

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

**Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto.**

**Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro**

Porto Alegre  
Out/2013

LUCIANA DE NAZARÉ PINHEIRO CORDEIRO

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS PRINCIPAIS QUE REGEM A  
VARIABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM  
AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO.**

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

Xxxx Cordeiro, Luciana de Nazaré Pinheiro

Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos de concreto.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2013.

Orientadora: Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Orientadora: Ângela Borges Masuero

1. Resíduo de Concreto. 2. Resíduo de Construção Civil. 3. Agregado Graúdo Reciclado de Concreto.

**LUCIANA DE NAZARÉ PINHEIRO CORDEIRO**

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS PRINCIPAIS QUE REGEM A  
VARIABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM  
AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO**

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

Porto Alegre, 18 de outubro de 2013

Prof<sup>ª</sup>. Ângela Borges Masuero  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientadora

Prof<sup>ª</sup>. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. pela Universidade de São Paulo  
Orientadora

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

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Nilo César Consoli (UFRGS)**  
Ph. D. Concordia University, Canadá

**Prof. Claudio de Souza Kazmierczak (UNISINOS)**  
Dr. pela Universidade de São Paulo

**Prof. Paulo Sérgio Lima Souza (UFPA)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Dr. Florian Huchet**  
Ph.D. pela Université de Nantes, França

Dedico este trabalho a todos da minha  
família, e ao meu amor Luciano.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus por me ajudar em mais uma batalha. E a minha amada Virgem Maria que passou na frente de todas as dificuldades, amenizando-as e tornando-as suportáveis.

Agradeço a minha mãe e sua incansável paciência e orações. Mãe você foi a inspiração de mais essa conquistas, EU TE AMO MUITO. A minha vó Lina e as minhas tias Léia, Nora e Cila, suas correntes de oração foram milagrosas. Pai e mano, obrigada pela torcida.

Agradeço a minha família Noriana, em especial aos meus anjos Cris Pauletti, Anderson, Mauro, Ângela, Luti e Dani. Vocês que me deram não só o apoio emocional, como também o apoio financeiro. Sou grata, pois vocês nunca deixaram faltar nada. Ao anjos que surgiram depois Ju Senisse, Ana Paula, Cris Vitorino, Jose Gasperin, Giselle (XL), Tiago, Eugênio, Salvador, poxa, vocês foram leais amigos, essa vitória também é de vocês.

Agradeço aos bolsistas que passaram pelo NORIE ao longo desses 4 anos, muito obrigada! E um agradecimento mais que especial aos bolsistas que sofreram junto comigo João e Edison na fase inicial; Marlon, Carol, Bruno e Felipe no finalzinho da pesquisa, com a ajuda de vocês beneficiar três toneladas de resíduo foi fichinha.

Agradeço também a Liliane, Ana Luiza e Carmem secretárias do PPGEC sempre prontas para ajudar. Fontes e Edgar obrigada por toda ajuda e pela experiência compartilhada. Airton e seu Gilmar, passamos por cada ensaio exaustivo, mas a parceria de vocês minimizava os desgaste físico; e a experiência trocada foi o diferencial dessa vitória.

Agradeço a CAPES que me concedeu a bolsa de estudo e a todos os membros do projeto PRO ENGENHARIAS que solícitos me ajudaram no desenvolvimento desse trabalho.

As meninas do happy, Fran Tiecher, Lucilia, Rô, Simone, Ana, Cris Pauletti, XL, Fabi e Amandita nossos luluzinhas, serviram de terapia. Vocês são excelentes amigas. Obrigada meninas!!!

Aninha querida, muito obrigada, sempre que eu precisava fugia para Bento e era recebida com todo amor. Esse acolhimento e essa amizade eu tinha também de você Ju Brito, você, a formosete mais querida e amada do NORIE. Cris, minha personal tradutora, personal mãe, personal irmã, personal cozinheira, personal amiga, obrigada pela paciência. Meninas, vocês

são meus anjos da guarda... Regininha e Paulo Sérgio, vocês me inspiraram a fazer doutorado. E graças a Deus, hoje somos colegas de trabalho.

Bonin, Azambuja e Masuero, obrigada por todas as contribuições, tardes de conversa, por todas as dúvidas que vocês plantaram em minha cabecinha. A conversa com vocês me deixava zozza, mas me ajudou muito a pensar...

A Denise, perdi o medo de você no doutorado, não sei se isso foi bom ou ruim. Com você eu aprendi a ter paciência e acreditar que tudo vai dá certo. Com seu pescocinho, sempre me convencia a fazer mais e mais ensaio. Com a Ângela não foi muito diferente, sempre me cobrando, exigindo o meu melhor, aumentando o número de ensaio. Este era o peso de ser a preferida. Nossa, quanto carinho eu tenho por vocês. Obrigada pela orientação, e pela amizade.

Tem a galera dos sem postura, não podia fazer um agradecimento sem citá-los: Mauro, Anderson, Lais e Cari, que "A Galerinha do Bem!!! Estávamos sempre juntos, conspirando, rindo, brigando, sofrendo. Foram muitos cafés, sushis, lanches, viagens, trabalhos... Vocês são os irmãos, que eu carrego aqui comigo, já sei a quem confiar os meus filhos nas férias...Essa conquista é de vocês...

Luti meu amor, obrigada por ter paciência, por me aturar nesse período tão cheio de altos e baixos, obrigada por todo amor dedicado, por me escutar, mesmo não entendendo nada de resíduos e de engenharia!!!! Te amo muito zizinho, agora sim podemos pensar nos gêmeos, hehehehe...

Agradeço a família Cunha (em especial Mary e Sergiana), Pinheiro e Cordeiro obrigada por todas as orações. A família Fracasso foi mais que especial, me acolheu nesses 6 anos. Agradeço aos meus sogros e a minha cunhada Carol, que estavam sempre por perto torcendo por mim.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui. O meu muito obrigada!!!

Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei  
para que o melhor fosse feito.

*Marthin Luther King*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	12
LISTA DE TABELAS .....	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	15
RESUMO .....	17
ABSTRACT.....	18
1 INTRODUÇÃO .....	19
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	19
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	19
1.3 QUESTÕES DE PESQUISA .....	22
1.4 OBJETIVOS .....	23
1.5 DELIMITAÇÃO .....	23
1.6 ESTRUTURA DA TESE.....	23
2 AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO (AGRC) .....	25
2.1 DEFINIÇÕES .....	25
2.2 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO. .....	26
2.2.1 Forma e textura superficial das partículas .....	26
2.2.2 Composição granulométrica .....	29
2.2.3 Quantidade de argamassa aderida no agregado reciclado de concreto .....	33
2.2.4 Massa específica e Massa unitária .....	34
2.2.5 Absorção de água.....	37
2.2.6 Resistência à abrasão .....	42
2.2.7 Quantidade de Contaminantes e Impurezas .....	43
2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO COM RESÍDUO DE CONCRETO (RDC) NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.....	44
2.3.1 Trabalhabilidade .....	44
2.3.2 Massa específica no estado fresco .....	47
2.3.3 Resistência à compressão axial.....	48
2.3.4 Módulo de elasticidade .....	49
2.4 CONCRETOS ESTRUTURAIS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETOS.....	51
2.4.1 Teor de Substituição de Agregado Graúdo Reciclado.....	51
2.4.2 Condição de Mistura.....	52
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	55
3.1 ASPECTOS GERAIS .....	55

3.2	FASE 1: ESTUDO DO EFEITO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO DE ORIGEM NAS CARACTERÍSTICAS DOS AGRC E NAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM OS MESMOS.....	56
3.2.1	Materiais utilizados.....	56
3.2.1.1	Cimento.....	57
3.2.1.2	Agregado Miúdo Natural.....	58
3.2.1.3	Agregado Graúdo Natural.....	59
3.2.1.4	Água.....	59
3.2.1.5	Agregado Graúdo Reciclado de Concreto.....	59
3.2.2	Produção de concretos.....	61
3.2.3	Análise e Discussão dos Resultados.....	64
3.2.3.1	Análise e Discussões dos Resultados da Caracterização do AGRC.....	64
3.2.3.2	Análise e Discussão dos Resultados das Propriedades dos concretos produzidos com AGRC <sub>15</sub> e AGRC <sub>30</sub> .....	66
3.2.3.3	Conclusões.....	70
3.3	FASE 2: ESTUDO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE DA POROSIDADE DO AGRC.....	72
3.3.1	Materiais e Métodos para Determinação da Massa Específica e Absorção do AGRC.....	72
3.3.1.1	Massa Específica e Absorção de Água segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2009).....	72
3.3.1.2	Massa Específica segundo o método Leite (2001).....	74
3.3.1.3	Absorção segundo o método Leite (2001).....	75
3.3.1.4	Absorção de água segundo o método Leite et al (2011).....	76
3.3.2	Apresentação e análise dos resultados obtidos pelos ensaios de massa específica.....	78
3.3.3	Apresentação e análise dos resultados obtidos pelos ensaios de absorção.....	79
3.3.4	Conclusões.....	81
3.4	FASE 3: ESTUDO DA ALTERAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGRC DURANTE A ESTOCAGEM.....	82
3.4.1	Materiais e Métodos.....	82
3.4.2	Apresentação e análise dos resultados.....	84
3.4.3	Conclusões.....	87
3.5	FASE 4: ESTUDO DA VARIAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGRC DURANTE A MISTURA DE CONCRETOS EM DIFERENTES BETONEIRAS.....	88
3.5.1	Materiais e Métodos.....	89

3.5.2	Apresentação e análise dos resultados .....	91
3.5.3	Conclusões.....	98
3.6	FASE 5: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE RETIRADA DO EXCESSO DE ÁGUA POR ESCORRIMENTO DO AGRC NO DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETOS....	99
3.6.1	Materiais e Métodos .....	99
3.6.2	Análise e Discussão dos Resultados .....	101
3.6.3	Conclusões.....	102
3.7	FASE 6: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE SATURAÇÃO DO AGRC NO DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETOS.....	103
3.7.1	Materiais e Métodos .....	103
3.7.2	Análise e Discussão dos Resultados .....	104
3.7.3	Conclusões.....	107
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	109
4.1	CONCLUSÕES POR FASES DE EXPERIMENTOS .....	109
4.1.1	Análise do efeito da resistência do concreto de origem nas características dos AGRC e nas propriedades dos concretos produzidos com os mesmos. ....	109
4.1.2	Análise da variação da forma original do AGRC. ....	110
4.1.3	Análise da porosidade do AGRC.....	110
4.1.4	Análise da alteração da composição granulométrica do AGRC durante a estocagem. ....	111
4.1.5	Análise da variação granulométrica do AGRC a durante a mistura de concretos em betoneiras de eixo vertical e eixo inclinado. ....	111
4.1.6	Análise do tempo de retirada do excesso de água por escorrimento do AGRC no desempenho mecânico de concretos. ....	112
4.1.7	Análise do teor de saturação do AGRC no desempenho mecânico de concretos.....	112
4.2	CONCLUSÕES GERAIS .....	112
	SUGESTÕES DE PESQUISAS.....	113
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	114

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuições granulométricas comparativas de Ulsen 2011 .....	30
Figura 2: Faixa granulométrica do agregado para concreto .....	31
Figura 3: Porcentagem de argamassa aderida em função da dimensão média das partículas (adaptado Amorim, 2008).....	33
Figura 4: Resultados de absorção de água em função da porcentagem de argamassa aderida (adaptado Hansen, 1992) .....	34
Figura 5: Absorção de água dos agregados graúdos reciclados de concreto em função da dimensão média das partículas (adaptado de Ferreira, 2007).....	38
Figura 6: Ensaio de absorção de água ao longo do tempo em agregado graúdo reciclado de concreto (FERREIRA, 2007).....	39
Figura 7: Representação esquemática das condições de umidade do agregado para concreto (adaptado Neville, 1997).....	41
Figura 8: Correlação entre as propriedades massa específica aparente e absorção de água para as fases dos agregados graúdos de RCD reciclados (ANGULO, 2000).....	41
Figura 9: Desenvolvimento do índice de consistência no ensaio de mesa de consistência (adaptado de NEALEN e RUHL, 1997).....	45
Figura 10: Desenvolvimento do índice de consistência do concreto empregando aditivo superplastificante (adaptado de Andrew Nealen e Marcus Rühl, 1997) .....	47
Figura 11: Correlação entre a massa específica do concreto fresco e a massa específica dos agregados reciclados (adaptado de Carrijo, 2005). .....	48
Figura 12: Módulo de elasticidade em função da relação a/c para diferentes taxas de substituição de agregado natural por agregado reciclado de concreto (SANCHEZ, 2004).....	51
Figura 13: Comportamento das propriedades dos concretos em função do teor de agregado reciclados (LIMBACHIYA et al., 2012).....	52
Figura 14: Comportamento das propriedades dos concretos em função do tipo de mistura (Rejeb, 1992) .....	53
Figura 15: Resumo dos fatores responsáveis pela variabilidade do AGRC analisados nesta pesquisa. 55	
Figura 16: Esquema da metodologia adotada na FASE 1. ....	56
Figura 17: Processo de produção do AGRC (a) cps de concreto; (b) britador de mandíbulas; (c) peneirador mecânico e (d) AGRC. ....	60
Figura 18: Curva de dosagem do AGRC <sub>15</sub> .....	62
Figura 19: Curva de dosagem do AGRC <sub>30</sub> .....	63
Figura 20: Curva de dosagem do AG <sub>NAT</sub> .....	63
Figura 21: Relação entre o consumo de cimento e o tipo de agregado para as diferentes faixas de resistência dos concretos. ....	67
Figura 22: Correlação entre os resultados de módulo de elasticidade e o tipo de agregado para as diferentes faixas de resistência. ....	69
Figura 23: Representação esquemática dos ensaios realizados na fase 2.....	72
Figura 24: Ensaio de absorção do agregado reciclado: a) Recipiente utilizado para execução do ensaio de absorção; b) Amostra de agregado submersa (Fonte: LEITE, 2001). ....	75
Figura 25: Equipamento para execução do ensaio de absorção: (a) representação esquemática do porta peneira; (b) vista geral do dispositivo .....	76
Figura 26: Representação esquemática da disposição dos materiais.....	77
Figura 27: Absorção de AGRC <sub>30</sub> em função do seudímetro máximo .....	80
Figura 28: Curva de absorção do AGRC em função do tempo.....	81

Figura 30: Posição do agregado na bombona.....	83
Figura 31: Representação esquemática das etapas realizadas na avaliação da condição de estocagem	83
Figura 32: Curva granulométrica dos AGRC (Topo, Meio e Fundo) .....	85
Figura 33: Análise de variância entre a posição do agregado na pilha e a resistência à compressão....	86
Figura 34: Representação esquemática dos ensaios realizados na fase 4.....	88
Figura 35: Ordem tradicional de colocação dos materiais constituintes do concreto convencional com AGRC <sub>30</sub> (Ordem A) .....	89
Figura 36: Ordem de mistura dos materiais com AGRC proposta pela autora (Ordem B).....	90
Figura 37: Produção dos concretos com AGRC: (a) Preparo em betoneira de eixo vertical, (b) Preparo em betoneira de eixo inclinado e (c) Lavagem dos concretos.....	90
Figura 38: Produção dos concretos com AGRC: (a) determinação do abatimento e (b) moldagem de cps. ....	91
Figura 39: Pontos de coletas de concreto .....	91
Figura 40: Curva granulométrica obtida com os AGRC dos concretos confeccionados em betoneira de eixo vertical pela ordem de mistura A .....	92
Figura 41: Curva granulométrica obtida com os AGRC dos concretos confeccionados em betoneira de eixo vertical pela ordem de mistura B.....	92
Figura 42: Curva granulométrica obtida com os AGRC dos concretos confeccionados em betoneira de eixo inclinado pela ordem de mistura B.....	93
Figura 43: Curva granulométrica obtida com os AGRC dos concretos confeccionados em betoneira de eixo inclinado pela ordem de mistura B.....	93
Figura 44: Curva granulométrica obtida com os AGRC dos concretos confeccionados em betoneira de eixo inclinado pela ordem de mistura B.....	94
Figura 45: Análise de variância entre o tipo de misturador e o módulo de finura. ....	95
Figura 46: Análise de variância entre a ordem de mistura dos materiais e o seu módulo de finura. ....	95
Figura 47: Análise de variância entre o tipo de betoneira e a resistência à compressão aos 28 dias. ...	97
Figura 48: Curvas granulométricas obtidas pela ordem de mistura A, em betoneiras de eixo inclinado. ....	97
Figura 49: Curvas granulométricas obtidas pela ordem de mistura A, em betoneiras de eixo inclinado. ....	98
Figura 50: Representação esquemática dos ensaios realizados na fase 5.....	99
Figura 51: Representação esquemática dos tempos de escoamento.....	100
Figura 52: Representação do processo de escoamento: (a) massa conhecida de material seco; (b) massa submersa e (c) processo de retirada do excesso de água.....	100
Figura 53: Influência do tempo de secagem na consistência do concreto com AGRC.....	102
Figura 54: Análise de variância do concreto produzido com AGRC em função do tempo de secagem .....	102
Figura 55: Esquema dos ensaios realizados na fase 6. ....	103
Figura 56: Influência do teor de saturação na consistência do concreto com AGRC. ....	105
Figura 57: Influência do teor de saturação resistência à compressão do concreto com AGRC. ....	105
Figura 58: Análise de variância do concreto produzido com AGRC em função do teor de saturação. ....	106
Figura 59: Análise de variância do concreto produzido com AGRC em função do teor de saturação .....	107
Figura 60: Resumo dos resultados alcançados.....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Levantamento bibliográfico relativo à massa específica e massa unitária dos agregados reciclados de concreto .....	36
Tabela 2: Levantamento bibliográfico relativo à taxa de absorção dos agregados reciclados .....	38
Tabela 3: Características químicas do cimento Portland CP V ARI RS .....	57
Tabela 4: Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI RS .....	58
Tabela 5: Características físicas do agregado miúdo .....	58
Tabela 6: Características físicas do agregado graúdo .....	59
Tabela 7: Resultados da dosagem experimental do CPV .....	62
Tabela 8: Proporcionamento dos concretos em função do tipo de agregado graúdo (Natural, Reciclado de 15 MPa e Reciclado de 30 MPa). .....	64
Tabela 9: Caracterização física dos AGRC .....	65
Tabela 10: Massa específica e massa unitária dos agregados reciclados .....	65
Tabela 11: Comparação dos resultados de massa específica e massa unitária dos agregados reciclados .....	66
Tabela 12: Coeficiente de variação e desvio padrão dos resultados de resistência dos concretos produzidos com agregados naturais e agregados reciclados aos 28 dias.....	66
Tabela 13: Módulo de elasticidade de concretos confeccionados com AGNAT e AGRC. ....	69
Tabela 14: Massa específica do agregado AGRC <sub>30</sub> segundo a NBR 53 (ABNT, 2009).....	78
Tabela 15: Massa específica do agregado AGRC <sub>30</sub> segundo LEITE (2001).....	78
Tabela 16: Massa específica de agregados reciclados com dimensões máximas diferentes, segundo o método proposto por LEITE (2001).....	79
Tabela 17: Absorção do AGRC obtidas pela NBR NM 53 (ABNT,2009). ....	80
Tabela 18: Absorção do AGRC obtida pelo método Leite et al (2011) .....	80
Tabela 19: Consumo unitário e total dos materiais utilizados para avaliação da influência de estocagem do agregado .....	84
Tabela 20: Caracterização física dos AGRC coletado em diferentes alturas (Topo, meio e fundo) .....	85
Tabela 21: Resultados da Análise de Variância (ANOVA) entre a posição do agregado na pilha e a resistência à compressão .....	86
Tabela 22: Análise múltipla de médias para as diferentes condições de estocagem. ....	87
Tabela 23: Consumo dos materiais .....	89
Tabela 24: Resultados da Análise de Variância (ANOVA) entre a posição do agregado na pilha e a resistência à compressão .....	94
Tabela 25: Análise múltipla de médias para as diferentes condições de estocagem.....	96
Tabela 26: Resultados da Análise de Variância (ANOVA) entre a posição do agregado na pilha e a resistência à compressão .....	96
Tabela 27: Consumo dos materiais .....	99
Tabela 28: Valores de água adotados.....	101
Tabela 29: Consumo dos materiais .....	104
Tabela 30: Tratamento dos resultados de resistência à compressão.....	105
Tabela 31: Tratamento dos resultados de resistência à compressão.....	106
Tabela 32: Resultados da Análise de Variância (ANOVA) entre a posição do agregado na pilha e a resistência à compressão .....	107

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	: Porcentagem
1:m	: Quantidade de cimento:agregados, em massa
a	: Agregado miúdo
a/c	: Relação água/cimento
ABNT	: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza e Resíduos Especiais
AGRC	: Agregado Graúdo Reciclado de Concreto
AGRC <sub>15</sub>	: Agregado Graúdo Reciclado de Concreto 15 Mpa
AGRC <sub>30</sub>	: Agregado Graúdo Reciclado de Concreto 30 Mpa
ANOVA	: Análise de Variância
ASTM	: American Society for Testing and Materials
c	: Cimento
Ca	: Consumo de água por metros cúbicos
Cc	: Consumo de cimento por metros cúbicos
CONAMA	: Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP V ARI	: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
cp's	: Corpos-de-Prova
CV	: Coeficiente de Variação
DM	: Dimensão máxima
E	: Módulo de Elasticidade em Giga pascal
EPUSP	: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Fc	: Resistência à Compressão, em Mega pascal
g/cm <sup>3</sup>	: Grama por centímetro cúbico
IBRACON	: Instituto Brasileiro do Concreto
IF	: Índice de Forma
IPT	: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo
Kg/m <sup>3</sup>	: Quilo por metro cúbico
KPa	: Quilo pascal
LACER	: Laboratório de Cerâmica
mm	: Milímetro
MPa	: Mega pascal
NBR	: Norma brasileira regulamentada
NM	: Norma mercosul
NORIE	: Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação
p	: Agregado graúdo
PNRS	: Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPGEC	: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
PRO ENGENHARIAS	: Programa de Apoio ao Ensino e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Engenharias
RCD	: Resíduo de Construção e Demolição
RILEM	: Réunion International de Laboratoires d'Essais et Matériaux
RS	: Rio Grande do Sul
RSU	: Resíduo sólido urbano
UFRGS	: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNEP	: United nations environment programme
VSI	: Vertical shaft impactor
$\alpha$	: Teor de Argamassa
$\gamma$	: Massa específica do agregado
M $\mu$	: Micro metro ( $10^{-6}$ )

## RESUMO

CORDEIRO, L.N.P. Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A cadeia produtiva da construção civil exerce grande influência na macroeconomia de um país. Em contrapartida, este setor destaca-se pelo consumo indiscriminado de matérias-primas não renováveis, processos produtivos ineficientes, além de uma grande quantidade de resíduos gerados. A reciclagem de materiais de construção desempenha um papel importante para a sustentabilidade visto que se tem a conservação dos recursos naturais e a redução de áreas para aterro. O foco principal dessa pesquisa é o estudo de resíduos de construção e demolição, mais especificamente os agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC). O objetivo principal desta tese foi analisar a influência dos principais parâmetros que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC), visando a transferência tecnológica. O programa experimental foi dividido em seis etapas. Nas etapas iniciais, estudou-se o resíduo de concreto, analisando a sua origem, os métodos de ensaios, para por fim realizar a caracterização dos materiais. Nas etapas intermediárias, fez-se um estudo para entender o efeito da variação granulométrica durante o processo de produção do concreto com fins estruturais. E nas etapas finais foram feitos estudos quanto à condição de saturação do AGRC. Com os resultados pode-se concluir que com um eficiente controle dos parâmetros de variabilidade do AGRC é possível produzir concretos com fins estruturais, visando dessa forma a transferência tecnológica.

Palavras-chave: resíduo de construção e demolição, resíduo de concreto, agregado reciclado de concreto, concretos estruturais, parâmetros de controle.

## **ABSTRACT**

CORDEIRO, L.N.P. Analysis of the main parameters governing the concrete made with recycled coarse aggregate concrete variability. 2013. Thesis (Engineering Phd)- Civil Engineering Post Graduated Program. UFRGS, Porto Alegre.

The construction industry supply chain has a great influence on country macro economy. In contrast, there is the indiscriminate consumption of non-renewable raw materials, production processes inefficient, plus a large amount of waste generated. The construction materials recycling plays an important role for the sustainability since it is the conservation of natural resources and reducing landfill areas. The main focus of this research is the study of construction and demolition waste, specifically recycled coarse aggregate concrete (AGRC). The main objective of this thesis is to analyze the influence of the main parameters governing the variability of concrete made with recycled coarse aggregate concrete (AGRC), aiming at technology transfer. The experimental program was divided into nine steps. In the early stages, concrete residue was studied, their origin and test methods were analyzed, and to end materials were characterized. In the intermediate stages, a study was made to understand the effect of varying particle size during the production process of structural concrete. And in the final stages studies were made in AGRC saturation condition. With the results it can be concluded that with an efficient control of AGRC variability parameter it is possible to produce concrete with structural objectives, aiming thereby to technology transfer.

**Keywords:** construction and demolition residue of waste concrete, recycled aggregate concrete, structural concrete, control parameters.

# 1 INTRODUÇÃO

O capítulo de introdução busca situar o leitor desta tese, através da motivação da pesquisa, da contextualização e justificativa do tema proposto, das questões de pesquisa, dos objetivos e das delimitações.

## 1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A motivação para o desenvolvimento dessa pesquisa surgiu pelo envolvimento da pesquisadora em estudos relacionados ao tema reaproveitamento de resíduos. O que a levou à participação no Programa de Apoio ao Ensino e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Engenharias (PRÓ ENGENHARIAS)<sup>1</sup>, em desenvolvimento no Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Através do projeto PRÓ ENGENHARIAS N° 01/2007 buscou-se avaliar as características de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD), obtidos em diferentes regiões do país, de forma a fazer a previsão das propriedades de concretos e argamassas produzidos com esses agregados, bem como, produzir e avaliar o comportamento físico, mecânico, e de durabilidade de argamassas, concretos e componentes pré-moldados produzidos com agregados reciclados. Esta tese de doutorado aborda especificamente o resíduo de concreto endurecido.

## 1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O crescimento da economia elevou a renda da população, contribuindo para um aumento na aquisição de bens, na execução de moradias, nos processos de reformas e, conseqüentemente, na geração de resíduos.

Os resíduos sólidos urbanos constituem-se numa problemática ampla e generalizada em todo o mundo. Segundo a United Nations Environment Programme (UNEP, 2010), em 2006 foram gerados no mundo em torno de 2,02 bilhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU); e em 2010, só no Brasil, foram produzidos quase 61 milhões de toneladas de resíduos

---

<sup>1</sup>O projeto PRO ENGENHARIAS está em desenvolvimento desde 2007, pelo grupo de Tecnologia de Materiais e Sistema Construtivo do NORIE-UFRGS. O projeto é financiado pela CAPES e fazem parte da rede pesquisa as seguintes instituições: UNISINOS, UEFS e UFPA.

---

Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC).

sólidos urbanos, o que significa uma média de 378 kg de lixo por ano para cada brasileiro (ABRELPE, 2011). Segundo Angulo (2005), o resíduo de construção e demolição (RCD) representa 50% da massa do resíduo sólido urbano (RSU); admitindo essa proporção, no final de um ano a quantidade de RCD gerada é passível de preocupação.

Grande parte do volume de resíduos concentra-se nas regiões metropolitanas, onde se aglomera o maior número de habitantes. De acordo com Blumenschein (2004), os processos construtivos executados em centros urbanos com mais de 500.000 habitantes são responsáveis por cerca de 40% a 70% do volume de resíduos sólidos urbanos. Desse total, entre 20% e 50% são dispostos irregularmente, ocasionando grandes problemas ambientais tais como: degradação de áreas de preservação, contaminação de rios e córregos, obstrução de vias e logradouros públicos, proliferação de vetores, queimadas, entre outros (LEVY, 2001).

É evidente que a cadeia produtiva da construção civil exerce um peso considerável na macroeconomia internacional e emprega uma enorme massa de trabalhadores, contribuindo para o desenvolvimento social de uma região. Só que da mesma forma que se destaca por fatores positivos, chama a atenção por apresentar muitos fatores negativos, citando-se o consumo indiscriminado de matérias primas não renováveis, processos produtivos ineficientes, consumo elevado de energia tanto na extração, quanto no transporte e processamento dos insumos, e por fim, uma grande quantidade de resíduos oriundos de construções, reformas e demolições e denominados de resíduos de construção e demolição. Todos estes fatores motivam discussões quanto à necessidade de se buscar o desenvolvimento sustentável.

A reciclagem de resíduos de construção no Brasil é relativamente recente, e se comparada com países europeus ainda é muito pequena. O primeiro estudo sistematizado para a utilização de resíduos de construção e demolição foi o de Pinto em 1986. A partir de então, pesquisas nesta área se intensificaram pelas universidades nacionais (ZORDAN, 1997; LEITE, 2001; VIEIRA, 2003; WERLE, 2010; PADOVAN, 2013; entre outros).

Em resposta a essas iniciativas, o governo também passou a fazer a sua parte. Em 2002, por exemplo, surgiu a Resolução do CONAMA, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos a serem adotados por governos municipais e agentes envolvidos no manejo e destinação do RCD. Dois anos mais tarde, a Associação Brasileira de Normas Técnicas

publicou normas regulamentadoras de gestão de resíduos sólidos, a NBR 15112 (ABNT, 2004) e a NBR 15116 (ABNT, 2004).

No ano de 2010, entrou em vigor Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) um marco na gestão de resíduos sólidos no país. Esta estabelece que os agentes públicos e privados fiquem responsáveis pela destinação e reaproveitamento dos resíduos urbanos por eles gerados. A Lei nº 12.305/2010 prevê a elaboração de planos integrados de gerenciamento dos resíduos. Observa-se, com essas iniciativas, um esforço, por parte dos gestores públicos, em melhorar o sistema e promover ações sustentáveis.

