ceramic bark, concrete, waste, recycled aggregate.

# 1 INTRODUÇÃO

O ramo de microfusão vem ganhando destaque nos últimos anos no mercado nacional, e, sobretudo, internacional. De acordo com Machado (2005), o Brasil destaca-se como o sétimo produtor mundial, com mais de 30 empresas de microfusão de pequeno, médio e grande porte, localizadas nas regiões Sul e Sudeste do país.

Os tacos de golfe, algumas fôrmas para doces, os implantes cirúrgicos metálicos, algumas próteses dentárias metálicas, as joias e as palhetas de turbina para motor a jato apresentam em comum o processo de produção, que é a fundição por cera perdida, às vezes denominada microfusão ou fundição de precisão. Este processo oferece diversas vantagens como precisão dimensional, excelente acabamento superficial, obtenção de formatos simples a complexos e aplicação para diferentes tipos de liga, possibilitando assim fornecer peças para mercados com exigências múltiplas como, por exemplo, as indústrias automobilísticas, aeronáutica, têxtil, alimentícia, agrícola, petroquímica, médica, odontológica e de esportes (MACHADO, 2005).

Ainda segundo Machado (2005), um dos grandes desafios das microfusões é obter cascas cerâmicas com resistência mecânica suficiente para suportar a deceragem, manuseio e entrada do metal e ao mesmo tempo com permeabilidade que possibilite a saída dos gases durante o vazamento do metal, reduzindo também o custo sem afetar a qualidade final do produto e o meio ambiente. Após o processo estar completo, a casca cerâmica formada e depois descartada torna-se um resíduo com grande potencial de reciclagem, porém, sem muitos estudos para a aplicação efetiva.

Assim como as microfusões, a maioria dos processos de fabricação de um produto gera resíduos. Quando não se dispõem de uma tecnologia para o seu reaproveitamento, certamente este material será depositado na natureza e poderá ocasionar inúmeros problemas ambientais (GONÇALVES, 2001).

Essa tendência mundial gerou um novo perfil de consumidor que, mais consciente e preocupado com a questão ambiental, agrega valor de estima aos produtos ecologicamente corretos tornando esse um dos fatores de influência na competitividade entre as empresas (FAGUNDES, 2009).

Inserida neste contexto encontra-se a indústria da construção civil, que é certamente a maior consumidora de recursos naturais de qualquer economia e grande geradora



de resíduos. Para a mitigação dos seus impactos é necessário o desenvolvimento de técnicas de reciclagem que combinem desenvolvimento técnico com proteção ao meio ambiente (GONÇALVES, 2011) e utilize a construção civil, mais especificamente o concreto, como fonte de incorporação do resíduo de casca cerâmica.

### **1.1. Objetivo Geral**

Avaliar a viabilidade de incorporação do resíduo como substituto total ou parcial do agregado natural para produção de concretos convencionais.

### **1.2 Objetivos específicos**

a) Avaliar algumas propriedades dos agregados produzidos a partir do resíduo de casca cerâmica, comparando os resultados obtidos entre os agregados naturais e as duas frações (graúdo e miúdo) oriundos da casca cerâmica (granulometria, massa específica, taxa de absorção, entre outras);

b) Através do método IPT EPUSP de dosagem de concreto desenvolver cinco percentuais de substituição do agregado graúdo e uma do agregado miúdo e posteriormente, a comparação entre os resultados obtidos em contraponto ao concreto convencional.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

A situação econômica moderna é concebida, de acordo com Farra e Esperancini (2005), por uma conjuntura bem diferenciada das circunstâncias anteriores à revolução industrial, a qual estimula uma imensa produção de resíduos industriais.

Na origem da sociedade industrial, o desenvolvimento econômico tem significado a transformação da natureza de maneira a melhorar a qualidade de vida de parcela da população. Dentro desta sociedade a função da construção civil é a transformação do ambiente natural no ambiente construído, adequado ao desenvolvimento das mais diversas atividades. Neste contexto, segundo John (2000), a visão da defesa do ambiente é vista como antidesenvolvimentista.

Considerando a grande produção de resíduos no mundo moderno, devido ao crescimento populacional, industrialização e má utilização dos recursos naturais e, conseqüentemente, analisando a possível diminuição da qualidade de vida decorrente às inúmeras doenças que a disposição final desses recursos pode ocasionar às pessoas que tenham contato direto ou indireto, torna-se imprescindível a preservação ambiental. Ou seja, desenvolvimento de processos produtivos a fim de buscar uma melhor qualidade de vida, quando não for possível a redução dos resíduos nos processos, deve-se utilizar de tecnologias já existentes, para que os recursos naturais sejam aproveitados de forma econômica e menos devastadora (TEIXEIRA, 2005).

Essa melhora na qualidade de vida será gerada devido à queda na quantidade de resíduos depositados no meio ambiente, além do mais, com a utilização dessas sobras para geração de energia ou até mesmo como matéria-prima para a produção de produtos industriais trará redução de custos e até mesmo geração de capital para as empresas que o utilizarem (SAVASTANO Jr, 2000).

### **2.1 O Processo de Microfusão**

A indústria de fundição brasileira é a 7ª produtora mundial de fundidos, com um mercado de 11 bilhões de dólares e tem como principal cliente a indústria automotiva, a qual responde por 67% das vendas do setor, sendo que 95% das empresas são de pequeno e médio porte (MME, 2009). O setor de fundição caracteriza-se como uma importante indústria

primária que fornece componentes para diversas outras, tais como, automotivas, bens de capital e siderúrgicas. No Brasil, o setor produziu no ano de 2014 cerca de 2,737 milhões de toneladas (ABIFA, 2015).

O ramo das indústrias de fundição contribui substancialmente no desenvolvimento industrial e da economia de um país, com sua variada gama de métodos e produtos gerados que atende a todos os setores técnicos. Historicamente, o setor gera uma grande quantidade de resíduos sólidos, muitos considerados por entidades reguladoras como perigosos. Portanto, saber dispor de forma racional esses resíduos é o grande desafio atual dessas empresas (MERCALI, 2009).

Entre os processos de fundição para a fabricação de peças, destaca-se o de microfundição ou cera perdida, cuja principal característica está no emprego de modelos e moldes consumíveis e a produção de peças com excelente precisão, máxima liberdade de desenho e detalhes em uma ampla variedade de metais e ligas que nenhuma outra técnica de fundição possibilita. Este processo inicia com a elaboração do projeto da peça que se quer produzir e a fabricação da matriz, que consiste em um molde bipartido da peça no qual a cera para modelos é injetada (BRUM, 2007). A Figura 1 ilustra as etapas do processo de microfundição. Após a injeção do modelo em cera é formado o cacho durante a fase de montagem, seguindo para o revestimento cerâmico. O próximo passo é a deceragem, aonde a cera é retirada do interior do molde em material cerâmico, tornando-se oco. A fusão do aço ocorre e o material cerâmico é preenchido. O cacho passa para o acabamento aonde é retirado o molde cerâmico, as peças são extraídas do cacho através do disco de corte e recebem o acabamento final por lixadeiras e jatos de granalha.

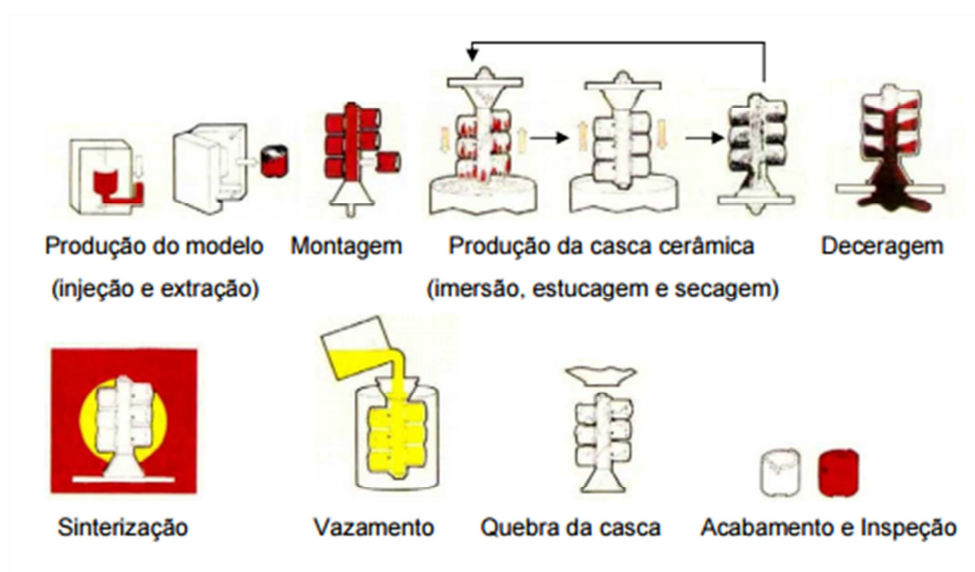


Figura 1- Etapas do processo de microfundição (Fonte: Bidwell, 1997).

Na última etapa do processo de microfundição, após a quebra do molde (calcinado) para a retirada da peça metálica fundida, gera-se um resíduo conhecido por casca cerâmica ou casca refratária. O resíduo cerâmico torna-se um passivo ambiental, uma vez que não encontra aplicabilidade dentro das indústrias geradoras, constituindo-se um mero rejeito industrial (MACHADO, 2013).

## 2.2 A Casca Cerâmica

A técnica de produção do molde cerâmico em casca envolve a imersão de todo o cacho na lama cerâmica, escoamento e cobertura com areia fina. Após secagem, este procedimento é repetido várias vezes, utilizando-se grãos progressivamente maiores até formação de uma casca refratária suficientemente forte para resistir a basicamente dois grandes esforços (HORTON, 1998):

- saída do material termoplástico (cera) sob ação do calor;
- entrada do metal líquido e suportá-lo até completa solidificação.

A espessura da casca varia normalmente de 5 a 16 mm. A última camada, denominada como camada de vedação, é normalmente deixada sem estuco para evitar perdas de partículas da superfície do molde (HENDRICKS et al., 2002).

Os materiais utilizados nessa etapa suportam o metal fundido a altas temperaturas (em geral cerca de 1650°C) e são totalmente inertes, para evitar reações metal-molde. Os materiais utilizados para a produção da casca (lama e estuco) são: refratários, aglomerantes, agentes de molhamento, antiespumantes e outros aditivos. Os refratários normalmente utilizados na lama e/ou estucagem são (HORTON, 1998, INVESTMENT CASTING INSTITUTE, 1979):

- Sílico-Aluminoso: Composto por cristais de mulita e sílica amorfa. Estes materiais são sinterizados, triturados e separados cuidadosamente para produzir faixas de tamanhos para uso em lamas (pós) e como estucos (grãos, chamotes).
- Alumina: Constituído por alumina eletrofundida (99,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou tabular (mínimo 99,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). As principais impurezas incluem  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ . O uso de alumina geralmente proporcionará uma camada de revestimento com alta condutividade térmica.

- Sílica Eletrofundida: Apresenta baixa expansão térmica. Comparada a outros refratários, possui condutividade térmica e densidade baixas. Utilizada como componente de lama e como estuco tanto para peças ferrosas como também não ferrosas. Para os ferrosos, as cascas são de fácil desmoldagem devido à fragilidade.

- Zirconita: Sua expansão térmica é intermediária entre a alumina e a sílica eletrofundida. Contém geralmente em torno de 67%  $ZrO_2$  e 33%  $SiO_2$ . Devido à sua alta densidade, o estuco de zircônio é normalmente aplicado com chuveiro. Os pós estão disponíveis em várias distribuições de tamanho de partícula e são usados em lamas primárias e secundárias. É o refratário mais comumente usado em lamas primárias por apresentar baixa reatividade com a maioria dos metais e ligas.

O aglomerante normalmente utilizado é a sílica coloidal, sendo uma dispersão de partículas esféricas de sílica amorfa, em água. Sob as condições normais, a sílica coloidal é muito estável, entretanto é sensível a várias condições que conduzem à gelificação. Fatores como temperatura elevada, temperatura de congelamento, e alguns compostos químicos, tais como ácidos, alguns sais e orgânicos reduzem a habilidade de aglomeração da sílica coloidal, resultando em cascas cerâmicas frágeis (INVESTMENT CASTING INSTITUTE, 1979, MACHADO et al, 2001).

Os agentes de molhamento, também denominados surfactantes, reduzem a tensão superficial da lama e permitem que esta “molhe” os cachos de cera mais facilmente (INVESTMENT CASTING INSTITUTE, 1979).

Os antiespumantes são adicionados geralmente na primeira lama para eliminar o ar que tenha ficado retido, seja durante a operação de mistura dentro dos tanques de lama ou proveniente do próprio refratário. A introdução de agente de molhamento também aumenta a tendência à formação de espumas. Os antiespumantes reduzem a resistência das bolhas de ar, levando à sua fragmentação bem como ao escapamento da lama (HORTON, 1998, INVESTMENT CASTING INSTITUTE, 1979).

A água pode apresentar variações em diferentes regiões quanto ao teor de minerais e o pH. Estes parâmetros influem nas características da água a ser utilizada na lama. Em geral, deve-se utilizar água destilada ou deionizada na lama. Água com alta dureza é indesejável já que cálcio e magnésio em pequenos teores desestabilizam a sílica coloidal.

### 2.3 A Importância da Destinação de Resíduos para a Indústria

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, prevê a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos (aquilo que tem valor econômico e pode ser reciclado ou reaproveitado) e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (aquilo que não pode ser reciclado ou reutilizado). Institui a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos: dos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, o cidadão e titulares de serviços de manejo dos resíduos sólidos urbanos na Logística Reversa dos resíduos e embalagens pós-consumo e pós-consumo. Cria metas importantes que irão contribuir para a eliminação dos lixões e institui instrumentos de planejamento nos níveis nacional, estadual, microrregional, intermunicipal e metropolitano e municipal; além de impor que os particulares elaborem seus Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (MMA, 2016).

Um dos objetivos fundamentais estabelecidos pela Lei 12.305 (BRASIL, 2010) é a ordem de prioridade para a gestão dos resíduos, que deixa de ser voluntária e passa a ser obrigatória: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. A Lei estabelece a diferença entre resíduo e rejeito: resíduos devem ser reaproveitados e reciclados e apenas os rejeitos devem ter disposição final (Figura 3) (MME, 2012).



Figura 2–Ordem de prioridade para a destinação de resíduos (Fonte: MME, 2012).

Dentro desta premissa, a utilização da casca cerâmica em outro processo é um passo muito importante para passar da destinação final adequada para a reciclagem. Para

Bidone (2001), a reciclagem é o processo pelo qual os resíduos retornam ao sistema produtivo como matéria-prima. Do ponto de vista ambiental a reciclagem diminui a quantidade de resíduos a serem dispostos no ambiente, aumentando a vida útil dos aterros sanitários e industriais, além de contribuir para a conservação dos recursos naturais, pois minimiza sua utilização ou a extração de matéria prima do ambiente natural (LUND, 1993).

Ainda por Lund (1993), do ponto de vista econômico, proporciona a redução do custo de gerenciamento dos resíduos, com menores investimentos em transporte, armazenamento e em instalações de tratamento e disposição final, ainda promovendo a criação de empregos.

## **2.4 Incorporação de Resíduos na Construção Civil**

O macro setor da construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais do planeta. Segundo Sjöström (1992), a construção civil consome, no mundo, entre 14% e 50% desses recursos. No Brasil, segundo John (2000), pode-se estimar um consumo anual de 210 milhões de toneladas de agregados somente na produção de concretos e argamassas.

As atividades de construção demandam uma notável quantidade de materiais inertes, tais como areia e brita. A extração de material inerte de formações rochosas em áreas acidentadas e montanhosas também é uma danosa atividade ao meio ambiente, uma vez que altera a paisagem e provoca problemas de estabilidade (BIANCHINI et.al, 2005).

Schulz e Hendricks apud Leite (2001) mostram registros da utilização de alvenaria britada para produção de concreto desde a época dos romanos. Igualmente nesta época era usada uma mistura de argilas, cinzas vulcânicas, cacos cerâmicos e pasta aglomerante de cal, que servia como uma camada para pavimentos, sobre a qual se efetuava o revestimento final do pavimento.

A produção de concretos com agregados reciclados ocorre a partir de 1928, quando começaram a ser desenvolvidas pesquisas de forma sistemática, para avaliar o efeito do consumo de cimento, consumo de água e granulometria dos agregados de alvenaria britada e de concreto. Porém a primeira aplicação significativa de entulho reciclado, só foi registrada após o final da 2ª Guerra Mundial, na reconstrução de cidades Europeias, que tiveram seus edifícios totalmente demolidos e o escombros ou entulho resultante, foi britado para a produção de agregados, visando atender à demanda na época (LEVY e HELENE, 2002). Com

base neste fato Levy e Helene (2002) afirmam que 1946 marca o início do desenvolvimento da reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) na construção.

No Brasil, o primeiro estudo sistemático para a utilização de resíduos de construção e demolição foi concluído em 1986, pelo arquiteto Tarcísio de Paula Pinto. Sua pesquisa consistiu em estudar o uso de reciclado para produção de argamassas (PINTO, 1986).

Por falta de um parâmetro que sirva de índice de qualidade para os agregados reciclados, estudos têm abordado diferentes formas de utilizá-los. Uma delas é a sua utilização apenas como substituto de parte do agregado natural (miúdo e/ou graúdo), de forma a não afetar tanto as propriedades do concreto. Outra forma vem a ser a investigação do efeito de várias composições do agregado sobre as propriedades do concreto, como que buscando uma composição ideal.

Para utilização de material reciclado como agregado para concreto devem ser realizadas misturas experimentais do mesmo modo que estas misturas são feitas para concretos convencionais. Deve ser estabelecida a quantidade de água suficiente para garantir a trabalhabilidade da mistura, desde que não haja excesso de água, fato que comprometeria o uso racional de cimento para alcançar a resistência desejada a um custo compatível (LEITE, 2001).

Uma característica muito importante é a sua dosagem. Entende-se por estudo de dosagem dos concretos de cimento Portland os procedimentos necessários à obtenção da melhor proporção entre os materiais constitutivos do concreto, também conhecido por traçado concreto (ISAIA et al., 2005).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a segurança de uma estrutura é considerada levando-se em conta a resistência do concreto, que é especificada pelo projetista. A resistência é principalmente caracterizada pela relação água/cimento e pelo teor de ar incorporado. Dependendo do teor de umidade dos agregados, será necessário providenciar correções na quantidade de água adicionada, no teor de areia e na quantidade de agregado graúdo, garantindo assim o conhecimento da relação água/cimento. A resistência também é tomada como um índice geral de durabilidade do concreto.



#### 2.4.1 *Uso da casca cerâmica como agregado: Composição granulométrica*

Os agregados reciclados, tanto miúdo quanto graúdo, tendem a uma composição granulométrica um pouco mais grossa que os agregados naturais, resultando em um módulo de finura (agregado miúdo) e dimensão máxima característica (agregado graúdo) um pouco maior. O tipo e a granulometria do resíduo, o britador e suas regulagens internas influenciam consideravelmente a granulometria final dos agregados reciclados produzidos (BAZUCO, 1999; LIMA, 1999, BANTHIA e CHAN, 2000).

A granulometria dos agregados exerce influência sobre a trabalhabilidade dos concretos no estado fresco, além de ser importante parâmetro para a dosagem das misturas (BARRA, 1996). De acordo com a autora, esta é uma característica que depende do processo de produção do agregado.

Devem ser tomados cuidados com a composição granulométrica dos agregados reciclados para possibilitar a produção de misturas de concreto trabalháveis, com grau de compactação satisfatório e que permitam o melhor desempenho técnico e a redução do custo dos concretos produzidos (LEITE, 2001).

Para atingir a granulometria apropriada para a incorporação é necessária a etapa de moagem do resíduo de casca cerâmica. Pode-se definir moagem como um processo de cominuição, no qual o material é fragmentado, ou reduzido de tamanho, entre duas superfícies móveis que não possuem entre si qualquer sujeição mecânica (JADOVSKI, 2005).

A seguir serão descritos alguns equipamentos utilizados para o beneficiamento dos resíduos de construção civil.

- a) *Britadores de mandíbulas*: Também muito utilizados na reciclagem, rompem as partículas por compressão (esmagamento). São geralmente utilizados como britadores primários, pois não reduzem muito as dimensões dos grãos, gerando alta porcentagem de graúdos. Em geral o material processado é rebitado (por moinhos de martelos, britadores de mandíbulas de menor porte, etc.) (LIMA, 1999). Apresenta as seguintes desvantagens, segundo Lima (1999): geração de alta porcentagem de graúdos, não sendo usado como único equipamento de britagem ou em recicladoras em que o material não é rebitado; geração de grãos lamelares, com tendência à baixa qualidade; dificuldade de britagem de peças armadas, peças de madeira com grandes dimensões, pois pode quebrar o eixo do

britador; alta emissão de ruído. Como vantagem, esses britadores apresentam baixo custo de manutenção.

- b) *Moinho de rolos*: Os moinhos de rolos são utilizados na moagem fina de materiais com baixa a média resistência à fragmentação, tais como carvão, linhito, calcário, cal, argilas, entre outros. As partículas produzidas tendem a ser uniformes no tamanho; isto é, partículas muito finas do material são geradas. A forma das partículas tende a ser irregulares, mais cúbicas ou retangulares do que esféricas. Tem como vantagens a eficiência energética, a distribuição uniforme no tamanho das partículas, pouco ruído e geração da poeira. As desvantagens é ter quase nenhum efeito na fibra das partículas, tendem a ser irregulares na forma e na dimensão, pode ter o custo inicial elevado (depende do sistema do projeto) e quando requerida, a manutenção pode ser cara (BARBOSA, 2007).

#### 2.4.2 *Uso da casca cerâmica como agregado: Forma e textura das partículas*

A forma das partículas exerce uma influência muito grande na produção de concretos, principalmente sobre a trabalhabilidade, compacidade, ângulo de atrito interno e quantidade da água de amassamento necessária à mistura (COUTINHO, 1997).

A textura dos agregados reciclados é geralmente mais rugosa e porosa do que a dos agregados naturais. Além da rugosidade, os agregados reciclados de concreto, depois de britados, tendem a formas mais angulares, com taxas de superfície/volume maiores que os agregados naturais, que possuem superfícies mais lisas e arredondadas. Este fato resulta numa maior fricção interna dos agregados reciclados, o que requer maior quantidade de argamassa para melhorar a trabalhabilidade do concreto produzido (RASHWAN e ABOURIZK, 1997).

A textura superficial, o tamanho da partícula e a forma do agregado também são apontados por SAGOE-CRENTSIL et al. (1998) como fatores que influenciam bastante a aderência entre o agregado e a matriz de concreto.

É consenso que todas estas características dos agregados reciclados discutidas acima são consequência do material de origem e do tipo de britador escolhido para o beneficiamento do material. De acordo com BAZUCO (1999), o britador de mandíbulas acentua a forma angular e o britador giratório (rolos) torna as partículas mais arredondadas.

### 2.4.3 *Uso da casca cerâmica como agregado: Massa específica e massa unitária*

Os resultados de massa específica e de massa unitária encontrados na bibliografia são muito variáveis, mesmo para materiais reciclados com composição muito parecida. Este fato pode ser explicado com base em dois aspectos. Primeiro, a própria composição do material, o tipo de beneficiamento realizado, a granulometria, entre outros fatores, são capazes de interferir na densidade dos agregados reciclados. Além disso, outro ponto que pode ser considerado muito importante é o método utilizado na determinação destas propriedades. Por exemplo, para a determinação da massa do material no estado saturado superfície seca, necessário para o cálculo da massa específica dos agregados, é preciso secar a amostra superficialmente e este procedimento pode incorrer em variabilidade, visto que devido à alta porosidade do material, não somente a película de água da superfície pode ser retirada, mas também a água dos poros um pouco mais internos. Ou ainda, pode ocorrer desagregação do material durante o seu manuseio, ou até durante a sua secagem, devido a menor resistência do material reciclado, principalmente no estado saturado. No método de ensaio do frasco de Chapman também podem ocorrer erros na determinação da massa específica do material, se não houver o cuidado de retirar a maior parte do ar desprendido pelo material poroso quando o mesmo entra em contato com a água, e o espaço que deveria estar ocupado por material e água, estaria ocupado também por bolhas de ar aprisionado. Deste modo, deve haver muito cuidado durante a execução dos ensaios de caracterização de novos materiais, inclusive devem ser levadas em consideração certas limitações no uso de normas e procedimentos de ensaio. É preciso, às vezes, considerar a utilização, ou mesmo, o desenvolvimento de outros métodos de quantificação para determinadas propriedades dos materiais reciclados (LEITE, 2001).

Além disso, conhecer as massas específica e unitária dos agregados é necessário para realizar o estudo de dosagem dos concretos. Pelos valores já apresentados conclui-se que existe a necessidade de realizar uma compensação da quantidade de material reciclado a ser utilizada nas misturas de concreto quando traços em massa de concretos convencionais são aplicados aos concretos reciclados. Sem este procedimento o volume de material reciclado correspondente à massa de agregado natural seria maior, resultando numa distorção entre os volumes de concreto convencional e reciclado produzidos a partir de um mesmo traço unitário (LEITE, 2001).

#### 2.4.4 *Uso da casca cerâmica como agregado: Absorção de água*

Segundo Djerbi Tegguer (2012) a quantidade de água absorvida depende principalmente da quantidade e continuidade dos poros na partícula, ao passo que a taxa de absorção depende do tamanho e também da continuidade desses poros; fatores secundários como o tamanho das partículas também podem ter um efeito.