Os materiais reciclados tornam-se competitivos quando há dificuldade em se obter matérias primas, quando não se tem locais para sua eliminação e quando o custo de matérias primas naturais é elevado. O fim da segunda guerra mundial foi o cenário encontrado pelos países europeus para reciclar maciçamente o RCD e utilizá-lo como material de construção. O panorama atual demonstra que 75% dos RCD produzidos na união europeia são depositados em aterro (ORTIZ ET AL, 2010). Esses resíduos resultam da atividade de nova construção, recuperação e demolição de edifícios, obras públicas e outras estruturas. A Dinamarca ainda é o país com o maior taxa de reciclagem, cerca de cerca de 90%, esse sucesso deve-se ao elevado imposto a que estão sujeitos os resíduos que não são reciclados e a obrigatoriedade de separação do resíduo na origem (MALIA ET AL, 2011). Segundo o mesmo autor, a União Europeia, como um todo, está mobilizada à atingir níveis aceitáveis de reciclagem e a estimular a procura de produtos reciclados de RCD.

Estudos nacionais e internacionais comprovam a viabilidade de uso de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) (BARRA, 1996; CABRAL, 2007; WERLE, 2010; BUTTLER, 2003; FERREIRA, 2007). Altamente volumoso, a destinação adequada desses resíduos é um dos grandes desafios da sociedade contemporânea. Uma vez que a reciclagem na construção civil pode gerar inúmeros benefícios como a redução do consumo de recursos naturais não renováveis, redução de áreas de aterro, pela minimização do volume de resíduos; redução do consumo de energia, redução da emissão de gás carbônico.

Oliveira (2008) foi um dos pesquisadores que demonstrou que os RCD possuem características bem peculiares, podendo variar sensivelmente em função do local de geração, da tecnologia utilizada na construção, das variantes referentes ao material aplicado, da qualidade do projeto e mão de obra, entre outros.

No Brasil, apesar de já existirem políticas de gestão de resíduos, pouco ainda é feito. Existem divergências quanto à forma que esse material deve ser reciclado. Para concretos e argamassas, a divergência começa desde a caracterização, como por exemplo, quais os métodos mais adequados para a determinação da taxa de absorção. E se estende até a ordem das misturas: - será que a ordem tradicional de mistura para concretos convencionais é adequada para concretos contendo agregados reciclados de concreto?

A variabilidade do RCD é um problema, pois ainda não se entende quais fatores influenciam nas propriedades dos materiais com eles produzidos. Uma vez que esses fatores são desconhecidos, não se sabe o que deve ser controlado nem como controlar. Não existem ensaios normatizados, apenas propostas de diferentes grupos de pesquisa. Dessa forma cada trabalho acaba usando a metodologia que melhor se ajuste ao seu resíduo e às suas realidades.

Com relação ao resíduo de concreto, não existem pesquisas sistematizadas que avaliem a variabilidade do material durante a mistura. Ou ainda, pesquisas que analisem o fenômeno que rege a condição de saturação dos agregados porosos.

Todavia, deve-se pensar que as fontes geradoras de resíduos são permanentes, sempre existirão obras. Além disso, no final do ciclo de utilização aparecerão reformas e demolições. A qualidade de vida presente e futura deve ser preservada. Investir em pesquisas científicas que possam compensar os danos já causados e evitar futuros danos, ainda é uma das formas encontradas para garantir a continuidade saudável da vida humana.

Esta Tese tem por meta contribuir com essas discussões, uma vez que tem por objetivo principal analisar a influência dos principais parâmetros que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC), visando a transferência tecnológica.

### 1.3 QUESTÕES DE PESQUISA

O presente trabalho foi norteado pela seguinte questão de pesquisa:

“As características do AGRC são fatores limitantes no processo produtivo de concreto estrutural?”

## 1.4 OBJETIVOS

O objetivo principal da presente pesquisa consiste em analisar os principais parâmetros que regem a variabilidade dos concretos produzidos com AGRC.

A fim de atingir o objetivo principal do estudo, seguem-se alguns objetivos específicos:

- a. analisar a eficiência dos métodos de avaliação da taxa de absorção, quando aplicado em materiais porosos;
- b. avaliar a influência da origem do AGRC e da dimensão máxima na taxa de absorção do resíduo;
- c. avaliar a influência da condição de saturação dos AGRC durante a mistura;
- d. avaliar a influência do tipo de misturador e da ordem de mistura dos materiais no desempenho mecânico do concreto.

## 1.5 DELIMITAÇÃO

Esta pesquisa delimita-se ao estudo de agregados graúdos reciclados de concreto, e ao efeito desses materiais nas propriedades mecânica dos concretos com eles produzidos. Como a mesma faz parte de uma pesquisa maior, outros pesquisadores avaliaram as questões referentes a durabilidade e ao efeito do uso dos demais resíduos de construção e demolição.

## 1.6 ESTRUTURA DA TESE

A presente tese está dividida em quatro capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução que engloba a contextualização do tema, as motivações e questões de pesquisa, os objetivos e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo são abordados diversos aspectos relativos ao agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC). Buscou-se na literatura trabalhos que permitissem a identificação dos parâmetros de variabilidade do concreto com AGRC.

No capítulo 3 é apresentado o programa experimental e a análise e discussão dos resultados das diferentes etapas da pesquisa.

E no capítulo 4 são apresentadas as conclusões a que este estudo conduziu e as sugestões para futuros trabalhos.

## **2 AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO (AGRC)**

Atualmente, o Brasil vive uma situação favorável de país emergente. Além disso, foi contemplado para sediar a Copa Mundial de 2014 e às Olimpíadas de 2016, eventos que contribuirão para o aquecimento da construção civil. Com a economia em condições favoráveis e as necessidades de adequação para receber esses eventos internacionais, teve-se um aumento no volume de obras tanto de construção quanto de demolição e reformas, que levou a um consumo exacerbado de energia e de recursos naturais. Trata-se de uma crescente demanda ambiental, que poderia ser amenizada pela reutilização do RCD.

Brito Filho (1999) considera os materiais gerados e descartados pelas obras de construção civil como sendo verdadeiras jazidas de matérias primas, passíveis de serem exploradas. É consenso que o resíduo de construção e demolição (RCD) tem potencial de aproveitamento em concretos, argamassas e pavimentação. Além disso, é alternativa do ponto de vista ambiental, econômico e social, uma vez que a substituição de agregado natural por agregado reciclado reduz os gastos com transporte, as áreas de aterro, o volume de agregado extraído, entre outros. Porém a sua variabilidade ainda é um dos pontos que dificulta, em nível nacional, o seu uso.

Na tentativa de construir um embasamento teórico para um melhor entendimento do presente tema, esta revisão bibliográfica abordará conceitos relacionados ao agregado reciclado de concreto, características e definições serão citadas a respeito desde material, bem como discussões a respeito do efeito da incorporação desses materiais em concretos.

### **2.1 DEFINIÇÕES**

De acordo com Buttler (2003), os resíduos de concreto incluem rejeitos de demolição de estruturas de concreto, resíduos de usinas de concreto pré-misturados, fábricas de elementos pré-moldados e de pavimentos de concretos e blocos. Pela britagem desses materiais obtém-se

o agregado reciclado de concreto que é composto por agregado natural e argamassa aderida em sua superfície.

A NBR 9935 (ABNT 2011) define o agregado reciclado de concreto (ARC) como aquele material obtido pelo beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

Mehta e Monteiro (2008) consideram como características relevantes dos agregados para a composição do concreto as seguintes: porosidade, composição ou distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e tipos de substâncias deletérias presentes.

O conhecimento das propriedades físicas e químicas dos agregados e dos materiais ligantes que compõe os concretos comuns é de extrema importância, e passam a ser fundamentais na produção de concretos especiais que utilizam resíduos, uma vez que influenciam diretamente no comportamento do concreto, seja no estado fresco ou no estado endurecido. Diante dessa consideração, no item a seguir serão tratadas as principais características que regem os agregados reciclados de concreto, focando os agregados de frações graúdas.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS GRAÚDOS REICLADOS DE CONCRETO

Sanchez (2004) comenta que as características dos agregados reciclados dependem dos seguintes fatores: materiais de origem, equipamento utilizado no beneficiamento e dos procedimentos empregados para eliminar as impurezas. Este item discutirá sobre algumas características dos agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) sob a ótica de diferentes autores.

### 2.2.1 Forma e textura superficial das partículas

A forma dos agregados se refere à sua geometria tridimensional. Contudo, é difícil representar tridimensionalmente corpos irregulares, sendo assim é mais conveniente classificá-los em função de características geométricas bidimensionais tais como alongamento, achatamento, cubicidade, esfericidade, angulosidade, entre outros (ISAIA, 2007).

Segundo Fonseca (2002), o formato final do agregado reciclado pode ser anguloso, lamelar (espessura é pequena em relação às demais dimensões), dependendo do material presente no RCD, e do equipamento de britagem utilizado, que poderá aumentar a superfície específica dos agregados com formato irregular, resultando em uma maior quantidade de argamassa e pasta de cimento a ser aderida.

Os agregados reciclados de concreto são geralmente mais irregulares e angulares; e com texturas mais ásperas e rugosas que os agregados naturais (BAIRAGI *et al.*, 1983; RAVINDRARAJAH E TAM, 1985; ANGULO, 2000; CARNEIRO *et al.*, 2001; LEITE, 2001; PEDROZO, 2008). Os autores citados atribuem essa característica a presença da argamassa aderida na superfície do agregado natural.

Para Bicca (2000) a forma e a textura superficial do agregado influenciam diretamente na trabalhabilidade do concreto. Grãos angulosos tendem a promover misturas ásperas, com travamento dos grãos, que levam a um aumento no volume dos vazios devido as partículas de agregado encontrarem dificuldade de se acomodar.

Mehta e Monteiro (1992) comentam concretos com partículas de textura áspera, angulosa e alongada necessitam de um volume maior de pasta de cimento que partículas arredondadas e lisas. Esse aumento no volume de pasta afeta no custo do produto final.

A textura superficial do grão tem influência sobre sua aderência com a pasta de cimento Portland ou com o ligante betuminoso. A classificação da textura superficial baseia-se no grau de polimento da superfície das partículas, se a mesma é lisa ou áspera. E dependerá da dureza e porosidade da rocha matriz e da sua subsequente exposição à ação de atrito (ISAIA, 2007).

Se um concreto for constituído por partículas menos angulosas, o mesmo apresenta ângulos de atrito interno relativamente baixo, o que conduz num melhor arranjo das partículas e, conseqüentemente, implicará em melhores níveis de trabalhabilidade e compacidade (COUTINHO, 2000).

Marmash (2000), em sua pesquisa, revelou que o sistema de britagem afeta diretamente o coeficiente de forma dos agregados. Os britadores de mandíbulas, segundo o autor, proporcionam agregados reciclados com formas mais apropriadas para o concreto que os britadores de impactos.

Segundo Sanchez (2004) agregados reciclados beneficiados em britadores de impacto e de cone apresentam uma angulosidade maior. Ainda segundo o autor, se o concreto de origem apresentar uma maior relação a/c os agregados gerados serão mais arredondados. Esta tendência é explicada pela menor resistência do concreto de origem, que leva a um maior desgastes dos agregados graúdos reciclados (FONSECA, 2009).

Há diversos métodos para avaliação da forma do agregado. Os métodos diretos baseiam-se em medidas de um número significativo de partículas usando um paquímetro, tal qual descreve a NBR 7809 (ABNT, 2006) e a NBR 6954 (ABNT, 1989). Os métodos indiretos usam gabaritos comparativos, ou uma série de peneiras e crivos de formatos e aberturas diversas (ISAIA, 2007). A NBR 7809 (ABNT, 2006) define o grau de cubicidade do agregado graúdo, usando duas dimensões (comprimento e espessura), obtidas pelo método do paquímetro. Se a razão entre o comprimento e a espessura for próximo de 1 tem-se partículas cúbicas, tida como ótima para concreto com agregados britados. As partículas são consideradas lamelares e alongadas se apresentarem valores menores que o limite aceitável de 3. Se a razão obtida for maior do que 3, a partícula é rejeitada e não é adequada para a produção de concreto.

Em sua pesquisa, Leite (2001) analisou o índice de forma de resíduos de construção e demolição coletados na cidade de Porto Alegre, a fim de verificar se o mesmo encontrava-se em conformidade com a NBR 7211 (ABNT, 2009). O valor médio obtido pela pesquisadora foi de 2,3, para uma britagem realizada por britador de mandíbulas seguido pelo britador de rolo. Esta mesma avaliação foi feita por Gomes (2005), em Maceió. Os autores utilizaram moinho do tipo martelo para beneficiar o RCD; os valores médios de índice de forma encontrados por este autor foi de 2,4. Angulo (2000), britando o resíduo apenas em britadores de mandíbulas, obteve valores de índice de forma variando de 1,87 a 2,01.

Gonçalves e Neves (2003) afirmam que as melhores forma e composição granulométrica são obtidas quando o processo de britagem consiste na utilização inicial de um britador de mandíbulas, seguido de um britador giratório. Os britadores de mandíbulas formam partículas de formas mais angulares, enquanto que os britadores giratórios produzem partículas mais arredondadas (NUNES, 2007).

Tseng (2010) realizou um estudo comparativo entre agregados produzidos através de dois britadores (mandíbulas e de impacto). A autora observou que com relação ao índice de forma não existe diferença acentuada nos grãos obtidos a partir desses dois britadores.

### 2.2.2 Composição granulométrica

A composição granulométrica é uma característica importante do agregado, visto que influencia na trabalhabilidade, na resistência mecânica, no consumo de aglomerantes, na absorção de água, na fluência e no módulo de elasticidade (LIMA, 1999; ALTHEMAN, 2002; TOPÇU, 2004).

Uma distribuição granulométrica contínua indica que o agregado está uniformemente graduado para todos os tamanhos, permitindo uma ampla possibilidade de interação entre as partículas, e proporcionando um grau de compacidade e uma resistência mecânica mais elevada (MORALES et al, 2011).

Há diversos fatores que influenciam na granulometria do agregado reciclado, dentre eles destacam-se o tipo de resíduo processado, a relação água/cimento do concreto de origem beneficiado, o tipo de equipamento utilizado para cominuição, a regulagem do equipamento, tipo de sistema adotado no peneiramento (LIMA, 1999; ALTHEMAN, 2002; SANCHEZ, 2011).

Com relação ao tipo de britador, Hansen (1992) cita que os britadores de mandíbulas quebram somente uma pequena fração dos agregados naturais presente no concreto, enquanto os britadores de impacto quebram igualmente partículas de argamassa aderida e agregados graúdos naturais, produzindo agregados de qualidade inferior, do ponto de vista de quantidade de finos.

Em se tratando de finos os mesmo aparecem durante a manipulação do material devido à presença de pequenas partículas em sua superfície, que se desprendem com a movimentação. Grandes quantidades de finos passam a ser um problema, pois afetam a aderência da pasta com os agregados, além de aumentar em quantidade de água na mistura.

Nagataki et al. (2004) notaram em sua pesquisa, que utilizar um britador de mandíbula, seguido por um de impacto, melhora a qualidade do agregado graúdo reciclado de concreto, em função da redução da quantidade de argamassa aderida.

Ainda a respeito da segregação de finos, não se encontrou nenhum estudo que avaliasse essa movimentação ao longo da pilha dos resíduos de concreto. O que se verificou foi um estudo feito em pilhas de estocagem de minérios de ferro, realizada por Chaves e Ferreira (1996), que demonstrou que para esses materiais acontece uma segregação granulométrica, em virtude do

escorregamento dos finos ao longo da pilha. Ao medir esses finos, os referidos autores notaram que no centro da pilha a quantidade de finos é maior, e essa característica acentua-se em materiais de menores resistências.

Com relação à quantidade de agregados graúdos gerados durante a britagem de resíduos de concreto, pesquisas internacionais (SANCHEZ, 2004; FÉ, 2012) demonstram que a granulometria do agregado está fortemente associada a tecnologia de britagem adotada. A porcentagem de agregados graúdos produzidos por diferentes britadores oscilam entre 60 e 90%. Quando o britador é mantido fixo, e os resíduos são de diferentes origens outros fatores passam a influenciar na quantidade de material gerado, como por exemplo a qualidade do concreto de origem.

Ulsen (2011), em sua pesquisa (Figura 1), observou, pela distribuição granulométrica, que a proporção de agregados graúdos e miúdos gerados, através de britagem por VSI, apresenta proporções semelhantes. Os resultados demonstraram que o tipo de resíduo associado ao tipo de britador influenciam nas características dos agregados reciclados.

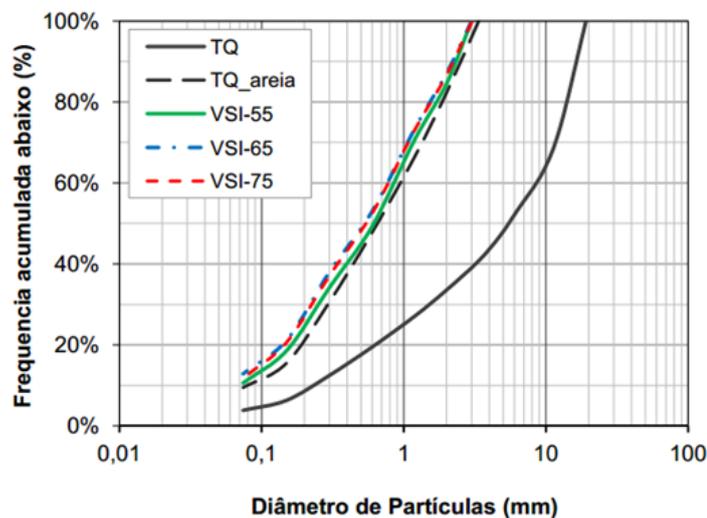


Figura 1: Distribuições granulométricas comparativas de Ulsen (2011)

Frações graúdas geralmente apresentam uma curva granulométrica adequada, e se enquadram muitas vezes dentro das recomendações estabelecidas pelas normas nacionais. A determinação da curva granulométrica através do ensaio normalizado pela NBR 7211 (ABNT, 2009) estabelece os limites que o agregado para concreto deve se enquadrar (Figura 2).

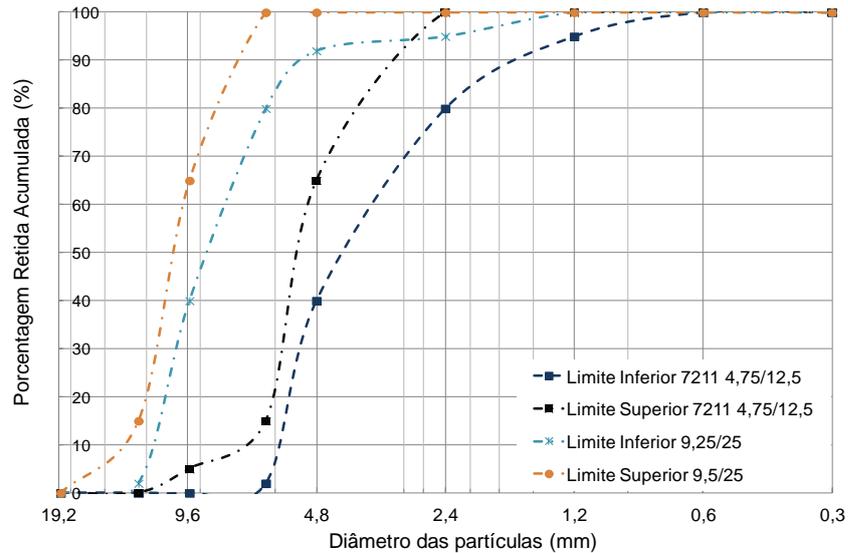


Figura 2: Faixa granulométrica do agregado para concreto

Em termos de dimensão máxima (DM) do agregado, quanto maior a DM menor a área superficial por unidade de volume que deve ser coberto pela pasta de cimento para uma dada relação água/cimento (a/c).

Quanto ao módulo de finura, os agregados graúdos reciclados de concreto mostram-se geralmente mais finos que o agregado natural, esses valores variam entre 5,50 e 5,80 (RASHWAN e ABOURIZK, 1997; TOPÇU e ŞENGEL, 2004; MEHTA e MONTEIRO, 2008). Pequenas variações de módulo de finura ocorrem em função da qualidade do concreto de origem e do tipo de britagem. Em geral os agregados gerados por concretos de maiores resistências apresentam módulos de finura ligeiramente superiores aos procedentes de concretos de menor resistência (KOBAYASHI e KAWANO, 1988; KAKIZAKI et al.1988).

Durante o beneficiamento do resíduo de concreto para a produção de agregados graúdos reciclados, geram-se também finos e microfins. Segundo Soares e Mendes (1999) finos de britagem são todas as partículas com dimensões menores que 4.8 mm, gerados pelo processo de cominuição. E microfins ou filler são os materiais com partículas menores que 0.075 mm.

Nos agregados graúdos de concreto ficam aderidas partículas finas e microfins que se desprendem durante a manipulação. Em quantidades adequadas, a presença dessas partículas pode levar a resultados satisfatórios de desempenho mecânico. Os microfins, por exemplo, melhoram as propriedades mecânicas do concreto, pois ocupam os espaços vazios entre as partículas maiores, promovendo um empacotamento melhor. Entretanto, em grandes quantidades podem exigir um acréscimo de água, para que a trabalhabilidade desejada seja mantida. O mesmo acontece com as frações finas, que se tornam um problema quando estão

em grandes quantidades, pois afetam na aderência da pasta com os agregados, além de aumentar a quantidade de água na mistura.

Há vários motivos para especificar os limites granulométricos e a dimensão máxima do agregado. Dentre eles destacam-se a sua influência sobre a trabalhabilidade do concreto e o seu efeito sobre o custo. A determinação da curva granulométrica é uma tarefa simples, no entanto, decidir se a granulometria do agregado pode ou não ser aceitável para a produção de concreto é uma tarefa mais complexa.

Os parâmetros de granulometria ideal para concreto de décadas passadas é diferente dos parâmetros atuais. Fernandes (2004) cita que na década de 70, por exemplo, o agregado miúdo adequado para a produção de concreto era a areia grossa, normalmente encontrada na região de Jacareí, seu uso era bastante difundido entre as concreteiras. Passado o tempo, materiais com essas características tornaram-se escasso e as concreteiras passaram a utilizar os materiais disponíveis na região que eram as areias finas e areias compostas artificialmente com finos de pedreiras, que não apresentaram restrições por parte dos consumidores.

Percebe-se com esse exemplo que a granulometria ideal é aquela que atende a finalidade específica para o qual o concreto se destina, sem prejudicar as propriedades do concreto. Como os materiais reciclados apresentam características distintas, os mesmos devem se enquadrar em limites mínimos que não prejudiquem a durabilidade e a estabilidade do concreto a ser produzido. Logo, o uso de curvas granulométricas como parâmetro de seleção de um agregado reciclado não pode ser adotado como critério absoluto de seleção, ao invés disso pode ser entendido como critério orientativo para prever a trabalhabilidade do concreto a ser produzido.

Para controlar o processo de britagem e a granulometria do agregado reciclado, foi desenvolvido na Alemanha um processo que avalia a característica do britador (RILEM, 1992). Esse processo, que foi divulgado no RILEM (1992), consiste em representar graficamente a relação existente entre o fator de redução, chamado de R, e a porcentagem de material retido nas diferentes peneiras. As relações entre os materiais retidos nas peneiras antes, e depois da britagem, equivalem ao fator de redução. A partir desse conceito é possível estimar a granulometria final dos agregados a partir da granulometria inicial, para cada tipo de britador, e decidir em função das características do resíduo, o tipo de sistema de britagem que melhor se ajuste à distribuição requerida.

### 2.2.3 Quantidade de argamassa aderida no agregado reciclado de concreto

O agregado reciclado de concreto possui em sua composição uma quantidade de argamassa aderida, que o diferencia dos agregados naturais. A presença dessa argamassa nos grãos influencia em características como massa específica, taxa de absorção, módulo de elasticidade, resistência mecânica, e de durabilidade dos concretos com eles produzidos.

Se o objetivo for produzir agregados reciclados com o mínimo de argamassa aderida, os britadores de impacto são mais eficientes, pois eles quebram o material fraco, levando a uma melhor qualidade do agregado (ETXEBERRIA, et al., 2007).

Chaves (1999) ao analisar diferentes britadores verificou que no britadores de mandíbula a quebra das partículas se dá por força de compressão que induzem tensões de cisalhamento, enquanto que no britador de impacto a quebra se dá em alta velocidade sendo a energia cinética transformada em fratura,

Segundo Sanchez (2004), o tamanho dos grãos influencia na quantidade de argamassa aderida. O autor diz que quanto menor o grão, maior a porcentagem de argamassa. Amorim (2008), em sua pesquisa, analisou essa relação e também observou que para as frações menores tem-se um volume maior de argamassa aderida ao agregado natural (Figura 3), fato corroborado por Barra (1996), Santos et al. (2002), Sanches (2004) e Juan e Gutiérrez (2009). Por esse motivo que Hansen (1992) e Vázquez et al. (2004) não recomendam o uso de agregados miúdos de concreto reciclados na produção de novos concretos.

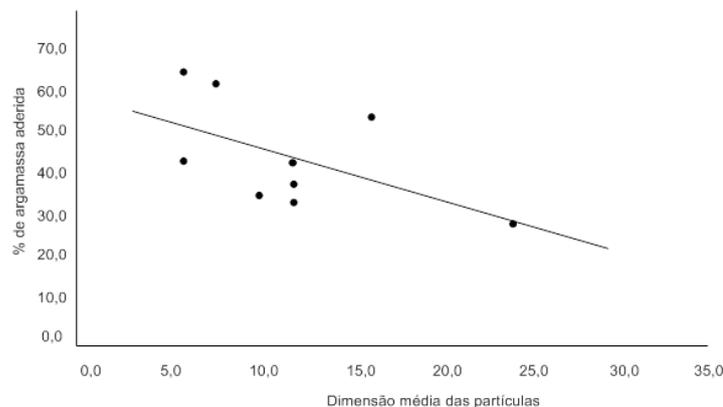


Figura 3: Porcentagem de argamassa aderida em função da dimensão média das partículas (adaptado de Amorim, 2008)

Com relação à qualidade do concreto de origem, estudos demonstram que as características do concreto de origem influenciam na quantidade de argamassa aderida, obtêm-se geralmente

valores superiores de quantidade de argamassa aderida aos agregados graúdos procedentes de concretos de maior resistência (HANSEN, 1992; SANCHEZ, 2004).

O diâmetro máximo do agregado reciclado e o método de britagem utilizado afetam diretamente nas quantidades de argamassa e pasta aderidas ao agregado (TSENG, 2010). Maiores quantidades de pastas aderidas implicam em uma menor massa específica, maior absorção de água e menor resistência à abrasão (TSENG, 2010).

Hansen (1992) observou que quanto menor o tamanho dos agregados reciclados, maior a quantidade de argamassa aderida. Juan e Gutiérrez (2009) confirmaram essa tendência em ensaios realizados para avaliar a quantidade de argamassa aderida em grãos de diferentes dimensões. Para a fração 4.8 mm a quantidade de argamassa aderida variou de 33 a 55%. Já para a fração de 16 mm a variação foi de 23% a 44%. Na Figura 4 estão os resultados de absorção de água alcançados por Hansen (1992), confirmando esse comportamento.

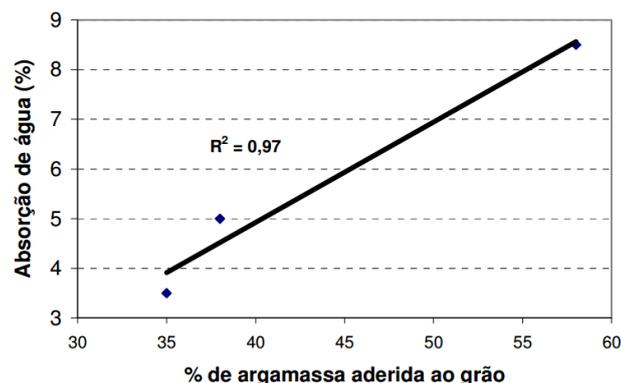


Figura 4: Resultados de absorção de água em função da porcentagem de argamassa aderida (adaptado de Hansen, 1992)

Em se tratando de metodologia de ensaio, ainda não existe uma normalização para determinação dessa característica. Contudo, a bibliografia (BARRA, 1996; SANCHEZ, 2004; FERREIRA, 2007) demonstra que três tipos de ensaios são comumente usados: o tratamento com ácido clorídrico, tratamento térmico e análise com planímetro. Porém os resultados obtidos pelos referidos métodos tratam-se de estimativas aproximadas, muitas vezes condicionadas à eficácia do procedimento de ensaio.

#### 2.2.4 Massa específica e Massa unitária

Segundo Mehta e Monteiro (2008), para fins de dosagem é necessário determinar o espaço ocupado pelas partículas de agregado, incluindo os poros existentes dentro das partículas, por unidade de volume, relação denominada como massa específica.

Em se tratando de dosagem de concreto, o uso de agregados reciclados com menor massa específica resulta num maior volume de agregados, quando são tomadas massas iguais de agregados naturais e reciclados. Este é um fato que deve ser observado no momento de se adaptar o traço de concreto convencional aos agregados reciclados, principalmente quando são realizados estudos comparativos de laboratório (TENÓRIO, 2007).

A argamassa aderida no agregado reciclado de concreto tem uma densidade significativamente menor que a dos agregados naturais originais, e quanto maior a quantidade de argamassa aderida no agregado natural, menor será a massa específica do agregado reciclado (BRITO, 2005).