DjerbiTegguer (2012) define ainda que, capacidade de absorção como sendo a máxima quantidade de água que o agregado pode absorver em função das circunstâncias. Ainda segundo o referido autor, numa mistura de concreto, se os agregados utilizados não estiverem completamente saturados, parte da água da mistura será absorvida por eles; por outro lado, caso tenha umidade livre na superfície das partículas de agregados, ela se tornará parte da água da mistura, aumentando-a.

González-Fonteboet al. (2011) constataram que o uso de agregado reciclado que tem maior capacidade de absorção de água que os agregados naturais, tornou os valores de absorção de água obtidos para os concretos reciclados superiores em relação aos convencionais. Além disso, eles observaram que quando aumentava a porcentagem de substituição, maiores eram os valores de absorção de água.

Elevados valores de absorção são comuns de serem verificados em materiais cerâmicos. Em levantamento bibliográfico realizado por Schulz e Hendricks (1992), os autores encontraram valores de absorção entre 22 a 25% para esse tipo de material.

A absorção de água dos agregados reciclados interfere na relação água/cimento final das misturas e na trabalhabilidade do material, deixando o concreto muito seco (LEITE, 2001). Portanto, é uma característica de grande importância, sendo fundamental o seu estudo prévio.

As normas para determinação das taxas de absorção dos agregados naturais miúdos e graúdos são a NM 30 (ABNT, 2001) e a NM 53 (ABNT, 2009), respectivamente. Todavia, o uso destas normas para determinação da taxa de absorção dos agregados reciclados foi dificultada devido à alta porosidade do material e à possibilidade de perda de material por desagregação do agregado graúdo e por causa da grande quantidade de finos apresentada pelo agregado miúdo, então deve-se tomar cuidado com estes detalhes ao longo da realização dos ensaios.

#### 2.4.5 *Uso da casca cerâmica como agregado: Resistência à compressão*

Todos os materiais dos quais o concreto é composto afetam diretamente a sua resistência e o seu desempenho final. Assim, os agregados também são extremamente importantes para análise criteriosa das propriedades do concreto. Qualquer variação dos materiais componentes do concreto merece um estudo sistemático e isso também se aplica ao agregado reciclado, principalmente quando se pensa que eles correspondem até 80 % de toda mistura (LEITE, 2001).

Kasai e Fuji (1989) relatam que a resistência à compressão de concretos com agregados reciclados de concreto depende da relação água/cimento e da resistência do concreto original. Os agregados reciclados apresentam grande porosidade e alto teor de absorção, características que podem propiciar uma boa aderência à matriz do concreto e um ganho de resistência entre as primeiras idades e os 28 dias (MACHADO Jr. e AGNESINI, 1999). Os autores sugerem também que exista um efeito de cura interna do concreto, sendo esta uma propriedade inerente dos agregados leves que possuem alto teor de absorção.

Salem e Burdette (1998) realizaram estudos comparativos em concretos com agregado graúdo reciclado e miúdo natural e concretos com ambas frações naturais e concluíram que a resistência à compressão dos concretos com agregado graúdo reciclado era maior que a do concreto convencional. Os autores atribuíram o melhor comportamento do concreto reciclado à forma mais angular e à textura mais áspera do material reciclado que proporciona melhor aderência e maior travamento entre a pasta de cimento e o agregado se comparado ao agregado natural. Além disso, outra causa apontada para o melhor desempenho do concreto reciclado foi a maior absorção de água apresentada pelo agregado reciclado, que pode ter ocasionado diminuição da relação a/c do concreto.

Sagoe-Crentsil e Brown (1998) encontraram perdas de resistência à compressão de cerca de 13 % em concretos produzidos com agregado graúdo reciclado e miúdo natural e valores até 32 % inferiores para concretos produzidos somente com agregados reciclados. Os autores atribuíram esta redução a maior demanda de água apresentada pelo concreto com agregado reciclado em relação ao concreto convencional.

Concretos preparados com agregado graúdo reciclado de blocos cerâmicos, com relação a/c variando de 0,3 a 0,6, apresentaram resistência à compressão cerca de 10 % maior que as respectivas misturas de referência. Para o traço com relação a/c 0,3 o concreto reciclado apresentou resistência de 72 MPa, contra 64 MPa do mesmo traço de referência com

brita granítica (MANSUR et al. 1999). Os autores atribuem o melhor comportamento do concreto reciclado à superfície rugosa, alta angulosidade, alta densidade e alta resistência dos agregados de blocos cerâmicos (153 MPa). A textura e forma dos agregados reciclados promovem melhor aderência entre a pasta e o agregado favorecendo o aumento da resistência.

Levy e Helene (2000) realizaram três misturas de concreto, uma de referência, a segunda utilizando 50 % de agregado graúdo de concreto e a terceira utilizando 50 % agregado graúdo de alvenaria, em três proporções 1:3, 1:4,5 e 1:6, tendo como fator de controle das misturas o abatimento de  $70 \pm 20$  mm, ou seja, as relações a/c variavam para cada traço. Os autores obtiveram como resultado aos 28 dias uma redução nos valores de resistência dos concretos com agregado de alvenaria que variou de 23 a 37 %. Para os concretos com agregado de concreto os resultados de resistência obtidos foram semelhantes aos do concreto de referência. Observou-se nos resultados que o tipo de componente utilizado para produção do concreto exerce influência sobre a resistência à compressão dos concretos. A menor resistência e maior porosidade dos agregados de alvenaria, compostos de argamassa e blocos cerâmicos, são apontadas como as causas desta redução.

Machado Jr et al. (2000) realizaram misturas de concreto reciclado utilizando agregado graúdo reciclado de 19,0 e 9,5 mm, separadamente, com teores de substituição de 0, 50 e 100 %. Os resultados obtidos não apresentaram diferença significativa em relação as duas graduações testadas, todavia os concretos reciclados apresentaram aumento de cerca de 15 e 19% nos valores de resistência em relação aos concretos de referência. Os autores atribuem este comportamento a alta absorção dos agregados reciclados que não foi compensada para produção dos concretos. Neste caso, foi mencionada, também, a possibilidade de “cura úmida interna” por parte do agregado reciclado durante o endurecimento da pasta, fenômeno que ocorre com os agregados leves de alto poder de absorção descritos por Neville (1995).

Diante dos vários resultados encontrados e dos mais variados tipos de pesquisa desenvolvidos, conclui-se que existe uma dificuldade em apontar qual comportamento observado para os concretos produzidos com agregados reciclados é o mais correto. Este fato é atribuído à dificuldade de avaliar quais parâmetros foram tomados como constantes em cada estudo para fazer as devidas comparações. Ou seja, a falta de um procedimento uniforme para as pesquisas torna difícil a adoção deste ou daquele resultado como parâmetro que sirva como orientador do comportamento do material, ou que ajude a corroborar os resultados já existentes (LEITE, 2001).

#### *2.4.6 Uso da casca cerâmica como agregado: Absorção de água do concreto*

Segundo Metha e Monteiro (2008), a água costuma ser o fator principal para a maioria dos problemas de durabilidade no concreto. Os fenômenos físico-químicos associados ao transporte de água em sólidos porosos, como o concreto, são controlados pela permeabilidade do sólido. Na pasta de concreto endurecida, em qualquer estágio durante o processo da hidratação, o tamanho e a conectividade dos poros controlarão a permeabilidade.

Segundo Djerbi Tegguer (2012) a quantidade de água absorvida depende principalmente da quantidade e continuidade dos poros na partícula, ao passo que a taxa de absorção depende do tamanho e também da continuidade desses poros; fatores secundários como o tamanho das partículas também podem ter um efeito.

Djerbi Tegguer (2012) define capacidade de absorção como sendo a máxima quantidade de água que o agregado pode absorver em função das circunstâncias. Ainda segundo o referido autor, numa mistura de concreto, se os agregados utilizados não estiverem completamente saturados, parte da água da mistura será absorvida por eles; por outro lado, caso tenha umidade livre na superfície das partículas de agregados, ela se tornará parte da água da mistura, aumentando-a.

Nos agregados naturais normalmente utilizados nas misturas de concreto, a taxa e a absorção do material geralmente tem índices muito baixos e sua influência para produção de concretos convencionais não é considerada. Mesmo para os agregados miúdos normalmente utilizados, cujos valores de taxa de absorção variam de 1 a 2,5 %, o efeito da absorção geralmente não é considerado, pois o processo se dá de forma mais lenta devido à baixa porosidade dos materiais comumente utilizados. Entretanto, quando se utiliza agregados mais porosos, como é o caso dos agregados reciclados, cuidados devem ser tomados para minimizar os efeitos de absorção e sua quantificação merece atenção especial (LEITE, 2001).

Segundo Pedrozo (2008), para concretos com agregados porosos, a maior causa da perda de trabalhabilidade é a absorção dos agregados quando adicionados a seco, diminuindo a quantidade de água livre na mistura.

González-Fonteboa et al. (2011) constataram que o uso de agregado reciclado que tem maior capacidade de absorção de água que os agregados naturais, tornou os valores de absorção de água obtidos para os concretos reciclados superiores em relação aos

convencionais. Além disso, eles observaram que quando aumentava a porcentagem de substituição, maiores eram os valores de absorção de água.

#### 2.4.7 *Uso da casca cerâmica como agregado: Carbonatação*

BARRA (1996) estudou a resistência ao ataque por CO<sub>2</sub> em concretos convencionais e concretos reciclados e concluiu que:

- a resistência ao ataque depende da resistência à compressão que está sendo analisada;

- para concretos ricos (consumo de cimento  $C > 400 \text{ kg/m}^3$ ), o risco de carbonatação do concreto reciclado é maior que para o concreto convencional;

- para concretos normais ( $400 \text{ kg/m}^3 > C > 300 \text{ kg/m}^3$ ), as condições de mistura dos materiais na betoneira influenciam muito nos resultados de carbonatação. Por exemplo, quando o cimento é adicionado ao agregado previamente umedecido na betoneira, ou seja, o agregado possui apenas a superfície molhada, o comportamento do concreto frente à carbonatação é equivalente ao comportamento do concreto convencional. Segundo a autora, neste procedimento de mistura existe uma maior concentração de grãos de cimento na superfície do agregado reciclado e, assim, a formação de uma barreira à penetração do CO<sub>2</sub>, melhorando o desempenho do concreto reciclado. Quando a mistura é feita colocando a pasta, ou argamassa, previamente misturadas junto com o agregado reciclado seco, a formação desta barreira não existe. Assim, o CO<sub>2</sub> possui mais de um caminho para permear o concreto, a nova matriz que pode ser boa o suficiente para barrar a entrada do CO<sub>2</sub>, ou o agregado reciclado poroso e mais suscetível ao ataque.

- para concretos pobres ( $C < 300 \text{ kg/m}^3$ ), os concretos convencionais e reciclados apresentaram comportamento semelhante frente ao ataque por CO<sub>2</sub>.

De acordo com Barra (1996), a resistência à carbonatação de concretos reciclados sofre uma influência muito grande da porosidade da matriz nova e da matriz antiga de agregados reciclados de concreto e também da maior porosidade inerente ao material.

Kikuchi et al. (1998) avaliaram a resistência à carbonatação de concretos com agregados reciclados de concreto e concluíram que estes apresentaram menor frente de carbonatação que os concretos de referência quando submetidos durante um mês a uma concentração de CO<sub>2</sub> de 5 %, temperatura de 30 °C e 60 % de umidade. Os autores relatam,



ainda, que os concretos com agregado miúdo reciclado apresentaram maior frente de carbonatação que os concretos com agregado graúdo reciclado.

Sciotti et al. (1998) afirmam que a carbonatação é um dos processos mais comuns que podem existir na argamassa antiga dos agregados reciclados de concreto. Os autores realizaram estudos da interface pasta/agregado de concretos com agregado reciclado de concreto e avaliaram que os agregados reciclados são provenientes de fontes desconhecidas de material e os concretos geralmente possuem diferentes relações a/c, como existe uma relação entre o sistema de poros. Para minimizar o problema os autores recomendam que os concretos reciclados passem por um processo de cura úmida, desta forma o processo de hidratação será melhor desenvolvido.

Levy e Helene (2000) realizaram estudos de durabilidade em concretos com 50% de agregados graúdos reciclados de concreto, concretos com 50% de agregados graúdos reciclados de alvenaria e concretos de referência, sendo realizadas três misturas para cada família de concreto nas proporções 1:3, 1:4,5 e 1:6 com diferentes relações a/c. Foram analisadas para as três famílias a evolução da resistênciamecânica nas idades de 28, 91 e 182 dias, bem como a absorção por imersão, índice de vazios, resistividade e profundidade de carbonatação. Os resultados mostraram que a taxa de absorção medida e o índice de vazios tendem a serem maiores para a família de concretos que incorpora agregados graúdos reciclados de alvenaria. Com relação à frente de carbonatação, os concretos submetidos a uma concentração de 12% de CO<sub>2</sub> durante duas semanas, apresentaram profundidades de carbonatação muito semelhantes, o que significa dizer que os autores não encontraram influência do tipo de agregado utilizado, nesta propriedade. A resistividade dos concretos com agregados reciclados foi semelhante à dos concretos de referência, com exceção do traço rico, 1:3, no qual os concretos com agregados reciclados apresentaram menor resistividade que o concreto de referência. Os autores concluíram que os concretos que utilizam 50% de agregados graúdos de concreto são tão duráveis quanto o concreto de referência.

Assim como acontece com as propriedades mecânicas, os aspectos relativos à durabilidade dos concretos reciclados, estudados em menor escala, também apresentam resultados contrastantes. Atribui-se a este fato a falta de uma metodologia adequada e uniforme para o estudo do comportamento dos agregados reciclados quando incorporados ao concreto (LEITE, 2001).

#### 2.4.8 *Uso da casca cerâmica como agregado: Dosagem pelo método IPT/EPUSP*

A dosagem do concreto pode ser definida como sendo o proporcionamento adequado dos materiais (cimento, água, agregados, e eventualmente aditivos), de maneira que o produto resultante dessa mistura atenda aos requisitos no estado fresco e endurecido, aliados ao menor custo possível (MALTA, 2012).

O estudo de dosagem é delimitado tanto por características dos materiais que compõem o concreto e pelas condições da obra, como pelo projeto estrutural, os equipamentos disponíveis para execução etc. A trabalhabilidade do concreto fresco, e a resistência do concreto endurecido, a uma idade definida são, em geral, os parâmetros mais importantes. A trabalhabilidade é definida em função das condições de produção e execução da obra (BARRA, 1996).

O objetivo final da dosagem é a determinação da quantidade com que cada material, cimento, água e agregados, entram na composição do concreto, ou seja, o consumo dos materiais por metro cúbico produzido. Os procedimentos adotados na realização dessa mistura é o que constitui um método de dosagem (LEITE, 2012).

Ainda por Leite (2012), existem diversos métodos de dosagem para concreto convencional, cuja utilização varia regionalmente, dependendo de condições técnicas, disponibilidade de material, conhecimento dos métodos, entre outros. Dentre eles, merece destaque o Método IPT/EPUSP, que parte do princípio que são necessários três pontos para montar o diagrama de dosagem, que correlaciona a resistência à compressão, relação água/cimento, traço e consumo de cimento.

O estudo consiste em se determinar um teor ideal de argamassa para um traço intermediário 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa), fixando-se um valor de abatimento. Baseado nas informações obtidas desta mistura, confeccionam-se mais duas, com os traços definidos em 1:3,5 (traço chamado de rico) e em 1:6,5 (traço chamado de pobre). Para cada traço são moldados exemplares de corpos-de-prova para a determinação da resistência a compressão axial em idades pré-determinadas pelo executor. Com esses resultados monta-se o diagrama de dosagem (LEITE, 2012).

Segundo Helene e Terzian (1993), os conceitos fundamentais do método IPT/EPUSP são:

- arelação a/c é o parâmetro mais importante do concreto estrutural;

- definida a relação a/c e definidos certos materiais, a resistência e a durabilidade do concreto passam a ser únicas;
- o concreto é mais econômico (barato) quanto maior for a dimensão máxima característica (DMC) do agregado graúdo e menor o abatimento do tronco de cone (consistência mais seca);
- correções assumidas como “Leis de comportamento”:

a. Lei de Abrams:

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2 \frac{a}{c}} \quad (\text{Equação 1})$$

b. Lei de Lyse:

$$m = k_3 + k_4 \times \frac{a}{c} \quad (\text{Equação 2})$$

e, para a relação água/cimento:

$$\frac{a}{c} = c \times A \quad (\text{Equação 3})$$

c. Lei de Molinari:

$$C = \frac{1000}{(k_5 + k_6 \times m)} \quad (\text{Equação 4})$$

d. Teor de argamassa seca:

$$\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + m)} \quad (\text{Equação 5})$$

e,

$$m = a + p \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$f_{cj}$  = resistência à compressão axial, à idade j, em MPa;

a/c = relação água/cimento em massa, em kg/kg;

a = relação agregado miúdo seco/cimento em massa, em kg/kg;

m = relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg;

$\alpha$  = teor de argamassa; deve ser constante para uma determinada situação, em kg/kg;

p = relação agregados graúdos secos/cimento em massa, em kg/kg;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  e  $k_6$  = constantes que dependem exclusivamente dos materiais (cimento, agregados miúdos, agregados graúdos e aditivos).

- diagrama de dosagem (modelo de comportamento), conforme Figura 3,

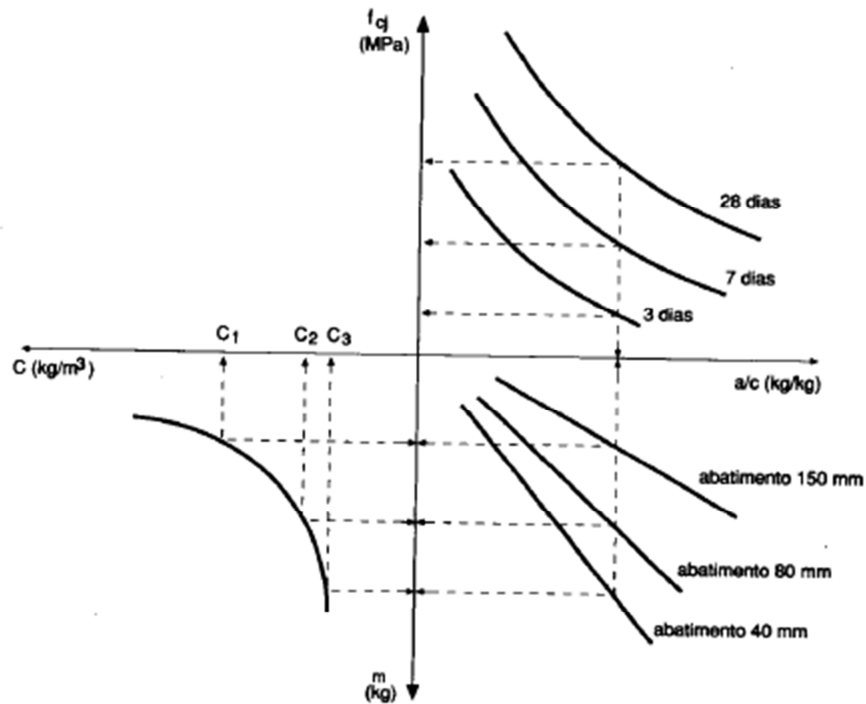


Figura 3 – Modelo de comportamento do diagrama de dosagem (Fonte: Helene e Terzian, 1993).

- “Leis Complementares”:

a. Consumo de cimento por m<sup>3</sup>:

$$C = \frac{\gamma}{1 + a + p + \frac{a}{c}} \quad \text{(Equação 7)}$$

b. Consumo de cimento por m<sup>3</sup>:

$$C = \frac{(1000 - ar)}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + \frac{a}{c}} \quad \text{(Equação 8)}$$

c. Consumo de água por m<sup>3</sup>:

$$C_a = C \times \frac{a}{c} \quad \text{(Equação 9)}$$

Onde:

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado em kg/m<sup>3</sup>;

$\gamma$  = massa específica do concreto, medida no canteiro em kg/m<sup>3</sup>;

$\gamma_c$  = massa específica do cimento em kg/dm<sup>3</sup>;

$\gamma_a$  = massa específica do agregado miúdo em kg/dm<sup>3</sup>;

$\gamma_p$  = massa específica do agregado graúdo em kg/dm<sup>3</sup>;

ar = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico, em dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

A escolha da consistência do concreto (medida através do ensaio de abatimento do tronco de cone) também é necessária para a execução da dosagem. Conforme Machado (2013), esse ensaio tem por finalidade medir a consistência e a fluidez da pasta, permitindo que se controle a uniformidade do concreto, sendo que a consistência do abatimento indicaria a uniformidade da trabalhabilidade.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo de casca cerâmica é gerado pelo processo de microfusão em uma empresa metalúrgica da Serra Gaúcha. O grupo engloba duas unidades com este processo e geram em torno de 110 toneladas mensais de casca cerâmica. Como este resíduo é classificado como não perigoso, Classe IIB, inerte (tipo de resíduo nobre para reutilização ou reciclagem – Anexo 1), pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) e atualmente seu destino é o aterro industrial. O presente trabalho visa o estudo da incorporação do resíduo de casca cerâmica, a fim de dar início à implantação de uma linha de fabricação de produtos de concreto.

Visando cumprir os objetivos específicos propostos, foram dosados concretos a partir do método IPT EPUSP. Foram realizadas seis dosagens, a primeira sem resíduo (CC), depois com 50% de resíduo como agregado miúdo (50M) - percentual utilizado em todas as dosagens com incorporação de resíduo-, 50M mais 25% de resíduo como agregado graúdo (50M25G), 50M mais 50% de resíduo como agregado graúdo (50M50G), 50M mais 75% de resíduo como agregado graúdo (50M75G) e 50M mais 100% de resíduo como agregado graúdo (50M100G) (Figura 4).

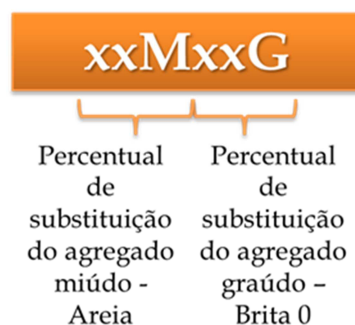


Figura 4 – Símbolos inseridos conforme o teor de resíduo incorporado (Fonte: Autor).

Esses teores de substituição para o agregado graúdo foram escolhidos por representarem uma situação ampla para avaliação dos resultados com o resíduo incorporado. O teor de agregado miúdo reciclado foi utilizado como 50%, por ter sido o melhor resultado dos testes realizados no trabalho de Adamatti (2014), também por gerar, na cominuição, grande quantidade de material que serve como agregado miúdo.

Neste capítulo serão apresentadas as etapas necessárias para o desenvolvimento do programa experimental desta pesquisa para o beneficiamento e caracterização do resíduo,

os materiais utilizados e suas caracterizações, os ensaios realizados para as misturas de argamassa e concreto nos estados fresco e endurecido, o estudo de dosagem das misturas e as quantidades de corpos-de-prova moldados. Um resumo do estudo e das principais etapas pode ser visualizado na Figura 5 e Figura 6.

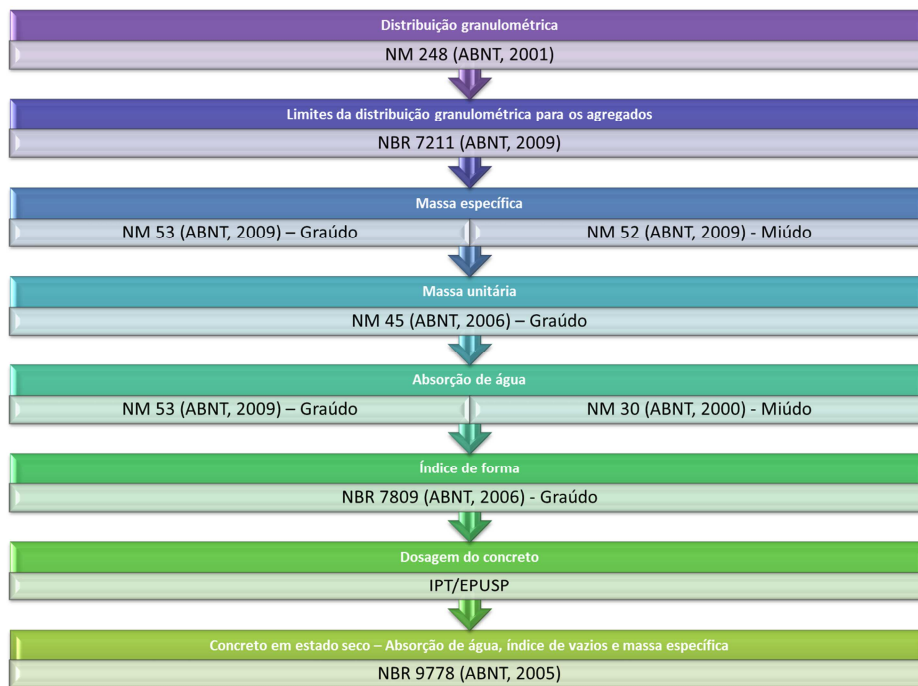


Figura 5 – Testes realizados e suas normas de referência (Fonte: Autor).