Sanchez (2004), em sua pesquisa, destaca alguns dos fatores que influenciam na densidade dos agregados reciclados citando:

- a densidade do agregado reciclado é superior nas frações mais grossas, e que a mesma aumenta com o tamanho máximo do agregado;
- a densidade pode variar em função do tipo de britador, quanto se utilizam os britadores de impacto este elimina a maior parte de argamassa aderida, conseqüentemente obtém-se uma maior densidade. E também caso sejam realizadas várias etapas de beneficiamento, geram-se agregados de melhor qualidade e maior densidade.
- se o concreto de origem é de alta resistência, a densidade obtida será maior.

Carrijo (2005) avaliou a influência da massa específica dos agregados reciclados sobre as propriedades do concreto. A autora coletou agregados graúdos reciclados, e separou em duas pilhas: uma cinza (resíduos à base de cimento) e outra vermelhas (resíduo à base de cerâmicas). E os separou em quatro faixas de massa específica:  $d < 1,9 \text{ kg/dm}^3$ ;  $1,9 \text{ kg/dm}^3 < d < 2,2 \text{ kg/dm}^3$ ;  $2,2 \text{ kg/dm}^3 < d < 2,5 \text{ kg/dm}^3$  e  $d > 2,5 \text{ kg/dm}^3$ . O resultado obtido foi que a massa específica e a absorção dos agregados reciclados variam conforme o intervalo de separação de densidade e não em função do tipo de agregado, se cerâmico ou cimento.

A Tabela 1 apresenta um resumo do levantamento bibliográfico relativo à massa específica e massa unitária de agregados reciclados de concretos em função de suas frações granulométricas.

Tabela 1: Levantamento bibliográfico relativo à massa específica e massa unitária dos agregados reciclados de concreto

<b>Autor</b>	<b>Fração granulométrica (mm)</b>	<b>Massa específica (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Unitária (kg/dm<sup>3</sup>)</b>
Hansen e Narud (1983)	4 - 8	2,34 - 2,35	-
	8 - 16	2,42 - 2,45	-
	16 - 32	2,48 - 2,49	-
Barra (1996)	6 - 12	2,41	-
	12 - 20	2,43	-
Soberón (2002)	5 - 10	2,42	-
	10 - 20	2,41	-
Santo et al ( 2002)	5 - 19	2,46 - 2,48	1,37 - 1,39
Katz (2002)	10 - 20	2,55 - 2,59	1,43 - 1,46
Buttler (2003)	0 - 20	2,39 - 2,55	1,25 - 1,29
Sanchez (2004)	4 - 8	2,24 - 2,42	-
	8 - 16	2,33 - 2,47	-
	4 - 16	2,3 - 2,45	-
Matias e Brito (2005)	2 - 25	2,63 - 2,65	1,26
Gomes (2007)	1 - 38	2,52	1,3
Yong e Teo (2009)	10 - 20	2,30	1,32
Rahman (2009)	10 - 20	2,40	-
Padmini et al (2009)	10 - 20	2,38 - 2,56	1,32 - 1,42
Werle (2010)	10 - 20	2,47 - 2,50	1,20 - 1,21
Troian (2010)	10 - 20	2,47 - 2,50	1,18 - 1,21
Cavalheiro (2011)	0 - 20	2,28 - 2,37	1,16
Kim et al (2012)	4 - 8	2,43	-
	10 - 20	2,61	-
Belagraa e Beddar (2013)	8 - 25	2,34 - 2,40	1,12 - 1,24
Manzi et al (2013)	16 - 25	2,3	-

Os resultados de massa específica e massa unitária dos agregados reciclados de concreto são muito variáveis, conforme mostra a tabela (Tabela 1). Essa diferença ocorre por diversos fatores tais como resistência do concreto de origem, diferença de granulometria, de método de ensaio, de britador.

Tomando como exemplo o fator granulometria, percebe-se que a massa específica das partículas é maior nas frações granulométricas mais grossas. A menor massa específica nas frações de menor dimensão pode ser justificada pelo processo de britagem, quando a argamassa se desprende do agregado, ela, por ter uma menor resistência, acaba quebrando e se transforma em agregado de menor dimensão.

A dispersão encontrada pode ser justificada pela diferença de massa específica dos agregados naturais que constituem os agregados reciclados e da porosidade da argamassa aderida. De

modo geral quanto maior a massa específica e a massa unitária dos agregados, melhor será o desempenho do agregado que os incorpora (COUTINHO, 2000). Com a massa unitária esta conclusão não é evidente, uma vez que a mesma dependerá além da massa do material, da forma das partículas e de como elas estão dispostas (COUTINHO, 2006).

### 2.2.5 Absorção de água

São diversas as propriedades do concreto tais como resistência compressão, módulo de elasticidade, absorção, entre outras, que são influenciadas pela porosidade dos agregados. De Larrard (1999) menciona que todas as propriedades do concreto, em especial, as relacionadas à reologia do concreto fresco, são afetadas pela absorção de água do agregado caso este seja utilizado na condição seca. Quando os agregados são heterogêneos, como o agregado de concreto, esta influência se torna ainda mais significativa.

Define-se como absorção o processo pelo qual um líquido penetra e preenche os poros permeáveis em corpo sólido poroso C9 (ASTM C 125, 1995). Assim, a absorção está diretamente relacionada à estrutura de poros do corpo, sendo uma proporção da quantidade água possível de ser retida nestes poros em relação à massa seca do material. As propriedades de massa específica aparente e absorção estão relacionadas à estrutura porosa permeável do corpo, sendo medidas indiretas da porosidade dos agregados (DAMINELI, 2007).

Para Etxeberria (2004), a absorção dos agregados reciclados está associada a três fatores principais, que são: dimensão das partículas, quantidade de argamassa aderida e massa específica.

O tamanho das partículas influencia tanto na massa específica quanto na absorção dos agregados reciclados. Para um resíduo de mesma origem, as frações menores apresentam uma menor densidade e uma maior absorção que as frações mais grossas (MARMASH 2000, UNE-EN 1015-2). Barra (1996) observou que quanto menor o diâmetro da partícula, maior a quantidade de argamassa aderida a sua superfície, conseqüentemente, maior é a porosidade inerente do material, e maior é a taxa de absorção obtida. A Figura 5 demonstra que há uma tendência de aumento da taxa de absorção de água com a dimensão média das partículas.

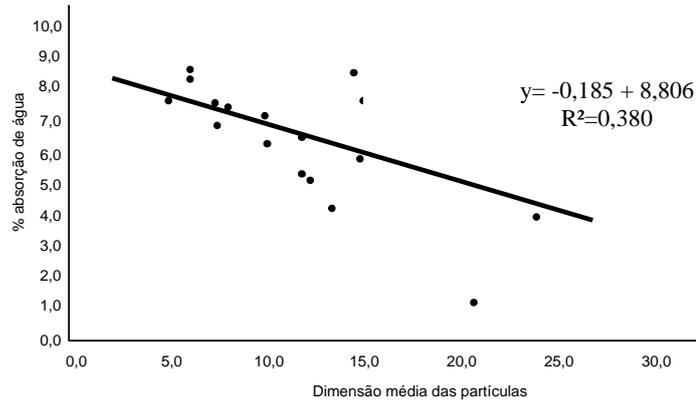


Figura 5: Absorção de água dos agregados graúdos reciclados de concreto em função da dimensão média das partículas (adaptado de Ferreira, 2007).

Já a Tabela 2 apresenta o resumo dos dados de absorção do agregado graúdo de concreto, coletado durante a pesquisa bibliográfica.

Tabela 2: Levantamento bibliográfico relativo à taxa de absorção dos agregados reciclados

Autor	Fração granulométrica (mm)	Taxa de absorção (%)
Barra (1996)	6 – 12	7,5
	12 – 20	6,9
Soberón (2002)	5 – 10	6,8
	10 – 20	5,8
Buttler (2003)	0 – 20	4,74 – 6
Poon et al. (2004)	0 – 10	7,6
	10 – 20	6,3
Sanchez (2004)	4 – 8	5,1 – 11,5
	8 – 16	4,2 – 8,8
Matias e Brito (2005)	2 – 25	4,1
Gomes (2007)	1 – 38	8,5
Yong e Teo (2009)	10 - 20	6,4
Rahman (2009)	10 - 20	3,48
Padmini et al (2009)	10 – 40	2,2 - 5
Werle (2010)	10 - 20	6.07
Corinadelsi (2010)	4 – 8	8,8
	8 – 16	6,8
Kim et al (2012)	4 - 8	4,55
	10 - 20	1,82
Manzi et al (2013)	16 - 25	7
Uddin et al (2013)	0 - 20	3 – 7,70

Nota-se pelos resultados que frações maiores comumente apresentam uma menor taxa de absorção. Outro fator que pode influenciar na taxa de absorção do AGRC é a resistência do concreto de origem. Limbachiya et al. (2000) realizou um estudo com agregados de concretos de alta resistência (50 MPa), a taxa de absorção encontrada foi de 4.9%. Em 2010, Dhir et al., realizaram estudos com agregados graúdos provenientes de concretos de resistência de 35 e 60 MPa, os resultados de taxa de absorção obtidos foram de 5.5% e 4.8% respectivamente. Nota-se que para esses estudos os concretos de alta resistência apresentaram uma menor taxa de absorção.

O tipo de processamento é outro fator que influencia na taxa de absorção. Quando o processamento do agregado graúdo é feito a partir de sucessivas triturações, se elimina uma maior quantidade de argamassa aderida e a qualidade do material melhora consideravelmente, em virtude da diminuição da absorção e do aumento da densidade (MARMASH 2000).

Juan e Gutiérrez (2004) estudaram a influência da quantidade de argamassa aderida ao agregado natural nas propriedades de agregados reciclados de concreto, e verificaram que a porosidade da argamassa aderida influencia negativamente nas propriedades dos agregados reciclados. Ainda segundo os autores, quanto maior a quantidade de argamassa aderida, menor a densidade do agregado, e conseqüentemente, maior será a absorção de água. Os autores indicam que a quantidade limite ideal de argamassa aderida ao agregado natural seja de 44%.

Ferreira (2007) analisou a velocidade da absorção de água ao longo do tempo, e percebeu que os agregados reciclados de concreto absorvem, aos cinco minutos, cerca de 90% da sua capacidade total de absorção. E a partir dos cinco minutos de imersão em água, a evolução da absorção é bastante lenta e pouco significativa (Figura 6).

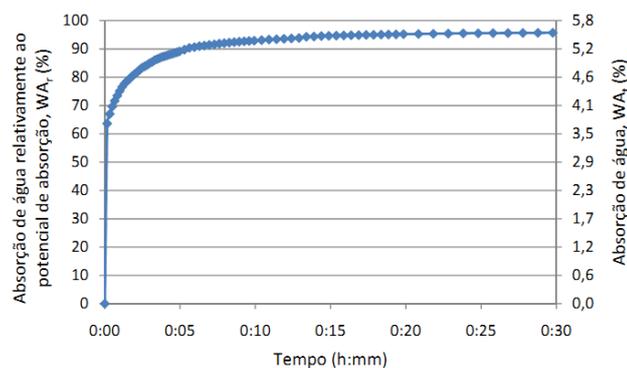


Figura 6: Ensaio de absorção de água ao longo do tempo em agregado graúdo reciclado de concreto (FERREIRA, 2007)

Werle (2010) também notou que os AGRC possuem uma alta taxa de absorção de água durante os primeiros 10 minutos de imersão, não varia muito no intervalo dos 10 ao 30 minutos, e vai aumentando lentamente ao longo de todo o período do ensaio. Gonçalves (2011) considera os 5 minutos iniciais como aqueles onde a absorção do AGRC é mais intensa, e nos demais tempo a variação é pouco significativa.

Outros pesquisadores (BUTLER, 2003; CABRAL, 2007) também realizaram este estudo, e também observaram que aos 10 minutos o agregado reciclado de concreto é capaz de absorver cerca de 85% de toda a capacidade de absorção de água. Os resultados demonstram que o agregado reciclado de concreto tem uma capacidade de absorção inicial rápida. A absorção de água do agregado exerce uma influência sobre as propriedades do

A norma holandesa CUR:1997 citada por Gonçalves (2007) especifica algumas considerações a respeito do uso de agregados reciclados, uma das exigências é especificar a origem dos agregados. E a outra é submeter os agregados a processos de saturação, para compensar as diferenças de absorção de água existente entre os agregados naturais e agregados reciclados. A norma brasileira (NBR 15116, ABNT 2004) recomenda que seja realizada uma pré-molhagem de 80% da taxa de absorção de água para a produção de concretos sem fins estruturais.

Para Angulo (2005) e Carrijo (2005), agregados reciclados de elevada porosidade influenciam de forma relevante na resistência dos concretos com eles confeccionados. Carrijo (2005) comenta que os agregados podem ter seus poros completamente encerrados dentro do sólido, ou mesmo superficiais. Existe uma variabilidade grande de tamanhos e estrutura de poros. Através destes, podem penetrar água e partículas de cimento da pasta durante a execução de novos concretos, e sua profundidade de penetração dependerá das dimensões, continuidade e volume total dos poros e da finura do cimento. Dependendo do teor de umidade dos agregados, estes podem ir de completamente secos a úmidos. A quantidade de água livre, presente na superfície do agregado no estado úmido, é variável de um agregado para o outro. Esta depende da capacidade dos agregados de carregar a água, sendo então relacionada à sua área superficial. A absorção de um agregado pode ser definida em quatro estágios, tal qual mostra a figura 7.

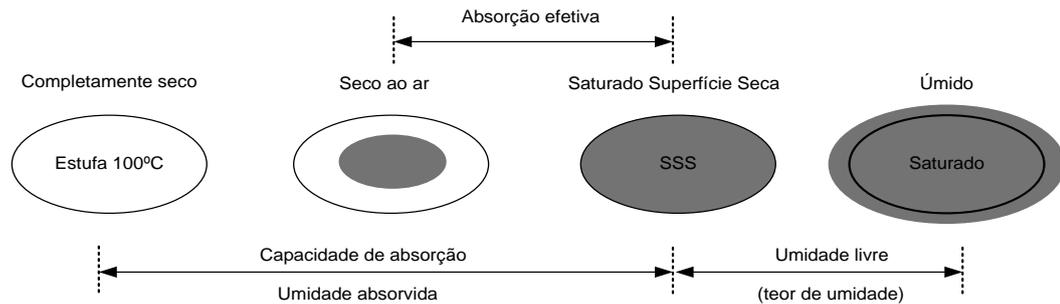


Figura 7: Representação esquemática das condições de umidade do agregado para concreto (adaptado de Neville, 1997)

Contudo, quando se opta pela utilização de agregados reciclados deve-se tomar cuidado ao usar condições extremas de umidade, que seria na condição totalmente saturada, uma vez que esta, além de aumentar a trabalhabilidade do concreto produzido com o resíduo, pode causar danos ao concreto em termos de propriedades mecânicas e de durabilidade (BARRA e VAZQUEZ, 1996; POON et al.,2004).

No caso da massa específica, Neville (1997) considera que os poros internos presentes nas partículas dos agregados correlacionam-se com a sua massa específica. Angulo (2000), em sua pesquisa, efetuou uma correlação entre os resultados de massa específica e taxa de absorção (Figura 8), e observou que estes parâmetros são inversamente proporcional, ou seja, a absorção de água será maior nos agregados que apresentarem uma menor massa específica.

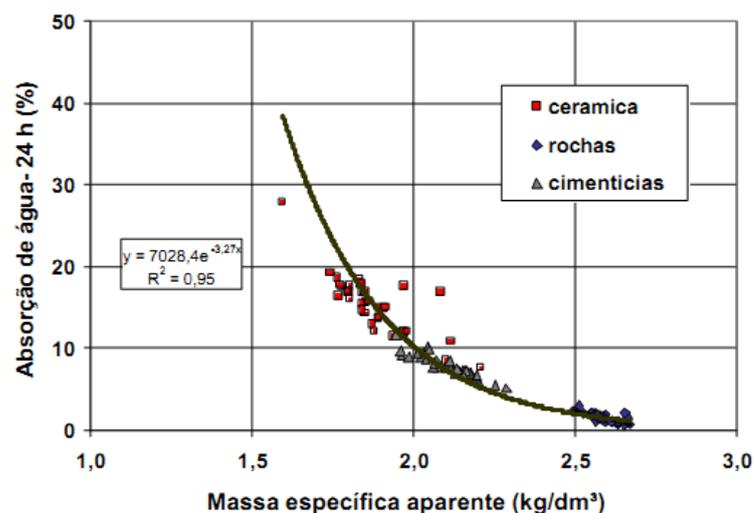


Figura 8: Correlação entre as propriedades massa específica aparente e absorção de água para as fases dos agregados graúdos de RCD reciclados (ANGULO, 2000)

Diante de tudo que foi comentado, observa-se que a taxa de absorção de água do agregado reciclado de concreto é superior à taxa de absorção do agregado natural. E também que a mesma está relacionada a distintos fatores tais como: origem, dimensão, tipo de britador, entre

outros. O ideal é que o agregado reciclado esteja na condição intermediária de umidade a fim de minimizar ou anular os efeitos negativos da absorção.

A pesquisa de Pandova (2013) mostrou que utilizar AGRC em condições de umidade adequada não afeta de forma negativa nas propriedades dos concretos com eles produzidos. A autora estudou três teores de pré-molhagem e os resultados encontrados mostraram que os concretos produzidos com AGRC previamente saturados não prejudicam a trabalhabilidade e a resistência à compressão dos novos concretos. A pré-molhagem em altos teores afeta apenas na durabilidade desses novos concretos. O coeficiente de capilaridade aumentou nas situações onde os teores de pré-molhagem eram altos (60 e 80%), já para o teor de pré-molhagem de 40% o coeficiente de capilaridade diminuiu. A autora atribui esses comportamentos a migração da água da argamassa para o AGRC, diminuindo assim a capilaridades desses concretos.

#### 2.2.6 Resistência à abrasão

Para Neville (1997) e Mehta e Monteiro (2008), a resistência à abrasão se inter-relaciona com propriedades tais como resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

Os agregados reciclados apresentam um elevado coeficiente Los Angeles devido à grande quantidade de argamassa que se desprende durante o ensaio. Quanto menor a relação a/c do concreto de origem, menor o coeficiente Los Angeles dos agregados que provém dele. Um dos métodos utilizados para avaliação desta característica, baseia-se no ensaio americano denominado de abrasão Los Angeles, que combina abrasão e atrito.

O ensaio de abrasão Los Angeles é um ensaio que permite aferir a resistência ao desgaste sofrido pelo material, quando submetido a um determinado número de revoluções na máquina Los Angeles, juntamente com uma carga abrasiva à velocidade de 30 a 33 RPM (NBR NM 51, ABNT 2001). O valor obtido pelo ensaio serve como parâmetro de qualidade do material a ser utilizado no concreto, visto que representa a capacidade de fragmentação por choque e atrito das partículas graúdas.

No caso dos agregados reciclados, apesar de não existir uma referência normativa que estabeleça o limite máximo de perda de resistência à abrasão, seu conhecimento é importante visto que interfere nas principais propriedades mecânicas do concreto.

Hansen e Narud (1983), em sua pesquisa, mensuraram o desgaste por abrasão Los Angeles de agregados reciclados de concreto e encontraram valores de perda de massa na ordem de 20 a 50% maior que os dos agregados naturais. Os autores atribuíram esta perda de massa à quantidade de argamassa aderida ao agregado natural, atribuindo a esta a fragilidade do agregado; e concluíram que quanto mais finos o agregado possuir, maior será o seu desgaste.

Buttler (2003) avaliou a perda por abrasão variando a idade de cura. O autor percebeu que a perda por abrasão diminuía à medida que aumentava a idade de cura, atribuindo esta perda nas primeiras idades a grande quantidade de partículas de cimento não hidratadas aderidas à superfície do agregado.

Analisando esta característica em agregados reciclados saturados e secos, Bazuco (1999) percebeu que a perda por abrasão é menor se os agregados estiverem saturados. O autor encontrou valores de perda por abrasão para agregados reciclados seco de 44,5% e para os saturados de 42,7%.

Limbachiya et al. (2000) verificaram que em agregados provenientes de concretos de alta resistência mecânica (acima de 50 MPa) a resistência à abrasão é bem pequena. Hansen e Narud (1983) observaram que agregados reciclados provenientes de resíduos de concreto de alta resistência apresentam valores de abrasão iguais a 22,4% e para agregados provenientes de resíduos de baixa resistência, o valor de perda de massa por abrasão ficou em torno de 41,4%.

### 2.2.7 Quantidade de Contaminantes e Impurezas

Os agregados reciclados apresentam uma quantidade de impurezas e contaminantes muitas vezes maior que o agregado natural, tais como plásticos, madeira, ladrilho, matéria orgânica, entre outros. A presença das impurezas está muitas vezes relacionada à etapa da demolição a qual o resíduo faz parte. Materiais provenientes de demolições de estruturas de concreto contêm na maioria das vezes menos impurezas que materiais originados pela quebra de paredes de alvenarias. O resíduo da fragmentação da alvenaria vem, em geral, acompanhado de argamassa, madeira, gesso e vidros.

É um consenso que a presença de impurezas diminui a resistência mecânica dos concretos produzidos com materiais contaminados. Contudo, Alaejos e Sanchez (2006) citam outros problemas decorrentes de tais contaminações:

- a presença de vidro favorece a reação álcali-agregado;
- o gesso pode originar ataque de sulfatos;
- a madeira e o papel são instáveis e em ciclos de umidade e secagem desprendem finos que prejudicam a aderência da pasta nos agregados;
- as pinturas incorporam ar nos concretos;
- os solos argilosos aumentam a demanda de água e originam uma maior retração no concreto;
- os metais podem produzir manchas superficiais devido à oxidação.

Para evitar tais situações o ideal seria trabalhar com a demolição seletiva, dessa forma o resíduo poderia ter um maior aproveitamento.

## 2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO COM RESÍDUO DE CONCRETO (RDC) NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

Quando se inserem agregados provenientes de resíduos em uma nova matriz de concreto, modificam-se as características do produto tanto no estado fresco quanto no endurecido. Nos itens que seguem são tratadas as principais propriedades afetadas pelas características dos agregados reciclados de concreto.

### 2.3.1 Trabalhabilidade

Mehta e Monteiro (2008) definem trabalhabilidade como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade, sendo que, o termo manipular inclui todas as operações das primeiras idades tais como lançamento, adensamento e acabamento do material. Ainda segundo os autores, um concreto difícil de lançar e adensar, não só causará o aumento do custo de manipulação, como também terá as suas propriedades mecânicas e de durabilidade afetadas.

Segundo Tattersal (1991) apud Castro e Libório (2005) a uniformidade do concreto está associada ao misturador empregado, o método e a sequência de incorporação dos materiais constituintes. Porém, mesmo com todo cuidado poderá haver uma variabilidade da trabalhabilidade dentro do lote considerado. Nota-se que mesmo para concretos com agregados naturais essa característica é bastante suscetível a variabilidade, pois depende da interação adequada de diversos fatores.

É um consenso que a presença de agregados reciclados em concreto afeta diretamente a trabalhabilidade. Os fatores principais que influenciam nessa variação são a forma irregular, a textura áspera e superfície porosa por conta da argamassa aderida. Concretos com agregados reciclados, geralmente, apresentam misturas mais secas que as que utilizam agregados naturais, com a mesma relação água/cimento.

Padmini et al (2009) em sua pesquisa observaram que o tamanho do agregado influencia diretamente na trabalhabilidade do concreto, segundo os autores quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor a absorção de água e melhor a trabalhabilidade.

Mendes et al. (2004), verificou que é possível manter a trabalhabilidade do concreto com agregado reciclado semelhante a do concreto com agregado natural, realizando para isso a pré-molhagem e/ou a compensação de água. Leite (2001), Carrijo (2005) e Malesev et al (2010) compartilham da mesma opinião.

López-Gayarre et al. (2009) comentaram que devido a absorção dos agregados reciclados de concretos ser maior que a do natural, realizar produções de concreto mantendo fixo a relação a/c e o abatimentos constantes só é possível com o uso de aditivos.

Nealen e Ruhl (1997) realizaram um estudo no qual compararam a evolução, ao longo do tempo, da trabalhabilidade de um concreto com agregado gráúdo natural e com um agregado gráúdo reciclado de concreto, ambos com a mesma relação a/c e a mesma distribuição granulométrica inicial, avaliando o índice de consistência. O resultado desta pesquisa está expresso na Figura 9.

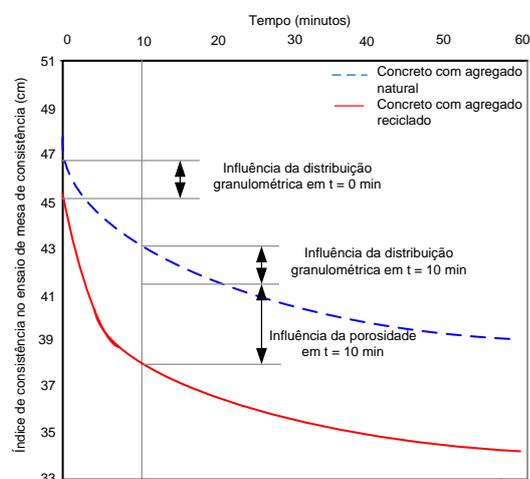


Figura 9: Desenvolvimento do índice de consistência no ensaio de mesa de consistência (adaptado de NEALEN e RUHL, 1997)

Através dos resultados apresentados por Nealen e Ruhl (1997) percebeu-se que os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram uma consistência inferior que a dos concretos com agregado natural. Verificou-se também que nos 10 minutos iniciais de mistura ocorreu uma acentuada perda de trabalhabilidade nos concretos com resíduo. Este comportamento pode ser atribuído a elevada absorção inicial dos resíduos e a alteração da distribuição granulométrica dos agregados reciclados causada pela mistura em betoneiras. Vale ressaltar que os autores não consideraram a absorção dos agregados reciclados que ocorre durante o processo de amassamento, por isso os resultados divergem dos descritos anteriormente.

Já Hasen (1992) em sua pesquisa observou que o abatimento dos concretos com agregados reciclados, com uma mesma relação a/c, são maior do que concreto com agregado natural. Eles atribuem essa situação a quantidade de água que fica adsorvida nos agregados, e produz um aumento na consistência. Porém, os autores não citam sob que condições de temperatura esse material foi feito.

Pandova (2013) verificou a influência de diferentes teores de pré-molhagem de AGRC nas propriedades de novos concretos, com e sem aditivo. A autora observou que a pré-molhagem em diferentes teores influencia na trabalhabilidade. Segundo a autora, as maiores perda de trabalhabilidade ocorrem para os níveis de saturação de 40 e 100%. Trata-se de perdas significativas, em termos estatísticos, para os fatores analisados. Porém, essas variações são inferiores a 10 mm, valor que de acordo com NM 67 (ABNT, 1998) está dentro do limite de ensaio tolerado.

Ainda segundo Pandova (2013) os concretos produzidos com AGRC sem aditivo demandam até 10% mais água para que o abatimento estabelecido fosse atingido, comparados aos concretos com aditivo, e os seus concretos referência.

Ferreira (2007) verificou a trabalhabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados pré-saturados, os resultados mostraram que a trabalhabilidade das misturas nem sempre foi coerente aos valores obtidos pelo ensaio de abatimento. O autor comenta que o ensaio não foi sensível ao método de compensação de água dos agregados reciclados. Conclui-se com essas informações que nem sempre o ensaio de abatimento é suficiente para avaliar a trabalhabilidade.

Nealen e Rühl (1997) estudaram o efeito do uso de superplastificante na consistência do concreto com agregado reciclado através de dois métodos, fixando a curva granulométrica dos agregados. No primeiro método o aditivo superplastificante foi colocado no instante zero, durante a mistura. O resultado foi trabalhabilidade semelhante à do concreto convencional. No segundo método o aditivo superplastificante foi adicionado 30 minutos depois da mistura pronta. Os autores admitiram este tempo como o adequado para o agregado reciclado absorver a água necessária para saturação. O resultado encontra-se na Figura 10.

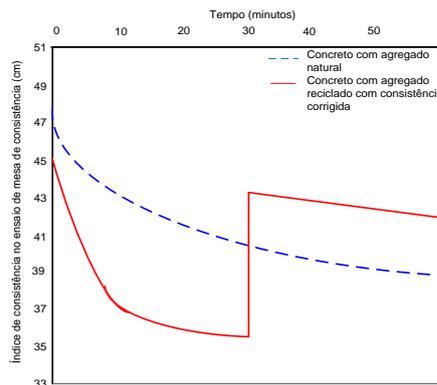


Figura 10: Desenvolvimento do índice de consistência do concreto empregando aditivo superplastificante (adaptado de Andrew Nealen e Marcus Rühl, 1997)

Percebe-se pelos resultados de Nealen e Rühl (1997) que o uso de aditivo superplastificante em concreto com agregado reciclado é viável, uma vez que o mesmo permite a melhora da consistência do concreto sem que para isto seja necessário acrescentar mais água. O custo adicional que se tem com a adição deste material, foi compensado pelo ganho de consistência obtido no concreto com resíduo.

### 2.3.2 Massa específica no estado fresco

A massa específica do concreto no estado fresco é o reflexo da massa específica dos seus componentes, em especial dos agregados, bem como do grau de compactação (existência de ar no interior do concreto) dos mesmos (FERREIRA, 2007; FONSECA, 2008). Para Mehta e Monteiro (2008), a massa específica do concreto no estado fresco depende, além da massa do agregado e da sua porosidade, da sua textura e tamanho.

Carrijo (2005) quantificou a variação da massa específica do concreto fresco em função da relação a/c e da massa específica do agregado utilizado, onde se observa que à medida que se reduz a massa específica do agregado e aumenta a relação a/c, reduz a massa específica do concreto, conforme mostra a Figura 11.

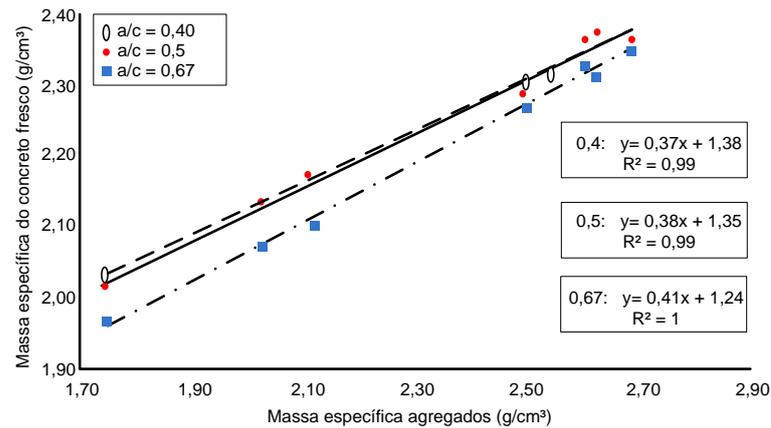


Figura 11: Correlação entre a massa específica do concreto fresco e a massa específica dos agregados reciclados (adaptado de Carrijo, 2005).

A maior porosidade intrínseca ao agregado reciclado é uma das maiores causas para que esta redução ocorra. A pasta aderida ao agregado natural é uma das grandes responsáveis pela alta porosidade dos agregados reciclados, e à medida que a massa específica dos agregados reduz, a porosidade dos agregados aumenta devido à presença de uma maior quantidade de pasta aderida.

### 2.3.3 Resistência à compressão axial

Diversos pesquisadores (GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; TOPÇU e SENDEL, 2004; XIAO et al., 2005; RAHAL, 2007; XIAO e FALKNER, 2007) estudaram o desempenho do concreto, em termos mecânicos, com agregados reciclados. Em geral os pesquisadores observaram que a resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados é menor do que a de concretos produzidos com agregados naturais, para um mesmo consumo de cimento. Este fato pode estar associado a fatores tais como: menor resistência do agregado reciclado; porosidade do resíduo de concreto decorrente da quantidade de argamassa aderida ao agregado natural; entre outros (SANCHEZ, 2004). É também de esperar que, quanto maior a taxa de substituição de agregado grão natural por agregado grão reciclado de concreto, menor será a resistência à compressão do concreto.

Hansen e Narud (1983) notaram que a relação água/cimento do concreto de origem influencia nos resultados de resistência à compressão. Nesse estudo todos os outros fatores foram controlados e notou-se que os concretos produzidos com agregados originários de concretos com baixa relação água/cimento são capazes de produzir novos concretos com resistências iguais ou superiores a sua resistência de origem.

Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) ao avaliarem as propriedades mecânicas de concretos de alta resistência (40 a 70 MPa) produzidos com agregados reciclados de concretos, perceberam que a propriedade do concreto de origem afeta significativamente nas propriedades dos novos concretos produzidos.

Katz (2002) avaliou as propriedades do concreto produzido com agregado reciclado de concreto parcialmente hidratado, e notou que a idade de hidratação não afeta nas características dos agregados reciclados, os valores de massa específica, massa unitária e absorção dos agregados britados nas diferentes idades foram similares.

A porosidade dos agregados reciclados de concreto encontra-se na matriz cimentícia, na zona de transição pasta-agregado (FERREIRA, 2007). Sanchez (2004) ressalta que enquanto o concreto com agregado natural apresenta uma zona de transição, nos concretos com agregados reciclados de concreto encontram-se duas zonas de transição, uma referente ao concreto antigo, e outra gerada pelo novo concreto.

Brito (2005) observou que a substituição de agregados graúdos de uma mesma composição granulométrica, em concretos com a mesma trabalhabilidade, conduz a valores de resistência à compressão muito semelhante aos obtidos em concreto de referência com as mesmas características.

Hansen (1992), em sua pesquisa, verificou que a resistência dos concretos com agregados reciclados de concreto está associada à qualidade e classe de resistência do concreto que lhe deu origem. Contudo, Santos et al. (2002), ao compararem concretos com resíduos de diferentes classes de resistência, verificaram que a classe de resistência tem pouca influência sobre esta resistência. O que se verifica é que o agregado reciclado só influenciará na resistência do concreto, quando a matriz do novo concreto for mais resistente que a do agregado reciclado, uma vez que possivelmente o concreto romperá no agregado. Se a matriz de concreto for menos resistente que o próprio reciclado, este último não exercerá grande influência na resistência mecânica, uma vez que a matriz será o elo mais fraco (SANTOS et al. 2002; CABRAL, 2007).

#### 2.3.4 Módulo de elasticidade

As características de elasticidade de um material são importantes, pois medem sua capacidade de rigidez. Para Mehta e Monteiro (1994), a importância do limite de elasticidade em um

projeto estrutural deve-se ao fato do mesmo representar a deformação máxima permitida antes de o material adquirir deformação permanente.

O módulo de elasticidade do concreto depende da porosidade de suas fases (pasta, agregado e zona de transição). No agregado graúdo as características que podem influenciar na elasticidade são dimensão máxima, forma, textura superficial e composição mineralógica. Quando se trata de agregados reciclados tem-se ainda sua maior porosidade quando comparados com os materiais naturais. A porosidade do agregado determina sua rigidez, que por sua vez controla a capacidade do agregado em restringir deformações da matriz.

Hansen (1992) menciona que concretos com agregados reciclados, apresentam, em geral, uma redução entre 15% a 40% do módulo de elasticidade em relação aos concretos com agregados naturais. E mostra que a diferença entre o módulo de elasticidade dos concretos reciclados e convencionais aumenta à medida que crescem os valores da resistência à compressão.

Vários autores apontam que os concretos produzidos com agregados reciclados de concreto apresentam um módulo de deformação menor que o dos concretos convencionais. Hansen (1992) observou em sua pesquisa que ao substituir o agregado graúdo por agregado graúdo reciclado tem-se uma redução de 15% a 40% do módulo, isso comparando com o concreto sem resíduo. Etxeberria (2007) teve reduções de 15% e Casuccio (2008) chegou a valores de módulo de 13% a 18%. Evangelista (2007) encontrou valores de módulo da ordem de 4% a 19% quando substituiu respectivamente 30% e 100% de agregados miúdos.

Levy (1997) atribui este fato à camada de argamassa antiga aderida à superfície do agregado reciclado de concreto e a maior porosidade dos materiais que compõem o resíduo.

Alaejos et al. (2006) encontraram valores de módulo de elasticidade de concreto com resíduo 10% menores para taxas de substituição de agregado natural por resíduos de 50%. E para situações onde a substituição foi de 100% o módulo teve uma redução de 20% se comparado com o do concreto sem resíduo.

Arias (2012) observou em sua pesquisa que o agregado reciclado de concreto, usado em substituição do agregado graúdo natural numa taxa de 20%, não apresenta influencia significativa no módulo de elasticidade se comparado com concretos convencionais. O autor afirma que o uso do método de dosagem adequado, em concretos com agregados reciclados

permite que se alcance concretos com características similares, e com condições estruturais similares aos dos convencionais.

Gomes (2007) obteve reduções de apenas 10% quando substituiu 50% do agregado natural por agregado graúdo reciclado de concreto. E reduções de 30% para situações onde a substituição foi total.

Sanchez (2004) verificou, em sua pesquisa, que quando maior a taxa de substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto, menor os valores de módulo (Figura 12).

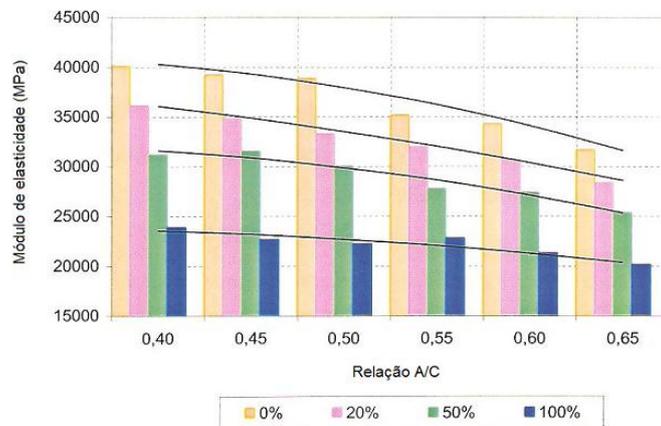


Figura 12: Módulo de elasticidade em função da relação a/c para diferentes taxas de substituição de agregado natural por agregado reciclado de concreto (SANCHEZ, 2004)

## 2.4 CONCRETOS ESTRUTURAIS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETOS.

### 2.4.1 Teor de Substituição de Agregado Graúdo Reciclado

Segundo Yeung e Col (2006), o concreto com agregado graúdo reciclado de concreto pode ser usado tanto para a fabricação de concreto massa, quanto para concreto armado, sempre tomando o cuidado de seguir os critérios normativos. Na Espanha, as exigências normativas permitem que sejam feitas concretos para fins estruturais com o uso de 20% de substituição de agregado natural por agregado graúdo de concreto.

Rao et al. (2007) citam que o uso de cinzas volantes melhoram as características desses materiais. Kou et. al (2011) diz que o uso de superplastificante apesar de tornar o processo mais caro, melhora consideravelmente a trabalhabilidade dos concretos. A qualidade do

concreto de origem também influencia nos resultados, para Sanchez e Alaejos (2006) concretos com até 44% de argamassa na sua composição podem ser usados para produção de concretos estruturais.

Limbachiya et al. (2012), analisou o comportamento das propriedades dos concretos a medida que se incorporava resíduos. Percebe-se pelos resultados disposto na Figura 13 que com até 30% de substituição obtém-se concretos com resistências mecânicas, durabilidade, retração e fluência a níveis satisfatórios.

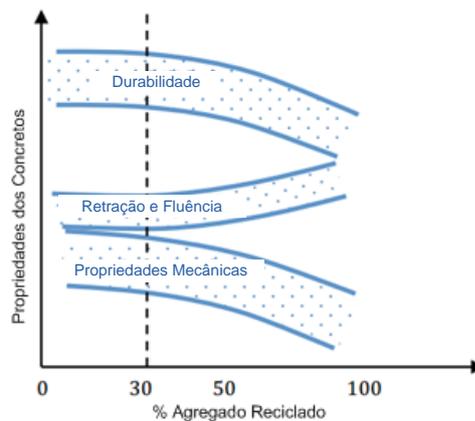


Figura 13: Comportamento das propriedades dos concretos em função do teor de agregado reciclados (LIMBACHIYA et al., 2012)

Gonzales et al. (2008) diz que é possível fabricar concretos com até 50% de substituição, mantendo a resistência à compressão. Etxeberria (2004) concluiu na sua tese que para um teor de 25% de substituição de agregado graúdo, mantendo-se a quantidade de cimento e a relação água cimento não se tem alteração nas propriedades mecânicas dos concretos. Em se tratando de lixiviação, o autor verificou para os seus materiais, os níveis de contaminação estão abaixo dos limites estabelecidos pelas normas europeias. No entanto, o autor aconselha o uso de cimentos com baixa alcalinidade, a fim de evitar futuras reações álcali-agregado.

#### 2.4.2 Condição de Mistura

Oyanadel (2009) considera a mistura do concreto um processo complexo, que depende de diversos fatores como a sequencia dos materiais, o tempo de mistura e o tipo de misturador. Um mistura eficiente influencia no comportamento e nas propriedades do concreto, uma vez que distribuem melhor as partículas de cimento, água e agregado.

Pope e Jennings (1992) em sua pesquisa observaram que a mistura em etapas melhora a resistência à compressão e uniformizam a zona de transição. Os autores sugerem separar a

ordem de colocação dos materiais, tais como misturar primeiro a argamassa, para em seguida adicionais os demais materiais.

Rejeb (1996) estudou a mistura em duas etapas e comparou com a mistura pela ordem tradicional. Na mistura A ele pré misturou a pasta e logo em seguida colocou os agregados. Na mistura B ele pré misturou a argamassa e em seguida colocou o agregado graúdo. E na mistura C ele seguiu a etapa tradicional. Os resultados estão dispostos na Figura 14.

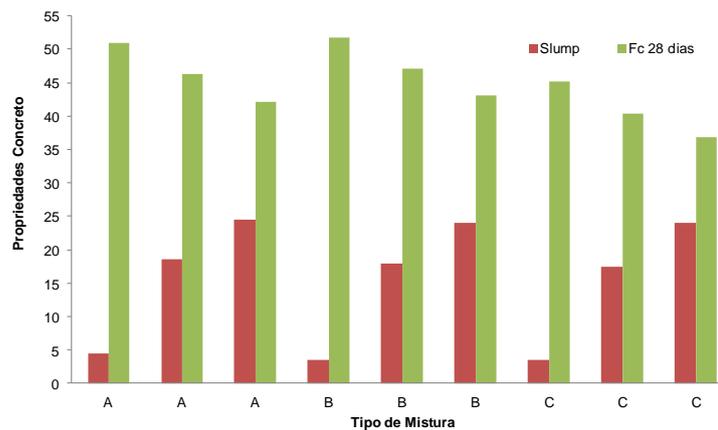


Figura 14: Comportamento das propriedades dos concretos em função do tipo de mistura (Rejeb, 1992)

Os resultados mostraram que os concretos misturados em duas etapas tiveram maiores resistência á compressão aos 28 dias, do que os misturados pela forma tradicional.

Oyanadel (2009) em sua pesquisa observou que as misturas em duas etapas são eficientes, e em geral, levam a resultados superiores aos obtidos pelo método de mistura tradicional. O autor pré misturava a pasta cimentícia (cimento, adição pozolânica e água) e posteriormente incorporava os agregados. Antes da mistura o autor estimava a umidade dos agregado, de maneira a calcular a umidade livre e a quantidade de água a agregar na mistura. Os resultados foram uma maior viscosidade e coesão da pasta, um aumento de até 18% na resistência das etapas iniciais.

Tam et al. 2007 também aplicou o processo de mistura em várias etapas os autores dividiram o processo de mistura em várias etapas de modo a gerar nos agregados reciclados uma fina camada de pasta de cimento sobre a superfície, desse modo eles conseguiriam permear os poros, os espaços vazios e as micro fissuras existentes no agregado de origem. Os autores perceberam que esse processo de mistura em diferentes estágios é eficaz e contribui para a durabilidade de concretos com agregados reciclados.

Salas et al 2010 aplicou em sua pesquisa, o processo de mistura em duas etapas, para a produção de concretos com agregados reciclados, o objetivo era permitir uma melhor saturação dos agregados reciclados e assim melhorar a aderência entre as partículas dos agregados e a pasta de cimento. Na primeira etapa da mistura o autor usou agregado reciclado mais cimento misturou por um minuto e adicionou 50% da água e misturou mais um minuto, em seguida colocou os agregados graúdos e as areias mais o restante da água e misturou por dois minutos. O objetivo dessa ordem de mistura era revestir previamente o agregado reciclado com a pasta de cimento, e dessa forma teria uma melhora na resistência da zona de transição. O efeito dessa alteração foi uma melhora na resistência à compressão, uma redução da profundidade de penetração de água.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 ASPECTOS GERAIS

Esta pesquisa tem por principal objetivo analisar os principais parâmetros que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto, denominado de AGRC. O programa experimental desta tese de doutorado foi montado a fim de responder algumas das lacunas do conhecimento referente a este tema. Dessa forma, a pesquisa foi dividida em 6 fases, conforme mostra a Figura 15.

Nas fases 1 e 2 foram realizados os estudos preliminares que auxiliaram na escolha do agregado de concreto e na definição dos métodos de caracterização. A fase 3 e 4 foram feitos estudos a fim de avaliar variabilidade do AGRC durante o processo de produção de concretos com AGRC. O estudo foi realizado desde a etapa de produção até o processo mistura. Nas fases 5 e 6 avaliou-se a influência da condição de saturação do AGRC nas propriedades mecânicas dos concretos com eles produzidos. Para um melhor entendimento da pesquisa cada fase vai conter materiais e métodos, discussão dos resultados e conclusão.

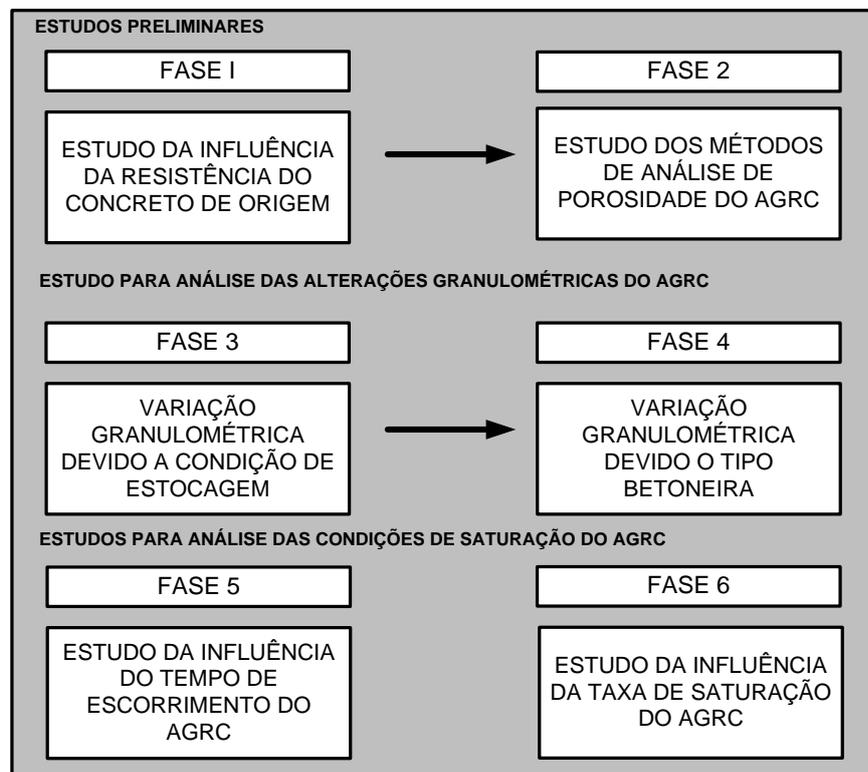


Figura 15: Resumo dos fatores responsáveis pela variabilidade do AGRC analisados nesta pesquisa. Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC).

### 3.2 FASE 1: ESTUDO DO EFEITO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO DE ORIGEM NAS CARACTERÍSTICAS DOS AGRC E NAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS PRODUZIDOS COM OS MESMOS.

Nesta etapa foi realizado um estudo para avaliar o efeito da resistência do concreto de origem tanto nas características do AGRC, quanto nas propriedades mecânicas dos concretos com eles produzidos. Com base nos resultados obtidos foi possível fixar a resistência do concreto de origem que seria utilizado ao longo da pesquisa. A Figura 16 demonstra esquematicamente a metodologia adotada.

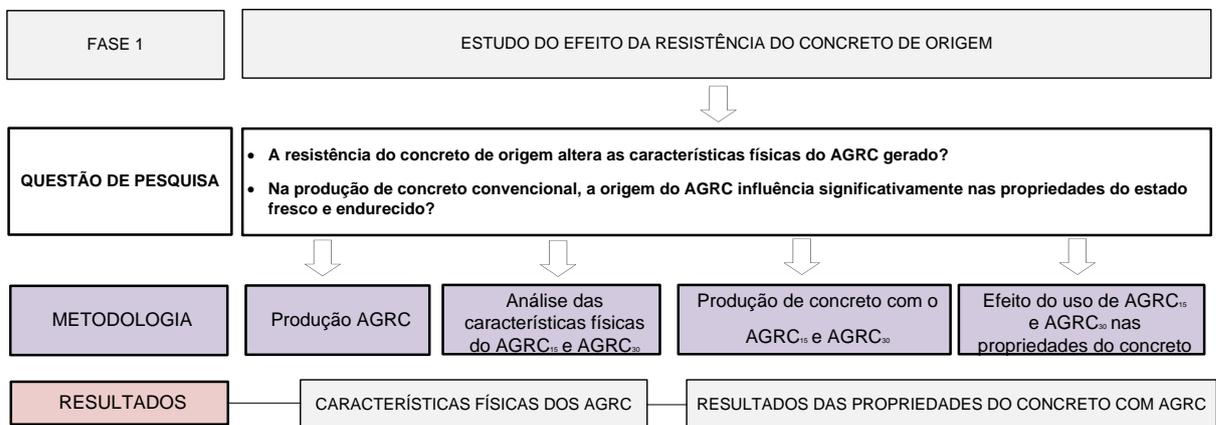


Figura 16: Esquema da metodologia adotada na FASE 1.

A maior parte dos ensaios foi executada no Laboratório do Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com exceção de alguns ensaios complementares, os quais foram realizados em outros locais da instituição e estarão referenciados no texto.

#### 3.2.1 Materiais utilizados

Para a análise do efeito do concreto de origem nas características do AGRC e nas propriedades do concreto, utilizaram-se os seguintes materiais:

### 3.2.1.1 Cimento

O cimento empregado nesta pesquisa foi o cimento Portland do tipo CP V ARI. A opção por este cimento deu-se por o mesmo não apresentar qualquer tipo de adição além de calcário moído.

A caracterização do cimento foi fornecida pelos fabricantes. Em complementação dos resultados, alguns ensaios foram repetidos no Laboratório do NORIE e no Laboratório de Cerâmica (LACER), ambos da UFRGS.

A técnica adotada para a caracterização química, realizada no LACER, foi a de espectrometria de fluorescência de raios-X. O ensaio de perda ao fogo seguiu as recomendações da NBR NM 18 (ABNT, 2004) e o de resíduo insolúvel a NBR NM 22 (ABNT, 2004), estando os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Características químicas do cimento Portland CP V ARI RS

Composição Química	Resultados % massa		Exigência da NBR 5736 (ABNT, 1991)
	Fabricante*	LACER	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2,36	-
SiO <sub>2</sub>	-	13,76	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	6,00	-
CaO	-	72,15	-
MgO	3,01	-	≤ 6,5
SO <sub>3</sub>	4,26	3,37	≤ 4,5
Na <sub>2</sub> O	-	-	-
SrO	-	1,00	-
TiO <sub>2</sub>	-	0,52	-
MnO	-	0,24	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-
Perda ao fogo	-	0,07	-
CaO livre	3,90	-	-
Resíduo Insolúvel	-	-	-

\*Dados fornecidos pelo fabricante

Alguns ensaios de caracterização física e mecânica foram repetidos no laboratório, para simples conferência. Os resultados encontrados estão dispostos na tabela 4.

Tabela 4: Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI RS

Características Avaliadas	Fabricante*	Exigência da NBR 5737 (ABNT, 1992)
Massa específica (cm <sup>3</sup> )	3,05	-
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4970	≥ 3000
Resíduo peneira 200 mm (%)	0,16	≤ 6,0
Resíduo peneira 350 mm (%)	1,44	Não aplicável
Tempo de pega (h:m) Início	175	≥ 60
Tempo de pega (h:m) Fim	275	≤ 600
Resistência à Compressão (1 dia)_MPa	28,20	≥ 24,0
Resistência à Compressão (3 dias)_MPa	42,00	≥ 24,0
Resistência à Compressão (7 dias)	46,20	≥ 34,0
Resistência à Compressão (28 dias)	51,50	Não aplicável

\*Dados fornecidos pelo fabricante

Os resultados obtidos estão de acordo com as exigências prescritivas da NBR 5736 (ABNT, 1991).

### 3.2.1.2 Agregado Miúdo Natural

O agregado miúdo é natural, de origem quartzosa e provém da extração do rio Jacuí, Rio Grande do Sul. Os ensaios realizados foram composição granulométrica (NBR NM 248, ABNT 2003), massa unitária (NBR NM 45, ABNT 2003) e massa específica (NBR NM 52, ABNT 2009). O resultado da caracterização física da amostra está disposto na Tabela 5.

Tabela 5: Características físicas do agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRAS		NBR 7211 (ABNT, 2009)			
	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (% em massa)			
			Limites Inferiores		Limites Superiores	
			Zona Util.	Zona Ótima	Zona Util.	Zona Ótima
4,75	1	1	0	0	5	10
2,36	4	5	0	10	20	25
1,18	11	16	5	20	30	50
0,6	19	35	15	35	55	70
0,3	34	69	50	65	85	95
0,15	26	95	85	90	95	100
< 0,15	5	100	100	100	100	100
Módulo de Finura		2,21	1,55 – 2,2	2,2	2,9 – 3,5	2,9
Dimensão Máxima (mm)		2,36				
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,62				
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,57				

Pelos resultados obtidos observa-se que o agregado miúdo enquadrou-se na zona utilizável do limite inferior, atendendo às recomendações para seu emprego em concreto.

### 3.2.1.3 Agregado Graúdo Natural

O agregado graúdo natural utilizado na pesquisa foi uma brita basáltica comercialmente conhecida como brita 0, proveniente da cidade de Montenegro (RS). Os ensaios realizados para caracterização foram composição granulométrica (NBR NM 248, ABNT 2003), massa unitária (NBR NM 45, ABNT 2003) e massa específica (NBR NM 53, ABNT 2009). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Características físicas do agregado graúdo

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRAS		NBR 7211 (ABNT, 2009)			
	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (% em massa)			
			Zona Granulométrica d/D <sup>a</sup>			
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50
19	-	-	-	2 - 15 <sup>b</sup>	65 <sup>b</sup> - 95	95 - 100
9,5	1	1	2 - 15 <sup>b</sup>	80 <sup>b</sup> - 100	95 - 100	-
4,75	81	82	80 <sup>b</sup> - 100	95 - 100	-	-
2,36	17	99	95 - 100	-	-	-
1,18	1	100	-	-	-	-
0,6	0	100	-	-	-	-
0,3	0	100	-	-	-	-
0,15	0	100	-	-	-	-
Módulo de Finura		5,82	<sup>a</sup> - Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo <sup>b</sup> - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo 5% em apenas um dos limites marcados com 2			
Dimensão Máxima (mm)		9,5				
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,98				
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,38				

Percebe-se pelos resultados que o agregado natural utilizado no estudo se enquadra na faixa de agregado de graduação (4,75/12,5) prescrita pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

### 3.2.1.4 Água

A água utilizada na pesquisa é proveniente da rede de abastecimento público, o Departamento Municipal de Águas e Esgoto (DMAE) de Porto Alegre.

### 3.2.1.5 Agregado Graúdo Reciclado de Concreto

Com relação à resistência do concreto de origem, Hansen (1992), em sua pesquisa, citou que a resistência dos concretos com agregados reciclados de concreto está associada à qualidade e classe de resistência do concreto que lhe deu origem. Contudo, Santos et al. (2002) admitem que a classe de resistência do concreto de origem tem pouca influência sobre esta resistência. Diante do exposto, julgou-se necessário avaliar de que forma a resistência dos agregados

influenciariam no desempenho mecânico de diferentes faixas de resistência de concretos com eles produzidos.

Fez-se então um estudo com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico de concretos produzidos com 100% de agregados reciclados de diferentes resistências. As propriedades analisadas foram a resistência à compressão (NBR 5739, ABNT 2007) e o módulo de elasticidade (NBR 8522, ABNT 2008).

O AGRC foi produzido a partir de corpos de provas (cp's) de resistência conhecida (15 MPa e 30 MPa), coletados na usina de concreto do grupo SULTEPA, situada em Porto Alegre/RS. A resistência do concreto foi definida pela disponibilidade de material com as mesmas características na usina. Após a coleta iniciou-se o processo de beneficiamento para a produção do AGRC.

a) Beneficiamento do AGRC<sub>15</sub> e AGRC<sub>30</sub>.

Para a produção do agregado reciclado utilizou-se corpos de prova de concreto, que foram cominuídos em britador de mandíbulas. A faixa granulométrica desse material foi limitada em passante na peneira de # 25 mm e retido na peneira # 4,8 mm. Para a conferência das dimensões dos grãos utilizou-se um peneirador mecânico. Os agregados graúdos que não atendiam esses requisitos voltavam para o processo de britagem conforme mostra a Figura 17. Ao final do processo obteve-se agregados graúdos reciclados de concreto de resistência de 15 MPa (AGRC<sub>15</sub>) e 30 MPa (AGRC<sub>30</sub>).

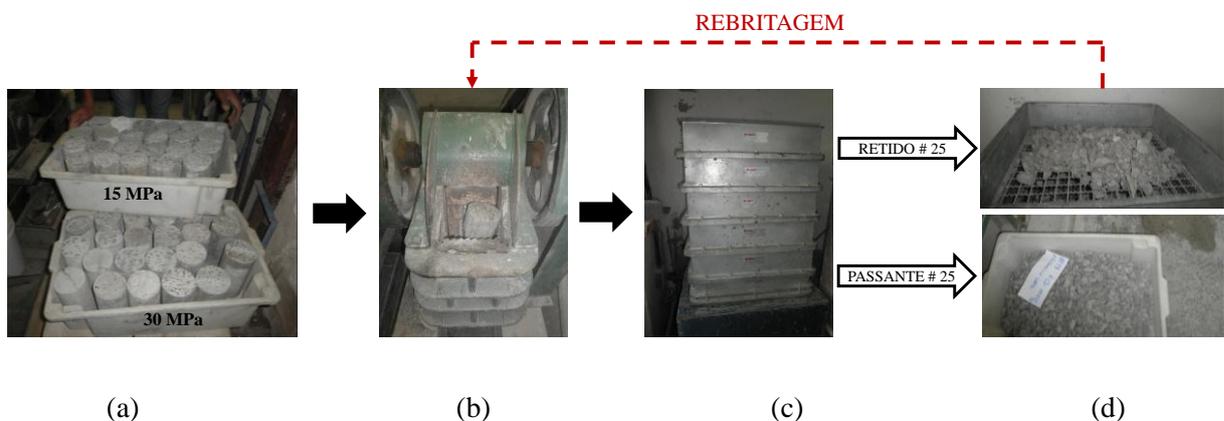


Figura 17: Processo de produção do AGRC (a) cp's de concreto; (b) britador de mandíbulas; (c) peneirador mecânico e (d) AGRC.