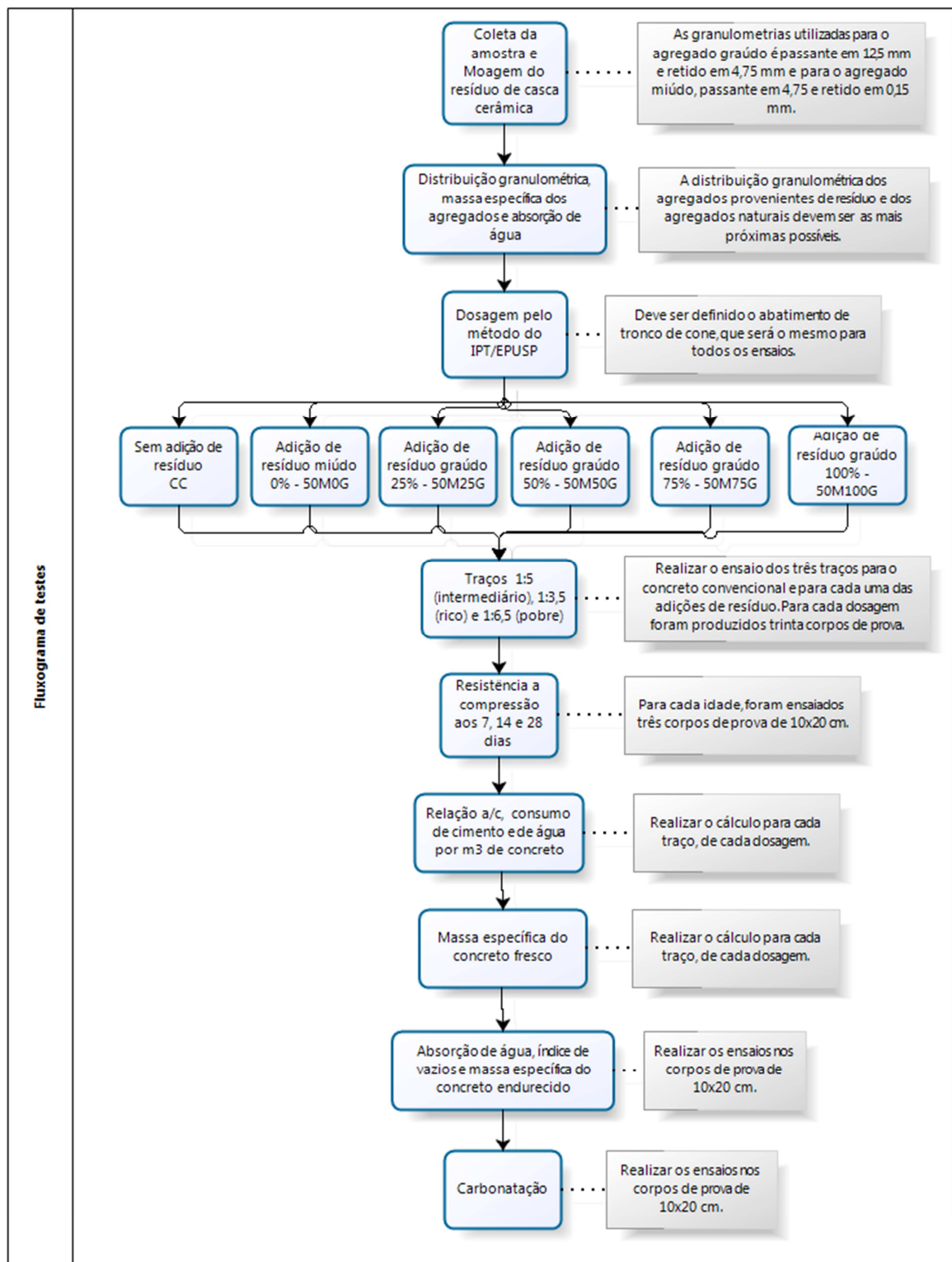


Figura 6 – Fluxograma de testes e das etapas realizadas ao longo do estudo, com seus maiores detalhes (Fonte: Autor).



### **3.1 Materiais Utilizados**

#### *3.1.1 Cimento*

Devido a este projeto estar vinculado a um processo de implantação industrial de produtos fabricados com este concreto desenvolvido, optou-se por utilizar o mesmo cimento que as empresas da região da Serra do Rio Grande do Sul utilizam em seus processos com concreto convencional, neste caso, cimento CPV ARI da empresa Itambé. A empresa Itambé forneceu o relatório da data de expedição do lote do cimento utilizado nos testes, contendo sua massa específica pela NBR NM 23 (ABNT, 2001), área específica Blaine e expansividade a quente. Maiores informações podem ser visualizadas no laudo em Anexo 2.

#### *3.1.2 Agregados Naturais – Agregado miúdo*

Como agregado miúdo foi selecionado uma areia natural, sem torrões de argila nem materiais friáveis, proveniente do “Rio Guaíba”. Conforme informações levantadas, a areia foi dragada do rio Jacuí. Esta informação pode ser confirmada pelas características do agregado miúdo que se enquadram nas características das areias do Jacuí, descritas no Relatório de pesquisa: “Qualificação de agregados para concretos e argamassas” (RAABE; BONIN, 1995). Foram realizados testes de distribuição granulométrica, massa específica do agregado seco, absorção de água e módulo de finura no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), localizado no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

#### *3.1.3 Agregados Naturais – Agregado graúdo*

Como agregado graúdo foi escolhido o material Brita 0, de natureza basáltica, britado, da cor cinza escura a preta, com forma lamelar à equidimensional e com pouco ou nenhum material pulverulento. As características físicas foram retiradas de laudo encaminhado pela empresa fornecedora e realizado no laboratório da CIENTEC (Anexo 3) e a composição granulométrica deste tipo de agregado, de uso frequente na região de Porto Alegre, juntamente com a massa específica do agregado seco, a massa unitária, a absorção de água e o módulo de finura, foram determinadas no Laboratório de Ensaios e Modelos

Estruturais (LEME), localizado no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

### 3.1.4 Agregados Reciclados - Resíduo de casca cerâmica como agregado graúdo

Foram coletadas amostras de um mesmo lote no processo produtivo, após o desmolde realizado no marteleto, seguindo a norma NBR 10.007 (ABNT, 2004). Com isso, inicialmente o resíduo de casca cerâmica passou por uma inspeção visual, a fim de retirar manualmente sobras de metal oriundos do processo de fundição, anterior ao processo de desmoldagem (Figura 7). Para um processo em maior escala pode ser utilizado uma esteira magnética para a separação do metal.

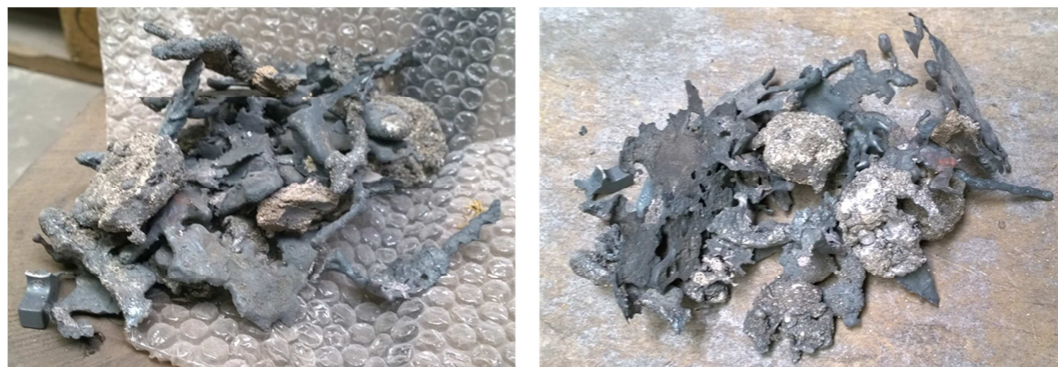


Figura 7 - Metais presentes no resíduo de casca cerâmica (Fonte: Autor).

Para utilização em substituição ao *agregado graúdo*, a casca cerâmica foi levada ao britador de mandíbulas (Figura 8) por três vezes, resultando na granulometria necessária para a utilização como agregado graúdo (passante em 12,5 mm e retido em 4,75 mm). O equipamento utilizado foi o Britador nº 300, modelo J58, ano 1996, produzido por Indústria de Electro-aços Plangg S.A.



Figura 8 - Britador de mandíbulas (Fonte: Autor).

Após passar pelo britador de mandíbulas, se tem o agregado pronto para uso. A Figura 9 mostra uma imagem comparativa entre os agregados natural e de casca cerâmica.

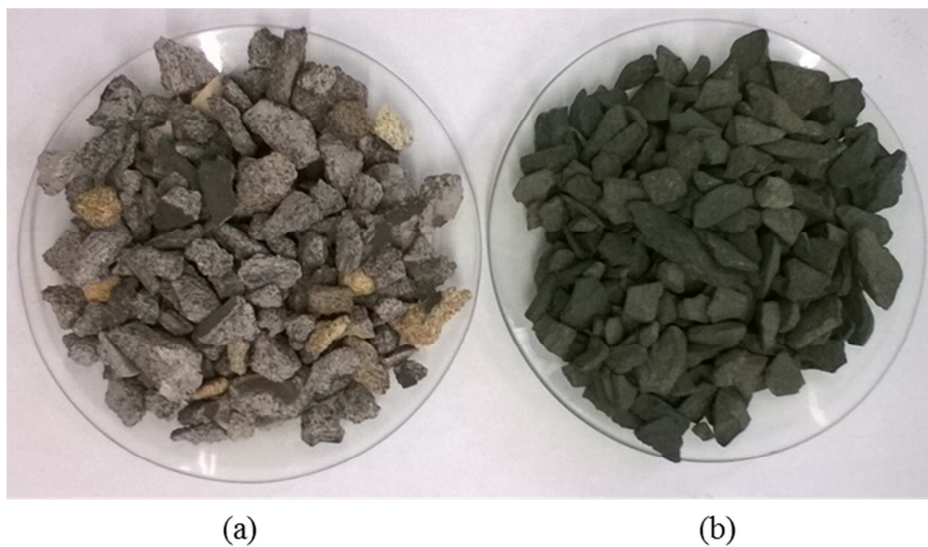


Figura 9 – Imagem comparativa do resíduo (a) e do agregado graúdo natural (b) (Fonte: Autor).

### 3.1.5 Agregados Reciclados – Resíduo de casca cerâmica como agregado miúdo

Para a substituição do resíduo como *agregado miúdo*, que é a fração passante em 4,75 mm e retida em 0,15 mm, foi utilizado o material que ficou passante em 4,75 mm no

britador de mandíbulas e que estava dentro da granulometria desejada (retida em 0,15 mm), a fim de reutilizar ao máximo, pensando na não geração de resíduos. Ainda, a casca cerâmica retida em 12,5 mm do processo para obtenção do agregado graúdo (britador de mandíbulas) passou por duas vezes no moinho de rolosMaqbritt(Figura 10), para resultar em um resíduo com granulometria que se enquadre na desejada para o agregado miúdo.



Figura 10 - A esquerda uma visão total do moinho de rolos e a direita, uma visão dos rolos da moagem (Fonte: Autor).

Tanto para o agregado graúdo quanto para a obtenção do agregado miúdo, foram utilizados os britadores/moinhos do Laboratório de Processamento Mineral – LAPROM e juntamente com este processo a classificação granulométrica, utilizando o agitador e conjunto de peneiras conforme a Figura 11. Foram utilizadas as peneiras para esta classificação as de maior e menor dimensão desejada para cada agregado, ou seja, para o agregado graúdo foram utilizadas as peneiras 12,5 mm e 4,75 mm e para o agregado miúdo a 4,75 mm e 0,15 mm. Para ambas seleções, utilizou-se a tampa e o fundo.



(a)



(b)

Figura 11 – (a) Agitador de peneiras com o conjunto de peneiras utilizado. (b) Visão geral do laboratório LAPROM, sendo visualizado o moinho de rolos, o britador de mandíbulas e o conjunto de peneiras com o agitador (Fonte: Autor).

Após passar pelo britador de mandíbulas, se tem o agregado pronto para uso. A Figura 12 mostra uma imagem comparativa entre os agregados natural e de casca cerâmica.



(a)

(b)

Figura 12 - Imagem comparativa do resíduo(a) e do agregado miúdo natural(b) (Fonte: Autor).

### 3.1.6 Distribuição granulométrica, módulo de finura dos agregados miúdos e dimensão máxima característica dos agregados graúdos

Para o ensaio de composição granulométrica dos agregados, utilizou-se a norma NM 248 (ABNT, 2001), tendo início com a escolha das peneiras das séries normal e intermediária para cada tipo de agregado, como pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1– Peneiras das séries normal e intermediária utilizada na seleção dos agregados (Fonte: NM 248, 2001).

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Agregado graúdo</b>	<b>Agregado miúdo</b>
<b>Tampa</b>	X	X
<b>12,5</b>	X	
<b>9,5</b>	X	
<b>6,3</b>	X	
<b>4,75</b>	X	X
<b>2,36</b>		X
<b>1,18</b>		X
<b>0,6</b>		X
<b>0,3</b>		X
<b>0,15</b>		X
<b>Fundo</b>	X	X

Com a escolha da dimensão máxima dos agregados graúdos, do módulo de finura para os agregados miúdos e definidas as peneiras, teve início a preparação das amostras. A amostra foi coletada conforme NM 26 (ABNT, 2009), sendo de 2 kg para o agregado graúdo e 0,3 kg para o agregado miúdo. Ambas foram secas em estufa e ensaiadas em um único conjunto de peneiras formado conforme Tabela 1, com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo.

Em seguida, foi realizado o ensaio conforme a norma NM 248 (ABNT, 2001). O conjunto de agitador e peneiras utilizado para a obtenção das curvas granulométricas pertence ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME e está demonstrado na Figura 13.



Figura 13 – Conjunto de agitador e peneiras utilizado no ensaio de determinação da curva granulométrica (Fonte: Autor).

Com os resultados da composição granulométrica, foi utilizada a norma NBR 7211 (ABNT, 2009), que rege os limites da distribuição granulométrica para os agregados utilizados em concreto. A Tabela 2 apresenta os limites inferiores e superiores que podem ser utilizados em cada malha utilizada no peneiramento do agregado miúdo.

Tabela 2– Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo (Fonte: NBR 7211, 2009)

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Nota 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

Nota 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

Nota 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Para o agregado graúdo foi utilizada a Tabela 3, a qual apresenta as percentagens, em massa, retida acumulada em cada peneira para verificação se o agregado pode ser utilizado como uma adição ao concreto.

Tabela 3 - Limites da composição granulométrica do agregado graúdo (Fonte: NBR 7211, 2009).

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D <sup>a</sup>				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 - 5
63 mm	-	-	-	-	5 - 30
50 mm	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5 mm	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5 mm	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25 mm	-	0 - 5	5 - 25 <sup>b</sup>	87 - 100	-
19 mm	-	2 - 15 <sup>b</sup>	85 - 95 <sup>b</sup>	95 - 100	-
12,5 mm	0 - 5	40 <sup>b</sup> - 65 <sup>b</sup>	92 - 100	-	-
9,5 mm	2 - 15 <sup>b</sup>	80 <sup>b</sup> - 100	95 - 100	-	-
6,3 mm	40 <sup>b</sup> - 65 <sup>b</sup>	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 <sup>b</sup> - 100	95 - 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

<sup>a</sup>Zona granulométrica correspondente a menor (d) e a maior (D) dimensões do agregado graúdo.

<sup>b</sup> Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.



### 3.1.7 Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa unitária, índice de forma e absorção de água

Segundo a norma NM 53 (ABNT, 2009), a amostra para o teste foi coletada conforme a NM 26. Após, foram seguidos os passos de execução dos ensaios conforme a NM 53 (ABNT, 2009).

Para a massa específica do agregado seco, utilizar a seguinte fórmula:

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

- d é a massa específica do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;
- m é a massa ao ar da amostra seca, em gramas;
- m<sub>a</sub> é a massa em água da amostra, em gramas.

Para o cálculo da massa unitária utiliza-se a norma NM 45 (ABNT, 2006), Método C. Calcular a massa unitária segundo a (Equação 11,

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

- $\rho_{ap}$  é a massa unitária do agregado, em quilogramas por metro cúbico;
- m<sub>ar</sub> é a massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas;
- m<sub>r</sub> é a massa do recipiente vazio, em quilogramas;
- V é o volume do recipiente, em metros cúbicos;

O índice de forma é o que permite avaliar a qualidade de um agregado graúdo em relação à forma dos grãos, considerando que os agregados com grãos de forma cúbica tida como forma ótima para agregados britados, terão índice próximo de 1; os grãos lamelares apresentarão valores bem mais altos, sendo considerado aceitável o limite de 3. O índice de forma dos agregados graúdos foi obtido através da norma NBR 7809 (ABNT, 2006). Com o auxílio do paquímetro foi obtido C/e de cada uma das frações e calculada a média ponderada da amostra (Figura 14).

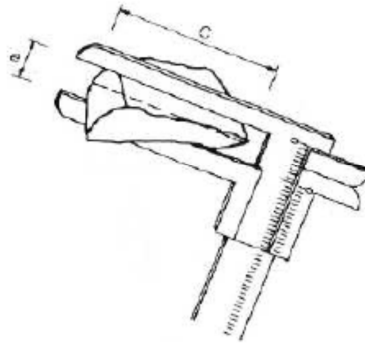


Figura 14 - Dimensões do grão (Fonte:Itambé, 2011).

Onde: “C” é a maior dimensão possível de ser medida e define a direção do comprimento e “e” é a maior distância possível entre dois planos paralelos à direção do comprimento do grão.

Com estes dados, é realizado o cálculo da média ponderada da amostra tanto para o agregado natural quanto para o resíduo, obtendo-se o índice de forma para cada um.

Por fim, tem-se o cálculo da absorção de água,(Equação 12;

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad \text{(Equação 12)}$$

Onde:

A é a absorção de água, em porcentagem;

$m_s$  é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

m é a massa ao ar da amostra seca, em gramas.

### 3.1.8 Agregado miúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água

Seguindo a norma NM 52 (ABNT, 2009), a amostra para ensaio foi constituída por 1 kg de agregado miúdo. Seguindo os passos da norma, para o cálculo da massa específica do agregado seco utilizar a Equação 13.

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad \text{(Equação 13)}$$

Onde:

$d_1$ , é a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m, é a massa da amostra seca em estufa,em gramas;

$V$ , é o volume do frasco, em centímetros cúbicos;

$V_a$ , é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com a seguinte fórmula, em centímetros cúbicos:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (\text{Equação 14})$$

$m_1$ , é a massa do conjunto (frasco + agregado), em gramas;

$m_2$ , é a massa total (frasco + agregado + água), em gramas;

$\rho_a$ , é a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

Para a determinação da absorção de água utilizou-se a norma NM 30 (ABNT, 2000), com a mesma amostra dos testes anteriores.

A absorção de água foi calculada mediante a (Equação 15):

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

$A$ , é a absorção de água, em porcentagem;

$m_s$ , é a massa ao ar da amostra na condição saturada e de superfície seca, em gramas;

$m$ , é a massa da amostra seca em estufa, em gramas.

### 3.1.9 Dosagem de concreto pelo método IPT/EPUSP

Segundo Helene Terzian (1993), inicialmente, devem ser decididas as características ou tipos de materiais a serem utilizados como dimensão máxima característica do agregado graúdo, determinação da brita a ser utilizada, consistência desejada pelo teste de abatimento de tronco de cone, e após então, partir para o estudo experimental.

São necessários três pontos para montar o diagrama de dosagem, que correlaciona a resistência à compressão, relação a/c, traço e consumo de cimento. O início do estudo experimental parte da avaliação preliminar de parâmetros para um traço intermediário de 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa) para definição do teor ideal de argamassa e, baseado nas informações dessa mistura, confeccionam-se mais duas, sendo uma rica (1:3,5) e outra mais pobre (1:6,5).

Para encontrar o teor de argamassa ideal, utiliza-se uma planilha com os cálculos de cada componente do concreto, o cimento, a areia, a brita e os resíduos graúdo e miúdo.

**1. Determinação do teor ideal de argamassa:** o objetivo desta fase é determinar o teor ideal de argamassa na mistura do concreto, repercutindo na adequabilidade do concreto quando lançado à forma. Para tal, através de variações no teor de argamassa da mistura, com o traço intermediário estabelecido, é sugerido determinar a proporção adequada por tentativas e observações práticas, descritas a seguir (MALTA, 2012).

- para a introdução dos materiais de modo individual na betoneira, os autores sugerem a seguinte ordem: água (80%); agregado graúdo (100%); agregado miúdo (100%); cimento (100%) e o restante da água;

- com a betoneira desligada, retirou-se todo material aderido nas pás e superfície interna (Figura 15);

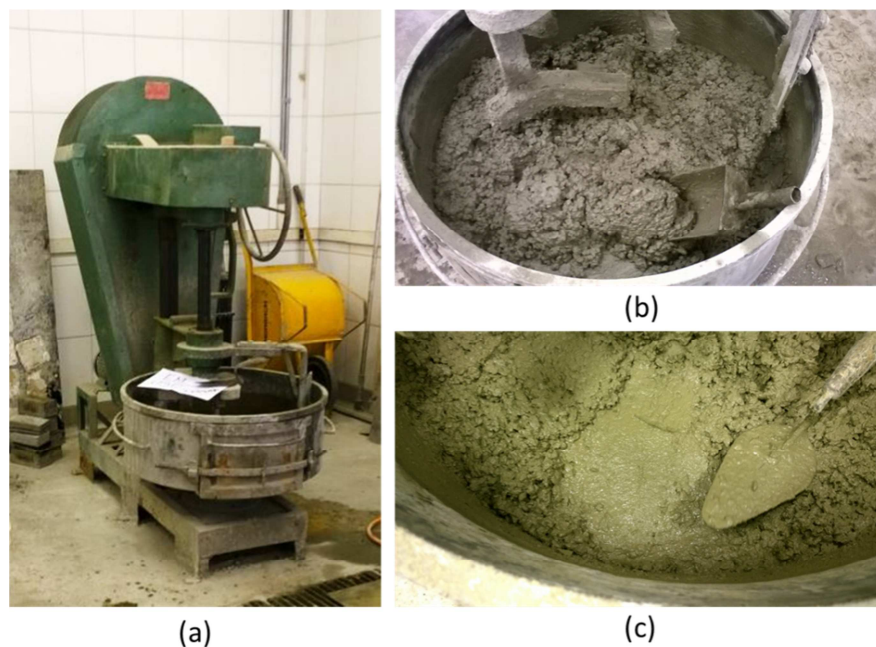


Figura 15–(a) Betoneira horizontal utilizada no ensaio; (b)Materiais misturados na betoneira no início do processo de dosagem; (c) Concreto com teor ideal de argamassa (Fonte: autor).

- com uma colher de pedreiro, foi recolhido todo material para a região inferior da cuba da betoneira, introduzindo os agregados soltos no interior da mistura;

- passou-se a colher de pedreiro sobre a superfície do concreto fresco, foi introduzida ela na massa e levantada no sentido vertical. Verificou-se se a superfície exposta estava com vazios, indicando falta de argamassa (Figura 16 (a, b e c));

- foi verificado se houve desprendimento de agregado graúdo da massa, o que indica falta de argamassa na mistura;

· levantou-se uma porção da massa com a colher de pedreiro e deixado cair a fim de verificar se a mesma cai de forma compacta e homogênea, o que indica teor de argamassa adequado (Figura 16 (d)).

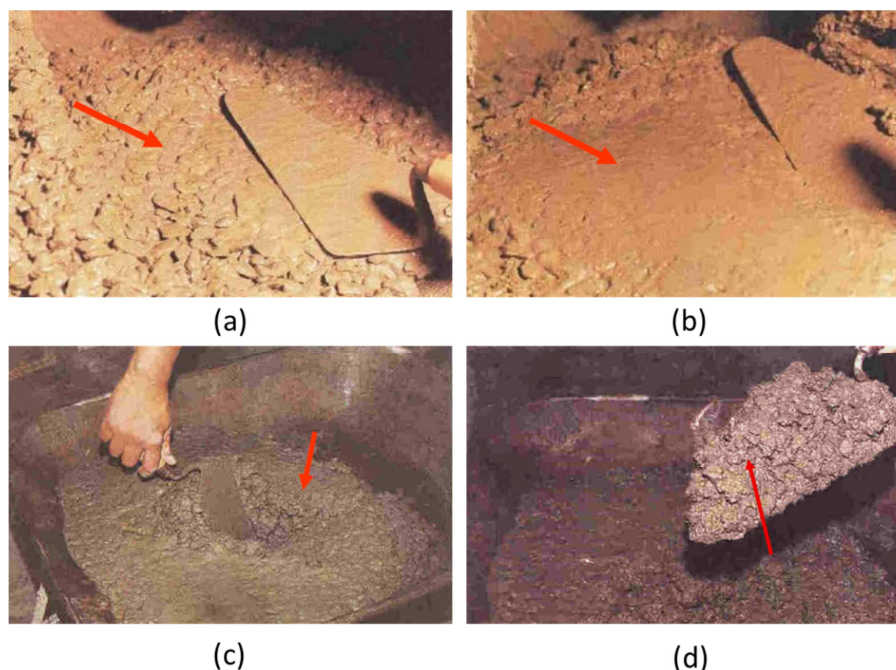


Figura 16 – (a) Aparência da mistura com superfície áspera pela falta de argamassa; (b) Superfície com o teor ideal de argamassa, após nivelamento a superfície está compacta, sem vazios; (c) Superfície exposta com vazios, indicando a falta de argamassa; (d) Concreto indicando o teor de argamassa ideal (Fonte: HELENE e TERZIAN, 1993).

Para a mistura que apresentar um teor adequado de argamassa a partir das verificações anteriores, foi determinado o abatimento do tronco de cone conforme a norma NM 67 (ABNT, 1998). Primeiramente, foi umedecido o molde e a placa de base e colocado o molde sobre a placa de base. Durante o preenchimento do molde com o concreto de ensaio, o operador se posicionou com os pés sobre suas aletas, de forma a mantê-lo estável. Encheu-se rapidamente o molde com o concreto em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde compactado. Compactou-se cada camada com 25 golpes da haste de socamento. Foram distribuídos uniformemente os golpes sobre a seção de cada camada. Para a compactação da camada inferior, foi necessário inclinar levemente a haste e efetuar cerca de metade dos golpes em forma de espiral até o centro. Compactou-se a camada inferior em toda a sua espessura (etapa 1 – Figura 17). Compactou-se a segunda camada e a camada superior, cada uma através de toda sua espessura e de forma que os golpes apenas penetrem na camada

anterior (etapas 2 e 3 – Figura 17). No preenchimento e na compactação da camada superior, foi acumulado o concreto sobre o molde, antes de iniciar o adensamento.

Se, durante a operação de compactação, a superfície do concreto ficar abaixo da borda do molde, adicionar mais concreto para manter um excesso sobre a superfície do molde durante toda a operação da camada superior, rasar a superfície do concreto com uma desempenadeira e com movimentos rolantes da haste de compactação (etapa 4 –Figura 17). A placa de base foi limpa e retirado o molde do concreto, levantando-o cuidadosamente na direção vertical. A operação de retirar o molde deve ser realizada em 5 s a 10 s, com um movimento constante para cima, sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral (etapa 5 – Figura 17). A operação completa, desde o início de preenchimento do molde com concreto até sua retirada, deve ser realizada sem interrupções e a duração total do ensaio deve ser de no máximo 5 min, desde a coleta da amostra até o desmolde (final do ensaio). Imediatamente após a retirada do molde, foi medido o abatimento do concreto, determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo-de-prova, que corresponde à altura média do corpo-de-prova desmoldado (etapa 6 –Figura 17), aproximando aos 5 mm mais próximos. Para os ensaios foi utilizado um abatimento de  $60 \pm 10$  mm.

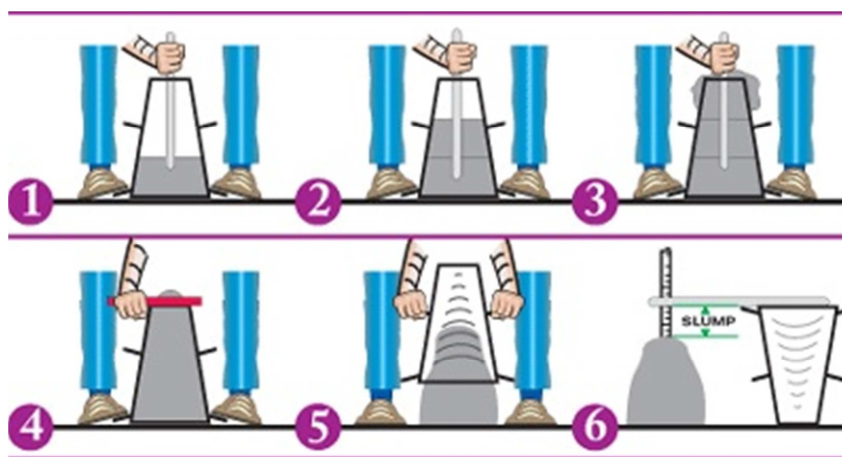


Figura 17 – Etapas do teste de Slump(Fonte: ABESC, 2016).

Caso o mesmo não atinja a faixa estabelecida, deve-se acrescentar a quantidade de água suficiente. Atendido o resultado desejado(Figura 17), foram determinadas as características do concreto fresco como: relação água/cimento(Equação 3), consumo de cimento/ $m^3$  de concreto(Equação 7), consumo de água/ $m^3$  de concreto(Equação 9) e a massa específica do concreto fresco (ME). A determinação da ME é realizada, conforme (Equação 16).

$$ME = \frac{m_{cpd} - m_{cpa}}{V} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

$m_{cpd}$  = massa do molde do corpo de prova preenchido com concreto, em kg;

$m_{cpa}$  = massa do molde do corpo de prova sem concreto, em kg;

$V$  = volume do molde do corpo de prova, neste caso corpo de prova cilíndrico nas dimensões de 10 cm (diâmetro) x 20 cm (altura), em  $\text{kg/m}^3$ ;

Para finalizar esta etapa, foram moldados os corpos-de-prova (CPs) nas idades a serem ensaiadas e com o número de amostras determinado pelo executor, conforme NBR 5738 (ABNT, 2016). Para cada traço são produzidos 10 corpos de prova (Figura 18).



Figura 18 – Corpos de prova após adensamento na mesa vibratória para a dosagem do concreto sem adição de resíduo (Fonte: Autor).

A partir dos dados da ME obtida para cada traço, de cada dosagem, pode-se calcular o consumo de cimento através da equação de Molinari, (Equação 17):

$$C = \frac{ME}{1 + a + p + a/c} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

$C$  = consumo de cimento, em kg;

$ME$  = massa específica do concreto em estado fresco, em  $\text{kg/m}^3$ ;

$a$  = massa de areia no traço, em kg;

$p$  = massa de brita no traço, em kg;

$a/c$  = relação água/cimento em massa, em kg/kg;

Obs: Para os traços que levam resíduo em sua composição, as massas devem ser somadas as da areia e/ou brita utilizada.

**2. Obtenção dos traços auxiliares:** a nova etapa do estudo de dosagem é produzir mais dois traços auxiliares, para montar o diagrama de dosagem, sendo um mais rico e outro mais pobre. Esses traços devem manter fixo o teor de argamassa ( $\alpha$ ) e o abatimento do tronco de cone, determinados para o traço de 1:5. Após isso fazer as mesmas determinações para o concreto fresco descritas anteriormente e moldar as mesmas quantidades de corpos-de-prova para as mesmas idades de 7, 14 e 28 dias.

Após a ruptura dos corpos-de-prova utilizam-se dos dados para obtenção das várias equações matemáticas necessárias para construção do Diagrama de Dosagem, de onde se obtêm o traço adequado para a obra, como relação  $a/c$ , traço ( $m$ ) e o consumo de cimento (DAL MOLIN, 2014). A Figura 19 mostra o diagrama de dosagem estilizado do método.

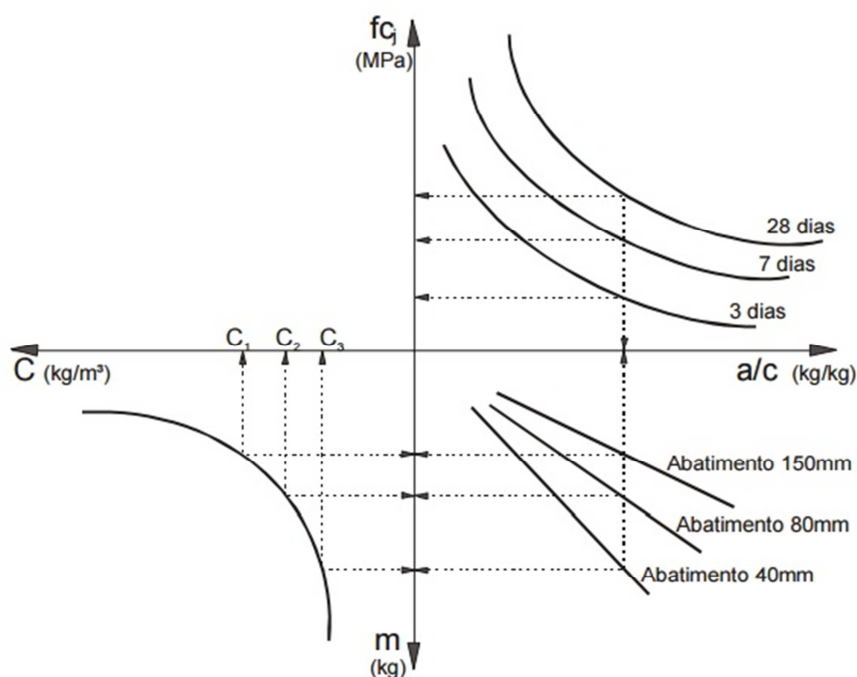


Figura 19 – Diagrama de dosagem, método IPT/EPUSP, modelo de comportamento (Fonte: HELENE E TERZIAN, 1993).

### 3.1.10 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão seguiram a NBR 5739 (ABNT, 2007), utilizando corpos de prova cilíndricos de 10x20cm, mantidos até a idade de ensaio (7, 14 e 28



dias) em processo de cura úmida. Antes da execução dos ensaios, os corpos de prova, três por idade, foram retificados e preparados para os ensaios conforme norma supracitada.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME), localizado no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Figura 20) e os resultados da resistência à compressão expressos em Mega Pascal (MPa).



Figura 20 – Equipamento utilizado na ruptura dos corpos de prova (Fonte: Autor).

### 3.1.11 Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto em estado seco

O ensaio é realizado baseado na norma NBR 9778 (ABNT, 2005), sendo primeiramente cada corpo de prova levado para secagem em estufa por 24 horas (tempo em que não houve diferença de massa), realizando a medição da massa do concreto em estado seco. Após, a amostra é imersa em água à temperatura de  $23\pm 2$  °C e mantida durante 72 horas nessa condição. Nesta etapa, para os corpos de prova do traço 1:5 (intermediário) para o concreto convencional e cada substituição, foram realizadas pesagens para a montagem das curvas de absorção nos tempos de 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20 e 30 minutos, 1 hora, 4 horas e 30 minutos, 8, 24, 48 e 72 horas. Para os outros traços (1:3,5 e 1:6,5) a pesagem ocorreu apenas nas 72 horas, retirando a amostra da água e enxugando em pano úmido em todas as medições. Após o período de imersão, foram determinadas e registradas as massas com auxílio da balança hidrostática.

Para determinar a absorção de água (A), em porcentagem, utiliza-se a (Equação 18),

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

$m_{sat}$  é a massa da amostra saturada em água após a imersão, em kg;

$m_s$  é a massa da amostra seca em estufa, em kg.

O índice de vazios ( $I_v$ ), em porcentagem, é dado pela (Equação 19):

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 19})$$

Onde:

$m_i$  é a massa da amostra saturada imersa em água, em kg.

Ainda, a massa específica real ( $\rho_r$ ) pela seguinte expressão(Equação 20):

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (\text{Equação 20})$$

E, finalmente, a massa específica da amostra seca ( $\rho_s$ ), pela (Equação 21):

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (\text{Equação 21})$$

### 3.1.12 Carbonatação

A profundidade de carbonatação é um teste largamente utilizado na construção civil para avaliar a durabilidade do concreto, apesar de não ser normalizado no Brasil. Em geral a profundidade de carbonatação no concreto é medida através do emprego de indicadores como a fenolftaleína, borrifados em perfis do concreto de cobrimento (GEYER, 2001).

Ainda segundo Geyer (2001), a solução de fenolftaleína (dissolvida a 1% em álcool etílico e água- 1g de fenolftaleína dissolvida em 50g de álcool e 50g de água) é incolor em pH inferior a 8,3. Para valores de pH superiores a 9,5 torna-se vermelho-carmin (violeta). Entre 8 e 9,5 fica com coloração variável de rosa a vermelho-carmin. Abaixo desses pHs de modificação, o concreto tende a não sofrer alteração de cor quando da aspersão do indicador (mantém-se incolor). Tem-se, então, com a linha divisória entre a região incolor e a de coloração típica, uma clara evidência do avanço da frente de carbonatação para o interior do

concreto de cobertura. Em nível prático, admite-se que o concreto não está carbonatado quando, ao se aspergir o indicador químico, ele adquirir em sua superfície a coloração típica; caso fique incolor assume-se que o concreto está carbonatado (Figura 21).

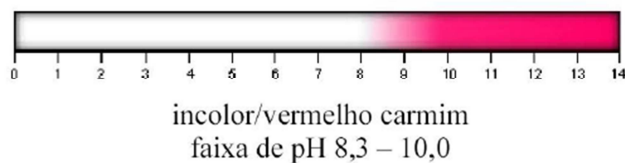


Figura 21 – Ponto de viragem da fenolftaleína (Fonte: CASTRO, 2003).

Para o ensaio de carbonatação foram utilizados corpos de prova (10x20cm) com 60 e 90 dias de idade e realizado para o traço 1:5 de cada dosagem (CC, 0R, 25R, 50R, 75R e 100R). As amostras foram impermeabilizadas nas suas extremidades com parafina, conforme mostra a Figura 22.



Figura 22 - Impermeabilização das extremidades dos corpos de prova para carbonatação (Fonte: Autor).

Os corpos de prova passaram por ruptura, e imediatamente após esta etapa, foram aspergidos com a solução de fenolftaleína ao qual indica a frente carbonatada, baseando-se na CPC-18 (RILEM, 1988).

Em seguida foram realizadas as leituras com auxílio de paquímetro, correspondentes de cada lado da profundidade carbonatada, em mm.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Estudo Granulométrico dos Agregados

#### 4.1.1 Agregado miúdo natural e reciclado – Areia e casca cerâmica

As características físicas e a distribuição granulométrica da areia e da casca cerâmica – NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009) - são apresentadas na Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 - Propriedades do agregado miúdo – areia e casca cerâmica (Fonte: Autor).

	<b>Agregado natural Areia</b>	<b>Agregado reciclado Casca cerâmica</b>
<b>Massa específica aparente do agregado seco</b>	2,58 g/cm <sup>3</sup>	2,68 g/cm <sup>3</sup>
<b>Absorção de água</b>	0,4 %	2,64 %
<b>Módulo de finura</b>	2,65	3,10

A determinação da massa específica aparente dos materiais é muito importante para a dosagem de concreto, pois conhecendo o seu resultado é possível calcular o consumo de materiais utilizados para produção das misturas. A massa específica aparente do material pode ser definida como a massa do material por unidade de volume, incluindo os vazios internos do mesmo. A massa específica do agregado miúdo natural é cerca de 3,7 % menor que a do agregado miúdo reciclado.

Nos agregados naturais normalmente utilizados nas misturas de concreto a taxa de absorção do material geralmente tem índices muito baixos e sua influência para produção de concretos convencionais não é considerada, neste caso, 0,4% para a areia e 0,18% para a brita 0 (Tabela 4 e Tabela 6). Segundo DjerbiTegguer (2012) a quantidade de água absorvida depende principalmente da quantidade e continuidade dos poros na partícula, ao passo que a taxa de absorção depende do tamanho e também da continuidade desses poros, fatores secundários como o tamanho das partículas também podem ter um efeito.

O agregado miúdo reciclado tende a uma composição granulométrica um pouco mais grossa que o agregado natural, resultando em um módulo de finura um pouco maior, como pode ser visto na Tabela 4(2,65 para a areia e 3,10 para o resíduo). Além disso, a forma das partículas exerce uma influência muito grande na produção de concretos, principalmente sobre a trabalhabilidade, compacidade e quantidade da água de amassamento necessária à mistura, podendo ser notado ao longo do trabalho.

Tabela 5 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo – areia e casca cerâmica (Fonte: Autor).

Peneiras (mm)	Limite Inferior (%)		Limite Superior (%)		Amostra (%) Areia	Amostra (%) Casca cerâmica
	Utilizável	Ótima	Ótima	Média	Média	Média
<b>4,75</b>	0	0	5	10	0,2	1,0
<b>2,36</b>	0	10	20	25	6,5	18,3
<b>1,18</b>	5	20	30	50	20,8	37,4
<b>0,6</b>	15	35	55	70	48,9	68,5
<b>0,3</b>	50	65	85	95	89,3	87,3
<b>0,15</b>	85	90	95	100	99,4	97,4

A moagem e posterior distribuição granulométrica foi realizada em comparação com a areia utilizada, sendo que os ensaios seguiram a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Como pode ser observado na Figura 23, as distribuições granulométricas dos agregados miúdos utilizados, areia e casca cerâmica, ficaram com curvas/faixas muito próximas (dentro dos limites da norma), o que é desejável para o andamento correto dos ensaios.

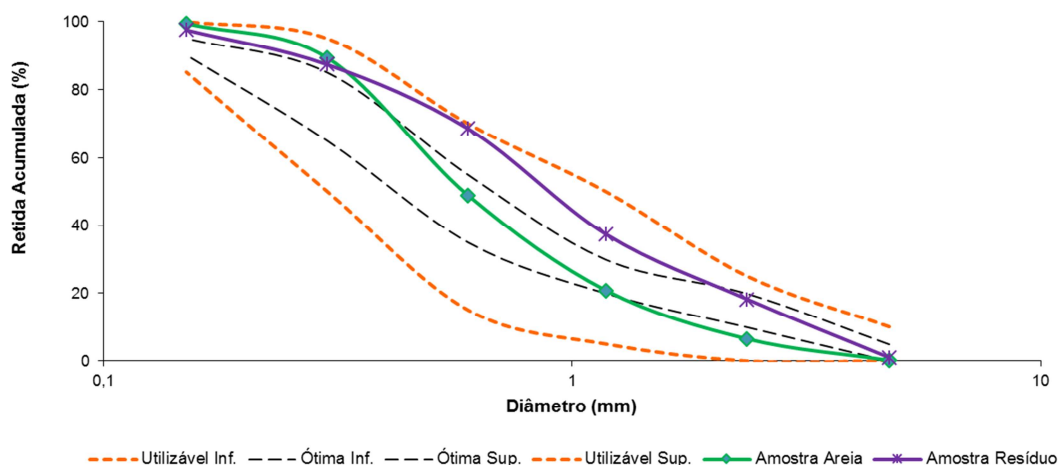


Figura 23 - Distribuição granulométrica comparativa dos agregados miúdos – Areia e Casca cerâmica (Fonte: Autor).

Ao analisar os dados obtidos, observa-se que quanto maior o módulo de finura dos agregados, maior é o tamanho de suas partículas, o que diminui a superfície específica dos agregados e, por consequência, a necessidade de pasta para lubrificar os grãos. De acordo com o resultado do módulo de finura, seria possível dizer que a demanda de água para o agregado miúdo reciclado deve ser maior a do agregado natural, no entanto outras propriedades também devem ser levadas em consideração quando se analisa a quantidade de água necessária para as misturas, como por exemplo, o formato e a textura das partículas.

É consenso que todas estas características dos agregados reciclados discutidas são consequência do material de origem e do tipo de britador escolhido para o beneficiamento do material. Já que o britador de mandíbulas acentua a forma angular e o britador giratório torna as partículas mais arredondadas.

#### 4.1.2 Agregadograúdo natural e reciclado – Brita 0 e casca cerâmica

As características físicas e a distribuição granulométrica da Brita 0 e da casca cerâmica – NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009) - são apresentadas na Tabela 6 e Tabela 7.

O percentual retirado de borra metálica (pedaços de metal) da amostra total de casca cerâmica utilizada foi de 1,9 %. Este material é deixado pelo processo de vazamento do metal líquido no molde, na etapa do processo de fundição e pode ser reutilizado, podendo ser reincorporado no processo de fusão do aço.

Tabela 6 - Propriedades do agregado graúdo – Brita 0 e casca cerâmica (Fonte: Autor).

	<b>Agregado natural Brita 0</b>	<b>Agregado reciclado Casca cerâmica</b>
<b>Massa específica aparente do agregado seco</b>	2,63 g/cm <sup>3</sup>	2,29 g/cm <sup>3</sup>
<b>Massa unitária</b>	1,33 kg/m <sup>3</sup>	1,26 kg/m <sup>3</sup>
<b>Absorção de água</b>	0,18 %	4,68 %
<b>Dimensão máxima característica</b>	12,5 mm	12,5 mm
<b>Índice de forma</b>	4,73	2,61

A dimensão máxima característica do agregado graúdo é 12,5 mm com 99,38% dos grãos passantes nesta peneira para a brita 0 e 99,58% para a casca cerâmica, o que está dentro dos limites estabelecidos pela norma da NM 248 (ABNT, 2003).

A massa específica do agregado miúdo natural é cerca de 12,9 % menor que a do agregado miúdo reciclado.

Nos agregados naturais normalmente utilizados nas misturas de concreto a taxa de absorção do material geralmente tem índices muito baixos e sua influência para produção de concretos convencionais não é considerada (neste caso, 0,4% para a areia e 0,18% para a brita 0). Considera-se que o sistema de beneficiamento dos resíduos e a sua composição devem ter influência direta sobre os resultados obtidos quando em comparação dos resultados para os agregados reciclados miúdo (2,64%) e graúdo (4,68%).

Tabela 7– Distribuição granulométrica do agregado graúdo – Brita 0 e casca cerâmica (Fonte: Autor).

<b>Peneiras (mm)</b>	<b>Limites Brita 0 (%)</b>		<b>Amostra (%) Brita 0</b>	<b>Amostra (%) Casca cerâmica</b>
	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Média</b>	<b>Média</b>
<b>12,5</b>	0	5	0,6	0,4
<b>9,5</b>	2	15	13,9	14,4
<b>6,3</b>	40	65	49,6	54,8
<b>4,75</b>	80	100	77,3	90,7

Graficamente, tem-se a distribuição granulométrica demonstrada na Figura 24.

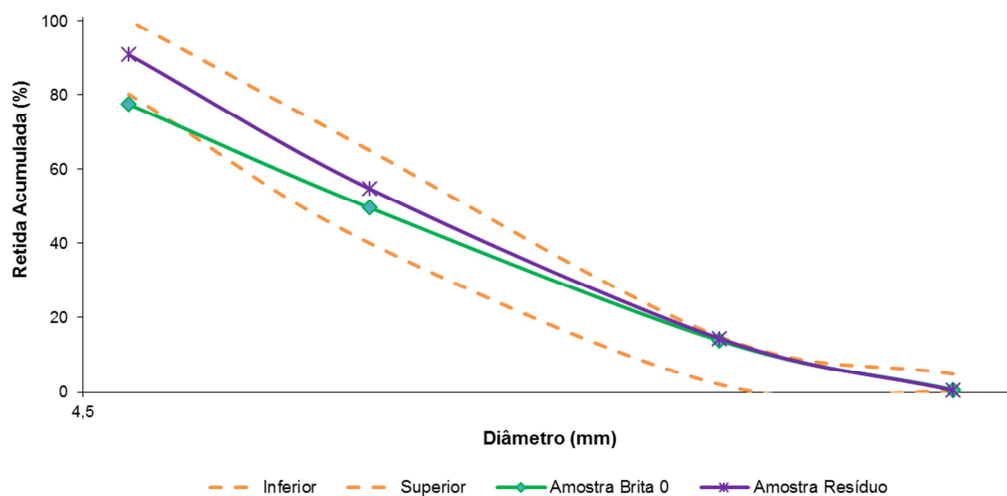


Figura 24 - Distribuição granulométrica comparativa dos agregados graúdos – Brita 0 e Casca cerâmica (Fonte: Autor).

A moagem e posterior distribuição granulométrica foi realizada em comparação com a brita utilizada, sendo que os ensaios seguiram a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Como pode ser observado na Figura 24, as distribuições granulométricas dos agregados graúdos utilizados, brita 0 e casca cerâmica, ficaram com curvas/faixas dentro dos limites aceitáveis estabelecidos na norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

O índice de forma foi obtido através dos dados apresentados no Anexo 4. Para o agregado graúdo natural o resultado foi de 4,73. Este resultado se deve ao fato do material ser lamelar (é um parâmetro de forma do agregado onde a espessura é pequena em relação às outras dimensões). Este parâmetro ou índice está entre as diversas características importantes que precisam ser avaliadas para qualificar os agregados, edepende da origem da rocha e também do processo de britagem. A origem do agregado utilizado é o basalto, que apesar de serem magmáticas, comumente fornecem britas de formatolamelar devido ao intenso diaclasamento (fraturas de descamação) dessas rochas e também devido ao processo de britagem. Britas com partículas lamelares no concreto acumulam mais bolhas de ar e água de exudação sob elas, o que prejudica a durabilidade e reduz a resistência do concreto. A NBR 7211 (ABNT, 2009) estabelece que o índice de forma dos agregados Graúdos não seja superior a 3, que seria o limite ideal para o trabalho com o agregado.



### 4.1.3 Caracterização química da casca cerâmica

A espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) é uma técnica bem estabelecida para análise elementar, monitoramento de processos e caracterização química quantitativa e qualitativa de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos. A FRX tem sido usada para cimentos e refratários, mineração, petroquímica, monitoramento de impactos ambientais e avaliação de fontes alternativas aos recursos renováveis. Pesquisa em Materiais necessita de análise microestrutural+análise elementar para estudo de materiais e desenvolvimento de opções aos materiais existentes (USP, 2016).

A fim de saber qualitativa e quantitativamente qual a composição básica da casca cerâmica foi realizada a análise de fluorescência de raios-X em laboratório da UFRGS. O resultado da análise pode ser visualizada no Anexo 7.

Os principais componentes químicos presentes são o  $\text{SiO}_2$  (sílica) e o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (revestimento/chamote). Conhecendo o processo de microfusão, já era sabido que estes componentes estariam ressaltados na casca cerâmica.

## 4.2 Concreto Produzido pelo Método IPT EPUSP de Dosagem

Com os dados obtidos através das dosagens realizadas, foram montados os gráficos de dosagem com suas curvas. Todos seguiram os mesmos passos para construção e, na Figura 25 está exemplificado o gráfico para o concreto sem adição de resíduos (convencional - CC). Para os demais, serão realizados comparativos tendo os dados do CC como referência, e analisados os parâmetros separadamente ao longo deste capítulo.