### b) Caracterização física do AGRC<sub>15</sub> e AGRC<sub>30</sub>

Nesse estudo, buscou-se analisar as principais características físicas do AGRC. A composição granulométrica é uma característica muito importante do agregado, uma vez que influencia diretamente em propriedades como trabalhabilidade, resistência mecânica, consumo de aglomerantes, entre outros (LIMA, 1999; ALTHEMAN, 2002; TOPÇU, 2004). O ensaio de análise granulométrica seguiu a metodologia prescrita pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para fins de dosagem é necessário o conhecimento da massa específica e unitária dos materiais estudados. A massa unitária dos AGRC foi determinada no estado solto de acordo com as recomendações estabelecidas pela NBR NM 45 (ABNT, 2003). Já a massa específica dos resíduos foi determinada pela metodologia apresentada por Leite (2001).

O agregado reciclado é um material que apresenta uma porosidade maior que a do agregado natural. Sendo assim, o conhecimento da taxa de absorção é fundamental em dosagens de concretos com agregados reciclados. Neste estudo, o método adotado para avaliar a taxa de absorção foi o de Leite et al. (2011).

### 3.2.2 Produção de concretos

Com relação à produção de concretos, partiu-se da hipótese que os agregados reciclados de concretos de diferentes resistências comportam-se no novo concreto de maneira distintas. Logo, cada agregado precisaria de um proporcionamento de materiais adequado a sua condição.

O método de dosagem adotado para realização desse estudo foi IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), que consiste em ajustar o teor ideal de argamassa estabelecendo, como parâmetro de controle, o valor do abatimento do tronco de cone, que neste estudo fixou-se em  $100 \pm 20$  mm. Os agregados graúdos reciclados (AGR<sub>15</sub>, AGR<sub>30</sub>) foram usados em substituição total ao agregado graúdo natural. Antes da incorporação do resíduo ao concreto, realizou-se a pré-molhagem dos agregados reciclados durante 10 minutos, seguindo as recomendações de Leite (2001).

A taxa de compensação de água adotada foi 50% da massa total determinada na absorção, tal qual utilizou Leite (2001). Após as misturas foram moldados três corpos de provas cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm. A moldagem foi realizada conforme a prescrição da NBR 5738 (ABNT, 2003). Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos com sacos de linhagem

úmidos e mantidos no local de ensaio durante as primeiras 24 horas. Posteriormente, foram desmoldados e armazenados em câmara úmida para realização da cura em temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa de 98%.

Na idade de 28 dias os corpos de prova foram ensaiados para determinação da resistência à compressão. Para este ensaio foi empregada uma prensa informatizada do modelo EMIC MCT30 PC 200i a uma velocidade de  $0,45 \text{ MPa/s}$ . De posse dos resultados da tabela 7, traçou-se a curva de dosagem para cada tipo de agregado, conforme mostram as figuras 18 a 20.

Tabela 7: Resultados da dosagem experimental do CPV

Tipo de Agregado	Traço Unitário (1:m)	Relação água/cimento	Resistência Potencial (MPa)	Coefficiente de Variação (%)	Consumo de cimento ( $\text{kg/m}^3$ )	H (%)	Abatimento (mm)
Natural	1:3,5	0,46	47,63	1	490,74	10,2	120
	1:5,0	0,55	40,23	2	374,36	9,16	90
	1:6,5	0,68	25,77	1	298,81	9,08	80
Resíduo de 15 MPa	1:3,5	0,48	41,35	3	472,23	10,6	100
	1:5,0	0,6	30,88	2	356,17	10,1	90
	1:6,5	0,81	17,72	2	279,65	10,8	100
Resíduo de 30 MPa	1:3,5	0,48	37,05	2	479,6	10,8	115
	1:5,0	0,61	30,9	1	354,85	10,2	80
	1:6,5	0,81	20,57	1	279,55	10,8	105

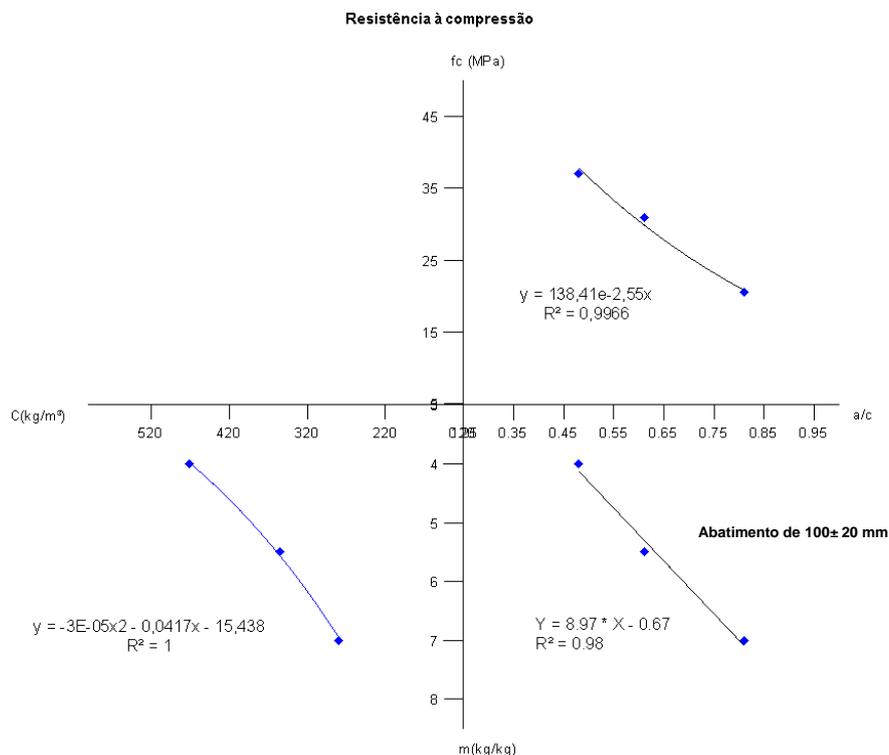


Figura 18: Curva de dosagem do AGRC<sub>15</sub>

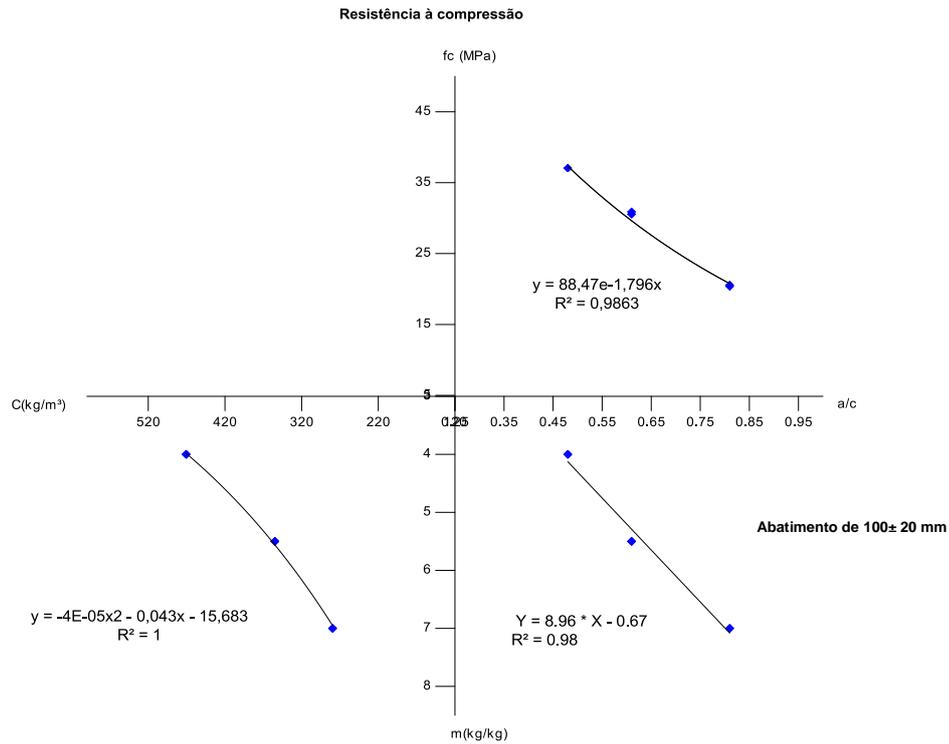


Figura 19: Curva de dosagem do AGRC<sub>30</sub>

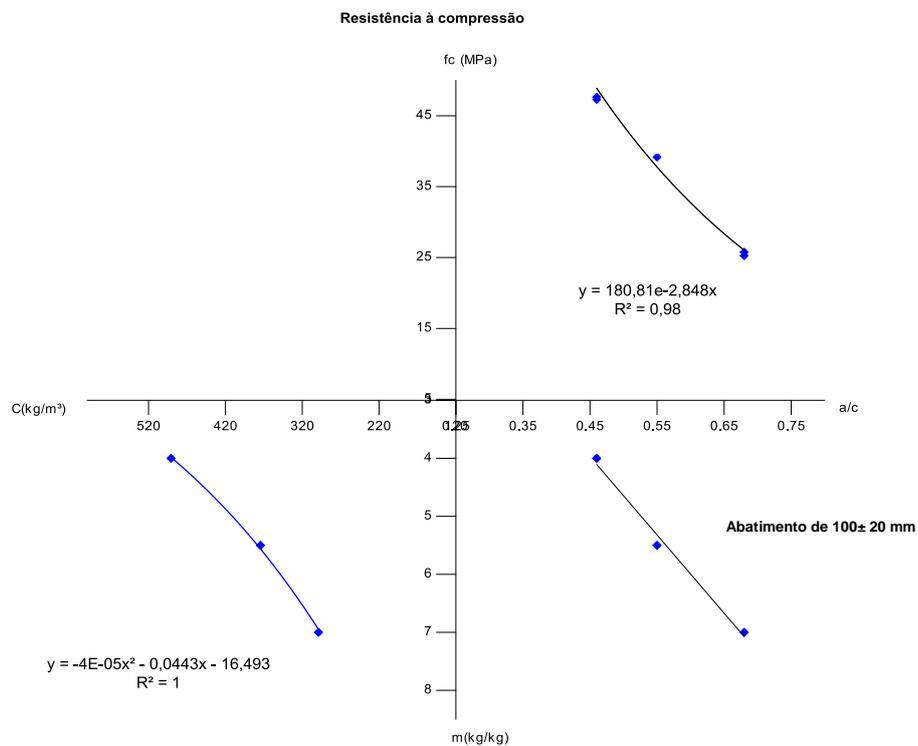


Figura 20: Curva de dosagem do AG<sub>NAT</sub>

A partir das curvas de dosagem, foram estabelecidos os traços dos concretos para três diferentes faixas de resistência (20, 30 e 40 MPa). Decidiu-se fixar o abatimento de 100 ±

---

Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade dos concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC).

20mm, e determinar o teor ideal de argamassa para cada mistura de concreto com diferentes agregados graúdos, a fim de identificar a necessidade de cada material. Os resultados, disposto na tabela 7, mostram que os concretos produzidos com AGRC<sub>30</sub> necessitam de um teor de argamassa maior que os demais, para atingir a trabalhabilidade especificada. A diferença entre eles apesar de pequena, fez-se necessária para a otimização das misturas.

Com relação às faixas de resistências adotadas, buscou-se com esses traços abranger a maior parte dos concretos usualmente utilizados no Brasil para fins estruturais. Na tabela 8 encontram-se os proporcionamento dos concretos.

Tabela 8: Proporcionamento dos concretos em função do tipo de agregado graúdo (Natural, Reciclado de 15 MPa e Reciclado de 30 MPa).

AG <sub>NAT</sub>		Traço Unitário			Consumo kg/m <sup>3</sup>	
$\alpha$	a/c	m	a	p	Cc	Ca
0,55	0,48	3,88	1,69	2,20	455,12	218,46
0,55	0,63	5,90	2,79	3,10	325,06	204,79
0,55	0,78	7,91	3,90	4,01	252,82	197,20
AGRC <sub>15</sub>		Traço Unitário			Consumo kg/m <sup>3</sup>	
$\alpha$	a/c	m	a	p	Cc	Ca
0,55	0,43	3,23	1,32	1,91	508,39	212,61
0,55	0,59	4,65	2,10	2,55	375,77	221,70
0,55	0,74	5,98	2,84	3,14	301,93	223,43
AGRC <sub>30</sub>		Traço Unitário			Consumo kg/m <sup>3</sup>	
$\alpha$	a/c	m	a	p	Cc	Ca
0,56	0,37	2,62	1,03	1,59	594,82	220,08
0,56	0,60	4,71	2,20	2,51	370,91	222,55
0,56	0,82	6,70	3,31	3,39	272,72	223,63

\*  $\alpha$ : teor de argamassa, a/c: relação água/cimento, m: materiais secos, a: areia, p: brita, Cc: consumo de cimento, Ca: consumo de água

### 3.2.3 Análise e Discussão dos Resultados

#### 3.2.3.1 Análise e Discussões dos Resultados da Caracterização do AGRC

O ensaio de composição granulométrica foi realizado para as amostras de AGRC<sub>15</sub> e AGRC<sub>30</sub>, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), os resultados estão dispostos na Tabela 9.

Hasaba (1981) observou em sua pesquisa que a quantidade de argamassa aderida é proporcional a resistência do concreto original, ou seja, concretos menos resistentes apresentam menos argamassas aderidas que os demais. Ravindrarajah e Tam (1985) dizem que concretos de baixa qualidade produzem mais finos que os demais. As argamassas aderidas na superfície dos AGRC são frágeis e desagregam-se facilmente durante a manipulação. Nota-se pelos resultados de módulo de finura que os agregados graúdos reciclados obtidos a partir do concreto de maior resistência apresentaram um módulo de finura

ligeiramente superior aos procedentes de concretos menos resistentes. Conclui-se com isso que quanto menor a resistência do concreto de origem, maior a geração de finos, em virtude da fragilidade do material durante o manuseio, por conta disso que os agregados menos resistentes apresentaram uma quantidade de argamassa aderida menor. Como a desagregação das partículas é inerente ao processo, considera-se inadequado o uso de agregados graúdos reciclados provenientes de concretos de baixa qualidade.

Tabela 9: Caracterização física dos AGRC

Abertura das peneiras (mm)	RCD 15		RCD 30		NBR 7211 (ABNT, 2009)	
	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)	% Retida Acumulada	
					Zona Granulométrica d/D <sup>a</sup>	
					4,75/12,5	9,5/25
12,5	11	11	26	26	-	-
9,5	31	42	33	59	2-15 <sup>b</sup>	80 <sup>b</sup> - 100
6,3	39	81	39	98	-	-
4,75	16	97	1	99	80 <sup>b</sup> - 100	95 - 100
2,36	1	98	1	100	95 - 100	-
1,18	1	99	0	100	-	-
0,6	1	100	0	100	-	-
0,3	0	100	0	100	-	-
0,15	0	100	0	100	-	-
Fundo	0	-	0	-	-	-

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

<sup>b</sup> - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo 5% em apenas um dos limites marcados

Módulo de Finura	6,36	-	6,58
Dimensão Máxima (mm)	19	-	19

Os resultados de massa específica e massa unitária apresentados nas Tabela 10 e Tabela 11 mostram que o agregado reciclado de concreto é mais leve que o agregado natural. Este comportamento é compatível com o encontrado na bibliografia, e ocorre devido a porosidade dos constituintes do AGRC.

Tabela 10: Massa específica e massa unitária dos agregados reciclados

Agregado	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Mesp (%): $\frac{AGRC}{AGNAT} \times 100$	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Munit (%): $\frac{AGRC}{AGNAT} \times 100$
AG <sub>NAT</sub>	2,98	-	1,38	-
AGRC <sub>30</sub>	2,73	92	1,3	98
AGRC <sub>15</sub>	2,71	91	1,35	94

Tabela 11: Comparação dos resultados de massa específica e massa unitária dos agregados reciclados

Autor	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )
LATTERZA (1997)	2,45	1,27
HANSEN; NARUD (1983)	2,49	1,30
CORDEIRO (2013)	2,73/2,71	1,35/1,30

Com relação ao efeito da resistência do concreto de origem nos resultados de massa específica e massa unitária, pode-se dizer que a mesma não afetou nos resultados. Uma vez que a diferença entre eles, 0,02g/cm<sup>3</sup>, está dentro do limite de variação permitido por norma.

Pela análise dos resultados de caracterização pode-se concluir que o AGRC<sub>15</sub> apresenta uma taxa de absorção maior que o AGRC<sub>30</sub>, os valores encontrados foram respectivamente 5,6% e 8,6%.

Padmini et al. (2009) e Hansen (1985), observaram que quanto menor o agregado, maior a quantidade de argamassa aderida. Como os AGRC<sub>15</sub> geram mais finos durante a manipulação que o AGRC<sub>30</sub>, tem-se um material com um área superficial maior para o volume disponível e uma presença maior de materiais porosos. Tem-se com isso um aumento na taxa de absorção.

### 3.2.3.2 Análise e Discussão dos Resultados das Propriedades dos concretos produzidos com AGRC<sub>15</sub> e AGRC<sub>30</sub>.

#### a) Resistência à compressão

Os resultados do desvio padrão e do coeficiente de variação dos traços estudados encontram-se na tabela 12.

Tabela 12: Coeficiente de variação e desvio padrão dos resultados de resistência dos concretos produzidos com agregados naturais e agregados reciclados aos 28 dias.

AG <sub>NAT</sub>	20 MPa	30 MPa	40 MPa
Média	19,26	29,19	43,95
Desvio Padrão	0,58	0,75	1,30
Coeficiente de Variação	3%	3%	3%
AGRC <sub>15</sub>	20 MPa	30 MPa	40 MPa
Média	25,52	33,44	44,28
Desvio Padrão	1,20	1,65	1,02
Coeficiente de Variação	5%	5%	2%
AGRC <sub>30</sub>	20 MPa	30 MPa	40 MPa
Média	19,24	34,72	48,41
Desvio Padrão	0,42	1,15	1,70
Coeficiente de Variação	2%	3%	4%

Conforme esperado, os concretos produzidos com AGRC apresentaram um coeficiente de variação maior que os concretos produzidos com agregado natural. Atribui-se essa variação a

heterogeneidade do material, decorrente da presença de argamassa aderida. Esta argamassa afeta nas características físicas do material, conforme observado no item 3.2.3.1, e influencia nas propriedades do concreto com eles produzido.

Na tabela 7, percebe-se que os concretos com resíduos apresentam uma sensível queda na resistência à compressão. Atribuem-se essa diminuição de resistência a porosidade dos agregados reciclados de concreto, que se encontra na matriz cimentícia e nas duas zonas de transição formadas, uma referente ao concreto antigo, e outra gerada pelo novo concreto.

Santos et al. (2002) comenta que a classe de resistência tem pouca influência sobre a resistência, o que afeta nos resultados é a relação entre a matriz presente no agregado e a matriz do novo concreto. Assim como este autor, essa pesquisa observou esse efeito durante a dosagem dos concretos. Em todos os traços com  $AGRC_{15}$ , os concretos produzidos apresentavam uma matriz mais resistente que a do agregado reciclado, possivelmente por conta dessa situação a ruptura aconteceu no agregado que era mais fraco e com isso teve-se um queda na resistência à compressão. Essa situação pode ser observada também no traço rico com  $AGRC_{30}$ , o mesmo teve uma queda de resistência em comparação aos concretos com agregados naturais, e essa queda foi maior no traço rico que apresentava uma resistência maior que a do agregado reciclado.

Na Figura 21 tem-se a relação entre o tipo de agregado e o consumo real de cimento, calculado a partir da curva de Abrams, para as faixas de resistências estudadas.

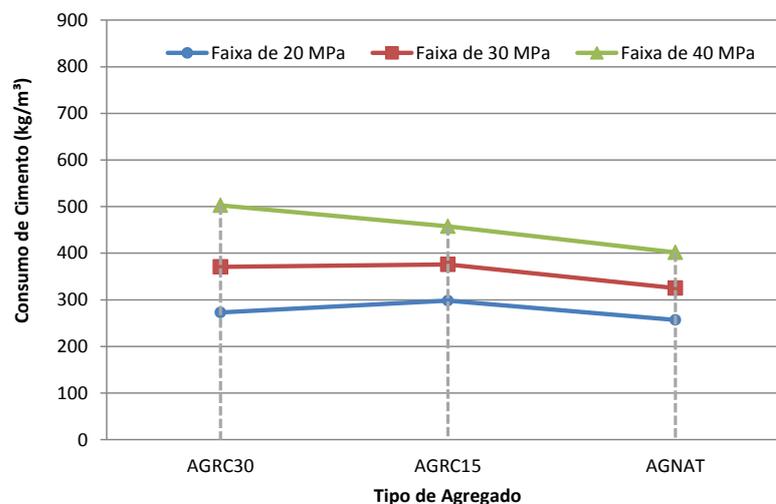


Figura 21: Relação entre o consumo de cimento e o tipo de agregado para as diferentes faixas de resistência dos concretos.

Nota-se, pelos resultados, que os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto apresentaram um consumo de cimento maior que os produzidos com agregados graúdos naturais. Esse comportamento foi o mesmo para todas as faixas de resistência analisadas. Acredita-se que este acréscimo esteja associado às características dos agregados reciclado tais como índice de forma, massa específica e taxa de absorção.

Segundo Levy (2011), agregados lamelares e com maior taxa de absorção implicam em um aumento no consumo de cimento para manter a trabalhabilidade especificada, uma vez a pasta vai funcionar como lubrificante para evitar o travamento. Carrijo (2005) observou que para atingir a mesma resistência mecânica utilizando agregados de menor densidade, tem-se que aumentar o consumo de cimento. Logo, sobre este ponto de vista os resultados encontram-se coerentes com os da bibliografia, já que utilizam materiais mais leves, frágeis e mais porosos que os convencionais.

Comparando os resultados de consumo de cimento individual, utilizados pelos distintos agregados, nas faixas de resistência de 20 MPa e 30 MPa percebeu-se que os concretos com agregados reciclados menos resistente, consomem mais cimento que os fabricados com agregados mais resistente. Para a faixa de 40 MPa, esse comportamento não pode ser verificado, ao analisar o efeito do uso dos AGRC no consumo de cimento, os resultados mostraram-se incoerentes. Os concretos com AGRC<sub>30</sub> apresentaram um consumo de cimento maior que os demais, o que não era esperado. Pode ter ocorrido algum erro neste traço que na época não foi detectado. Como o critério de aceitação desse ensaio foi o coeficiente de variação, o mesmo tinha que ser menor ou igual a 5%, tal qual cita a NBR 5739 (ABNT, 2007), todos os traços atendiam esses limites não se julgou necessário sua repetição.

Os resultados indicam que é possível alcançar as resistências desejadas a um bom nível de variação. Entretanto, é interessante que os agregados reciclados de concretos sejam utilizados em situações onde sua resistência características seja menor ou igual ao do novo concreto que será produzido, caso contrário, o custo será muito alto.

#### b) Módulo de elasticidade

O conhecimento do módulo de elasticidade do concreto é extremamente importante visto que está diretamente relacionado com as flechas máximas admissíveis das peças estruturais. Para

os concretos confeccionados com agregados reciclados vários autores tais como: Etxeberria et al. (2007); Brito e Alves (2010); Xiao et al. (2005) apontaram que concretos feitos com agregado reciclado geralmente apresentam módulo de elasticidade menor que o do concreto convencional. Na tabela 13 e Figura 22 estão os resultados de módulo de elasticidade alcançados.

Tabela 13: Módulo de elasticidade de concretos confeccionados com AGNAT e AGRC.

AGREGADOS	a/c	E Médio (Gpa)
AGNAT	0,48	33,53
	0,63	26,88
	0,78	27,16
AG15	0,43	29,65
	0,59	23,90
	0,74	25,80
AG30	0,37	31,20
	0,60	28,00
	0,82	26,80

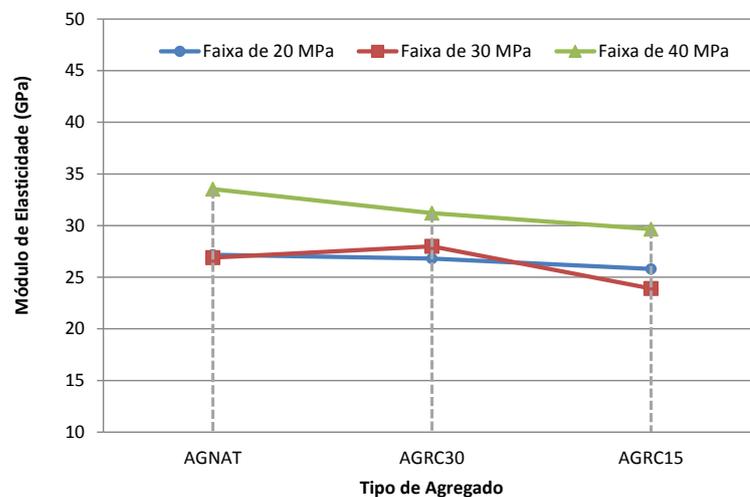


Figura 22: Correlação entre os resultados de módulo de elasticidade e o tipo de agregado para as diferentes faixas de resistência.

Analisando os resultados, verifica-se que os módulos de elasticidade dos concretos com agregados reciclados são menores que os dos concretos com agregados naturais.

Para faixa de 20 MPa o decréscimo foi de 5% e 1% para os AGRC<sub>15</sub> e AGRC<sub>30</sub>, respectivamente. Para faixa de 30 MPa, os módulos de elasticidade diminuíram cerca de 11%

para AGRC<sub>15</sub> e 4% para o AGRC<sub>30</sub>. E na faixa de 40 MPa a diminuição foi de 12% para o AGRC<sub>15</sub> e 7% para o AGRC<sub>30</sub>.

Os resultados apresentados coincidem com o que a bibliografia (HANSEN, 1992; LEITE, 2001; XIAO ET AL., 2005; BENETTI, 2012) apresenta, de que os concretos com agregados reciclados apresentam-se mais deformáveis que os concretos com agregados naturais. Nesse estudo observou-se também que quanto maior a resistência mecânica do concreto, maior a diferença entre o módulo de elasticidade do concreto com agregados naturais e o módulo de elasticidade do concreto com resíduo de concreto.

Mehta e Monteiro (1994) afirmam que quanto maior a quantidade de agregados densos numa mistura de concreto, maiores são os valores de módulo obtidos. Como os agregados reciclados são menos densos, conseqüentemente tem-se um concreto com um módulo de elasticidade menor.

Ravindrarajah (1988), Hansen (1992) e Cheen et al (2002) mostraram, em sua pesquisa, que o módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados são menores do que o módulo dos concretos com agregados naturais, e esta diferença é maior para resistências à compressão mais elevadas. Os referidos autores atribuem essa diferença às características do agregado, tais como: densidade mais baixa, maior porosidade, heterogeneidade dos constituintes (presença de argamassa antiga aderida na superfície do agregado) e menor rigidez, fatores estes que influenciam diretamente no módulo de elasticidade do concreto.

### 3.2.3.3 Conclusões

Com relação aos resultados obtidos no estudo das características físicas do AGRC, podem-se fazer algumas considerações quanto à influência da resistência do concreto de origem nas características físicas dos agregados resultantes, tais como:

- ✓ O módulo de finura do agregado gerado por um concreto de menor resistência (AGRC<sub>15</sub>) foi inferior a do agregado produzido por um concreto de maior resistência (AGRC<sub>30</sub>) com maior geração de finos. O efeito dessa maior geração de finos foi sensível no ensaio de absorção, que mostrou que a taxa de absorção do AGRC<sub>15</sub> foi superior à do AGRC<sub>30</sub>;
- ✓ Em se tratando de massa específica, a origem do agregado não afetou esta característica.

Analisando os resultados obtidos no estudo do concreto com resíduo e com AGRC e com AGNAT, em que se avaliou o efeito da resistência do agregado reciclado no desempenho do concreto com ele produzido, percebe-se que:

- ✓ Os concretos com agregados reciclados apesar de apresentarem, na maioria dos casos, um coeficiente de variação maior que a dos concretos convencionais, enquadram-se como satisfatórios nos níveis estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 2007). Desta forma pode-se dizer que as operações de ensaios foram eficientes.
- ✓ A resistência do concreto de origem só afetará na resistência mecânica quando o agregado incorporado for o elo fraco, isto acontece quando sua resistência é inferior a da matriz do novo concreto.
- ✓ Em todos os concretos com agregados reciclados teve-se um aumento no consumo de cimento, para que a trabalhabilidade desejada fosse alcançada. Esse aumento se fez necessário para evitar o travamento dos grãos lamelares e minimizar o efeito da maior taxa de absorção.
- ✓ Com relação ao módulo de elasticidade os resultados mostraram que concretos com agregados reciclados apresentam um módulo de elasticidade menor que aqueles produzidos com agregados naturais, em virtude de sua maior porosidade, menor densidade e menor rigidez. Percebeu-se, também, que quanto maior a resistência do concreto, maior a diferença entre o módulo de elasticidade do concreto convencional e do concreto com agregado reciclado.

Por questões de restrições de tempo e custo, os estudos que seguem correspondem à análise de uma faixa de resistência de concreto. A escolha da faixa resistência levou em consideração o fato de que a resistência da matriz agregado reciclado deve ser compatível com a matriz do novo concreto, caso contrário o agregado passará ser o elo fraco e romperá quando solicitado, levando ao decréscimo de resistência mecânica.

Dessa maneira o uso de AGRC<sub>30</sub> permite a produção de concretos de até 30 MPa, sem grandes danos ao concreto. Outro fator que contribuiu para essa escolha foi o fato do AGRC<sub>30</sub> apresentar características físicas satisfatórias. Este material além de apresentar uma taxa de absorção menor, gera menos de finos, durante a sua manipulação que o AGRC<sub>15</sub>.