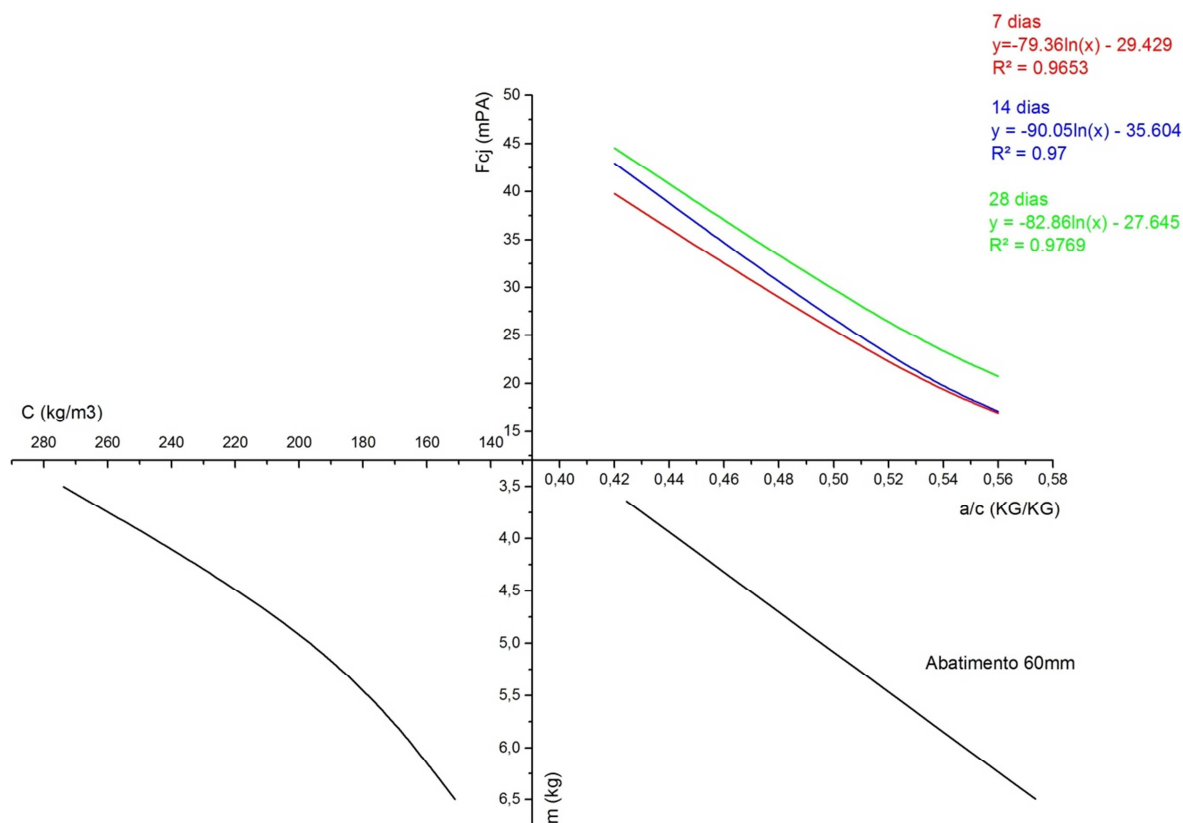


Figura 25 - Curva de dosagem para o CC (Fonte: o Autor).

O teor de argamassa ( $\alpha$ ) foi ajustado ao realizar a dosagem do traço 1:5 de cada substituição, conforme descrito no capítulo anterior. Para a dosagem 50M o valor obtido foi 43% e para os demais, todos apresentaram o mesmo  $\alpha$ , 45%, incluído o concreto convencional.

#### 4.2.1 Concreto em estado fresco – Massa específica aparente, relação a/c e consumo de cimento

Ao terminar a dosagem, obtendo o abatimento de tronco de cone desejado ( $60 \pm 10$  mm), obteve-se os valores para a massa específica de cada traço de cada dosagem realizada (Figura 26), obtida através da (Equação 16).

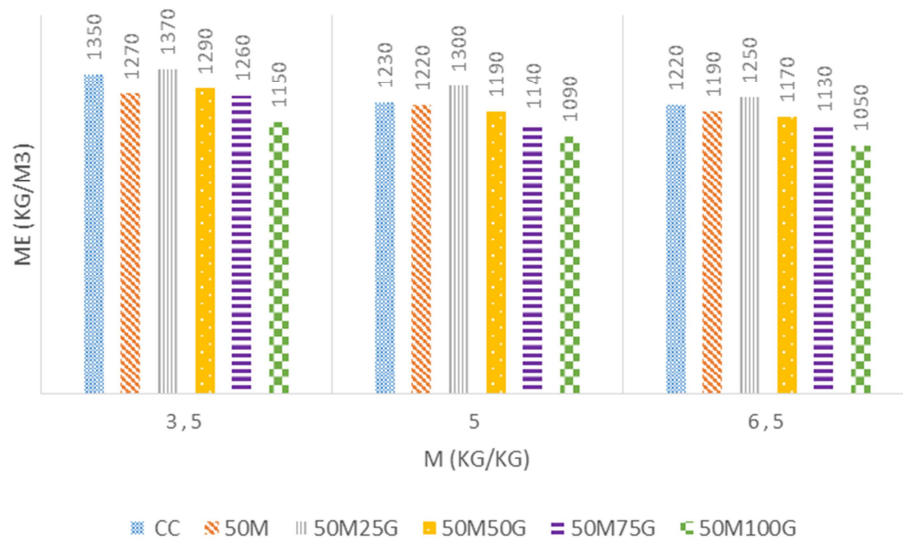


Figura 26 - Massa específica para o concreto em estado fresco(Fonte: Autor).

Como pode ser observado na Figura 26, todos os tipos de concreto apresentaram a mesma tendência, aonde a massa específica para o traço rico (rico em cimento) é maior, seguida pelo traço intermediário e o traço pobre. O CC apresentou a segunda maior massa específica, sendo menor apenas do concreto 50M25G.

Outro aspecto importante a ser analisado é a relação a/c dos concretos produzidos. Para melhor visualização, a Figura 27 demonstra os resultados obtidos.

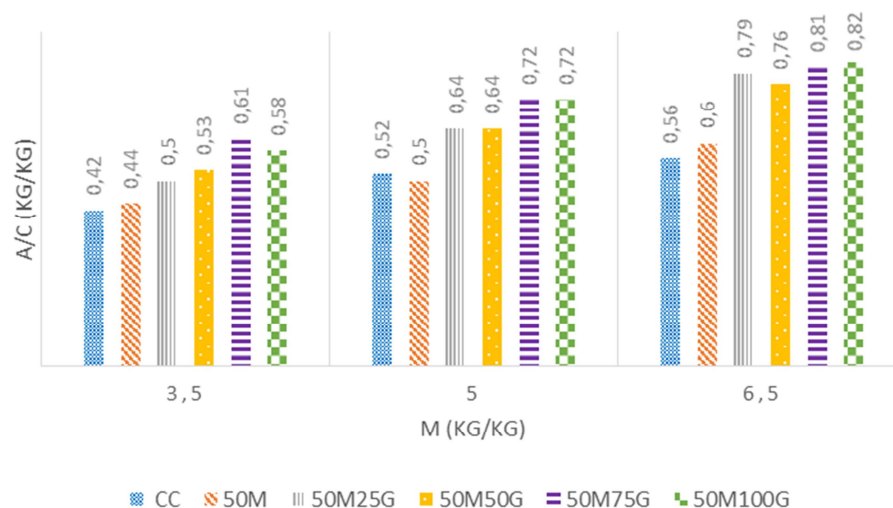


Figura 27 - Relação a/c para os diferentes concretos dosados(Fonte: Autor).

Como pode ser observado, o comportamento da relação a/c com a adição do resíduo como agregado segue o previsto em literatura, sendo maior com o aumento da

incorporação da casca cerâmica no concreto, já que há maior absorção de água. González-Fonteboet al. (2011) constataram que o uso de agregado reciclado que tem maior capacidade de absorção de água que os agregados naturais, tornou os valores de absorção de água obtidos para os concretos reciclados superiores em relação aos convencionais. Além disso, eles observaram que quando aumentava a porcentagem de substituição, maiores eram os valores de absorção de água.

Estes resultados confirmam também a importância de ser estudada a absorção dos materiais e a utilização ou não da molhagem (imersão) do material cerâmico antes da dosagem. Neste caso o processo de deixar o resíduo em contato com água antes da dosagem não foi realizado, pois pensando em escala industrial (incentivador deste projeto) seria um processo a mais, que acaba trazendo dificuldades de implantação e aumento de custo para a linha. Na tentativa de reduzir a relação a/c poderia ser utilizado aditivo como uma opção para ser obtida a trabalhabilidade necessária e manter uma relação a/c dentro de uma faixa pré-estabelecida.

No Anexo 6 estão apresentados os resultados do tratamento estatístico obtidos na ANOVA, onde os valores de “F calculados” (F) foram comparados com os valores de “F tabelados” ( $F_{crítico}$ ) para um nível de significância de 5%. Esta análise mostrou que o resultado obtido é significativo tanto entre as dosagens quanto entre os traços, uma vez que o valor F é maior do que o  $F_{crítico}$ . Para verificar onde há diferença, foi utilizado o teste de Turkey para o traço e a dosagem. A diferença significativa está entre os traços 3,5e 6,5 e entre as dosagens CC e 50M25G, CC e 50M50G, CC e 50M75G, CC e 50M100G, 50M e 50M25G, 50M e 50M50G, 50M e 50M75G, 50M e 50M100G.

Com os dados da massa específica e a relação a/c é obtido o consumo de cimento (Lei de Molinari) para cada um dos casos estudados (Figura 28).

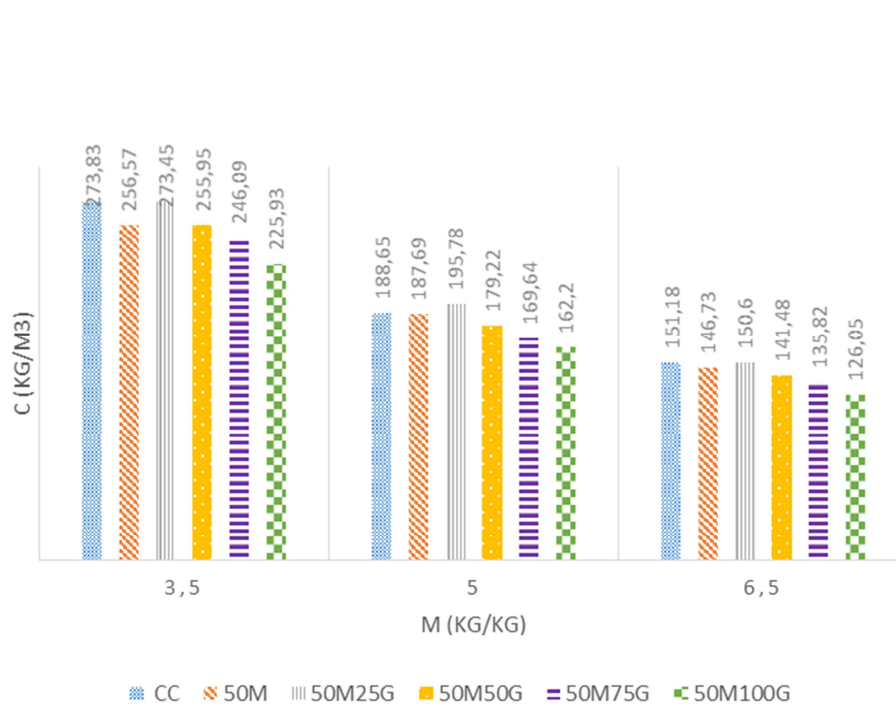


Figura 28 - Consumo de cimento para os diferentes concretos dosados (Fonte: Autor).

O que pode ser verificado é que o consumo de cimento é maior para o traço rico, seguido pelo traço intermediário e depois o traço pobre.

No Anexo 6 estão apresentados os resultados do tratamento estatístico obtidos na ANOVA, onde os valores de “F calculados” (F) foram comparados com os valores de “F tabelados” ( $F_{crítico}$ ) para um nível de significância de 5%. Esta análise mostrou que o resultado obtido é significativo tanto entre as dosagens quanto entre os traços, uma vez que o valor F é maior do que o  $F_{crítico}$ . Para verificar onde há diferença, foi utilizado o teste de Turkey para o traço e a dosagem. A diferença significativa está entre todos os traços (3,5; 5 e 6,5) e entre as dosagens CC e 50M75G, CC e 50M100G, 50M e 50M100G, 50M25G e 50M50G, 50M25G e 50M75G, 50M25G e 50M100G, 50M50G e 50M100G.

Ainda, foram utilizados os gráficos de dosagem para a comparação entre as cinco substituições e o concreto convencional, com os parâmetros de 28 dias e 25 MPa de resistência à compressão (Figura 29).

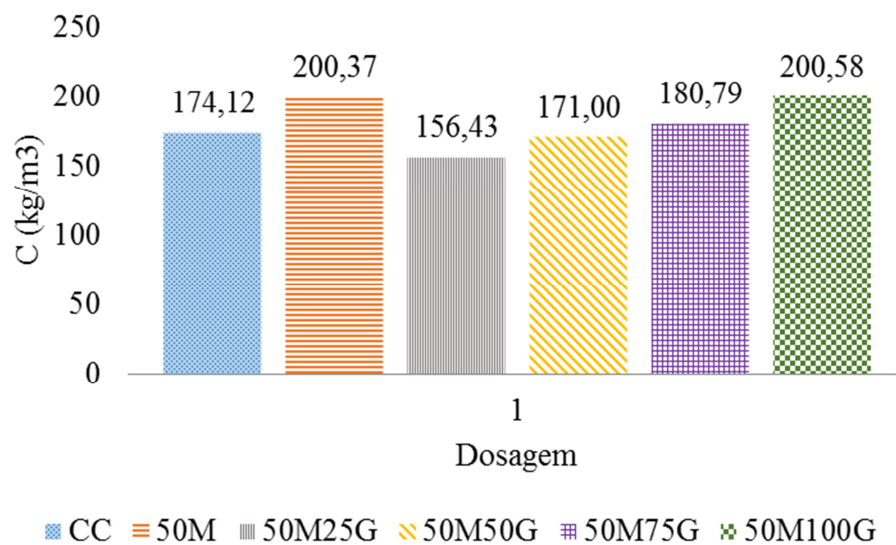


Figura 29 - Consumo de cimento para as dosagens, para um concreto de 28 dias e 25 MPa de resistência à compressão (Fonte: Autor).

O que pode ser observado na Figura 29, é que o comportamento com a adição do resíduo de casca cerâmica se mostrou satisfatório, podendo ser observado que o consumo de cimento é reduzido com a incorporação de uma forma geral. Detalhadamente, quando comparada a dosagem CC e a 50M25G, nota-se uma redução de até  $17,69 \text{ kg/m}^3$  (para um concreto de 25MPa aos 28 dias), o que representa uma minimização de custos e preservação de recursos naturais com a incorporação do resíduo de casca cerâmica no concreto.

#### 4.2.2 Resistência à compressão

Após 7, 14 e 28 dias em processo de cura por imersão, os corpos de prova passaram por testes de compressão axial. Foram realizadas três rupturas para cada dosagem, em cada idade citada, sendo considerado como parâmetro a maior resistência. Um resumo dos dados podem ser visualizados na Figura 30 e também no Anexo 5.

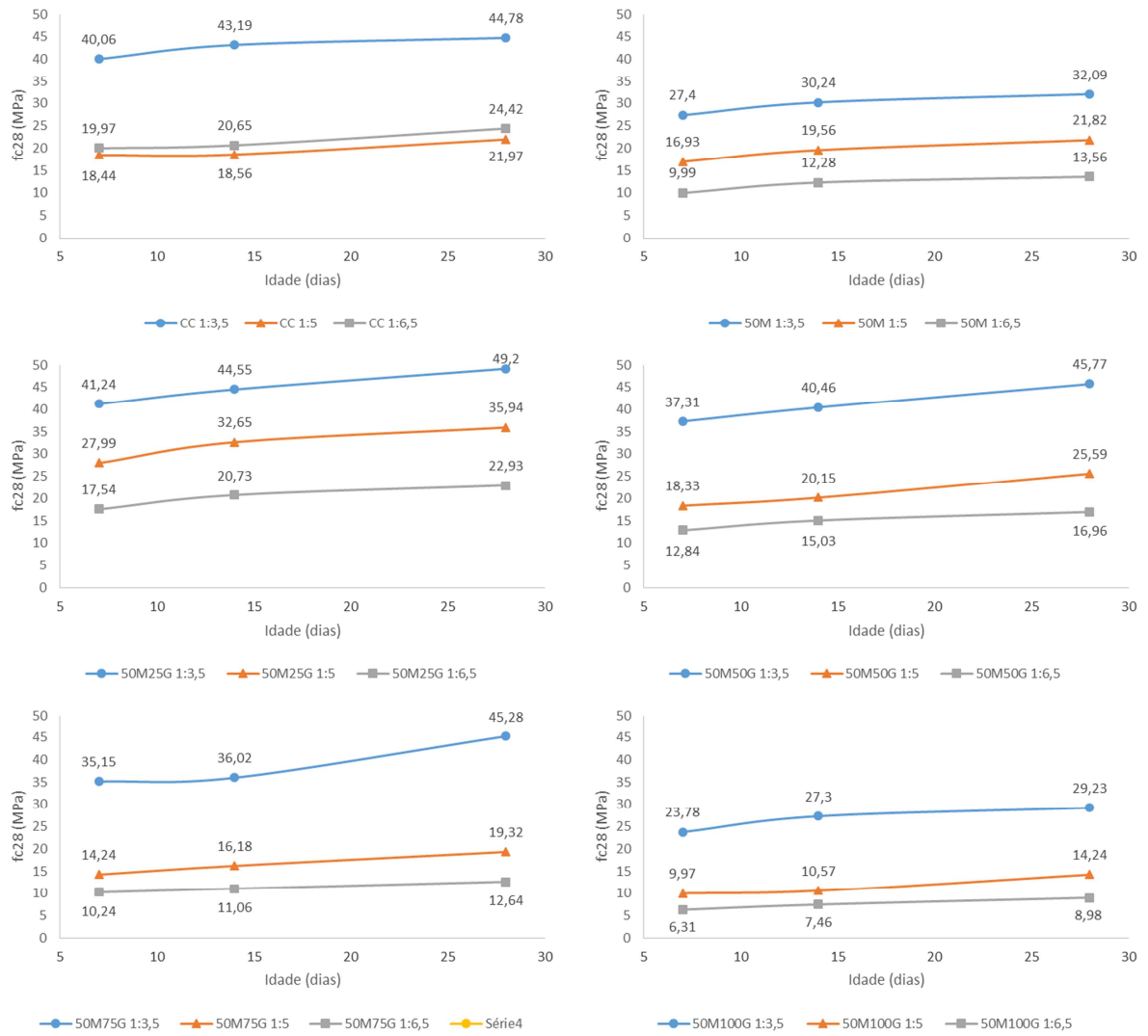


Figura 30 - Resistência à compressão axial para as dosagens e seus traços aos 7, 14 e 28 dias(Fonte: Autor).

Para melhor visualização, foram plotados os dados para a resistência à compressão aos 28 dias, conforme segue.

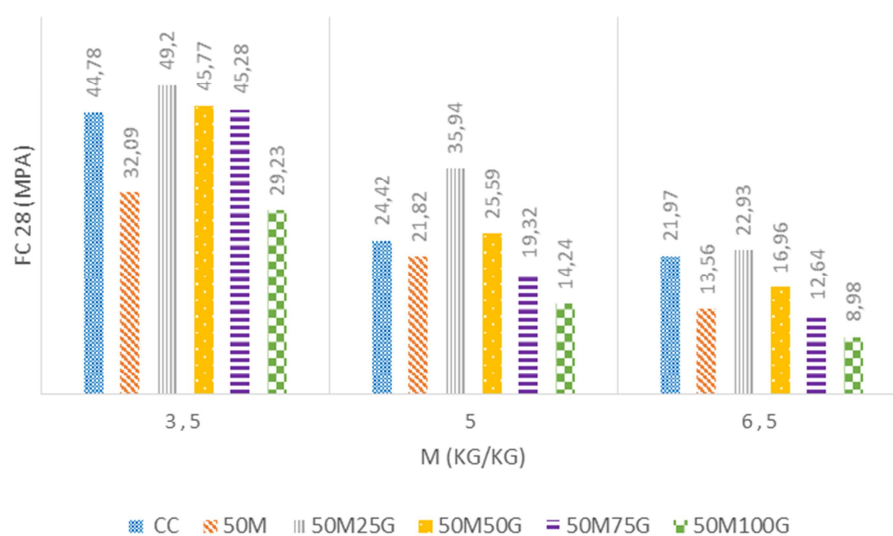


Figura 31 - Resistência à compressão axial aos 28 dias para as dosagens com relação a “m”(Fonte: Autor).

Pode-se notar que a utilização do resíduo somente como agregado miúdo deixou o concreto com menor resistência à compressão. Porém seu uso é adequado quando pensado em escala industrial, já que em sua cominuição há grande geração de finos, os quais podem ser utilizados e estão dentro da faixa granulométrica do agregado miúdo, o que provocaria uma otimização ambiental, gerando menos resíduo. Ainda, para o traço rico, pode-se notar que as adições 50M25G, 50M50G e 50M75G apresentaram maior resistência, inclusive em relação ao traço referência, sem resíduo. Para o traço intermediário, o resíduo continuou demonstrando vantagens quanto a este quesito para as incorporações 50M25G e 50M50G. Finalmente, para o traço pobre em cimento, apenas a dosagem 50M25G apresentou vantagem em seu uso com relação a resistência à compressão.

No Anexo 6 estão apresentados os resultados do tratamento estatístico obtidos na ANOVA, onde os valores de “F calculados” (F) foram comparados com os valores de “F tabelados” (Fcrítico) para um nível de significância de 5%. Esta análise mostrou que o resultado obtido é significativo tanto entre as dosagens quanto entre os traços, uma vez que o valor F é maior do que o Fcrítico. Para verificar onde há diferença, foi utilizado o teste de Turkey para o traço e a dosagem. A diferença significativa está entre todos os traços (3,5; 5 e 6,5) e entre as dosagens CC e 50M100G, 50M e 50M25G, 50M25G e 50M75G, 50M25G e 50M100G, 50M50G e 50M100G.

Outra questão importante de salientar é a de que dependendo do produto que se deseja produzir, pode ser feita a escolha pela dosagem que melhor se adequa as características desejadas e estipuladas em norma específica. Portanto, todas as substituições são importantes



e utilizáveis, mas quanto maior a adição de resíduo e utilização das duas granulometrias (graúdo e miúdo) maior é reciclagem do material e menor é o impacto ambiental tanto para o gerador do resíduo quanto para o processo de fabricação do concreto.

Outra análise que pode ser feita é a correlação entre a resistência à compressão aos 28 dias e a relação a/c (Figura 32), conforme a Lei de Abrams.

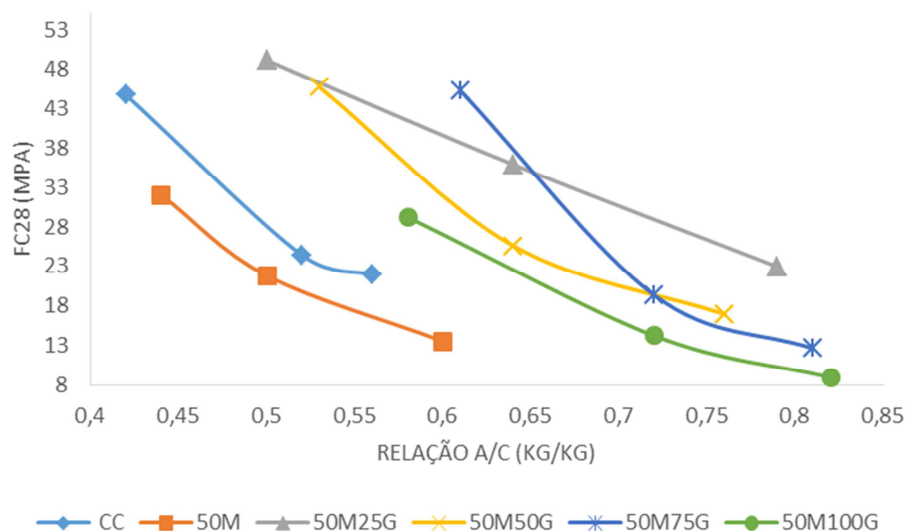


Figura 32 – Resistência à compressão aos 28 dias correlacionada a relação a/c(Fonte: Autor).

A Figura 32 comprova o comportamento já descrito no item 4.2.1, onde quanto maior a relação água/cimento, menor a resistência à compressão do concreto. Este aumento da quantidade de água na dosagem e, posteriormente, o aumento da relação a/c ocorre devido ao resíduo incorporado e sua absorção de água.

O consumo de cimento é um elemento importante a ser observado, já que representa o componente de maior custo nas centrais de dosagem. Para isso, foram organizados os dados do consumo de cimento e da compressão aos 28 dias, conforme Figura 33.

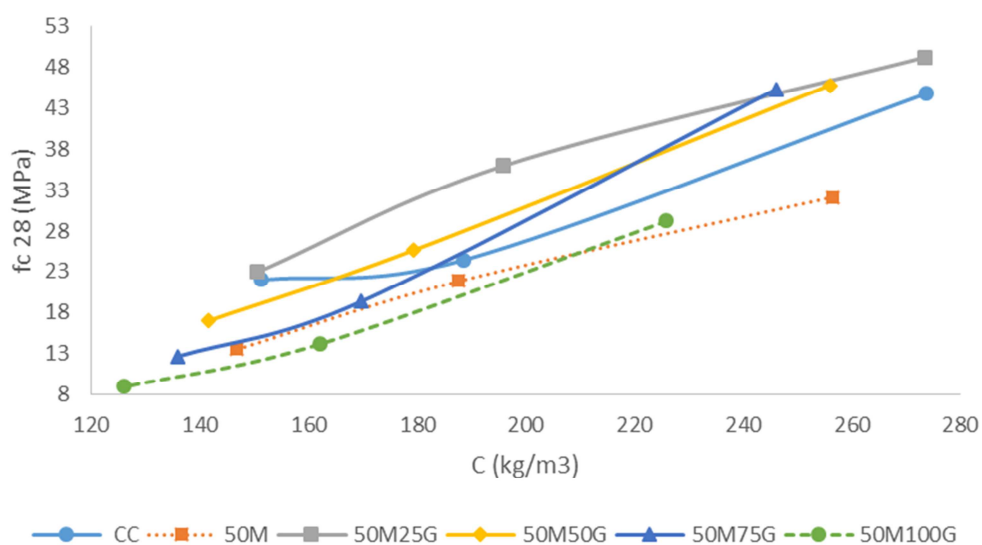


Figura 33 - Resistência à compressão aos 28 dias correlacionada ao consumo de cimento(Fonte: Autor).

Como é sabido e também pode ser visto na Figura 33, quanto maior a quantidade de cimento utilizada em uma dosagem, maior a resistência do concreto. Este gráfico se torna interessante ao analisar as situações em separado, como por exemplo, os concretos 50M50G e o 50M75G apresentam resistências muito próximas (45,77 e 45,28 MPa respectivamente) e uma redução de  $9,86 \text{ kg/m}^3$  no consumo de cimento. Em geral, quanto maior a adição de resíduo na mistura, menor o consumo de cimento. É claro que para a escolha do melhor concreto em cada situação é importante a observação de outros fatores conforme o uso final desejado.

A Figura 34 relaciona a resistência à compressão aos 28 dias com a absorção de água do concreto em estado endurecido para os traços pobre, intermediário e rico (segundo os pontos da esquerda para a direita em cada uma das curvas). Nota-se que as curvas características do concreto com incorporação de casca cerâmica como agregado graúdo e miúdo apresentaram comportamentos distintos quando comparado ao concreto convencional. Para todas as situações, a incorporação de agregado aumentou a absorção de água e a dosagem 50M25G, mesmo com a taxa de absorção maior, apresentou um acréscimo de 9,87% na resistência à compressão entre os traços ricos. Para o traço pobre apenas o 50M25G demonstrou uma resistência maior do que o concreto convencional. Comparando os traços intermediário, o 50M25G teve grande vantagem frente ao concreto convencional, sendo que o 50M50G também apresentou uma resistência maior. Os pontos para os traços rico das dosagens 50M50G, 50M50G e 50M75G apresentaram resultados para a resistência de compressão axial superiores aos valores encontrados no concreto convencional.

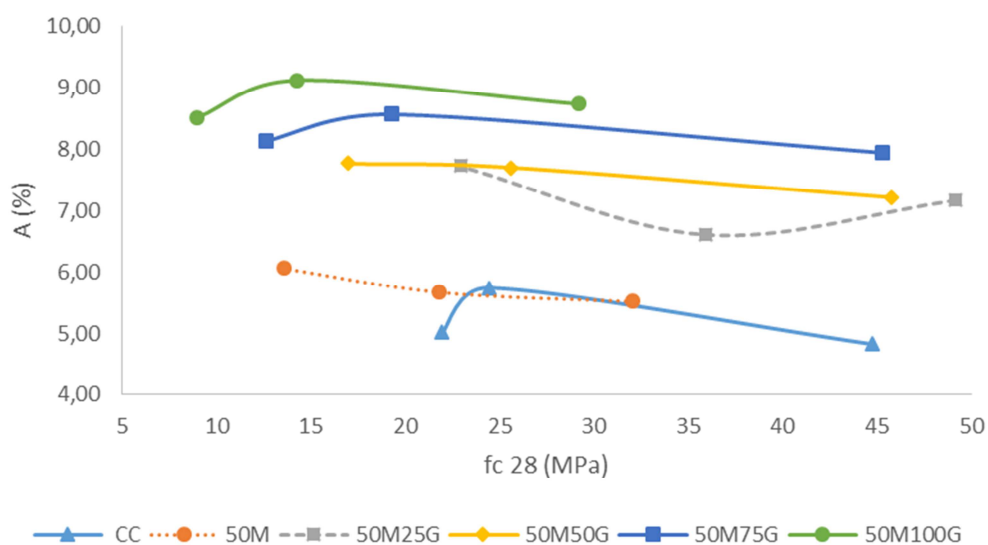


Figura 34 – Resistência à compressão aos 28 dias comparado com o percentual de absorção de água para os traços pobre, intermediário e rico (Fonte: Autor).

Conforme MACHADO Jr. e AGNESINI (1999), os agregados reciclados apresentam grande porosidade e alto teor de absorção, características que podem propiciar uma boa aderência à matriz do concreto e um ganho de resistência entre as primeiras idades e os 28 dias, fatores estes que podem ter ajudado no ganho de resistência à compressão.

#### 4.2.3 Concreto em estado endurecido – Absorção de água, índice de vazios e massa específica real e massa específica da amostra seca

Foram avaliados os comportamentos do concreto endurecido frente à absorção de água, índice de vazios e massa específica real. Primeiramente, a Tabela 1 demonstra os dados da absorção ao longo do tempo para o traço intermediário de cada dosagem.

Tabela 8 – Dados da absorção ao longo do tempo para o traço intermediário (1:5) de cada dosagem(Fonte: Autor).

Tempo	Absorção (%)					
	CC	50M	50M25G	50M50G	50M75G	50M100G
<b>0 min</b>	0	0	0	0	0	0
<b>1 min</b>	0,74	0,32	0,42	0,71	0,91	1,14
<b>3 min</b>	1,05	0,45	0,65	1,23	1,51	1,80
<b>5 min</b>	1,23	0,52	0,89	1,55	1,93	2,28
<b>7 min</b>	1,36	0,64	1,01	1,88	2,25	2,69
<b>10 min</b>	1,54	0,71	1,25	2,20	2,56	3,09
<b>15 min</b>	1,73	0,84	1,43	2,46	3,05	3,53
<b>20 min</b>	1,91	0,90	1,67	2,72	3,30	3,83
<b>30 min</b>	2,10	1,09	1,96	3,11	3,83	4,16
<b>1 h</b>	2,65	1,48	2,68	3,89	4,63	5,04
<b>4h30min</b>	4,32	2,83	4,82	6,02	6,67	7,17
<b>8 h</b>	5,06	3,61	5,71	6,87	7,44	7,95
<b>24 h</b>	5,55	4,96	6,37	7,51	8,08	8,83
<b>48 h</b>	5,74	5,54	6,55	7,64	8,29	9,12
<b>72 h</b>	5,74	5,67	6,61	7,71	8,57	9,12

Para melhor visualização, aFigura 35 demonstra que o percentual de absorção no primeiro minuto é a mais significativa nos primeiros seteminutos e iniciando a sua estabilização a partir das 8 horas de imersão. Ainda, quanto maior a incorporação de material cerâmico, maior a absorção de água ao concreto, excetuando-se apenas a dosagem 50M que apresentou menor absorção de água ao longo de tempo, estando coerente frente a absorção de água dos resíduos como agregado miúdo (2,64%) e graúdo (4,68%).

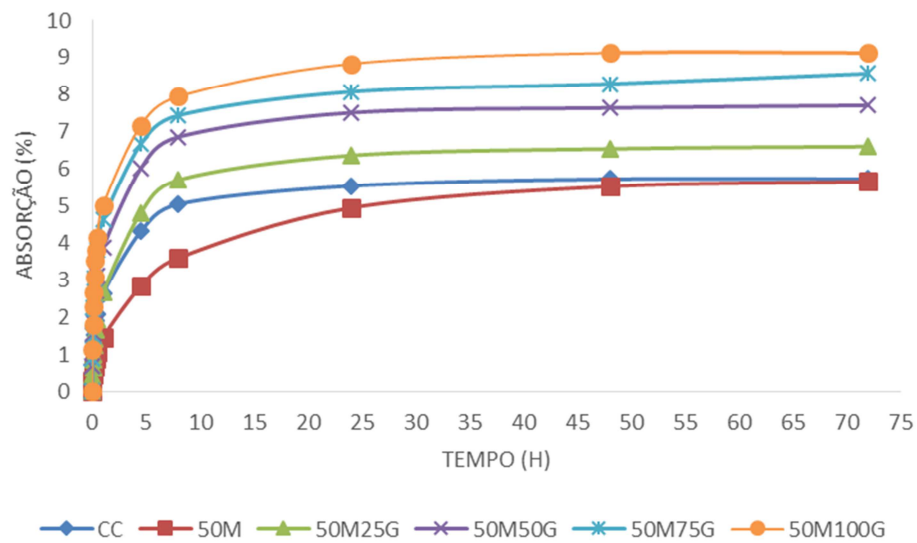


Figura 35 – Absorção de água ao longo do tempo para o traço intermediário (1:5) de cada dosagem (Fonte: Autor).

A seguir, na Figura 36 e Figura 37, está demonstrado que o aumento da relação a/c é diretamente proporcional ao aumento da absorção de água e ainda, aumentando a quantidade de agregado reciclado na mistura, aumenta a taxa de absorção.

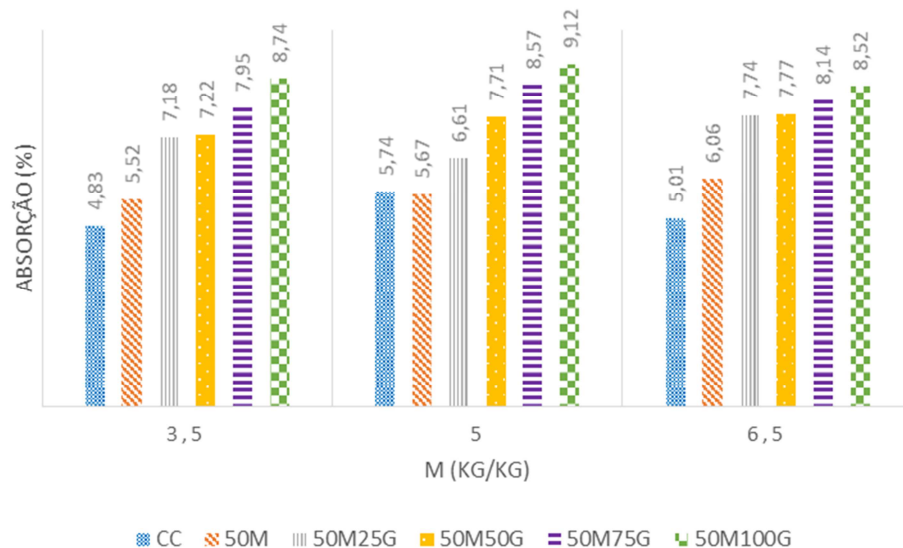


Figura 36 – Absorção de água versus relação agregados secos/cimento em massa (m), para os traços rico, intermediário e pobre, de todas as dosagens (Fonte: Autor).

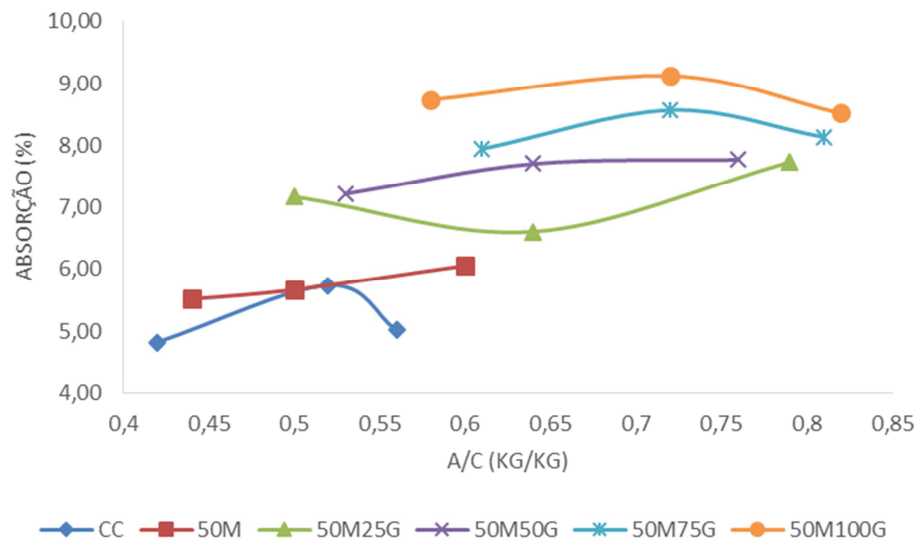


Figura 37 – Absorção e relação a/c para os traços rico, intermediário e pobre para cada dosagem (Fonte: Autor).

O agregado natural é a fase da estrutura do concreto com a maior densidade e, portanto, com o menor índice de vazios (Equação 19) e poros. A porosidade de um concreto é influenciada pelas características da matriz de argamassa, que possui vazios capilares que podem ou não estar conectados. Portanto, os agregados reciclados possuem uma absorção de água maior do que um agregado natural (GONÇALVES, 2001). A observação descrita, pode ser observada na Figura 38, tendo uma pequena variação no índice de vazios para o traço 1:5 da dosagem 50M, que pode ter sido interferido pelo teor de argamassa, ou melhor empacotamento deste, que foi a única dosagem com  $\alpha$  de 43%, sendo de 45% para todos os outros ensaios.

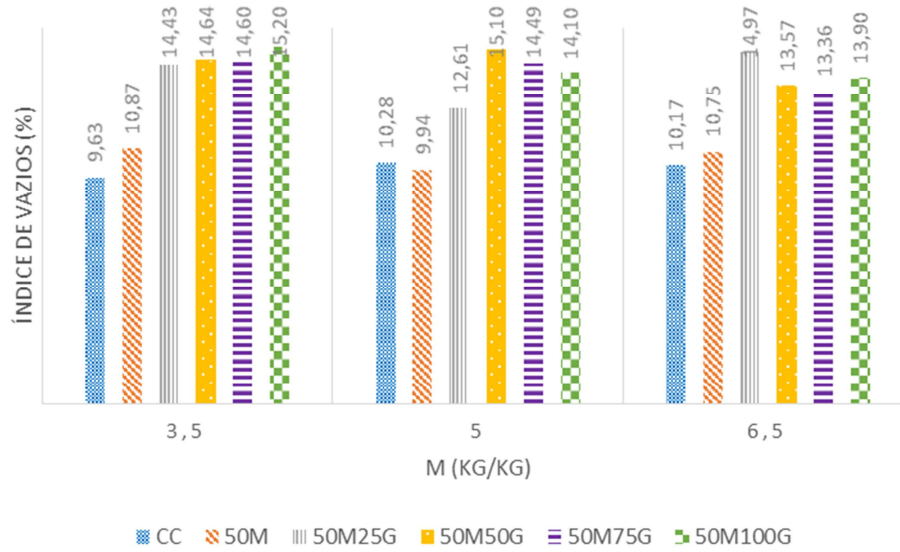


Figura 38 – índice de vazios comparado à relação agregados secos/cimento em massa (m), para os traços rico, intermediário e pobre(Fonte: Autor).

A massa específica real ( $\rho_r$ ) e a massa específica da amostra seca ( $\rho_s$ ) podem ser visualizadas na Figura 39. Através dela pode ser observada a variação entre as dosagens referente aos poros permeáveis e impermeáveis, já que a  $\rho_r$  não leva em consideração os poros, ao contrário da  $\rho_s$ , sendo que esta sempre será menor.

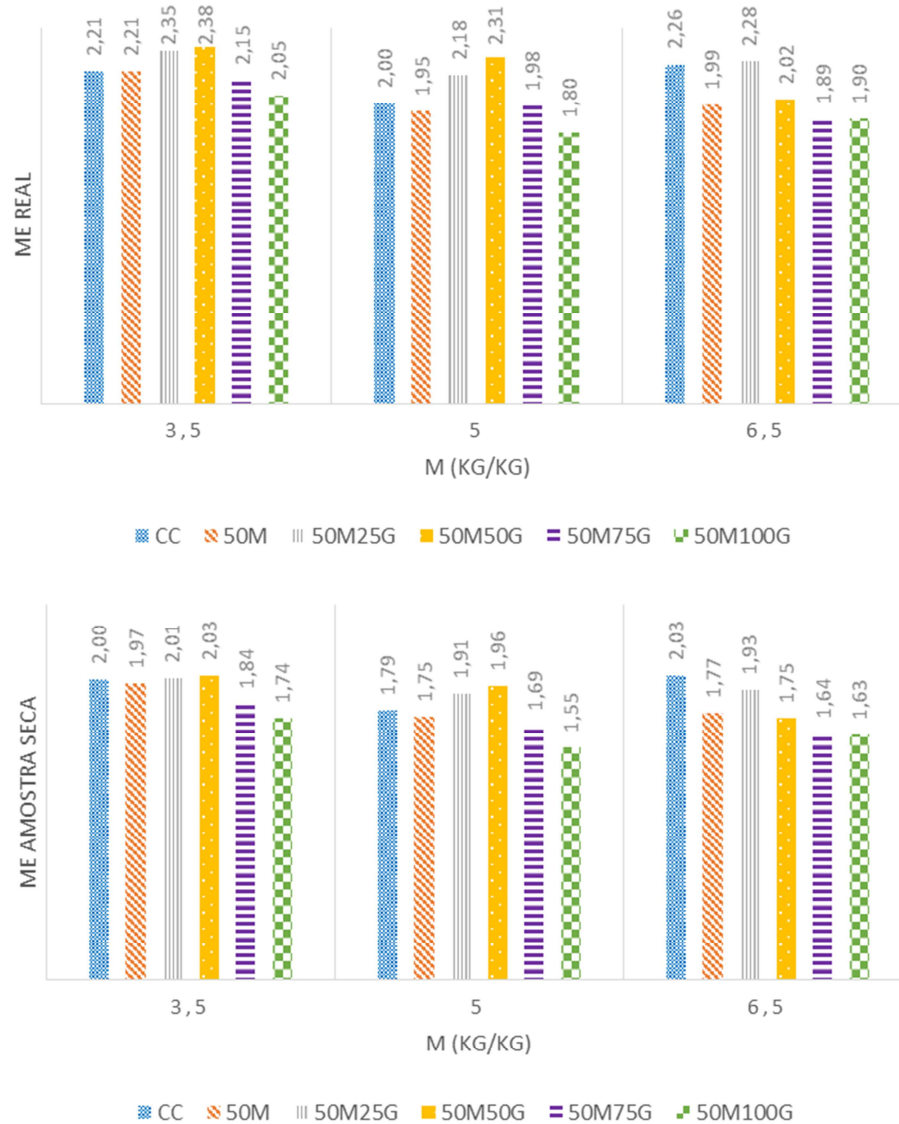


Figura 39 – Massa específica real e massa específica da amostra seca versus relação agregados secos/cimento em massa (m), para os traços rico, intermediário e pobre(Fonte: Autor).

Como pode ser observado na Figura 38Figura 39, a incorporação de resíduo aumenta a massa específica real e da amostra seca das dosagens até a substituição 50M50G e após esta, tem-se uma pequena redução nestes parâmetros.

#### 4.2.4 Concreto em estado endurecido – Carbonatação

Foi realizado o ensaio de carbonatação aos 60 e aos 90 dias de idade para efeito comparativo.



A Figura 40 apresenta as imagens obtidas nos testes em 60 e em 90 dias para cada dosagem.

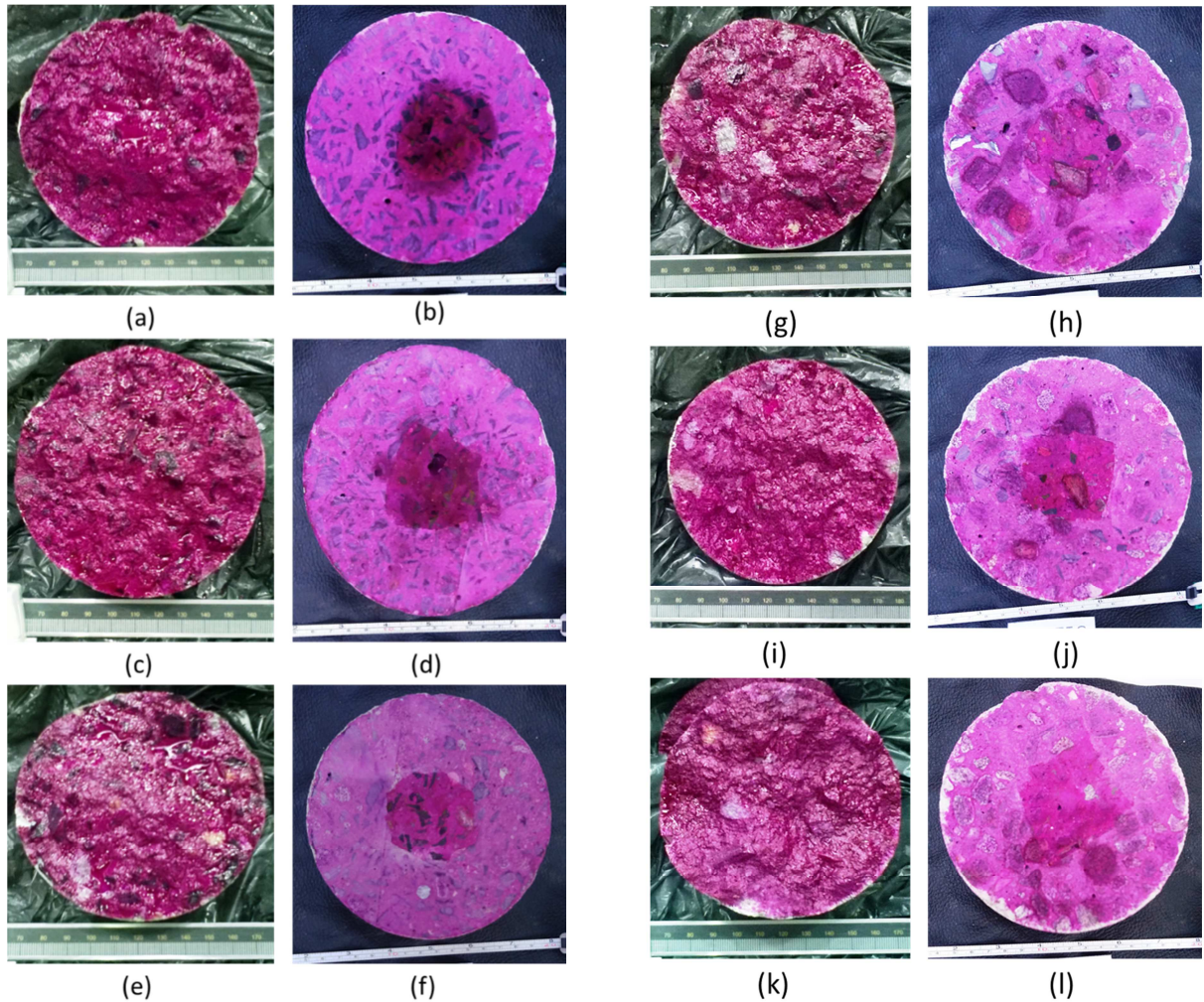


Figura 40 – (a) e (b) CC aos 60 e 90 dias, respectivamente; (c) e (d) 50M; (e) e (f) 50M25G; (g) e (h) 50M50G; (i) e (j) 50M75G; (k) e (l) 50M100G (Fonte: Autor).

Em seguida foram realizadas as leituras com auxílio de paquímetro, correspondentes de cada lado da profundidade carbonatada, em mm. Na Tabela 9 estão demonstrados os dados obtidos.

Tabela 9 – Carbonatação dos traços 1:5 aos 60 e 90 dias de idade (Fonte: Autor).

<b>Dosagem</b>	<b>Espessura (mm) aos 60 dias</b>	<b>Espessura (mm) aos 90 dias</b>
<b>CC</b>	1,13	1,20
<b>50M</b>	0,76	0,90
<b>50M25G</b>	1,13	1,15
<b>50M50G</b>	0,77	0,90
<b>50M75G</b>	1,16	1,25
<b>50M100G</b>	1,50	1,70

A espessura carbonatada de todos os corpos de prova analisados aumentou com a idade. Ainda, as dosagens 50M, 50M25G e 50M50G apresentaram valores menores do que o concreto convencional, o que demonstra uma maior camada passivante ao aço nestas substituições, ou seja, maior proteção contra a corrosão. Já, as adições 50M75G e 50M100G resultaram em espessuras maiores de carbonatação.

Estatisticamente, utilizando a distribuição t-Student para um nível de 1% de significância, foi obtido um valor calculado superior ao valor tabelado, ou seja, é significativo (Anexo 6).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O resíduo de casca cerâmica é classificado pela ABNT NBR 10.004 (2004) como classe IIB – inerte.

Tanto para o agregado graúdo quanto para o agregado miúdo, as curvas granulométricas, após a cominuição do resíduo, ficaram dentro das tolerâncias recomendadas pela norma de referência, ABNT NM 248 (2003).

A massa específica aparente do agregado graúdo seco e a massa unitária para o resíduo apresentou uma pequena redução comparado ao concreto convencional. A absorção de água para o agregado graúdo reciclado é muito maior do que o natural (0,18% para o natural e 4,68% para o resíduo). O índice de forma obtido para o agregado natural está dentro do limite indicado por norma.

Ao contrário do agregado graúdo, o agregado miúdo reciclado apresentou resultados maiores para o módulo de finura e a massa específica. Para a absorção de água o mesmo comportamento foi notado: o resíduo tem valor maior do que o agregado natural.