### 3.3 FASE 2: ESTUDO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE DA POROSIDADE DO AGRC.

Nessa fase da pesquisa avaliou-se a porosidade do AGRC<sub>30</sub>. Para tal foram realizados estudos preliminares a fim de decidir se as características referentes à porosidade seriam avaliadas através da norma NBR NM 53 (ABNT, 2009), ou se seguiria a metodologia proposta por Leite (2001) e Leite et al (2011). Os ensaios executados nesta fase da pesquisa estão dispostos na Figura 23.

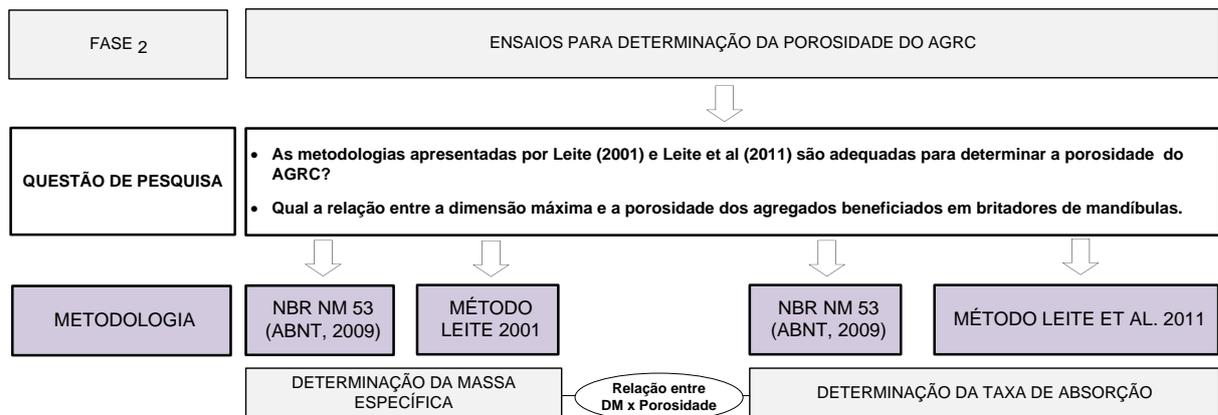


Figura 23: Representação esquemática dos ensaios realizados na fase 2.

#### 3.3.1 Materiais e Métodos para Determinação da Massa Específica e Absorção do AGRC

Conforme já dito anteriormente, os materiais analisados são resíduos de concretos de 30 MPa (AGRC<sub>30</sub>), que foram produzidos em laboratório, a fim de garantir tais características. A produção dos AGRC foi feita em britadores de mandíbulas seguido por peneiramento mecânico. Ao final do processo foram geradas três toneladas de AGRC, que foram estocadas em recipientes de 200 litros. A faixa granulométrica desses agregados foi de passante na peneira de # 25 mm e retido na peneira # 4.8 mm.

##### 3.3.1.1 Massa Específica e Absorção de Água segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2009)

O primeiro método analisado é o proposto pela NBR NM 53 (ABNT, 2009), através do qual são determinadas a absorção e a massa específica do material. Este método baseia-se no princípio de Arquimedes para determinar a absorção e massas específicas. Segundo Arquimedes, um corpo mergulhado num fluido recebe deste um empuxo dirigido

verticalmente de baixo para cima, igual ao volume deslocado. Dessa maneira a força resultante será igual ao peso do corpo menos o seu empuxo. No método da NBR NM 53 a amostra fica submersa em água durante a pesagem, de forma que o que se mede é a força resultante do peso da amostra menos o empuxo criado pela água sobre a mesma. A absorção, entretanto, é determinada a partir das medidas percentuais de ganho de massa de água do agregado. Relaciona-se a quantidade de água contida no material à sua massa seca. A seguir tem-se a descrição do procedimento:

Inicia-se o ensaio pesando a amostra seca. A quantidade de material que deve ser pesada está relacionada com a dimensão máxima característica do grão. Em seguida submerge o agregado em água à temperatura ambiente por um período de  $(24 \pm 4h)$ . Logo depois, retira-se a amostra da água e envolve-se os agregados em um pano absorvente até que toda a água visível seja eliminada, ainda que a superfície das partículas se apresente úmida. Se existir fragmentos grandes, estes devem ser limpos individualmente. É necessário evitar a evaporação da água dos poros do agregado durante a operação de enxugamento da amostra. Imediatamente após a amostra ser enxugada, a mesma deve ser pesado em balança com precisão de 1g ( $M_{SS}$ , agregado saturado com superfície seca). Coloca-se a amostra no recipiente, e submerge em água mantida a  $(23 \pm 2)^\circ C$  e pesa-se em água com precisão de 1g ( $M_a$ , massa em água). Após esse processo seca-se a amostra a  $(105 \pm 5)^\circ C$  até massa constante. Deixa-se esfriar até a temperatura ambiente durante 1h e 3h ou até que o agregado esteja a uma temperatura que permita sua manipulação e pesa-se com precisão de 1g ( $m$ , agregado seco). A massa do AGRC foi determinada pela seguinte equação:

$$\gamma = \frac{M_s}{M_s - M_a} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\gamma$  ( $g/cm^3$ ) = massa específica do agregado

$M_s(g)$  = massa seca da amostra

$M_a(g)$  = massa material submerso em água.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

A= absorção de água, em porcentagem.

$m_s$  = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas.

$M$  = massa ao ar da amostra seca, em gramas.

Com relação às limitações dessa norma primeiramente pode-se dizer que a mesma foi concebida para rochas naturais, que tem como características intrínsecas a pouca porosidade. Já os agregados reciclados são materiais porosos. Leite (2001) demonstrou que as maiorias dos agregados reciclados não saturam totalmente em 24 horas, e por conta disso aprisionam o ar. Este ar aumenta o empuxo e diminui conseqüentemente a força resultante, trazendo com isso erros de medidas. Outro fator, é a secagem dos agregados graúdos com o pano, este procedimento leva muitas vezes a perda de massa de material. Carrijo (2005) observou que se uma mesma amostra for submetida a vários ciclos de ensaio, o erro se acumula, comprometendo a repetibilidade do ensaio. Diante dessas contestações faz-se necessário a realização de estudos na tentativa de se estabelecer métodos de ensaios que levem em consideração as características do agregado reciclado.

### 3.3.1.2 Massa Específica segundo o método Leite (2001)

O método proposto por Leite (2001) para determinação da massa específica consiste em utilizar um balão volumétrico com capacidade de 1000 ml, balança com precisão mínima de 0,1 g e bomba de vácuo. A amostra de agregado é seca em estufa por 24 horas; e após resfriada em temperatura ambiente. Em seguida pesa-se 800 g de material (C), que é colocado no recipiente de vidro. Põe-se então água no recipiente. A quantidade de água deve ser suficiente para submergir o agregado. O conjunto fica em repouso por 24 horas. Passado o tempo aplica-se o vácuo, por pelo menos 15 minutos, agitando o recipiente para que haja a saída de ar entre os grãos de agregado. Acrescenta-se água ao recipiente até enchê-lo completamente e cobrindo-o com uma placa de vidro. Determina-se a massa desse conjunto com a placa de vidro (A). Retira-se o material do recipiente, lavando-o e em seguida preenche-se totalmente com água o recipiente. Cobre-se o recipiente com a placa de vidro e determina-se a massa do conjunto (B). A Equação 3 é usada para determinação da massa específica do agregado reciclado.

$$\gamma = \frac{C}{B - A + C} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$\gamma$  (g/cm<sup>3</sup>) = massa específica do agregado

A(g) = massa da amostra + recipiente + água + placa de vidro

B(g) = massa do recipiente + água + placa de vidro

C(g) = massa da amostra seca em estufa

O interessante a respeito desse método é que ele foi desenvolvido para caracterização de agregados reciclados, de elevada porosidade em comparação as rochas naturais. A etapa de retirada do ar aprisionado por meio de bomba de vácuo e agitações periódicas contribui bastante para que se alcance resultados satisfatórios.

### 3.3.1.3 Absorção segundo o método Leite (2001)

O ensaio de absorção de Leite (2001) também se baseia no princípio de Arquimedes, entretanto, a autora leva em consideração a porosidade do material que leva ao aprisionamento do ar, por conta disso o método sugere que antes de cada leitura seja feita uma agitação a fim de eliminar o ar aprisionado entre os grãos. Na Figura 24 têm-se as fotos do ensaio realizado por Leite (2001).



Figura 24: Ensaio de absorção do agregado reciclado: a) Recipiente utilizado para execução do ensaio de absorção; b) Amostra de agregado submersa (Fonte: LEITE, 2001).

Na Equação 4 e Equação 5 estão, respectivamente, a fórmula para o cálculo da taxa de absorção e da absorção de água percentual, usada na construção das curvas.

$$ASUB_{(\%)} = \frac{M_{SUB F} - M_{SUB I}}{M_{SUB I}} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$A_{SUB} (\%)$  = taxa de absorção do material submerso

$M_{SUB F} (g)$  = massa de material submerso no instante final

$M_{SUB I} (g)$  = massa de material submerso no instante inicial

$$An_{(\%)} = \frac{An}{A_{24}} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$An (\%)$  = absorção de água percentual no instante n

$An (g)$  = massa de água absorvida no instante n

$A_{24}(g)$  = massa de água absorvida em 24 horas de ensaio

O AGRC estudado é um material heterogêneo composto argamassa aderida na sua superfície. Essa argamassa além de desagregar-se facilmente com o atrito apresenta poros que aprisionam o ar. Os pontos positivos a respeito do método Leite (2001) é que o ensaio foi desenvolvido para agregados reciclados. Sendo assim, faz parte do seu processo um período de agitação do material para retirada do ar aprisionado. E em nenhum momento do método têm-se ações que levam a desagregação das partículas. Porém, por conta do pioneirismo, o método apresenta alguns problemas que levaram com que pesquisadores como Dias (2004) e Daminelli (2005) criticassem o ensaio como sendo um método instável e pouco preciso. Diante de tais contestações decidiu-se então realizar ajustes e adaptações. Surge então o método de Leite adaptado disponível em Leite et al. (2011).

#### 3.3.1.4 Absorção de água segundo o método Leite et al (2011).

O método Leite et al. (2011) tem como principal diferença a concepção de um aparato rígido, que restringe a movimentação, diminuindo-se assim as variação durante as leituras na balança.

Os equipamentos necessários para execução desde ensaio são: estufa; caixa de plástico com altura mínima que garanta a imersão do porta amostra; placa de apoio para sustentar a balança; aparato para imersão; balança hidrostática com precisão de 0,01g, e capacidade compatível com a massa a determinar; dispositivo para manter a peneira suspensa; espátula de silicone e peneira com dimensão de # 0,044 mm.

Na Figura 25, pode ser visto o dispositivo utilizado para manter a peneira suspensa. A temperatura do local de ensaio deve estar entre  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e a umidade relativa do ar deve ser de  $70 \pm 10\%$ .

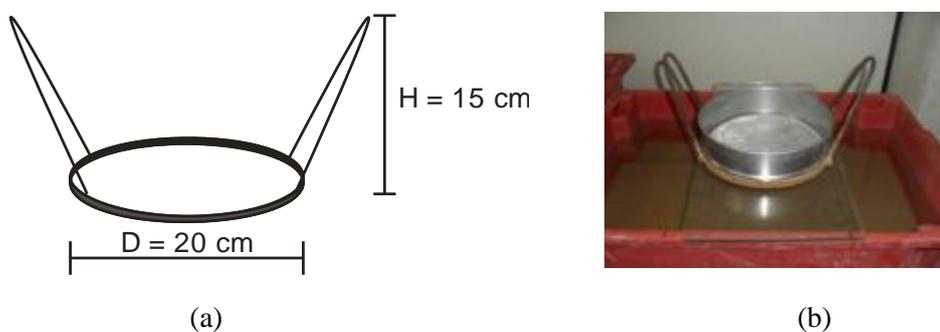


Figura 25: Equipamento para execução do ensaio de absorção: (a) representação esquemática do porta peneira; (b) vista geral do dispositivo

O procedimento consiste em separar, em bandejas, aproximadamente 1000 g de agregados reciclados e 300 g de sílica gel. Levar o material na estufa por pelo menos 4 horas. Após esse tempo, colocar o material numa bandeja com sílica gel. A bandeja é mantida no local do ensaio até a estabilização da temperatura.

Inicia-se o ensaio marcando na peneira as medidas equivalente as alturas representadas na figura 29. Monta-se sobre a balança o aparato (que consiste em um porta peneira, haste e peneira # 0,044 mm) e tara a balança. Com a amostra seca preenche-se o volume equivalente a três centímetros medidos a partir da base da peneira (Figura 26).

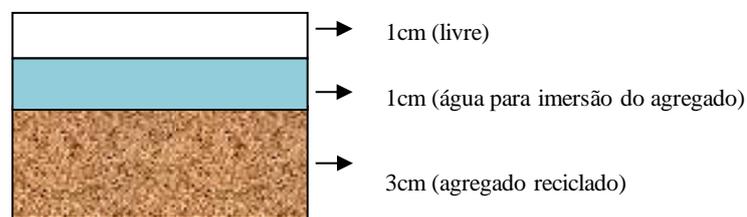


Figura 26: Representação esquemática da disposição dos materiais

Coloca-se cuidadosamente a água, de modo que se tenha uma lâmina d'água para imersão de aproximadamente 1 centímetro. Passado um minuto, contado a partir do momento que a água atinge a altura desejada, anota-se o que será a massa no instante inicial ( $M_{SUBI}$ ). Com relação ao minuto inicial para tornar o ensaio mais preciso pode-se filmar a operação para que se tenha o valor exato a respeito do instante inicial. Ou ainda, utilizar um sistema de coleta de dados que envie para o computador as leituras de massa. Nesse estudo, pela disponibilidade de equipamentos utilizou-se a filmagem para determinação do minuto inicial.

Efetuem-se então leituras consecutivas de ganho de massa do conjunto, conforme os intervalos pré-determinados 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 180, 360 e 1440 minutos. Antes da realização de cada leitura, o material deve ser cuidadosamente agitado, com o auxílio de uma espátula de silicone, para facilitar a saída de ar aprisionado entre as partículas de agregados, essa agitação deve ocorrer minutos antes do tempo pré-definido, no caso agitava-se 5 minutos antes de cada leitura. A leitura final será aquela medida no tempo de 1440 minutos ( $M_{SUB F}$ ). Ao fim do período estipulado, escoar-se o excesso de água, retirar-se o material com cuidado para evitar perdas, e coloca-o em uma bandeja metálica que é levada à estufa, onde permanece até a constância de massa. A massa seca é então pesada, sendo que a perda de material durante o ensaio não deve ser superior a 0,05%. O ensaio deve ser realizado

com duas repetições no mínimo. No caso de materiais muito finos, recomenda-se o uso de seda no fundo da peneira a fim de evitar perdas.

Percebe-se que além de apresentar um aparato rígido que facilita o ensaio e a estabilidade do sistema. Tem-se também o volume fixo de material, água e ar que garante uma melhor reprodutibilidade dos ensaios.

### 3.3.2 Apresentação e análise dos resultados obtidos pelos ensaios de massa específica.

Na Tabela 14 encontram-se os resultados obtidos pelo método de ensaio proposto pela NBR NM 53 (ABNT, 2009). E na Tabela 15 estão disponíveis os resultados obtidos pelo método Leite (2001). Para as duas situações foram realizadas análises da massa específica em duas amostras.

Tabela 14: Massa específica do agregado AGRC<sub>30</sub> segundo a NBR 53 (ABNT, 2009)

<b>Método de ensaio NBR NM 53 (ABNT, 2009)</b>		
<b>Massa</b>	<b>Amostra 1 (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Amostra 2 (g/cm<sup>3</sup>)</b>
μ seca*	3,16	3,25
μ sss**	2,62	2,51
μ aparente***	2,37	2,18

\* Massa específica seca

\*\*Massa específica saturado superfície seca

\*\*\*Massa específica aparente

Tabela 15: Massa específica do agregado AGRC<sub>30</sub>segundo LEITE (2001)

<b>Método de ensaio LEITE 2001</b>		
<b>Massa</b>	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>
C	800 g	800 g
B	2025,4 g	2025,4 g
A	2531,9 g	2533,4 g
μ	2,73 g/cm <sup>3</sup>	2,74 g/cm <sup>3</sup>

C: massa da amostra seca em estufa; B: massa do recipiente+ água+ placa de vidro; A: massa da amostra + massa do recipiente+ água+ placa de vidro e μ: massa específica do agregado reciclado.

Percebe-se que os resultados de massa específica obtidos pelos dois métodos são distintos. Seguindo o método descrito pela norma obtêm-se resultados variáveis, se comparado com os obtidos pelo método de Leite (2001), que apresentaram uma boa reprodutibilidade. Acredita-se que a variabilidade dos resultados obtidos pela norma está associada a dois fatores: desagregação dos grãos e porosidade do AGRC. A norma NM 53 foi concebida para caracterizar agregados de baixa porosidade, que não é o caso dos agregados reciclados.

Pelo ensaio da norma, quando se retira a amostra da água e seca com um pano absorvente para eliminar a água visível, tem-se uma perda de material, e por mais cuidadoso que o operador seja o material desagrega-se por esse processo, afinal é um material mais frágil que uma rocha. Carrijo (2005), em sua pesquisa, observou erros da ordem de 30% devido a perda de massa de material pela secagem por pano, e essa variação é maior para os ensaios repetidos com a mesma amostra. Leite (2001) observou que além de desagregar o material, a água dos poros pode não estar sendo retirada durante a secagem, por isso os resultados mostram-se incoerentes. Essa situação também foi observada por Vieira (2004) e Lovato (2007).

Como o critério de avaliação foi a reprodutibilidade do ensaio com uma pequena variação, optou-se por dar prosseguimento nos estudos utilizando o métodos de determinação de massa específica proposto por Leite (2001) para avaliar a influência da dimensão máxima dos agregados reciclados de concreto na massa específica dos agregados. Os resultados encontram-se a seguir na Tabela 16:

Tabela 16: Massa específica de agregados reciclados com dimensões máximas diferentes, segundo o método proposto por LEITE (2001)

Método de ensaio LEITE 2001						
Massa	# 19.0		# 12.5		# 9.5	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
C	800	800	800	800	800	800
B	1635,9	1635,9	2025,4	2025,4	1635,9	1635,9
A	2150,9	2150,9	2537,4	2533,2	2141,3	2141,9
$\mu$	2,81	2,81	2,78	2,74	2,72	2,72

Os resultados demonstraram que quanto menor a dimensão do AGRC, menor é a massa específica. Este comportamento pode ser explicado pela desagregação da argamassa do concreto aderida aos grãos de agregado natural, que por ser menos resistente que a rocha, acabam se concentrando em peneiras de menor diâmetro. Barra (1996) e Gomes (2007) também observaram esse comportamento e os autores atribuem esses resultados à presença de argamassa aderida na superfície dos grãos, e por conta dessas argamassas os mesmos são mais leves, mais porosos e apresentam uma menor densidade.

### 3.3.3 Apresentação e análise dos resultados obtidos pelos ensaios de absorção.

Os resultados obtidos pela NBR NM 53 (ABNT, 2009) estão dispostos na Tabela 17, nota-se uma diferença de cerca de 30% entre os valores, essa falta de reprodutibilidade corrobora para

a ideia de que esse método não é o mais adequado para determinação da absorção de materiais porosos.

Tabela 17: Absorção do AGRC obtidas pela NBR NM 53 (ABNT,2009).

<b>Método de ensaio NBR NM 53 (ABNT, 2009)</b>		
<b>Massa</b>	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>
M (g)	181,10	173,40
Ms (g)	200,20	199,70
Absorção (%)	11	15

Na Tabela 18, tem-se os resultados de absorção obtidos pelo método de ensaio Leite et al. (2011). Pode-se considerar a respeito deste ensaio que a secagem superficial não é realizada, e tem-se o cuidado de desprender com certa periodicidade o ar aprisionado.

Tabela 18: Absorção do AGRC obtida pelo método Leite et al (2011)

<b>Método de ensaio Leite et al. 2001</b>		
	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>
Absorção (%)	5,2	5,4

A instabilidade do ensaio nos minutos iniciais, que era passível de crítica, foi solucionada com a construção de aparato que restringia a movimentação e a utilização de filmagem que auxiliava na determinação mais precisa do minuto inicial. A diferença entre os resultados foi de cerca de 5%. Bem menor que a obtida pelo ensaio normalizado, fortalecendo a ideia de que esse método apresenta uma boa reprodutibilidade.

Diante desses fatores optou-se em analisar a influência da variação da dimensão máxima dos grãos na absorção através do método Leite et al. (2011). Os resultados obtidos encontram-se na Figura 27:

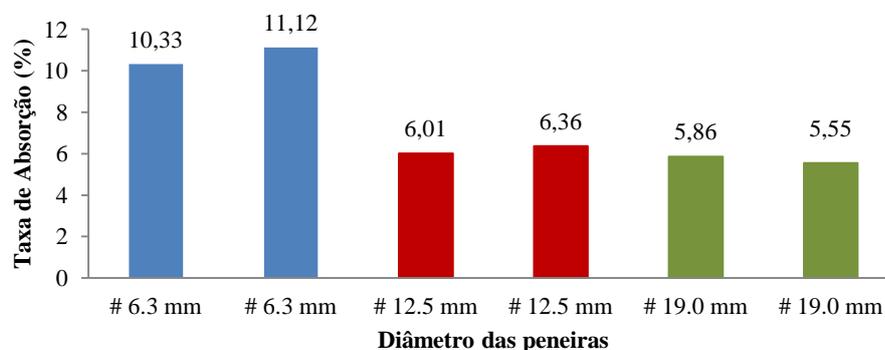


Figura 27: Absorção de AGRC<sub>30</sub> em função do seu diâmetro máximo

Com relação aos valores de absorção (Figura 32) observou-se duas coisas, com relação a variação dos resultados nota-se que para todas as situações a diferença encontrada foi de cerca 5%, em comparação com o ensaio da NBR NM 53, pode-se dizer que o resultados apresenta uma boa reprodutibilidade.

Outro fator observado foi que a absorção diminuiu à medida que se aumentou a dimensão máxima do agregado reciclado. Barra (1996) e Dessy et al. (1998) observaram o mesmo comportamento e concluíram que quanto menor o diâmetro do agregado, maior a porosidade inerente do material, maior quantidade de argamassa e menor de rocha, consequentemente maior será a taxa de absorção obtida. Nota-se que os resultados coincidem com os resultados de massa específica, apresentados no item anterior. Dessa forma, pode-se concluir que os agregados reciclados produzidos nessa pesquisa apresentam uma menor porosidade nas frações maiores.

Com relação as curvas de absorção, para os diferentes dimensões de agregados tem-se que em 10 minutos todos os agregados alcançaram cerca de 90% da taxa de absorção total conforme mostra a Figura 28, os resultados mostram que as maiores taxas de absorção do agregado reciclado ocorre nos instantes iniciais.

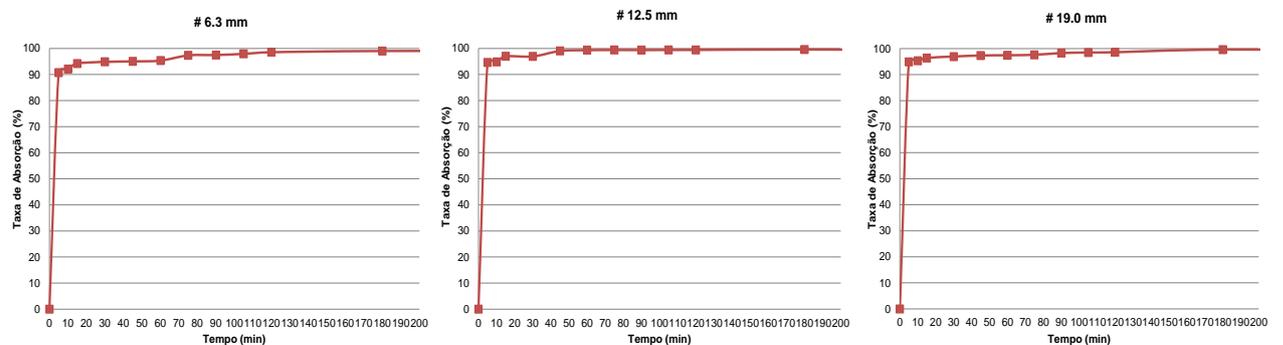


Figura 28: Curva de absorção do AGRC em função do tempo

### 3.3.4 Conclusões

Com relação à questão de pesquisa desse item, concluiu-se que os métodos proposto por Leite (2001) e Leite et al (2011) foram adequados na caracterização do AGRC<sub>30</sub>. Percebeu-se também que grãos de menores dimensões apresentam uma menor massa específica e uma maior taxa de absorção. Acredita-se que este fato esteja associado à presença de argamassa desagregada superfície dos grãos de rocha em quantidades maiores nas frações de menor

dimensão. E por conta dessa argamassa os agregados são mais leves, com uma menor densidade e maior porosidade. Barra (1996) e Dessy et. al. (1998) observaram esse mesmo comportamento. Com relação ao ensaio de absorção e suas adaptações, percebeu-se que o mesmo apresenta uma boa reprodutibilidade.

### 3.4 FASE 3: ESTUDO DA ALTERAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGRC DURANTE A ESTOCAGEM

Nesta fase do estudo foi feita uma investigação a respeito da variação da composição granulométrica do AGRC ao longo do processo de produção de concretos com AGRC. Buscou-se mapear a curva do AGRC desde a pilha de estocagem até a etapa de produção do concreto.

Iniciou-se este estudo avaliando-se a pilha de estocagem. Na Figura 29 estão as variáveis analisadas.

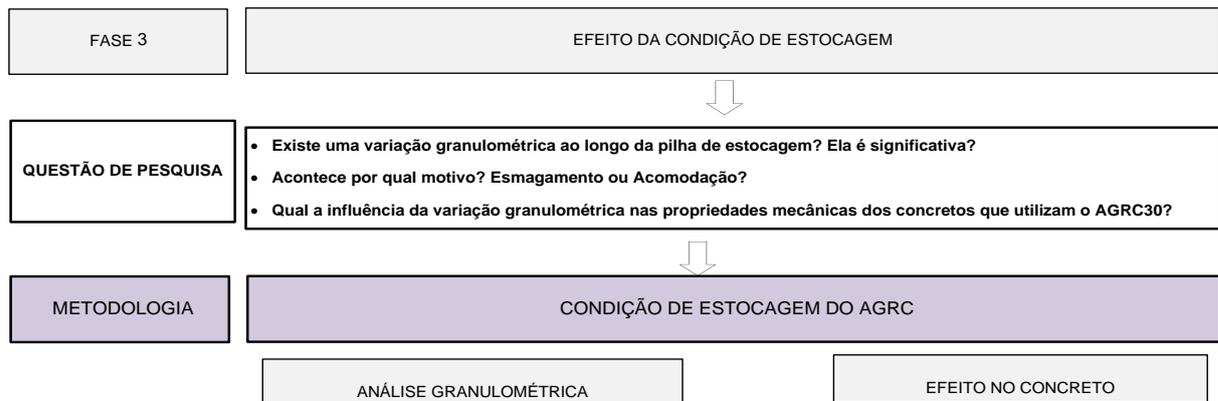


Figura 29: Esquema dos ensaios realizados na fase 3.

A condição de estocagem passou a ser uma variável de estudo quando percebeu-se que durante o transporte e estocagem dos agregados uma parte de finos concentrava-se no fundo das bombonas. Para esse estudo armazenou-se os AGRC em bombonas a fim de evitar qualquer tipo contaminação. A capacidade de estocagem do recipiente era 200 litros e os AGRC preenchiam totalmente esse volume.

#### 3.4.1 Materiais e Métodos

O material utilizado nessa pesquisa foi AGRC<sub>30</sub>, com dimensão máxima de # 19.0 mm, usado em substituição total ao agregado graúdo. Para a produção do concreto utilizaram-se cimento

CPV ARI e areia quartzosa. A análise começou com a divisão dos AGRC das bombonas em três partes denominadas de topo, meio e fundo (Figura 30).



Figura 30: Posição do agregado na bombona

Observou-se durante a pesquisa que finos concentravam-se no meio e no fundo das bombonas. Só que não se tinha ideia do quanto esses finos representavam. Outra dúvida a ser respondida era se no caso de existir variação, a mesma era decorrente do esmagamento dos grãos ou da simples acomodação dos finos em função da gravidade. E por fim, se de alguma forma tais alterações prejudicariam o desempenho dos concretos.

Após um mês de estocagem, sem movimentar a bombona, os materiais das diferentes partes foram submetidos a uma análise granulométrica, seguindo as recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Em seguida realizou-se a produção de concretos. O esquema a seguir (Figura 31) demonstra o que foi feito.

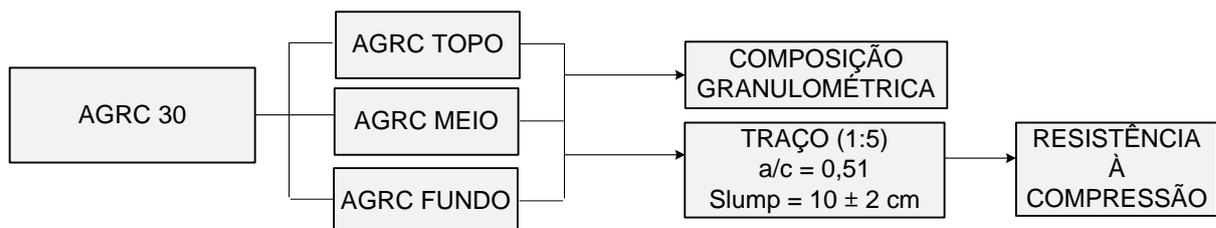


Figura 31: Representação esquemática das etapas realizadas na avaliação da condição de estocagem

Para a produção do concreto utilizou-se um traço intermediário (1:5) de relação água/cimento (a/c) de 0,51 e abatimento de  $100 \pm 20$  mm. As quantidades de materiais utilizadas encontram-se na Tabela 19, o agregado graúdo foi substituído totalmente por agregado graúdo reciclado de concreto. Para manter fixos os valores de abatimento e da relação água/cimento (a/c), utilizou-se aditivo superplastificante na mistura.