Foi realizado o método de dosagem do IPT EPUSP, onde o teor de argamassa para a 50M foi  $\alpha = 43\%$  e para os demais foi de 45%. Para o concreto fresco a massa específica foi maior para o traço rico, seguida pelo intermediário e o pobre. O CC apresentou a segunda maior massa específica, perdendo apenas para a 50M25G. Para a relação água/cimento (a/c), quanto maior a incorporação do resíduo como agregado, maior a relação a/c. Com a determinação da relação a/c foi realizado o cálculo do consumo de cimento para cada caso, apresentando redução com o aumento do teor de resíduo incorporado para a dosagem 50M25G comparado com o concreto convencional, chegando a  $17,69 \text{ kg/m}^3$  para um concreto de 25MPA aos 28 dias.

A utilização do resíduo somente como agregado miúdo (50M) apresentou menor resistência quando comparado com o CC. Porém, seu uso é adequado quando pensado em escala industrial, já que na cominuição da casca cerâmica há grande geração de finos, os quais podem ser utilizados e estão dentro da faixa granulométrica do agregado miúdo. Este tipo de uso aumenta o percentual utilizado do resíduo, sendo favorável à Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). As adições 50M25G, 50M50G e 50M75G apresentaram maior resistência, inclusive em relação ao traço referência sem resíduo, CC. Ainda, quanto maior a relação a/c menor a resistência à compressão obtida.

Quanto maior a adição de resíduo, maior a absorção, excetuando-se para o 50M que apresentou um resultado menor frente ao CC, variando entre 5,67% (50M) e 9,12% (50M100G). Outra observação é de que o aumento da relação a/c provoca um aumento da absorção de água e, o aumento do teor de resíduo na mistura aumenta a taxa de absorção. O índice de vazios do concreto depende do tipo de agregado e da matriz da argamassa, portanto quanto maior a incorporação de resíduo na mistura, maior o índice de vazios obtido em cada amostra, excetuando-se a dosagem 50M que apresentou um menor valor, o qual pode ter sido influenciado pelo teor de argamassa ou melhor empacotamento deste, que obteve-se  $\alpha$  de 43% para 50M, sendo de 45% para todas as outras dosagens. A incorporação de resíduo aumenta a massa específica real e da amostra seca das dosagens até a substituição 50M50G e após esta, tem-se uma pequena redução nestes parâmetros.

Quanto ao teste de carbonatação, realizado em corpos de prova em estado endurecido, a espessura carbonatada de todos os corpos de prova analisados aumentou com a idade. Ainda, as dosagens 50M, 50M25G e 50M50G apresentaram valores menores do que o concreto convencional.

Estatisticamente foram avaliados os testes quanto ao traço e as dosagens para os parâmetros de relação a/c e m, resistência à compressão e m, consumo de cimento e m, além da carbonatação. Todos os testes apresentaram resultados significativos.

Frente a todos os parâmetros analisados, deve ser avaliado cada caso de substituição em função do produto a ser gerado com o concreto reciclado, verificando os ensaios e resultados específicos individualmente, conforme sua norma de referência. Cabe salientar que quanto maior a adição do resíduo, maior a reciclagem, menor o impacto ambiental provocado pela indústria geradora da casca cerâmica e pela indústria fabricante do concreto (com a extração de recursos naturais não renováveis), maior a vida útil de aterros industriais (já que o resíduo não terá esse fim), menor o custo para ambas as empresas, e tudo isso ainda, corrobora com a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

## 6 ESTUDOS FUTUROS

Como proposta para estudos futuros tem-se:

- O uso de aditivo para os casos em que a relação a/c se torna prejudicial pode ser utilizado, já que o mesmo consegue a trabalhabilidade desejada, reduzindo a quantidade de água necessária à mistura.
- Estudar o efeito da molhagem ou imersão de água do agregado antes de realizar a dosagem para estudar sua interferência nos resultados e avaliar se para a implantação em escala industrial este processo é vantajoso.
- Estudar uma utilização para a fração de miúdos obtidos na cominuição que é passante na peneira 0,15 mm e que não foi utilizada neste estudo como adição ao cimento.
- Avaliar parâmetros característicos para os produtos que podem ser produzidos a partir deste concreto e se estes se enquadram nas normas em cada caso específico.
- Realizar um levantamento de custos para o processo convencional e o processo com a incorporação do resíduo de casca cerâmica como agregado miúdo e graúdo em escala industrial.
- Realizar novos testes de carbonatação dos corpos de prova com mais idade para obtenção de novos resultados.
- Estudo da influência química dos componentes da casca cerâmica nas reações com o concreto.

## REFERÊNCIAS

\_\_\_\_\_. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 02 de outubro de 2016.

ABESC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM. **Teste de slump**. Blog da Concrebon. Disponível em: <<http://www.concrebon.com.br/blog/?p=10>>. Acesso em 05 de agosto de 2016.

ABIFA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Informativo anual de desempenho**. Disponível em: <<http://abifa.org.br/wp-content/uploads/2015/08/Dezembro-2014-SITE.pdf>> Acesso em 25 de janeiro de 2015.

ADAMATTI, D.; BORGES, D.; TEDESCO, M. **Avaliação dos Efeitos da Substituição do Agregado Miúdo por Resíduo Cerâmico de Microfusão**. 56º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Natal, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004. Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 6136. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211. Agregados para Concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809. Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522. Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_ **NBR 10.004. Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_ **NBR 10.007. Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_ **NBR 12118. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 23. Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 26. Agregados - Amostragem.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 30. Agregado miúdo–Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 45. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 52. Agregado miúdo–Determinação de massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 53. Agregado graúdo–Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 67. Concreto–Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 248. Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

BANTHIA, N.; CHAN, C. **Use of recycled aggregate in plain and fiber-reinforced shotcrete.** Concrete International, v. 22, n. 06, p. 41-45, 2000.

BARBOSA, C. **Moinhos verticais e de rolos.** Disciplina de tratamento de minérios. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2007.

BARRA, M. **Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado ensuaplicación como hormigón armado.** Barcelona, 1996. 223 p. Tese (doutorado). Escola técnica Superior d'Enginyers de Camin, Canal i Ports. Universitat Politècnica de laCatalunya.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos.** Florianópolis, 1999. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

BIANCHINI, G. et al. **Waste Management.** 2005.

BIDONE, F. A. **Resíduos Sólidos Provenientes de Coletas Especiais: eliminação e valorização.** Prosab, 2001.

BIDWELL, H. T. **Investment casting handbook.** Dallas: ICI, 1997.

BRASIL. **Lei no 12.305** de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 ago. 2010a. Disponível em:<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em 02 de Nov. de 2014.

BRUM, F.J.B. **Deceragem por Microondas no Processo de Fundição de Precisão (Microfusão).** Dissertação pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do rio Grande do Sul, Brasil, 2007.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal de Goiás, 2003.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão.**3.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997. 3v. v.1. 401p.

DAL MOLIN, Denise. **Dosagem do concreto: Método de dosagem IPT/EPUSP.** Apostila de aula da disciplina de Tecnologia e Dosagem de Concretos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DJERBI TEGGUER, A. **Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach.** *Construction and Building Materials.* v. 27, p. 112-116, 2012.



FAGUNDES, Alexandre B. **A relação entre os custos e receitas ambientais como principal indicador do desempenho econômico ambiental das organizações.** Associação Brasileira de Engenharia de Produção – ABEPRO, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. ISSN 1676 – 1901, volume IX, número III, 2009.

FARRA, F.C.P.D.; ESPERANCINI, M.S.T. **Análise econômica-energética de utilização industrial florestal para geração de energia térmica: um estudo de caso.** Revista Energia Agrícola, Botucatu, vol. 20, n.3, 2005.

GEYER, Rejane Maria Tubino. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto.** Tese apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

GONÇALVES, Rodrigo Dantas Casillo. **Agregados reciclados de resíduos de concreto - um novo material para dosagens estruturais.** Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2001.

GONÇALVES, Micheli Silveira. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos.** Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2011.

GONZALEZ-FONTEBOA, B.; MARTINEZ-ABELLA, F.; CARRO LÓPEZ, D.; SEARAPAZ, S. **Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate.** Construction and Building Materials. v. 25, p. 2335-2342, 2011.

HELENE, Paulo Roberto L; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle de concreto.** 1ª Ed. São Paulo: Editora Pini, 1993.

HENDRICKS, WANG, M.J.P. FILBURN, R.A. WELL, D.K. **The effect of seal dipson ceramic shell properties and performance.** In: TECHNICAL CONFERENCE, 50, 2002. Chicago. Proceedings...Chicago: ICI, 2002.

HORTON, A. H. **Investment casting.** In Annual Handbook: casting. Metal Park, 1998.

INVESTMENT CASTING INSTITUTE. **Ceramics testing guidebook.** Dallas, 1979.

ISAIA, G.C. (edit.) et al. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005.

ITAMBÉ. **Apostila de ensaios de concretos e agregados, 3ª edição.** Curitiba, 2011.

JADOVSKI, I. **Diretrizes Técnicas e Econômicas para Usinas de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição.** Porto Alegre, 2005. 182 p. Trabalho de Conclusão (Mestrado) – Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia. Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil.** Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2000.

KASAI, Y.; FUJII, T. **Demolition and reuse of concrete and masonry.** Concrete International. V.11, n. 3, p.24-28, 1989.

KIKUCHI, M.; MIURA, T.; DOSHO, Y; & Narikawa, M. **Application of recycled aggregate concrete for structural concrete. Part 1 – Experimental study on the quality of recycled aggregate and recycled aggregate concrete.** In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 55-68.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Escola de Engenharia, curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. **Durability of concrete produced with mineral waste of civil construction industry.** In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE, 2000, São Paulo, Brazil. Proceedings... [CD-ROM]. São Paulo: CIB, 2000. 12p.

LEVY, Salomon Momy; HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2002.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** São Carlos, 1999. 246p. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LUND, H. F. **The McGraw-Hill Recycling Handbook.** United States of America: McGraw-Hill, 1993.

MACHADO, Ioná Macedo Leonardo; FREITAS, Alênio Wagner de. **Tecnologia básica do processo de fundição por cera perdida.** Itaúna: SENAI.DR.MG, 2001.

MACHADO Jr., E. F.; AGNESINI, M. V. C. **Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de microconcretos leves produzidos com argila expandida e com agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 41, 1999, Salvador. Anais... [CD-ROM]. São Paulo: IBRACON, 1999. Arquivo: 2-1-13, 19p.

MACHADO Jr, E. F.; LATTERZA, L. M.; MENDES, C. L. **Influência do agregado reciclado de rejeitos de construção e demolição nas propriedades do concreto fresco e endurecido.** In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29., 2000, Puntadel Este, Uruguai. Memórias... [CD-ROM]. Puntadel Este: EDITOR, 2000, 13p.

MACHADO, Ioná Macedo Leonardo. **Avaliação microestrutural de cascas cerâmicas utilizadas na produção de moldes para o processo de fundição por cera perdida.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia da UFMG, 2005.

MACHADO, C.F.; MORAVIA, W.G. **Caracterização do resíduo de casca cerâmica do processo de fundição por cera perdida para emprego como pozolana.** 56º Congresso Brasileiro de Cerâmica e 1º Congresso Latino-Americano de Cerâmica. Curitiba, 2012.

MACHADO, C.F. **Reutilização da Casca cerâmica do Processo de Fundição por Cera Perdida, como Adição em Matrizes Cimentícias.** Dissertação pelo curso de pós-graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2013.

MALTA, J. O. **Dosagem de Concretos Produzidos com Agregado Miúdo Reciclado de Resíduos de Construção e Demolição.** Dissertação pelo curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, 2012.

MANSUR, M. A.; WEE, T. H.; CHERAN, L. S. **Crushed bricks as coarse aggregate for concrete.** ACI Materials Journal, v. 96, n. 04, p. 478-484, 1999.

MERCALI, G. **Viabilidade de reciclagem do rejeito cerâmico de fundição por microfundição como agregado graúdo para concreto.** Dissertação pela escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto- Estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Produto 35 – Cadeia da Fundição. Relatório Técnico 61 – Perfil da Fundição**. Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de geologia, mineração e transformação mineral, 2009.

MME – Ministério do Meio Ambiente. **Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação**. ICLEI – Brasil. Brasília, 2012.

MME – Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>> . Acessado em: 25 de novembro de 2016>.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**.4.ed. London: Longman, 1995. 844p.

PEDROZO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. Florianópolis, 2008. 178 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas**. Dissertação de Mestrado, departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos. São Carlos, 1986.

RAABE, A. L.; BONIN, L. C. **Qualificação de agregados para concretos e argamassas**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 1995. Relatório de Pesquisa.

RASHWAN, M. S.; ABOURIZK, S. **The properties of recycled aggregate concrete**. Concrete International, v.19, n.7, p.56-60, 1997.

RILEM CPC 18. **Measurement of hardened concrete carbonation depth**. Materials and Structures, v. 21, n. 126, p. 453-455, 1988.

SAGOE-CRENTSIL, K.; BROWN, T. **Performance requirements of building products derived from construction and demolition waste**. In: MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION – CIB WORLD BUILDING CONGRESS, 1998, Gävle, Sweden. Proceedings... Gävle: Kickan Fahlstedt, KTH, 1998. Symposium A., 2v. v. 1, p.451– 457.

SALEM, R. M.; BURDETTE, E. G. **Role of chemical and mineral admixtures on physical properties and frost-resistance of recycled aggregate concrete.** ACI Materials Journal, v. 95, n. 5, p.558-563, 1998.

SAVASTANO Jr, H. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** Tese de Livre Docência (Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica). São Paulo: USP, 2000.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, Ch. F. **Recycling of masonry rubble.** In: HANSEN, T. C. Recycling of demolished concrete and masonry. London: Chapman & Hall, 1992. Part Two, p.161-255. (RILEM TC Report 6).

SCIOTTI, M.; DOLARA, E.; DI NIRO, G.; et al. **Bonding surface between recycled aggregate and new cement paste.** In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate. London: Thomas TelfordPub., 1998. p. 135-142.

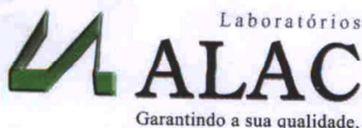
SJÖSTRÖM, C. **Durability and sustainable use of building materials.**In: LLEWELLYN, J. W.; DAVIES, H. (Ed). **Sustainable use of materials.**London: BRE/RILEM, 1992.

TEIXEIRA, M.G. **Aplicação de conceitos da ecologia industrial para a produção de materiais ecológicos: o exemplo do resíduo de madeira.** Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo). Salvador: UFBA, 2005.

USP. **FRX (Espectrômetro de Fluorescência de Raios).** Escola de Engenharia de Lorena. Disponível em: <<http://demar.eel.usp.br/frx/>> . Acessado em: 30 de novembro de 2016.

## **ANEXOS**

## Anexo 1 – Laudo de Classificação do Resíduo



### **Laudo de Classificação de Resíduos Sólidos** ( conforme norma NBR 10004 Maio 2004 )

Laudo Nº R0078/06

**CLIENTE:** MGA - METALÚRGICA GOLDEN ART'S LTDA

**Data da coleta:** 01/11/06

**Endereço:** RUA GETÚLIO VARGAS, 496, CENTRO

**Cidade:** VERANÓPOLIS - RS, CEP 95.330-000

#### **1 - ORIGEM DO RESÍDUO**

Resíduo denominado de "casca Cerâmica de Microfusão". Resíduo formado no processo de recobrimento dos moldes em cera. Após a deceragem em autoclave e forno de calcinação é vazado aço no interior dos moldes vazios. A casca cerâmica é removida do entorno das peças em aço. Matéria prima de areias especiais como mulita e zirconita, silicato de sódio e lamas de fusão (também compostas de areia e silicato de sódio).

#### **2 - AMOSTRAGEM DO RESÍDUO**

A amostra foi acondicionada em saco plástico e coletada pelo Engº Paulo A.Boff.

#### **3 - OBJETIVO**

Composição química, ensaios de Lixiviação (NBR 10005), Solubilização (NBR 10006), Líquidos livres – Verificação em amostra de resíduos (NBR 12988) e interpretação de dados, para posterior classificação pela Norma NBR 10004 – Maio 2004.

#### **4 - AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO:**

**4.1 – Inflamabilidade:** A amostra **não apresentou a característica Inflamabilidade** de acordo com os termos referidos na Norma;

**4.2 – Corrosividade:** A amostra apresentou pH (sol. 1:1) igual a **7,3 não apresentando a característica Corrosividade** de acordo com os termos referidos na Norma;

**4.3 – Reatividade:** De acordo com os produtos utilizados no processo industrial e baseados nos resultados analíticos a amostra **não apresenta a característica Reatividade**;

**4.4 – Toxicidade:** A amostra **não apresentou a característica Toxicidade** de acordo com os termos referidos na Norma;

**4.5 – Patogenicidade:** O resíduo **não apresentou a característica Patogenicidade** de acordo com os termos referidos na Norma;

Laudo Nº R0078/06 - Página 1

## 5 – AVALIAÇÃO QUÍMICA DO RESÍDUO:

### 5.1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA:

Matéria Orgânica ( % ).....	<b>0,15</b>
Cinzas( % ).....	<b>99,8</b>
Umidade ( % ).....	<b>0,05</b>

### 5.2 – LIXIVIAÇÃO DOS RESÍDUOS (NBR 10005)

Parâmetro	Unidade	Resultado	Limite Máximo (NBR 10005)
Arsênio	mg/l	n.d.	1,0
Bário	mg/l	n.d.	70,0
Cádmio	mg/l	n.d.	0,5
Chumbo	mg/l	n.d.	1,0
Cromo Total	mg/l	<b>0,02</b>	5,0
Fluoreto	mg/l	<b>1,76</b>	150,0
Mercúrio	mg/l	n.d.	0,1
Prata	mg/l	n.d.	5,0
Selênio	mg/l	n.d.	1,0

n.d.= não detectado

### 5.3 – SOLUBILIZAÇÃO DE RESÍDUOS (NBR 10005)

Parâmetro	Unidade	Resultado	Limite Máximo (NBR 10006)
Alumínio	mg/l	n.d.	0,2
Arsênio	mg/l	n.d.	0,01
Bário	mg/l	n.d.	0,7
Cádmio	mg/l	n.d.	0,005
Chumbo	mg/l	n.d.	0,01
Cobalto	mg/l	n.d.	-
Cianeto	mg/l	n.d.	0,07
Cloreto	mg/l	<b>58,8</b>	250,0
Cobre	mg/l	n.d.	2,0
Cromo Total	mg/l	n.d.	0,05
Fenóis Totais	mg/l	n.d.	0,01

Continua folha 03. . .



Parâmetro	Unidade	Resultado	Limite Máximo (NBR 10006)
Ferro	mg/l	0,04	0,3
Fluoreto	mg/l	1,27	1,5
Manganês	mg/l	0,02	0,1
Mercúrio	ug/l	n.d.	0,001
Dureza	mg/l	154	500,0
Nitrato ( expresso em N )	mg/l	0,70	10,0
Prata	mg/l	n.d.	0,05
Selênio	mg/l	n.d.	0,01
Sódio	mg/l	11,1	200,0
Sulfato ( expresso em SO4)	mg/l	n.d.	250,0
Surfactantes	mg/l	n.d.	0,5
Zinco	mg/l	0,02	5,0

n.d.= não detectado

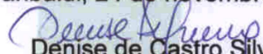
#### 6 - INTERPRETAÇÃO DOS DADOS:

a) Teor de sólidos suspensos (%).....	0,00001
b) pH medido antes da adição do ácido.....	7,3
c) pH final.....	4,0
d) Volume do ácido utilizado .....	0,5 mL (1 N)
e) Tempo total de lixiviação (horas).....	24
f) Volume do líquido obtido (ml).....	750

#### 7 - CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO NORMA NBR 10004

De acordo com os ensaios realizados foi classificado como "RESÍDUO CLASSE II B-INERTES"

Garibaldi, 24 de novembro de 2006.

  
Denise de Castro Silveira  
Química CRQ 5º Região 05101104

Lauda N° R0078/06 - Página 3

## Anexo 2 – Relatório de Ensaios do Cimento CPV-ARI



TIPO : **CP V-ARI**

### RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO

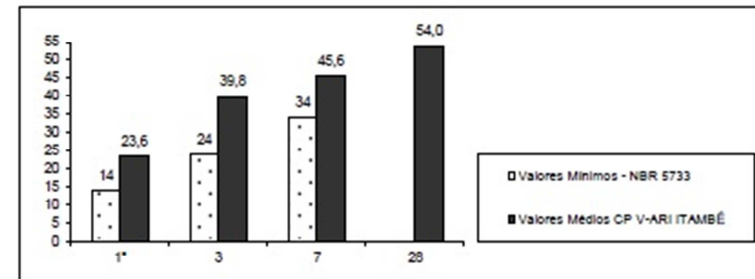
PERÍODO : fev/16  
EMISSÃO : 29/03/2016

Data	Químicos										Físicos										
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.	Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	h : min	h : min	%	cm <sup>2</sup> /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
																			MPa	MPa	MPa
02	4,38	18,79	2,65	60,18	4,53	3,02	3,26	0,59	0,89	0,73	0,00	03:30	04:00	30,4	4,270	0,01	0,60	23,5	38,9	46,1	55,2
04	4,40	18,85	2,98	60,38	4,71	2,98	3,06	0,56	0,50	0,73	0,50	03:30	04:00	30,2	4,250	0,05	0,70	23,1	40,8	45,4	54,1
08	4,31	18,90	2,66	60,35	4,80	2,96	3,16	0,53	0,71	0,74	0,00	03:05	03:45	30,4	4,280	0,05	0,50	24,3	38,8	44,5	55,6
11	4,24	18,72	2,62	60,24	4,29	2,95	3,23	0,56	0,72	0,71	0,00	03:35	04:15	30,2	4,260	0,06	0,50	23,4	41,3	45,6	54,0
15	4,28	18,90	2,71	60,49	3,92	2,96	3,23	0,59	0,77	0,89	0,50	03:25	04:00	30,2	4,280	0,03	0,40	24,4	40,4	46,0	53,2
17	4,40	19,06	2,78	60,96	3,81	3,03	3,23	0,70	0,92	0,70	0,00	03:15	04:00	30,0	4,270	0,02	0,40	22,3	41,8	46,7	53,6
19	4,38	19,09	2,75	61,02	3,60	3,03	3,31	0,64	0,96	0,72	0,50	03:15	04:00	30,3	4,300	0,05	0,60	24,1	40,3	46,9	54,6
23	4,31	19,02	2,70	60,84	3,95	3,03	3,35	0,67	0,84	0,71	0,50	03:20	04:00	30,2	4,280	0,09	0,60	24,3	38,7	45,2	54,7
25	4,30	19,01	2,70	60,96	3,87	3,12	3,35	0,76	0,85	0,71	0,00	03:10	04:00	30,2	4,300	0,05	0,50	23,7	39,3	44,6	51,9
29	4,23	19,05	2,73	60,87	4,13	3,02	3,45	0,84	0,77	0,70	0,50	03:20	04:00	30,2	4,330	0,04	0,30	23,1	38,3	45,0	53,0
<b>Média</b>	<b>4,32</b>	<b>18,94</b>	<b>2,73</b>	<b>60,63</b>	<b>4,12</b>	<b>3,01</b>	<b>3,26</b>	<b>0,64</b>	<b>0,79</b>	<b>0,71</b>	<b>0,25</b>	<b>03:21</b>	<b>04:00</b>	<b>30,2</b>	<b>4,282</b>	<b>0,05</b>	<b>0,51</b>	<b>23,6</b>	<b>39,8</b>	<b>45,6</b>	<b>54,0</b>
<b>Sd</b>	<b>0,06</b>	<b>0,13</b>	<b>0,10</b>	<b>0,33</b>	<b>0,40</b>	<b>0,05</b>	<b>0,11</b>	<b>0,10</b>	<b>0,13</b>	<b>0,02</b>	<b>0,26</b>	<b>00:10</b>	<b>00:07</b>	<b>0,1</b>	<b>23,00</b>	<b>0,02</b>	<b>0,12</b>	<b>0,7</b>	<b>1,2</b>	<b>0,8</b>	<b>1,1</b>
<b>Min</b>	<b>4,23</b>	<b>18,72</b>	<b>2,62</b>	<b>60,18</b>	<b>3,60</b>	<b>2,95</b>	<b>3,06</b>	<b>0,53</b>	<b>0,50</b>	<b>0,69</b>	<b>0,00</b>	<b>03:05</b>	<b>03:45</b>	<b>30,0</b>	<b>4,250</b>	<b>0,01</b>	<b>0,30</b>	<b>22,3</b>	<b>38,3</b>	<b>44,5</b>	<b>51,9</b>
<b>Max</b>	<b>4,40</b>	<b>19,09</b>	<b>2,98</b>	<b>61,02</b>	<b>4,71</b>	<b>3,12</b>	<b>3,45</b>	<b>0,84</b>	<b>0,96</b>	<b>0,74</b>	<b>0,50</b>	<b>03:35</b>	<b>04:15</b>	<b>30,4</b>	<b>4,330</b>	<b>0,09</b>	<b>0,70</b>	<b>24,4</b>	<b>41,8</b>	<b>46,9</b>	<b>55,6</b>

Obs.: A Resistência à Compressão aos 28 dias do CP V-ARI é regida pela NBR 5733, a qual não estabelece valor mínimo.

A massa específica média do CP V-ARI ITAMBÉ é 3,09 g/cm<sup>3</sup> (NBR NM 23).

As datas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.





Documento **RELATÓRIO DE ENSAIO**

Número **26624/99818**

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao(s) item(ns) ensaiado(s) ou calibrado(s).  
Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.

## RESULTADOS

### 1. Apreciação petrográfica macroscópica das amostras antes dos ensaios

A apreciação petrográfica refere-se a todas as amostras, exceto para as Amostras 26624/1 e 26624/9.

Cor: Amostra seca = cinza escura a preta.  
Amostra úmida = preta.