Tabela 19: Consumo unitário e total dos materiais utilizados para avaliação da influência de estocagem do agregado

Condição de estocagem	a/c	m	Traço Unitário (massa)			Quantidade de materiais (kg)			Quantidade de água (kg)			Aditivo (%)	Abatimento (mm)
			c	a	p	c	a	p	AMOLHAGEM	AMISTURA	ATOTAL		
TOPO	0,51	5	1	2,3	2,7	7,41	17,04	20	0,57	3,21	3,78	2,6	115
MEIO												1,4	80
FUNDO												2,4	110

Para que o agregado graúdo reciclado não absorvesse água da mistura, realizou-se uma pré-molhagem de duração de 10 minutos, seguindo as recomendações de Leite (2001). A quantidade de água incorporada na pré-molhagem equivale a uma compensação de água de 30%, calculado a partir da taxa de absorção.

A mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira de eixo vertical, previamente imprimada com uma mistura de cimento, agregado miúdo natural e água. A ordem dos materiais foi o agregado graúdo reciclado, aproximadamente 30% da água, cimento, 50% de água, agregado miúdo natural, e os 20 % restantes de água e aditivo superplastificante para ajustar a trabalhabilidade do concreto e atingir o limite de abatimento estabelecido de  $100 \pm 20$  mm. Os resultados do abatimento encontram-se na Tabela 19.

Todos os corpos de prova foram moldados simultaneamente. O processo de adensamento adotado foi mecânico, com o auxílio de um vibrador de imersão, que era mantido durante 5 segundos dentro do corpo de prova (cp's), 5 segundos retirando-se do corpo de prova (cp's) e 7 segundos na parte externa do cp's.

Para avaliar o desempenho do concreto foi realizado o ensaio de resistência à compressão segundo a NBR 5739 (ABNT, 1994). Foram moldados 10 corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm, cuja moldagem seguiu a prescrição da NBR 5738 (ABNT, 2003). Após a moldagem, os cp's foram cobertos com sacos de linhagem úmidos, e mantidos no local de ensaio durante as primeiras 24 horas. Posteriormente às 24 horas os cp's foram desmoldados e armazenados em câmara úmida para realização da cura. Após 28 dias os concretos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

### 3.4.2 Apresentação e análise dos resultados

Os resultados demonstraram que dependendo do ponto de coleta, a amostra apresenta uma alteração granulométrica. Acredita-se que essa alteração seja decorrente da fragilidade de algumas partes do agregado estudado. A argamassa antiga aderida na superfície do AGRC tende, durante o manuseio, a se desagregar, pois o processo leva ao impacto que as partes

mais frágeis não suportam. No próprio processo de beneficiamento, partículas de agregados ficam aderidas nas paredes dos grãos, e com o passar do tempo, pela ação da gravidade, elas tendem a se acomodar, depositando-se no fundo das pilhas de estocagem. Chegou-se a verificar se acontecia um esmagamento dos grãos pelo peso próprio, entretanto, essa ideia foi descartada, pois a tensão provocada pelos grãos nas pilhas em análise era tão pequena (na ordem 0,5 KPa) que não poderia provocar tal ação.

A Tabela 20 e Figura 32 mostram a variação granulométrica existente na pilha de estocagem após um mês.

Tabela 20: Caracterização física dos AGRC coletado em diferentes alturas (Topo, meio e fundo)

Abertura das peneiras (mm)	RCD TOPO		RCD MEIO		RCD FUNDO	
	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
25	2	2	3	3	2	2
19	18	20	15	17	14	16
12,5	25	45	18	36	19	35
9,5	17	62	15	51	17	52
6,3	18	80	19	71	18	70
4,75	8	88	9	80	8	77
2,36	6	94	10	90	9	86
1,18	3	97	5	94	5	91
0,6	1	99	2	97	4	95
0,3	1	99	1	98	2	97
0,15	0	100	1	99	2	99
Fundo	0	-	1	100	1	100
Módulo de Finura		6,58	-	6,27	-	6,13
Dimensão Máxima (mm)		25	-	25	-	25

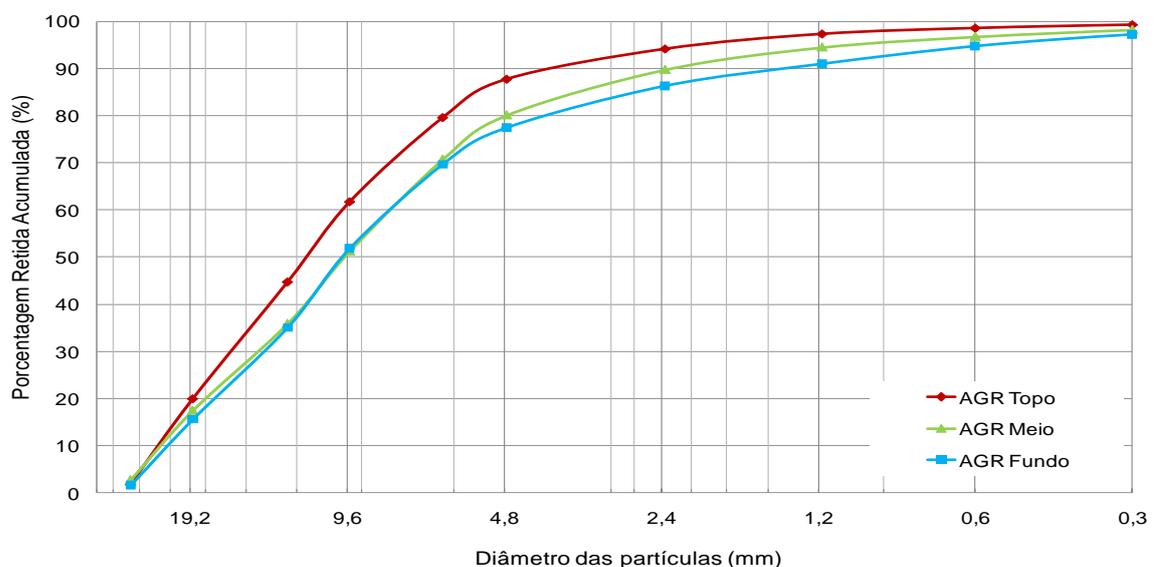


Figura 32: Curva granulométrica dos AGRC (Topo, Meio e Fundo)

Percebe-se pelos resultados que existe uma alteração granulométrica ao longo da pilha de estocagem. O meio e o fundo da pilha apresentam uma concentração de finos maior que o topo. Comparando os resultados de módulo de finura nota-se uma diferença entre os valores de cerca de 10%. Contudo, do ponto de vista de resistência à compressão, é necessário avaliar se essa diferença é ou não, capaz de provocar uma influência significativa, sobre o concreto com eles produzido.

A proporção de agregado miúdo natural foi mantida fixa em todas as misturas, e não se utilizou finos e nem aditivos. O AGRC, variável do experimento, foi separado por pontos de coleta e utilizado na produção dos novos concretos. Para tal foram moldados corpos de prova, os quais foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão. Os resultados desse ensaio foram analisados estatisticamente (ANOVA) e estão dispostos na Figura 33 e Tabela 21.

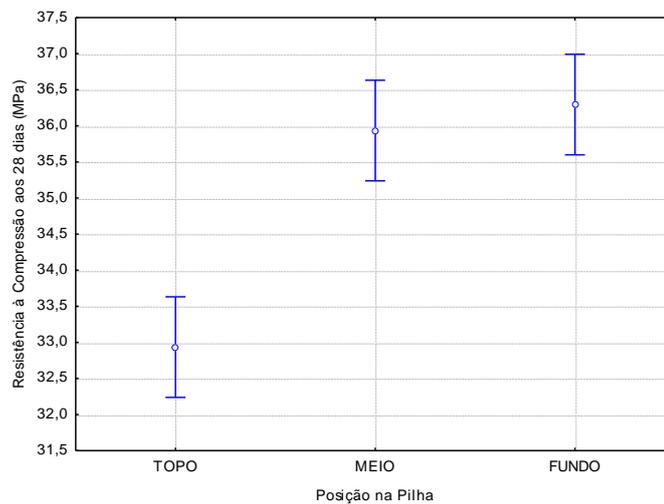


Figura 33: Análise de variância entre a posição do agregado na pilha e a resistência à compressão.

Tabela 21: Resultados da Análise de Variância (ANOVA) entre a posição do agregado na pilha e a resistência à compressão

Análise de Variância						
	SQ	GDL	MQ	Fcal	p	Significância
Posição na Pilha	68,06	2	34,03	29,50	0,00000	s
Erro	31,14	27	1,15			

SQ: Soma Quadrada, GDL: Grau de Liberdade, MQ: Média Quadrada, F(cal): valor calculado de F, p: nível de significância, s: significativo e ns: não significativo

Os resultados obtidos pela análise de variância (ANOVA) mostraram que a utilização de agregados reciclados coletados de diferentes posições da pilha influencia, de forma significativa, na resistência à compressão. O concreto produzido com  $AGRC_{TOPO}$  apresenta uma resistência à compressão menor que o concreto produzido com  $AGRC_{MEIO}$  e  $AGRC_{FUNDO}$ .

Comparando as resistências médias a diferença entre os resultados de resistência à compressão foi de cerca de 10%. Para avaliar a diferença entre as posições realizou-se a análise múltipla de médias, expressa na Tabela 22. Dessa maneira seria possível dizer se esta seria ou não uma diferença significativa.

Tabela 22: Análise múltipla de médias para as diferentes condições de estocagem.

<b>ANÁLISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS</b>			
	TOPO	MEIO	FUNDO
TOPO	-	VS	VS
MEIO	VS	-	VNS
FUNDO	VS	VNS	-

VS: variância significativa; VNS: variância não significativa

Os resultados comprovam que a resistência do concreto produzido com o agregado localizado no topo difere-se significativamente da resistência do concreto produzido com agregado localizado no meio e no fundo. E que os concretos produzidos com agregados localizados no meio e no fundo são estatisticamente iguais. Acredita-se que o fato desses agregados apresentarem em sua distribuição uma maior quantidade de finos, faz se, pelo efeito filler, um preenchimento dos vazios, e conseqüentemente uma melhoria nas propriedades do concreto com eles produzido. Em termos de dispersão dos resultados, o valor do coeficiente de variação, para as três situações, foi de 3%.

### 3.4.3 Conclusões

Concluiu-se que existe uma alteração granulométrica do AGRC ao longo da pilha de estocagem. Tais alterações influenciam nas características granulométricas dos materiais e acontecem devido à acomodação dos finos, que desagregam da argamassa aderida no agregado reciclado de concreto e se distribuem ao longo da pilha de estocagem.

CHAVES e FERREIRA (1996) observaram que em pilhas de estocagem de minério de ferro acontece segregação granulométrica, em virtude do escorregamento dos finos ao longo da pilha. Ao medir os finos, os referidos autores observaram que no centro da pilha a quantidade de finos era maior, e essa característica acentuava-se em materiais de menores resistências. Com relação a variação granulométrica em pilhas de agregados naturais, até o momento nada foi encontrado.

Ao analisar o efeito da alteração granulométrica do AGRC nas propriedades do concreto, pode-se concluir que a mesma tem influência significativa na resistência à compressão dos

concretos com eles produzidos. Os concretos produzidos com os agregados localizados no topo apresentam os menores resultados que os concretos produzidos com agregados localizados no meio e no fundo, que por apresentar um maior teor de finos, possivelmente são favorecidos pelo efeito filler justificando a melhoria na sua resistência mecânica.

Diante desses resultados, decidiu-se eliminar a variável condição de estocagem, trabalhando-se com curvas granulométricas fixas, montadas antes de cada mistura. Trata-se de uma solução que demanda tempo, porém foi a maneira encontrada para evitar grandes variações. Sendo assim, os AGRC foram peneirados, e separados por frações em tonéis de 200 litros. Antes de cada mistura, conferiam-se as dimensões dos agregados e montava-se a curva granulométrica.

### 3.5 FASE 4: ESTUDO DA VARIAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGRC DURANTE A MISTURA DE CONCRETOS EM DIFERENTES BETONEIRAS.

No item 3.4 verificou-se que a curva granulométrica do AGRC, ao longo da pilha de estocagem, é distinta. E essa diferença, afeta de maneira significativa na resistência dos concretos com eles produzidos; sendo assim, o ideal seria compor as curva granulométrica antes das misturas. Neste estudo busca-se analisar a variabilidade do AGRC durante o processo de produção de concreto. Para tal, será feito um estudo para avaliar a variação granulométrica do AGRC, durante a mistura de concreto, em diferentes betoneiras. A Figura 34 mostra o resumo das atividades que foram realizadas.

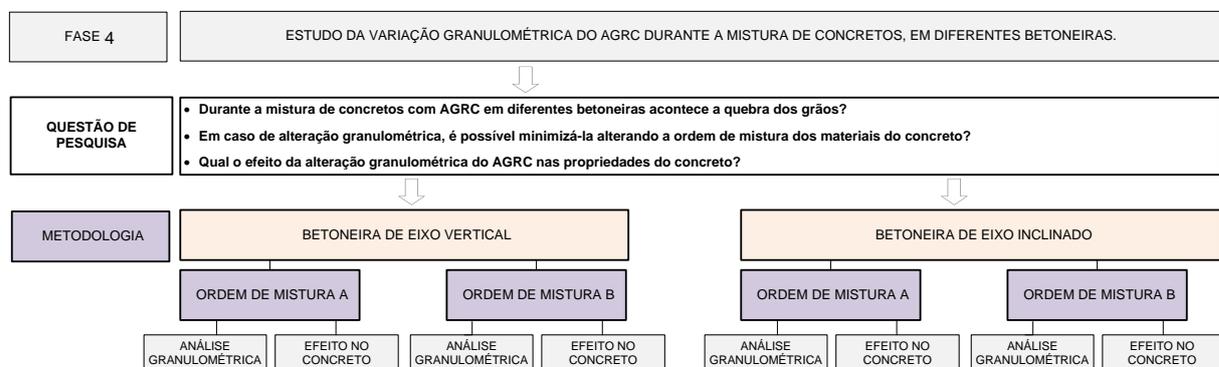


Figura 34: Representação esquemática dos ensaios realizados na fase 4.

### 3.5.1 Materiais e Métodos

O objetivo desta fase da pesquisa é analisar se há alteração granulométrica do AGRC durante o processo de produção do concreto. Os materiais utilizados neste estudo foram cimento CPV ARI, areia quartzosa e agregado reciclado de concreto utilizado em substituição total ao agregado graúdo natural. A composição granulométrica dos agregados reciclados antes da mistura foi mantida fixa (# 19,0, #12,5, #9,5 e # 6,3 mm), sendo que a proporção de materiais por fração foi de 25%.

Optou-se por não realizar pré-molhagem do AGRC não utilizar aditivos e nem adições por acreditar que esta seria a pior condição de mistura. O tempo de mistura também foi mantido constante, em três minutos e vinte e dois segundos, obtido a partir de testes prévios feitos em laboratórios, mostrando-se adequado para homogeneizar materiais em diferentes ordens de misturas. As misturas foram realizadas em betoneiras de eixo vertical e em betoneira de eixo inclinado. Para cada misturada testada faz-se uma repetição. O consumo de materiais usado está disposto na Tabela 23.

Tabela 23: Consumo dos materiais

$\alpha$	a/c	Traço unitário (massa)			Cc (m <sup>3</sup> )	Ca (m <sup>3</sup> )	Quantidade de materiais (kg)			
		M	a	p			c	a	p	Água TOTAL
56%	0,61	4,71	2,20	2,51	370,91	222,55	7,96	17,49	20,00	4,90

No estudo da avaliação da alteração granulométrica testou-se o tipo de betoneira (eixo inclinado e eixo vertical), e a ordem de mistura dos materiais (tradicional e inversa).

A ordem de mistura tradicional, denominada de ordem A, consisti em adicionar os materiais na seguinte ordem: brita, água, cimento, água, areia e o restante da água. A Figura 35 demonstra as etapas de produção.



Figura 35: Ordem tradicional de colocação dos materiais constituintes do concreto convencional com AGRC<sub>30</sub> (Ordem A)

Na tentativa de minimizar a quebra dos grãos durante a mistura, pois a mesma visivelmente acontecia, a autora propôs uma nova ordem de mistura, na qual se produzia na betoneira uma argamassa e sobre esta colocava o AGRC<sub>30</sub>. A nova ordem de mistura proposta foi denominada como ordem B ou ordem inversa, e consiste em adicionar os materiais na seguinte ordem: areia, cimento, água, agregado e o restante da água, conforme mostra a Figura 36.



Figura 36: Ordem de mistura dos materiais com AGRC proposta pela autora (Ordem B)

Primeiramente decidiu-se avaliar se o AGRC quebrava durante as misturas dos concretos. Para tal foram produzidas quatro misturas por betoneira, sendo que em duas a colocação dos materiais seguia a ordem tradicional, e as duas restantes seguia a ordem inversa. Após cada mistura, lavava-se todo o concreto para a obtenção de materiais para a composição das curvas granulométricas. Ao final do processo tinha-se a porcentagem retida nas peneiras # 19.0 mm, # 12.5 mm, #9.5 mm, #6.3 mm, # 4.8 mm. Na Figura 37 tem-se os misturadores utilizados, bem como o processo de lavagem adotado. Tanto a coleta do material na betoneira, quanto a lavagem deve ser cuidadosa a fim de evitar perda e desagregação de material.



Figura 37: Produção dos concretos com AGRC: (a) Preparo em betoneira de eixo vertical, (b) Preparo em betoneira de eixo inclinado e (c) Lavagem dos concretos

Em seguida, produzia-se novas misturas para a avaliação das propriedades dos concretos tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, conforme mostra a Figura 38. Para cada tipo de betoneira, foram realizadas quatro misturas a fim de avaliar se a ordem de mistura tinha influência significativa sobre as propriedades do concreto.



Figura 38: Produção dos concretos com AGRC: (a) determinação do abatimento e (b) moldagem de cp's.

Ao produzir concretos com AGRC em betoneiras de tombo, notou-se nos resultados de resistência à compressão, elevados coeficientes de variação. Diante disso decidiu-se avaliar se ao longo da betoneira de eixo inclinado, existia alteração granulométrica, capaz de justificar tais variações. Os parâmetros de misturas permaneceram fixos, e estipularam-se quatro pontos de coletas (Figura 39: Pontos de coletas de concreto) a partir dos quais seriam retiradas amostras para a realização de análise granulométrica.

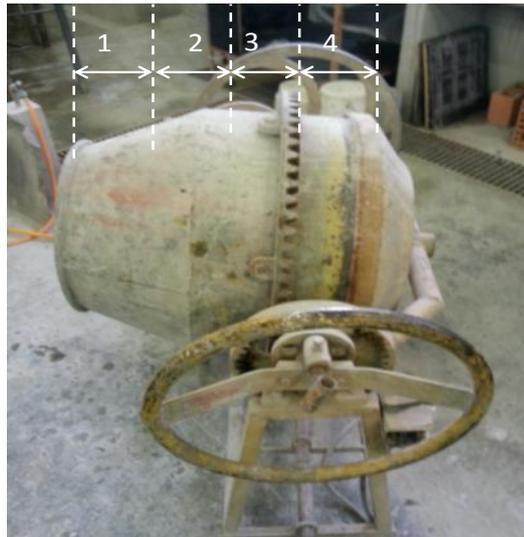


Figura 39: Pontos de coletas de concreto

### 3.5.2 Apresentação e análise dos resultados

Em termos granulométricos, todos os casos avaliados sofreram alterações, logo o AGRC sofre alteração granulométrica durante a mistura dos concretos, conforme mostram as Figura 40, Figura 41 e Figura 43.

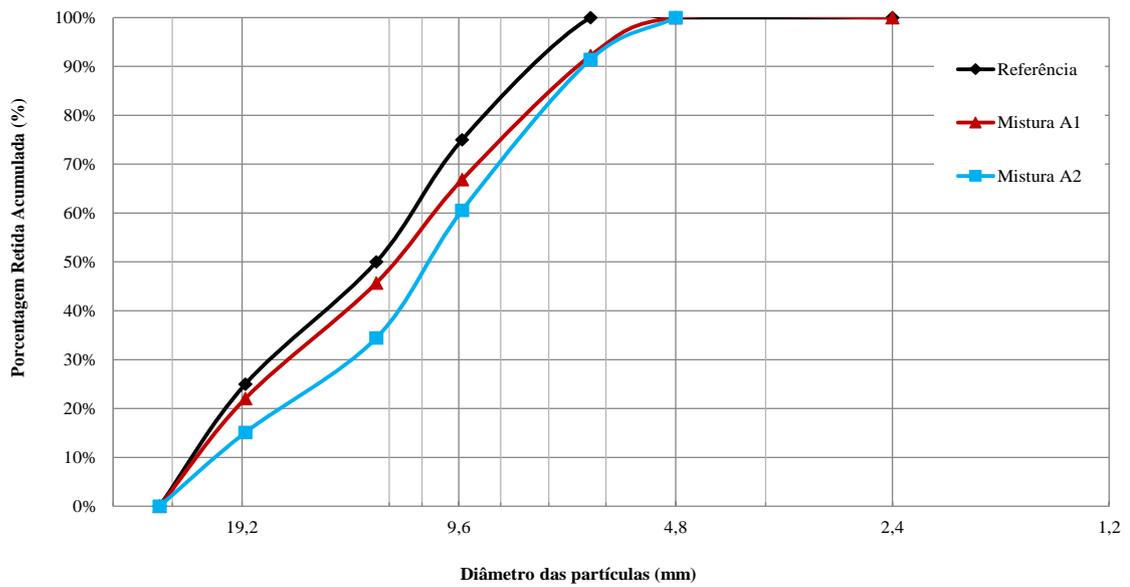


Figura 40: Curva granulométrica obtida com os AGRC dos concretos confeccionados em betoneira de eixo vertical pela ordem de mistura A.

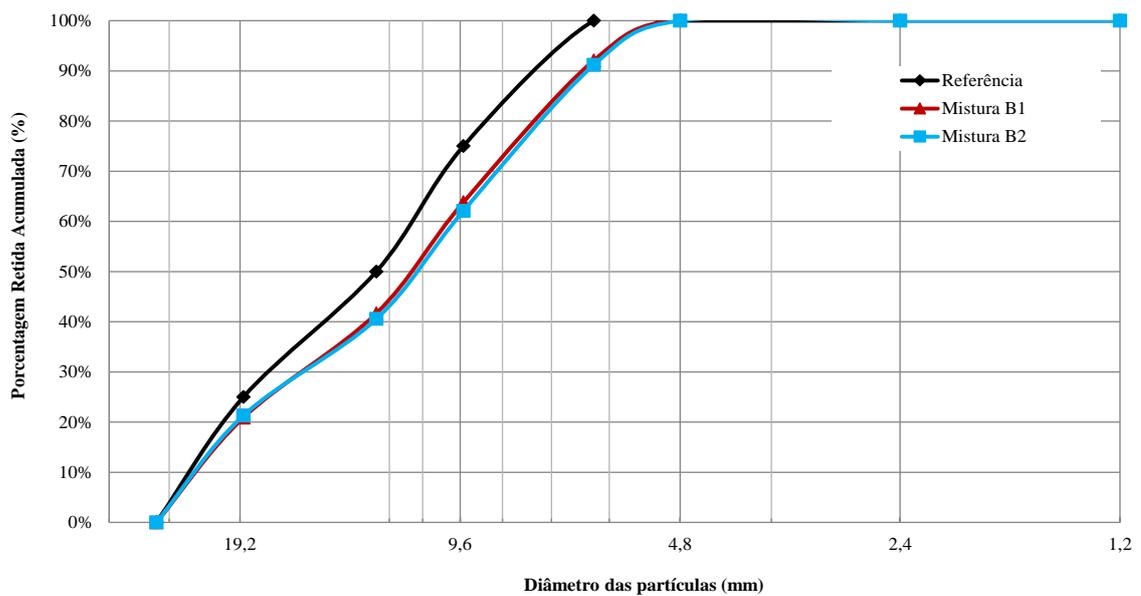


Figura 41: Curva granulométrica obtida com os AGRC dos concretos confeccionados em betoneira de eixo vertical pela ordem de mistura B.

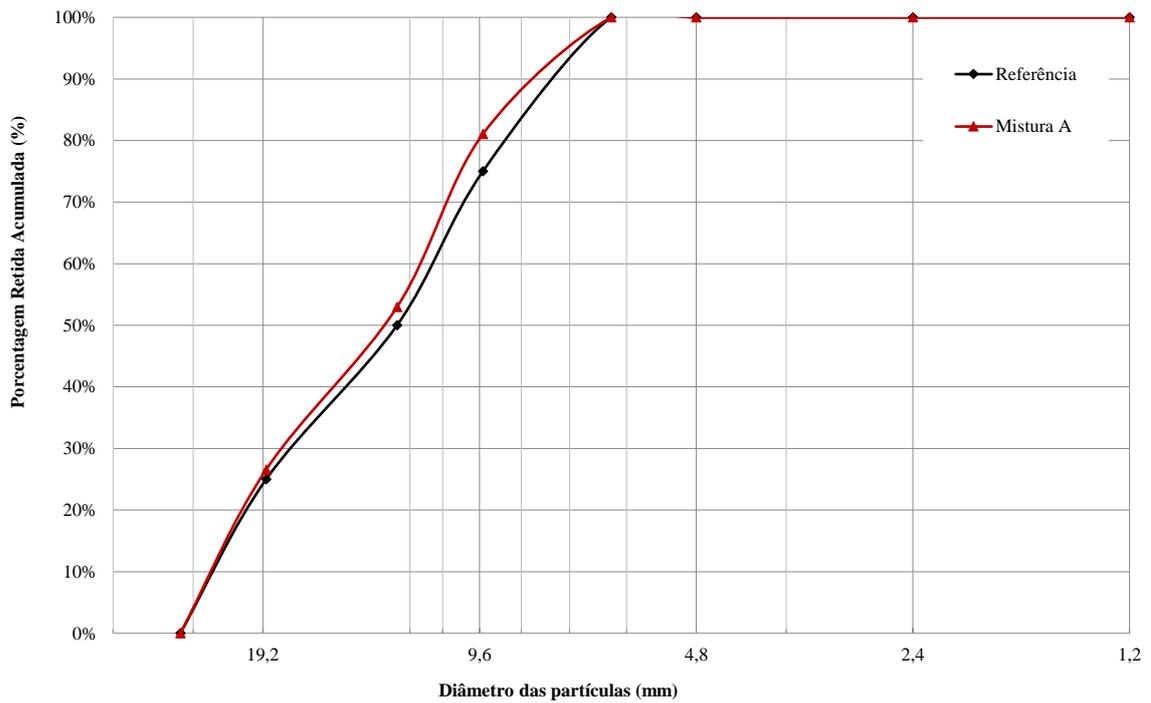


Figura 42: Curva granulométrica obtida com os AGRC dos concretos confeccionados em betoneira de eixo inclinado pela ordem de mistura B

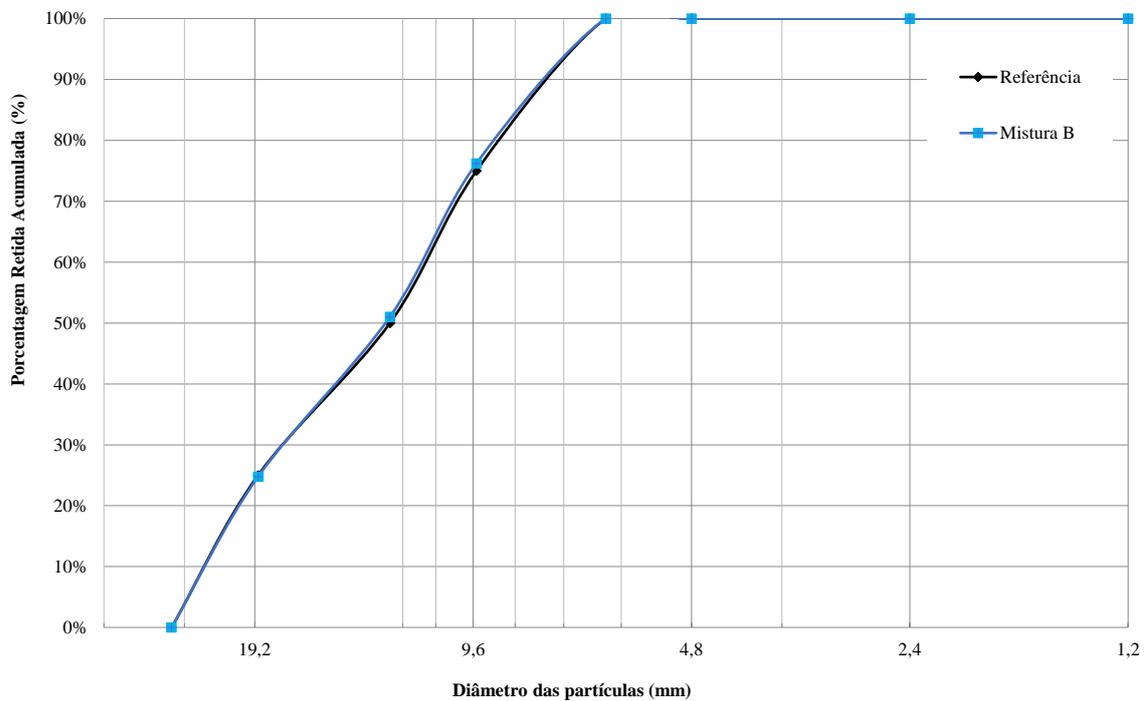


Figura 43: Curva granulométrica obtida com os AGRC dos concretos confeccionados em betoneira de eixo inclinado pela ordem de mistura B

Nota-se que em todas as situações a curva granulométrica sofre alterações, confirmando a hipótese de quebra dos grãos de AGRC durante a mistura. Porém, o comportamento das

curvas obtidas através da lavagem do material produzido em betoneira de eixo inclinado foi distinto da betoneira de eixo vertical, demonstrando um comportamento inverso ao esperado. Para investigar melhor tal situação, decidiu-se que na repetição, a lavagem seria feita em todas as peneiras da série normal (Figura 44), pois o que se tinha era o comportamento detalhado das frações graúdas, mas não se sabia qual a característica do fino geral. Os resultados comprovaram que durante processo de mistura dos concretos com o AGRC tem-se a quebra dos grãos.