Estrutura: maciça.

Descontinuidades: raras fraturas abertas (superfície de alguns fragmentos), planas, não recobertas.

Textura: afanítica.

Teste para ácido clorídrico: não reativo.

Alteração: rocha sã.

Classificação provável: basalto.

Propriedades físico-mecânicas: rocha muito coerente.

Forma dos fragmentos: lamelar à equidimensional.

**Anexo 4 – Índice de forma dos agregados graúdos**

<b>Agregado natural – Brita O</b>						
<b>Comprimento</b>	<b>Espessura</b>	<b>C/E</b>		<b>Comprimento</b>	<b>Espessura</b>	<b>C/E</b>
16,8	2	8,40		20,2	5,5	3,67
24,7	2,7	9,15		21,1	5,4	3,91
19,4	3	6,47		17,4	5,3	3,28
15,7	2,2	7,14		16,7	4,1	4,07
18,5	2,9	6,38		16,1	2,3	7,00
20,8	3,8	5,47		17	5,6	3,04
21,2	5,8	3,66		15	5,1	2,94
16,4	2,5	6,56		14	3,4	4,12
16,9	3,2	5,28		15,2	3,7	4,11
19,1	4	4,78		11,8	3,3	3,58
13,6	2,2	6,18		20,2	4,6	4,39
13,9	4,3	3,23		16,1	2,4	6,71
17,1	3,9	4,38		12,3	3,1	3,97
14,4	2,2	6,55		14,6	4,9	2,98
15,4	5,4	2,85		22,2	3,4	6,53
25,1	7,1	3,54		17,1	3	5,70
17,1	3,9	4,38		14,1	5,2	2,71
18,8	5,8	3,24		18,5	6,5	2,85
16,8	5,4	3,11		17,3	6,4	2,70
18	2,6	6,92		14,6	3,2	4,56
19,5	5,2	3,75		13,3	2,8	4,75
12,6	3,1	4,06		13,6	3	4,53
15,9	5	3,18		12,6	3,5	3,60
12,7	5,3	2,40		14,5	3,2	4,53
12,7	5,1	2,49		12,8	5,4	2,37
154	3	51,33		13,5	1,8	7,50
15,3	3	5,10		13,7	4,1	3,34
17,9	6	2,98		16,9	2,8	6,04

16,7	4,2	3,98		15,8	2,8	5,64
14,1	4,3	3,28		18,1	4,6	3,93
16,7	4,4	3,80		14,7	4,5	3,27
13,1	6,5	2,02		15,3	5,5	2,78
16	3,1	5,16		19,5	4,6	4,24
18,6	4,9	3,80		16,9	3,4	4,97
14,2	5,6	2,54		17	6,8	2,50
12,3	2,5	4,92		22,3	3,4	6,56
10,6	6,2	1,71		17,8	4,8	3,71
22,5	3,7	6,08		20,9	5,5	3,80
17,6	2,1	8,38		15,3	6,1	2,51
14,9	4	3,73		14,1	4,3	3,28
12,6	2,4	5,25		16,6	6,9	2,41
13,5	3,4	3,97		20,7	3,3	6,27
11,4	3,6	3,17		16,8	6,1	2,75
12,3	3,1	3,97		10,1	4	2,53
17,1	5	3,42		11	6,1	1,80
12	3,6	3,33		23	4	5,75
14,7	3,3	4,45		23,9	4,9	4,88
16	2,3	6,96		20,7	4,1	5,05
10,6	4,5	2,36		18,1	5	3,62
12,1	2,4	5,04		15,1	2,8	5,39
21,9	2,3	9,52		18,7	4,9	3,82
13,6	2,3	5,91		13,1	3,5	3,74
16	4,1	3,90		16,4	4,9	3,35
12,1	3,1	3,90		19,9	5,4	3,69
12,4	3,3	3,76		18,9	5	3,78
14,3	5,8	2,47		16,9	2,7	6,26
13,9	2,6	5,35		16,3	2,9	5,62
18,3	2,3	7,96		21,4	3,2	6,69
11,8	2,4	4,92		18,1	4,1	4,41

12,9	3,3	3,91		16,3	4,7	3,47
13,9	1,5	9,27		12,5	2,2	5,68
10,5	4,2	2,50		17,9	3,4	5,26
18,6	6,6	2,82		16,1	3	5,37
14,6	2,3	6,35		13,3	3,1	4,29
17,2	2,4	7,17		19,7	7	2,81
19,9	3,4	5,85		25,7	4,6	5,59
16,1	2,2	7,32		19,9	5,7	3,49
14,2	3,1	4,58		10,8	2,8	3,86
12,5	3,8	3,29		19,4	2,1	9,24
14,3	4,2	3,40		15,3	2,7	5,67
18,4	2,1	8,76		14,9	3,7	4,03
12,9	2	6,45		12,6	3,4	3,71
12,6	6,9	1,83		13,3	2	6,65
11,6	4,3	2,70		13,5	4,1	3,29
13,8	4,2	3,29		15,5	7,3	2,12
14,5	2,3	6,30		20,1	6,3	3,19
13,2	5,2	2,54		22,8	6,6	3,45
14,7	4,7	3,13		21,8	5,3	4,11
21,1	4,6	4,59		17,5	1,7	10,29
19,6	4,4	4,45		17,5	5,1	3,43
14,6	2,9	5,03		17,7	4,3	4,12
22,5	3	7,50		17,7	2,4	7,38
13,6	2	6,80		14	3,8	3,68
14,9	2,5	5,96		19,4	3,1	6,26
12,4	2,8	4,43		15	4,5	3,33
11,5	5,2	2,21		15,9	3,6	4,42
11,4	2,6	4,38		12,3	2,1	5,86
12,5	3,2	3,91		17,8	3,1	5,74
15,1	3,6	4,19		11,9	5,1	2,33
16,7	2,4	6,96		10,2	5,2	1,96

15,9	4,6	3,46		13,9	4,5	3,09
19	3	6,33		13,4	1,8	7,44
22,8	6,7	3,40		15,6	4,9	3,18
13,8	2,7	5,11		16,8	4,6	3,65
17	4,4	3,86		14	3,7	3,78
14,1	3,2	4,41		18,1	5,3	3,42
13,2	3,1	4,26		14,3	3,8	3,76
14,6	3,9	3,74		18,1	3,7	4,89
12,9	5,3	2,43		13,1	4,8	2,73
15,1	4,4	3,43		13,7	4,8	2,85

<b>Agregado Reciclado – Casca cerâmica</b>						
<b>Comprimento</b>	<b>Espessura</b>	<b>C/E</b>		<b>Comprimento</b>	<b>Espessura</b>	<b>C/E</b>
19,7	8,7	2,26		16,1	7,7	2,09
17,5	7,3	2,40		18,4	5,5	3,35
14,1	9,2	1,53		14,9	6,4	2,33
21,8	11,6	1,88		13,2	7,8	1,69
18,1	7,8	2,32		16,3	5,8	2,81
12,1	8,8	1,38		18,3	5,8	3,16
17,7	4,8	3,69		19	10	1,90
14,7	6,4	2,30		15,3	2,9	5,28
21,2	5,2	4,08		24,5	9,6	2,55
13,7	10,1	1,36		13,4	5,5	2,44
18	5,1	3,53		15,7	3,9	4,03
15	7,3	2,05		12,5	7,2	1,74
13,4	5,6	2,39		18,4	2,5	7,36
17	6,2	2,74		17,3	8,1	2,14
14,2	6,1	2,33		12,5	3,7	3,38
12,9	8,8	1,47		12,9	7,2	1,79
12,3	6,4	1,92		17,6	6,8	2,59
16,3	8,6	1,90		13,4	4,2	3,19

16,7	3,6	4,64		13,2	8,5	1,55
14,3	9,2	1,55		11,6	3,8	3,05
11,4	8,2	1,39		13,4	6,3	2,13
11,5	6,6	1,74		11,2	6,5	1,72
15,1	7,9	1,91		15,9	7,1	2,24
15,6	7,1	2,20		11,5	5,9	1,95
15,7	7,9	1,99		12,5	7,8	1,60
16,4	8	2,05		14	4,6	3,04
14,3	7,9	1,81		12,8	5,4	2,37
14,4	6,5	2,22		13	4,8	2,71
17	6,8	2,50		11,7	9,7	1,21
15	5,9	2,54		22,2	8,6	2,58
12,9	8,5	1,52		14,8	7,9	1,87
17,5	8,8	1,99		16,4	5,6	2,93
20,5	4,8	4,27		16,9	5,8	2,91
12,7	7,8	1,63		17,7	9,9	1,79
13,1	8,6	1,52		16,3	6,1	2,67
16,1	4,7	3,43		11,3	3,3	3,42
16,2	9,3	1,74		13,7	9,9	1,38
15,6	6,6	2,36		14,8	5,6	2,64
13,2	9,7	1,36		10,1	8,6	1,17
16,1	6,8	2,37		13,6	9,9	1,37
17,6	8,6	2,05		12,9	6,1	2,11
15,6	7,6	2,05		13,1	7,7	1,70
12,4	9,1	1,36		11,8	4,8	2,46
16,8	3,1	5,42		11,8	4,1	2,88
16,1	8,5	1,89		13,6	7,4	1,84
14,8	4,7	3,15		12,2	4,7	2,60
14,5	8,4	1,73		15,4	3,6	4,28
11,7	8,3	1,41		16,7	6,5	2,57
17,3	8,1	2,14		10,9	7	1,56



13,8	7	1,97		12,9	7,2	1,79
20,5	7,7	2,66		10,2	8,5	1,20
20,5	9,7	2,11		15,3	7,2	2,13
21,5	9,1	2,36		14,3	5,4	2,65
13,3	9,4	1,41		20,2	4,8	4,21
18	8,6	2,09		19,5	2,6	7,50
22,3	7,1	3,14		16,8	2,7	6,22
18,4	5,9	3,12		20	4,9	4,08
17,7	6,3	2,81		13	5,7	2,28
14,8	6,2	2,39		13,1	4,4	2,98
15,9	10,3	1,54		13,1	4,5	2,91
14,3	5,4	2,65		13	6,2	2,10
21,7	6,9	3,14		15,7	3,9	4,03
15,5	7,2	2,15		14,8	4,5	3,29
14	7,3	1,92		13,2	7,2	1,83
21,4	9,4	2,28		14,4	3,9	3,69
10,2	6	1,70		12,4	5,1	2,43
14,6	5,3	2,75		17,8	4,7	3,79
13,1	6,1	2,15		12,3	5,5	2,24
13,8	6,1	2,26		12,5	2,5	5,00
11,1	5,6	1,98		14,2	3,6	3,94
19,8	9,6	2,06		15,4	6,8	2,26
19,1	2,6	7,35		12,9	1,7	7,59
21,2	3,8	5,58		13,3	8,2	1,62
19,7	9,5	2,07		12,8	6,1	2,10
18,2	7,4	2,46		14,8	6,2	2,39
12,4	7,4	1,68		12,5	3,7	3,38
15,4	8,6	1,79		18,7	3,4	5,50
13	7,1	1,83		12,9	5	2,58
13,3	5,8	2,29		9,1	4,8	1,90
13,5	8,2	1,65		15,6	5,4	2,89

18	5,9	3,05		13,5	4,5	3,00
15,3	5,9	2,59		12,6	6	2,10
15,4	8,8	1,75		13,9	4,3	3,23
16,7	7,5	2,23		14,1	7,9	1,78
20,1	3,8	5,29		15,7	2,7	5,81
16,5	8	2,06		13,3	5,7	2,33
18,7	4,9	3,82		11,5	3	3,83
16,5	6,4	2,58		13,5	5,3	2,55
17,6	7,9	2,23		13,2	5,2	2,54
15,4	6,1	2,52		13	4,1	3,17
14	7,5	1,87		13,4	3,8	3,53
15,1	8,8	1,72		13,1	6,1	2,15
15,8	5,5	2,87		10,3	6,6	1,56
15,1	7,5	2,01		12,4	4,7	2,64
20,6	7,8	2,64		14,8	5,5	2,69
14,4	8,3	1,73		12,9	3,9	3,31
11,1	7,3	1,52		14,4	4,3	3,35
14,4	8,1	1,78		15,3	6	2,55
16,1	7,5	2,15		13,2	5,2	2,54
13,6	4,7	2,89		12,5	6,4	1,95

**Anexo 5 – Resistência à compressão**

Dosagem	Idade	Resistência Traço 1:3,5			Resistência Traço 1:5			Resistência Traço 1:6,5		
		KN	MPa	Valor MPa	KN	MPa	Valor MPa	KN	MPa	Valor MPa
CC	7	301,6	38,39	40,06	164,2	20,9	19,97	144,8	18,44	18,44
		301,2	38,39		157	19,97		134,6	17,13	
		314,6	40,06		150	19,09		138,2	17,59	
	14	339	43,19	43,19	161,5	20,56	20,65	143,5	18,28	18,56
		319	40,6		162,5	20,65		146	18,56	
		0	0		0	0		0	0	
	28	351,8	44,78	44,78	191,8	24,42	20,65	143,5	18,28	18,56
		348	44,28		187,2	23,83		146	18,56	
		346,5	44,11		171,6	21,84		0	0	
50M	7	199,4	25,39	27,4	133	16,93	16,93	99,1	12,71	9,99
		215,2	27,4		126,6	16,12		76,6	9,76	
		205,2	26,13		126	16,03		78,6	9,99	
	14	237,6	30,24	30,24	153,6	19,56	19,56	94,6	12,04	12,28
		233,8	29,77		138	17,57		96,6	12,28	
		0	0		0	0		0	0	
	28	252	32,09	32,09	156	19,93	21,82	106,5	13,56	13,56
		242,5	30,9		171,5	21,82		91	11,61	
		247	31,47		155,5	19,81		96	12,25	
50M25G	7	304	38,67	41,24	212,5	27,06	27,99	137,5	17,49	17,54
		324	41,24		220	27,99		135	17,16	
		276	35,11		201	25,61		138	17,54	
	14	350	44,55	44,55	256,5	32,65	32,65	157,5	20,07	20,73
		334	42,49		245	31,19		163	20,73	
		0	0		0	0		0	0	
	28	386,5	49,2	49,2	282,5	35,94	35,94	180	22,93	22,93
		369,5	47,02		265,5	33,79		170,5	21,69	
		328,5	41,84		274,5	34,93		173	21,99	
50M50G	7	285,5	36,33	37,31	144	18,33	18,33	101	12,84	12,84
		284,5	36,19		143,5	18,25		79	10,06	
		292	37,31		133	16,96		88	11,2	

	14	289	36,8	40,46	158,4	20,15	20,15	98,4	12,53	15,03	
		317,8	40,46		152,2	19,36		118,6	15,03		
		0	0		0	0		0	0		
	28	341	43,42	45,77	193,4	24,63	25,59	131,6	16,74	16,96	
		359,6	45,77		179,4	22,85		126,6	16,12		
		352,6	44,89		201	25,59		133,2	16,96		
<b>50M75G</b>	7	257	32,71	35,15	107	13,61	14,24	80,4	10,24	10,24	
		276	35,15		110	14		80	10,18		
		274,8	34,72		114	14,24		75,4	9,6		
	14	283	36,02	36,02	121,5	15,45	16,18	106	13,49	11,06	
		260,5	33,14		127	16,18		87	11,06		
		0	0		0	0		0	0		
	28	334,6	42,6	45,28	142,4	18,12	19,32	99,2	12,64	12,64	
		355,6	45,28		151,8	19,32		88,4	11,24		
		0	0		0	0		0	0		
	<b>50M100G</b>	7	187	23,78	23,78	78,5	9,97	9,97	49,5	6,31	6,31
			178	22,64		71,5	9,12		43,5	5,55	
			165	21,02		77,5	9,86		45,5	5,8	
14		214,4	27,3	27,3	83	10,57	10,57	58,6	7,46	7,46	
		208,4	26,54		76,8	9,77		55	7		
		0	0		0	0		0	0		
28		211,4	26,92	29,23	97,6	12,42	14,24	66,6	8,47	8,98	
		223	28,39		91,8	11,99		60,8	7,73		
		229,6	29,23		111,9	14,24		70,6	8,98		

## Anexo 6 – Cálculos estatísticos

Simbologia para o anexo:

A: CC

B: 50M

C: 50M25G

D: 50M50G

E: 50M75G

F: 50M100G

### 1. Resistência à compressão

Dosagens	Traços		
	3,5	5	6,5
<b>A</b>	44,78	24,42	21,97
<b>B</b>	32,09	21,82	13,56
<b>C</b>	49,2	35,94	22,93
<b>D</b>	45,77	25,59	16,96
<b>E</b>	45,28	19,32	12,64
<b>F</b>	29,23	14,24	8,98

Anova: fator duplo sem repetição

RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
CC	3	91,17	30,39	156,8047
50M	3	67,47	22,49	86,1769
50M25G	3	108,07	36,02333	172,5334
50M50G	3	88,32	29,44	218,6209
50M75G	3	77,24	25,74667	297,3189
50M100G	3	52,45	17,48333	110,405
3,5	6	246,35	41,05833	68,10006
5	6	141,33	23,555	53,19847
6,5	6	97,04	16,17333	30,18615

#### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Dosagem	633,9414	5	126,7883	10,26775	0,00108551	3,325835
Traço	1960,238	2	980,1189	79,37343	0,000000731	4,102821
Resíduo	123,482	10	12,3482			
Total	2717,661	17				

Tanto para a dosagem quanto para o traço, os resultados são significativos.

Pelo Teste de Tukey:

- Entre os traços:

dms	4,518942		
3,5-5  =	17,50333	>	4,518942
3,5-6,5  =	24,88500	>	4,518942
5-6,5  =	7,381667	>	4,518942

Existe diferença significativa entre todos os traços.

- Entre as dosagens:

dms	9,961453		
A-B  =	7,9	<	9,961453
A-C  =	5,633333	<	9,961453
A-D  =	0,95	<	9,961453
A-E  =	4,643333	<	9,961453
A-F  =	12,90667	>	9,961453
B-C  =	13,53333	>	9,961453
B-D  =	6,95	<	9,961453
B-E  =	3,256667	<	9,961453
B-F  =	5,006667	<	9,961453
C-D  =	6,583333	<	9,961453
C-E  =	10,27667	>	9,961453
C-F  =	18,54	>	9,961453
D-E  =	3,693333	<	9,961453
D-F  =	11,95667	>	9,961453
E-F  =	8,263333	<	9,961453

Existe diferença significativa entre os tratamentos A e F, B e C, C e E, C e F e D e F. Entre as outras dosagens não existe diferença significativa.

## 2. Relação a/c

Dosagens	Traços		
	3,5	5	6,5
<b>A</b>	0,42	0,52	0,56
<b>B</b>	0,44	0,5	0,6
<b>C</b>	0,5	0,64	0,79
<b>D</b>	0,53	0,64	0,76
<b>E</b>	0,61	0,72	0,81
<b>F</b>	0,58	0,72	0,82

Anova: fator duplo sem repetição

<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
A - CC	3	1,5	0,5	0,0052
B - 50M	3	1,54	0,513333	0,006533
C - 50M25G	3	1,93	0,643333	0,021033
D - 50M50G	3	1,93	0,643333	0,013233
E - 50M75G	3	2,14	0,713333	0,010033
F - 50M100G	3	2,12	0,706667	0,014533
	3,5	6	3,08	0,513333
	5	6	3,74	0,623333
	6,5	6	4,34	0,723333

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Dosagem	0,129267	5	0,025853	29,60305	0,0000110	3,325835
Traço	0,1324	2	0,0662	75,80153	0,000000907	4,102821
Resíduo	0,008733	10	0,000873			
Total	0,2704	17				

Tanto para a dosagem quanto para o traço, os resultados são significativos.

Pelo Teste de Tukey:

- Entre os traços:

$$dms \quad 0,206773$$

$$|3,5-5| = 0,11000 < 0,206773$$

$$|3,5-6,5| = 0,21000 > 0,206773$$

$$|5-6,5| = 0,10000 < 0,206773$$

Existe diferença significativa entre os traços 3,5 e 6,5.

- Entre as dosagens:

dms 0,083774

A-B  =	0,013333333	<	0,083774
A-C  =	0,143333333	>	0,083774
A-D  =	0,143333333	>	0,083774
A-E  =	0,213333333	>	0,083774
A-F  =	0,206666667	>	0,083774
B-C  =	0,130000000	>	0,083774
B-D  =	0,130000000	>	0,083774
B-E  =	0,200000000	>	0,083774
B-F  =	0,193333333	>	0,083774
C-D  =	1,11022E-16	<	0,083774
C-E  =	0,070000000	<	0,083774
C-F  =	0,063333333	<	0,083774
D-E  =	0,070000000	<	0,083774
D-F  =	0,063333333	<	0,083774
E-F  =	0,006666667	<	0,083774

Existe diferença entre as dosagens A e C, A e D, A e E, A e F, B e C, B e D, B e E e B e F. Entre as outras dosagens não existe diferença significativa.

### 3. Consumo de cimento

Dosagens	Traços		
	3,5	5	6,5
<b>A</b>	273,83	188,65	151,18
<b>B</b>	256,57	187,69	146,73
<b>C</b>	273,45	195,78	150,6
<b>D</b>	255,95	179,22	141,48
<b>E</b>	246,09	167,64	135,82
<b>F</b>	225,93	162,2	126,05

Anova: fator duplo sem repetição

RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
A	3	613,66	204,5533	3950,443
B	3	590,99	196,9967	3081,167
C	3	619,83	206,61	3860,997
D	3	576,65	192,2167	3402,53
E	3	549,55	183,1833	3221,065
F	3	514,18	171,3933	2557,392
3,5	6	1531,82	255,3033	324,4479
5	6	1081,18	180,1967	170,5906
6,5	6	851,86	141,9767	94,69347



## ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Dosagem	2690,899578	5	538,1799	20,87907	5,35E-05	3,325835
Traço	39889,42631	2	19944,71	773,7694	1,09E-11	4,102821
Resíduo	257,7604222	10	25,77604			
Total	42838,08631	17				

Tanto para a dosagem quanto para o traço, os resultados são significativos.

Pelo Teste de Tukey:

- Entre os traços:

dms 29,83312

3,5-5  =	75,10667	>	29,83312
3,5-6,5  =	113,3267	>	29,83312
5-6,5  =	38,22	>	29,83312

Existe diferença significativa entre os traços 3,5, 5 e 6,5.

- Entre as dosagens:

dms 14,39226

A-B  =	7,556667	<	14,39226
A-C  =	2,056667	<	14,39226
A-D  =	12,33667	<	14,39226
A-E  =	21,37000	>	14,39226
A-F  =	33,16000	>	14,39226
B-C  =	9,613333	<	14,39226
B-D  =	4,780000	<	14,39226
B-E  =	13,81333	<	14,39226
B-F  =	25,60333	>	14,39226
C-D  =	14,39333	>	14,39226
C-E  =	23,42667	>	14,39226
C-F  =	35,21667	>	14,39226
D-E  =	9,033333	<	14,39226
D-F  =	20,82333	>	14,39226
E-F  =	11,79000	<	14,39226

Existe diferença entre as dosagens A e E, A e F, B e F, C e D, C e E, C e F, D e F. Entre as outras dosagens não existe diferença significativa.

#### 4. Carbonatação

Dosagem	Espessura (mm) aos 60 dias	Espessura (mm) aos 90 dias	d
CC	1,13	1,20	0,07
50M	0,76	0,90	0,14
50M25G	1,13	1,15	0,02
50M50G	0,77	0,90	0,13
50M75G	1,16	1,25	0,09
50M100G	1,50	1,70	0,20

$$\Sigma d = 0,65$$

$$\bar{d} = 0,1083$$

$$S^2 d = 0,003897$$

$$n = 6$$

$$t_{cal} = \frac{\bar{d}}{\sqrt{\frac{Sd^2}{n}}} = 4,251$$

Pela tabela t-Student:

$t_{tab} = 3,36$ , para 1% de nível de significância.

Como  $t_{cal} > t_{tab}$  este resultado é significativo.

## Anexo 7 – Análise FRX

Sample : CascaFundM  
 Operator:  
 Comment : 20 deg/min , for Oxide  
 Group : [Qual-Quant.]Std-Oxide  
 Date : 2016-08-25 16:18

[Quantitative Result]

Analyte	Result	Proc-Calc	Line	Net Int.	BG Int.
SiO2	56.4864 %	Quant.-FP	SiKa	227.604	0.971
Al2O3	30.6536 %	Quant.-FP	AlKa	210.079	11.568
Fe2O3	2.6513 %	Quant.-FP	FeKa	56.388	1.283
CaO	2.5953 %	Quant.-FP	CaKa	31.832	0.563
ZrO2	2.0612 %	Quant.-FP	ZrKa	242.003	9.125
K2O	1.7362 %	Quant.-FP	K Ka	27.823	0.521
TiO2	1.6114 %	Quant.-FP	TiKa	6.144	0.224
ZnO	0.3018 %	Quant.-FP	ZnKa	14.719	2.639
SO3	0.1800 %	Quant.-FP	S Ka	0.894	0.314
MgO	0.1608 %	Quant.-FP	MgKa	0.286	0.132
MnO	0.1155 %	Quant.-FP	MnKa	1.932	0.914
HfO2	0.0699 %	Quant.-FP	HfLa	1.048	2.091
P2O5	0.0687 %	Quant.-FP	P Ka	0.435	0.376
Cr2O3	0.0475 %	Quant.-FP	CrKa	0.500	0.593
NbO	0.0454 %	Quant.-FP	NbKa	6.663	9.879
Y2O3	0.0315 %	Quant.-FP	Y Ka	3.736	8.262
CO2	1.1835 %	Fix	-----	-----	-----