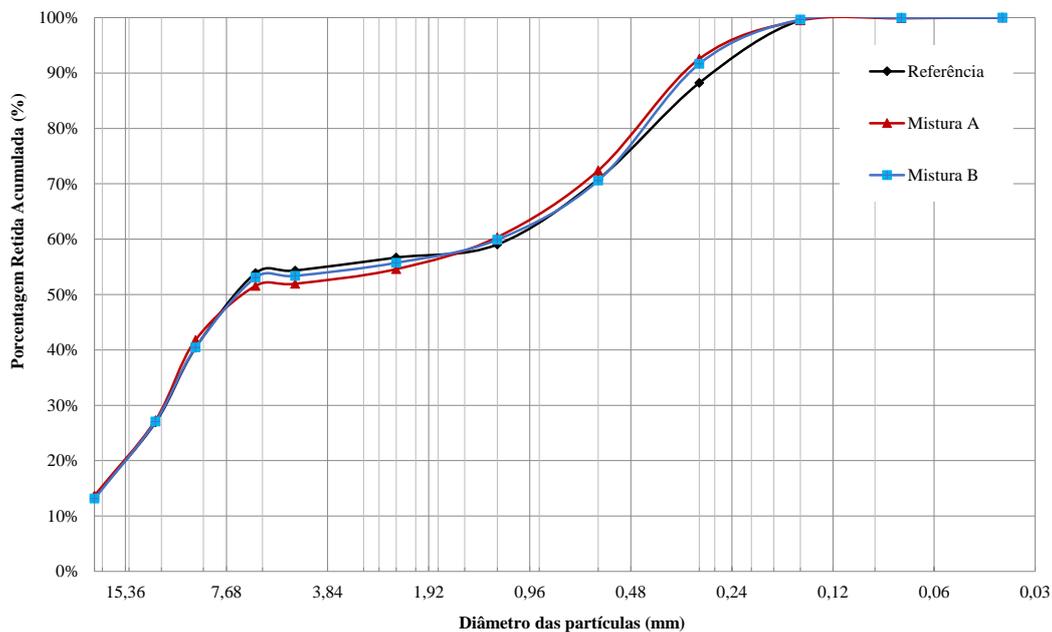


Figura 44: Curva granulométrica obtida com os AGRC dos concretos confeccionados em betoneira de eixo inclinado pela ordem de mistura B

Com os resultados de módulo de finura, decidiu-se realizar um tratamento estatístico a fim verificar, por meio de análise de variância as alterações granulométricas após a produção do concreto. Os resultados alcançados estão disposto na Tabela 24.

Tabela 24: Resultados da Análise de Variância (ANOVA) entre a posição do agregado na pilha e a resistência à compressão

Análise de Variância						
	SQ	GDL	MQ	Fcal	p	Significância
Tipo de Betoneira	1,5696	1	1,5696	2297,0	0,00000	s
Mistura	0,2362	2	0,1181	172,8	0,00005	s
Tipo de betoneira*Mistura	0,2956	2	0,1478	216,3	0,00003	s
Erro	0,0041	6	0,0007			

Os resultados apresentados na Figura 45 e demonstram que o tipo de misturador tem influência significativa na granulometria dos agregados. O AGRC misturado em betoneiras de eixo vertical apresenta mais fino que o misturado em betoneiras de eixo inclinado. Logo no primeiro equipamento o atrito entre os grãos é maior, promovendo um maior desgaste nos grãos e alterando sua granulometria.

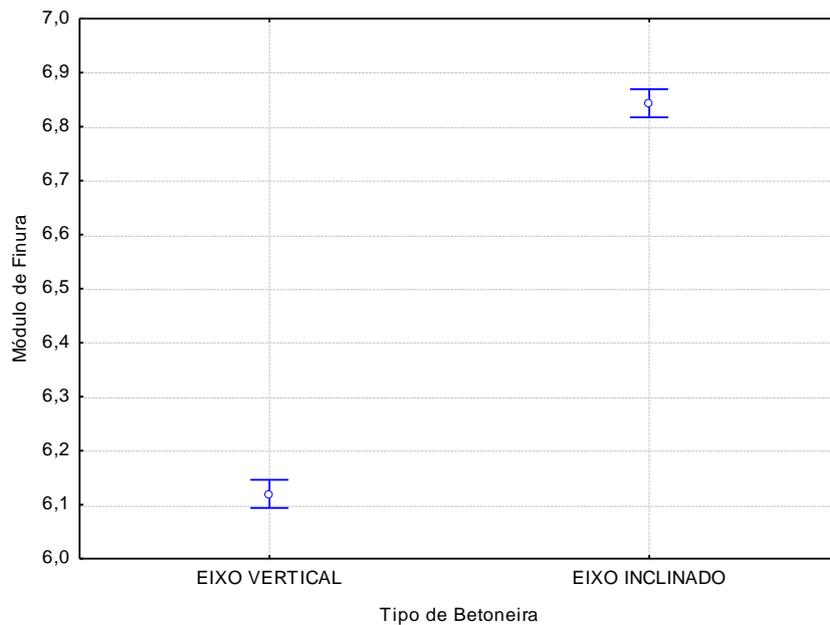


Figura 45: Análise de variância entre o tipo de misturador e o módulo de finura.

Com relação a mistura, a Figura 46 é mais um indicativo de que a quebra dos grãos acontece, e que a inversão da ordem de colocação dos materiais na betoneira não minimiza esse efeito.

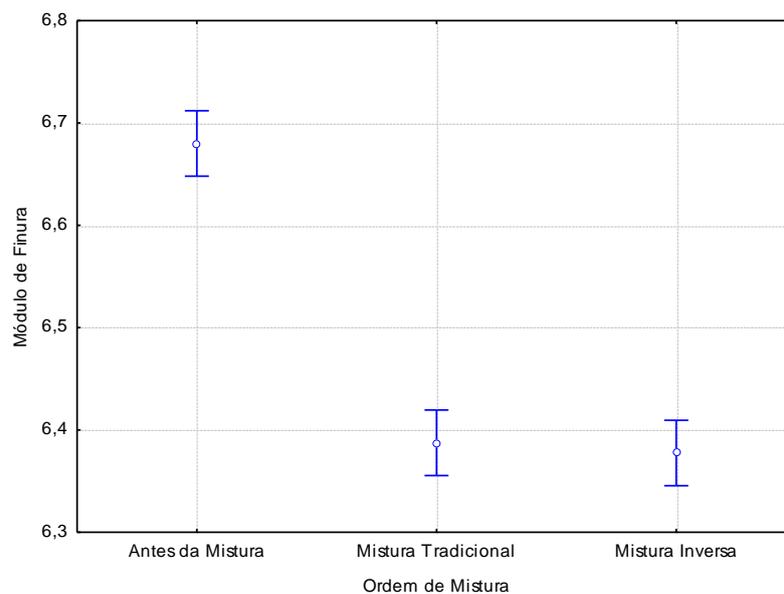


Figura 46: Análise de variância entre a ordem de mistura dos materiais e o seu módulo de finura.

Para avaliar a eficiência das diferentes ordens de misturas realizou-se uma análise múltipla de médias, expressa na Tabela 25.

Tabela 25: Análise múltipla de médias para as diferentes condições de estocagem.

ANÁLISE MÚLTIPLA DE MÉDIAS			
	Antes da Mistura	Ordem Tradicional	Ordem Inversa
Antes da Mistura	-	VS	VS
Ordem Tradicional	VS	-	VNS
Ordem Inversa	VS	VNS	-

VS: variância significativa; VNS: variância não significativa

Os resultados demonstram que para as betoneiras analisadas, a ordem de mistura adotada não apresenta diferença significativa. Tanto pela ordem tradicional, quanto pela ordem inversa tem-se a desagregação dos grãos de AGRC, e estas são estatisticamente iguais nas duas situações.

Pelos resultados pode-se dizer que a alteração granulométrica do AGRC, durante a mistura de concretos, é uma característica inerente do AGRC. Diante desse fato é necessário averiguar se tais alterações influenciam de maneira significativa na resistência à compressão dos novos concretos. Com os resultados de resistência à compressão aos 28 dias, fez-se uma análise de variância, cujos resultados estão dispostos na Tabela 26.

Tabela 26: Resultados da Análise de Variância (ANOVA) entre a posição do agregado na pilha e a resistência à compressão

Análise de Variância						
	SQ	GDL	MQ	Fcal	p	Significância
Tipo de Betoneira	241,67	1	241,67	64,59	0,00000	s
Ordem de Mistura	4,66	1	4,66	1,25	0,271585	ns
Tipo de betoneira*Ordem de Mistura	0,86	1	0,86	0,23	0,633693	ns
Erro	134,71	36	3,74			

Com relação a influência da ordem de mistura na resistência à compressão percebe-se que esta variável não apresenta influência significativa. Este resultado era esperado uma vez que a mesma influenciou na alteração granulométrica. Porém o tipo de betoneira apresentou influência significativa sobre a resistência à compressão. A Figura 47 mostra que a betoneira de eixo vertical alcançou níveis de resistências superiores a de eixo inclinado, e em termos granulométricas este misturador foi o que gerou mais fino. Diante desses fatos acredita-se que os finos gerados durante a mistura promoveram um melhor empacotamento dos grãos, densificando o esqueleto granular do concreto e conferindo uma melhora no desempenho.

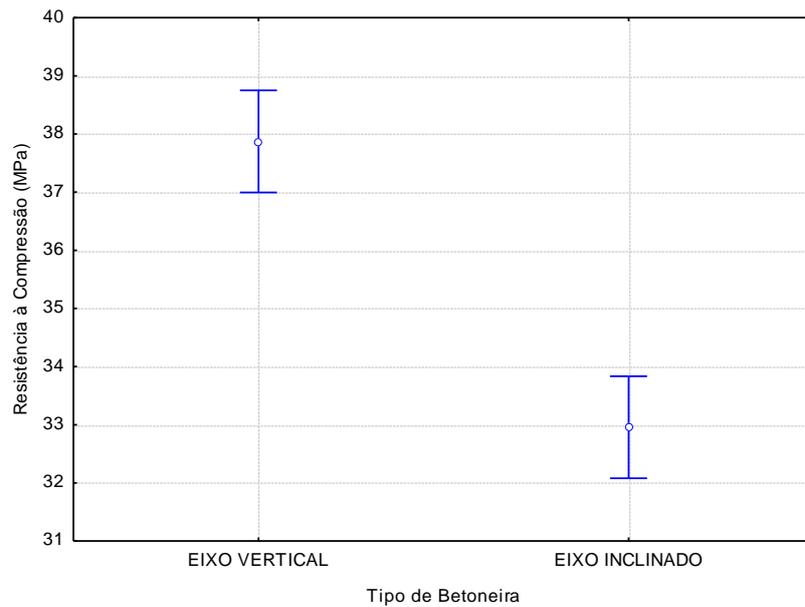


Figura 47: Análise de variância entre o tipo de betoneira e a resistência à compressão aos 28 dias.

Com relação a alteração granulométrica ao longo da betoneira de eixo inclinado, nota-se que para as duas condições de misturas analisadas, tem-se variação granulométrica ao longo da betoneira conforme mostram as Figura 48 e Figura 49. E possivelmente por conta dessa variação que os resultados de resistência à compressão apresentaram um elevado coeficiente de variação.

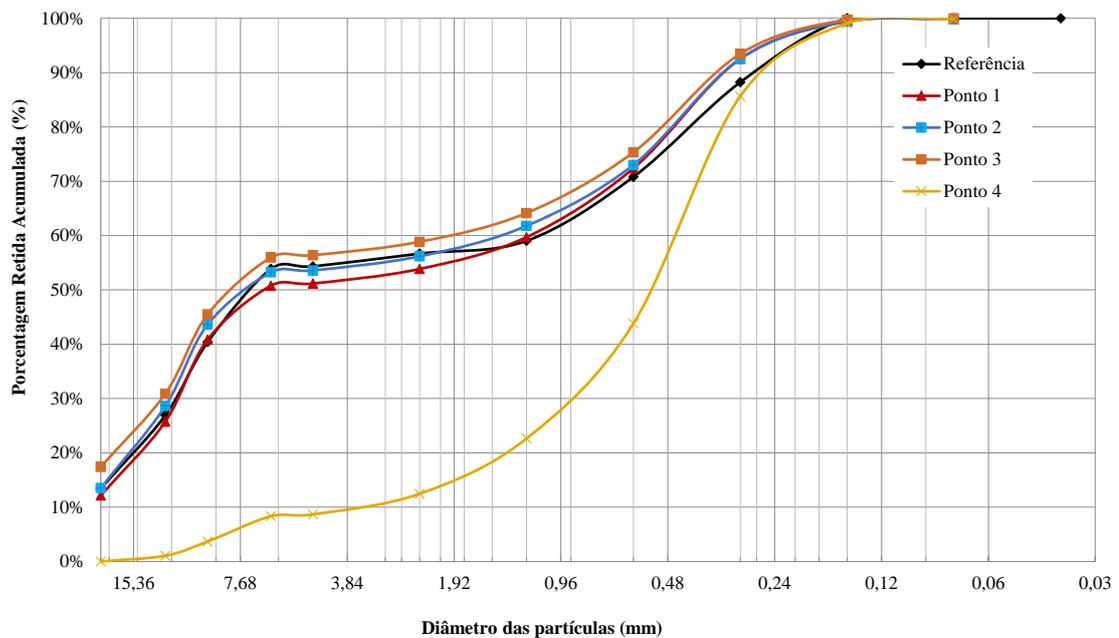


Figura 48: Curvas granulométricas obtidas pela ordem de mistura A, em betoneiras de eixo inclinado.

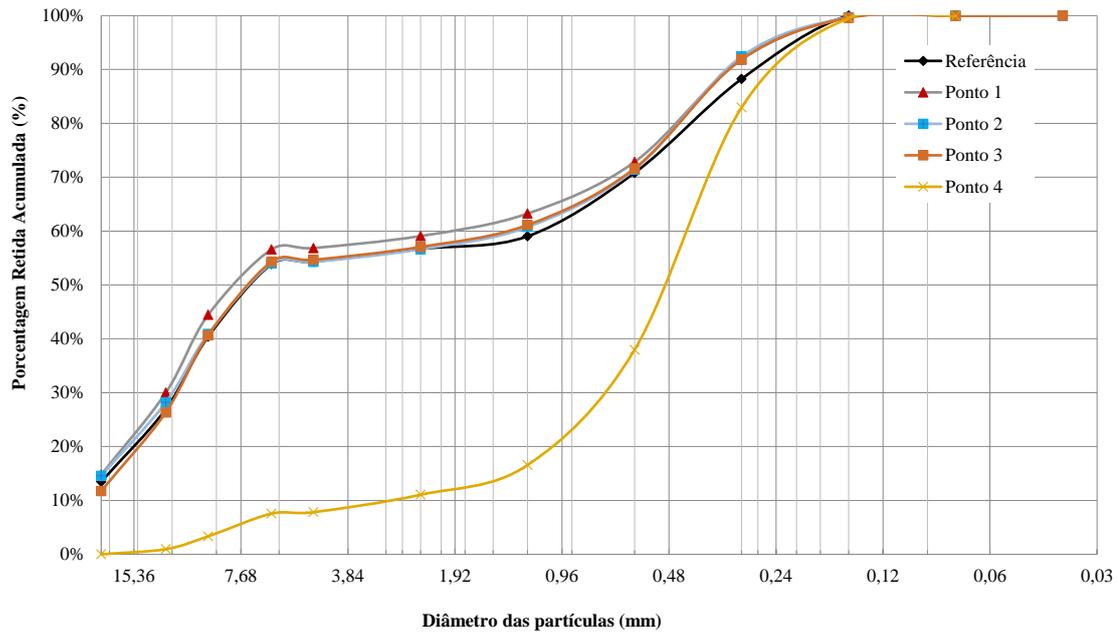


Figura 49: Curvas granulométricas obtidas pela ordem de mistura A, em betoneiras de eixo inclinado.

### 3.5.3 Conclusões

Conclui-se neste estudo que durante a mistura de concretos com AGRC em betoneiras de eixo vertical e eixo inclinado tem-se a quebra dos grãos nos pontos de menor resistência do AGRC, que possivelmente é a argamassa aderida em sua superfície. E esta desagregação durante a mistura influencia de maneira significativa o módulo de finura.

Notou-se também que a alteração da ordem de colocação dos materiais não afeta de maneira significativa na finura dos grãos, tampouco na resistência à compressão. Contudo, o tipo de betoneira utilizado confere aos materiais curvas distintas. A betoneira de eixo vertical gera mais finos que a de eixo inclinado, e o efeito dessa diferença no concreto foi um incremento de resistência. Supõe-se que os finos gerados durante a mistura, preencheram os vazios existentes e densificaram o esqueleto granular, o que justificaria o seu melhor desempenho.

Com relação a variabilidade dos AGRC ao longo da betoneira do eixo inclinado foi possível observar pelas curvas granulométricas uma variação nos resultados. O material situado no fundo da betoneira apresenta mais fino que os demais, e o material situado nos pontos centrais mostraram-se mais uniformes. Os coeficientes de variação dos concretos misturados em betoneira de eixo inclinado ficaram entre 6 a 10% mesmo na repetição. Esse elevado índice de variabilidade pode ser justificado pela variação granulométrica que ocorre ao longo da

betoneira. Já que na betoneira de eixo vertical, onde as misturas foram reproduzidas sobre os mesmos parâmetros essa variação não ultrapassou aos 3%.

Por todas as considerações apresentadas nessa pesquisa, conclui-se que para esse tipo de material, e para essas condições de mistura a betoneira de eixo vertical é a mais indicada, pois apesar de gerar mais finos, promove um incremento de resistência.

### 3.6 FASE 5: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE RETIRADA DO EXCESSO DE ÁGUA POR ESCORRIMENTO DO AGRC NO DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETOS.

Nesta fase serão avaliados os fatores relacionados à condição de saturação dos grãos. O resumo desse estudo está disposto na Figura 50, juntamente com as questões de pesquisa analisadas.

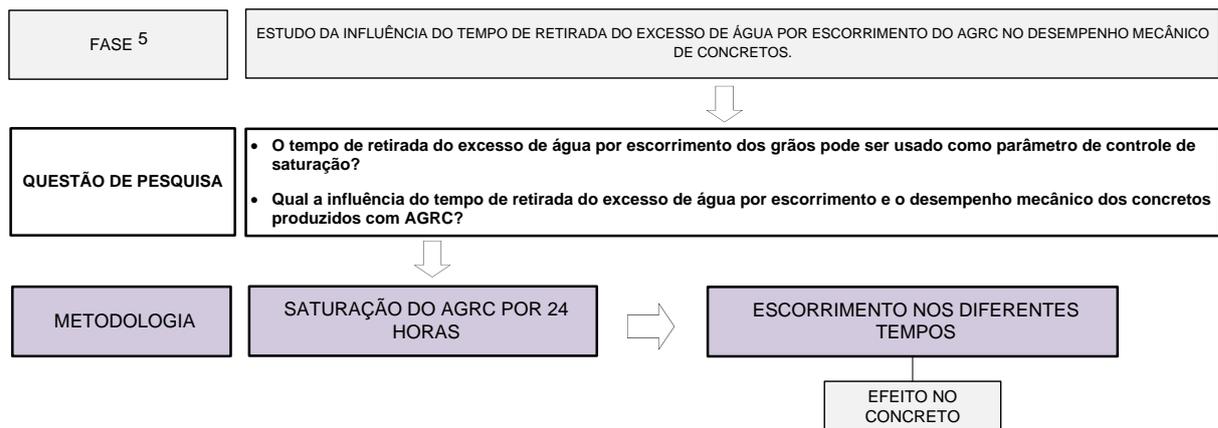


Figura 50: Representação esquemática dos ensaios realizados na fase 5.

#### 3.6.1 Materiais e Métodos

Os materiais utilizados são os mesmos descritos nas fases anteriores. O traço adotado na produção do concreto foi obtido pela curva de dosagem do concreto produzido com AGRC<sub>30</sub> e está disposto na Tabela 27.

Tabela 27: Consumo dos materiais

α	a/c	Traço Unitário (massa)			Quantidade de materiais (kg)				Consumo m <sup>3</sup>	
		c	a	p	c	a	p	Água	Cc	Ca
56%	0,60	4,71	2,2	2,51	7,96	17,49	20	4,8	370,91	222,55

Um diferencial na produção desse concreto diz respeito à ordem de mistura. Pelos resultados obtidos nas fases anteriores, optou-se em realizar misturas de concreto seguindo a ordem B, na qual se prepara a argamassa e por fim adiciona-se o agregado graúdo reciclado de concreto.

Pelo ensaio de absorção, realizado na fase 3, percebeu-se que os AGRC utilizados nessa pesquisa, em 10 minutos de ensaio, alcançam cerca de 90% da água que absorveriam em 24 horas. Diante dessa constatação, os AGRC ficaram submersos por um período de 24 horas, para sua saturação. Em seguida realizou-se um processo de secagem ao ar livre por períodos pré-determinados, conforme mostra a Figura 51.

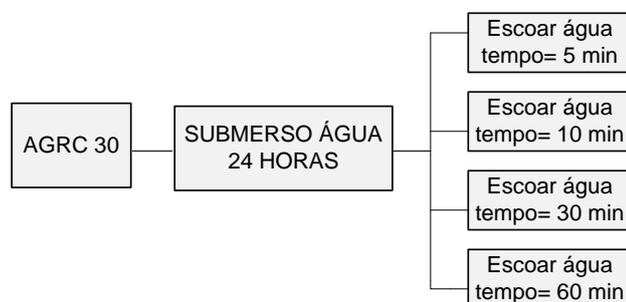


Figura 51: Representação esquemática dos tempos de escoamento

Neste item considera-se como água total a soma da água de mistura com a água presente no AGRC. Para determinar a quantidade de água presente no AGRC, secava-se o material em estufa por 24 horas. Em seguida pesava-se a massa de AGRC utilizada na mistura (Figura 51a). Em seguida, esta massa era submersa em água por pelo menos 24 horas (Figura 52b). Antes de cada mistura, o AGRC era submetido a um processo de retirada de excesso de água por escoamento (Figura 52c). Os tempos de escoamento analisados foram 5, 10, 30 e 60 minutos. Passado este tempo o material foi pesado (M2). A diferença entre a massa úmida (M2) e a massa seca (M1) correspondia a água presente no AGRC (Água<sub>AGRC</sub>).

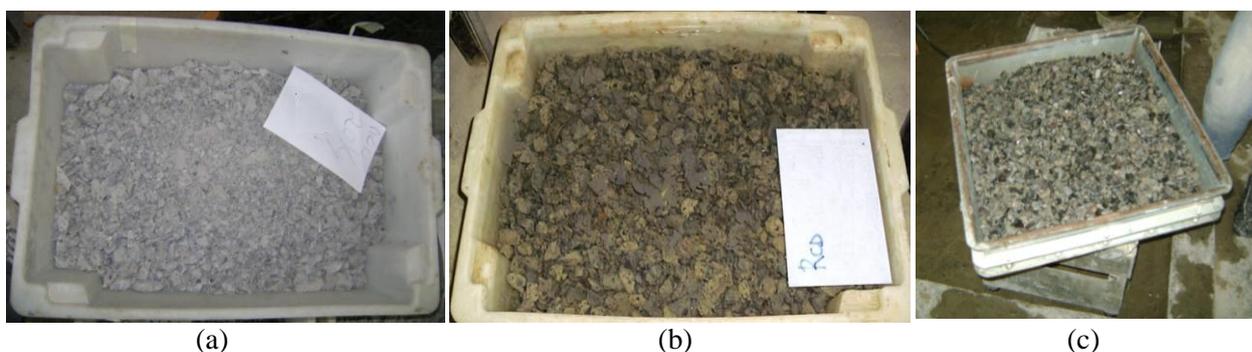


Figura 52: Representação do processo de escoamento: (a) massa conhecida de material seco; (b) massa submersa e (c) processo de retirada do excesso de água.

Com relação a água total, estabeleceu-se que este parâmetro seria mantido fixo. Sendo assim a água presente no AGRC foi descontado da água total, o produto dessa operação equivale a quantidade de água utilizada na mistura. Na Tabela 28 estão os valores da água incorporados na mistura, os valores da água presentes no AGRC e os valores de abatimento medidos um minuto após a mistura.

Tabela 28: Valores de água adotados

Tempo de escoamento (min)	Taxa de saturação (%)	Água AGRC	Água MISTURA	Água TOTAL	ABATIMENTO (cm)
5	100	2,18	2,62	4,80	11,5
10	77	1,68	3,12		11,0
30	70	1,52	3,28		10,7
60	60	1,30	3,50		8,0

No primeiro traço, deixou-se o agregado submerso por um período de 24 horas para sua saturação. Passado este tempo, retirou-se o material da água, colocou-se numa peneira, para secagem ao ar livre, por um período de 5 minutos, em seguida pesou-se o material para calcular a quantidade de água presente no AGRC e a água necessária para mistura. Nos demais concretos, repetiu-se o processo acima descrito, variando apenas o tempo de escoamento. Os tempos de escoamentos adotados foram 5, 10, 30 e 60 minutos. Para cada traço foram moldados dez corpos de prova, sendo a cura feita em câmara úmida. Após 28 dias de cura, determinou-se a resistência à compressão.

### 3.6.2 Análise e Discussão dos Resultados

Pelos resultados dispostos na Tabela 28 observa-se que quanto maior o teor de água presente no AGRC, menor a quantidade de água utilizada na mistura. O efeito desse comportamento no ensaio de abatimento encontra-se dispostos na Figura 53. Nota-se que os resultados alcançados estão dentro de limite de variação, utilizado na pesquisa, de  $100 \pm 20$  mm. Pandova (2013) observou este mesmo comportamento, e também concluiu que o aumento do teor de água no AGRC durante a pré-molhagem resulta numa redução de água de mistura. E que se os valores de relação água/cimento for mantido fixo, é possível atingir o mesmo abatimento.

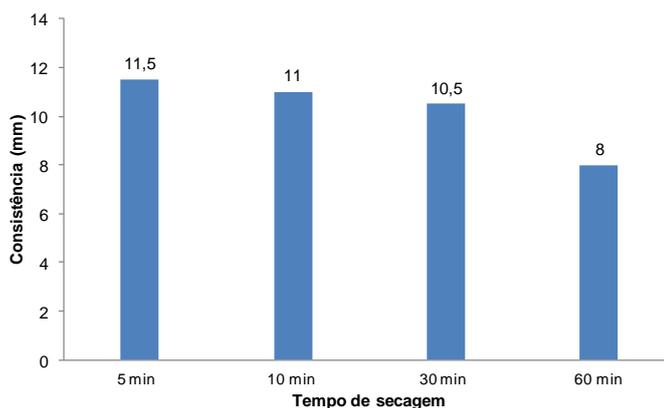


Figura 53: Influência do tempo de secagem na consistência do concreto com AGRC.

Com relação a resistência à compressão tem-se a Figura 54. Os resultados mostram que o tempo de escorrimento tem influência significativa na resistência do concreto. No tempo de 10 minutos a resistência obtida foi maior que as demais que estatisticamente são iguais. Esse resultado leva a crer que para determinados agregados haja um teor ótimo de água a ser adicionada para sua compensação.

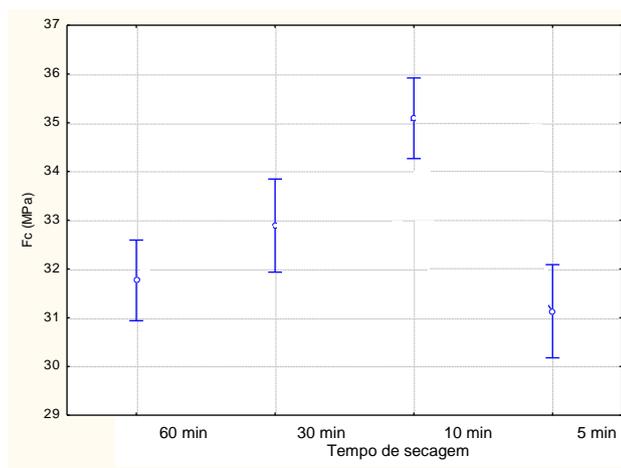


Figura 54: Análise de variância do concreto produzido com AGRC em função do tempo de secagem

### 3.6.3 Conclusões

Conclui-se nessa fase que em termos de desempenho mecânico o tempo de retirada do excesso de água por escorrimento tem influência significativa sobre a resistência à compressão. Situações onde a retirada de água promoveu um teor de saturação dos agregados é baixo, fez-se necessário aumentar a quantidade de água de mistura e vice-versa. Sendo assim, para utilizar este fator como parâmetro faz-se necessário um rígido controle entre todas etapas do processo a fim de compensar adequadamente a água de mistura, e manter a relação água/cimento fixo.

### 3.7 FASE 6: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE SATURAÇÃO DO AGRC NO DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETOS.

No segundo estudo avaliou-se a influência da taxa de saturação do agregado no desempenho do concreto. A Figura 55 mostra resumidamente o que foi avaliado nessa fase da pesquisa.

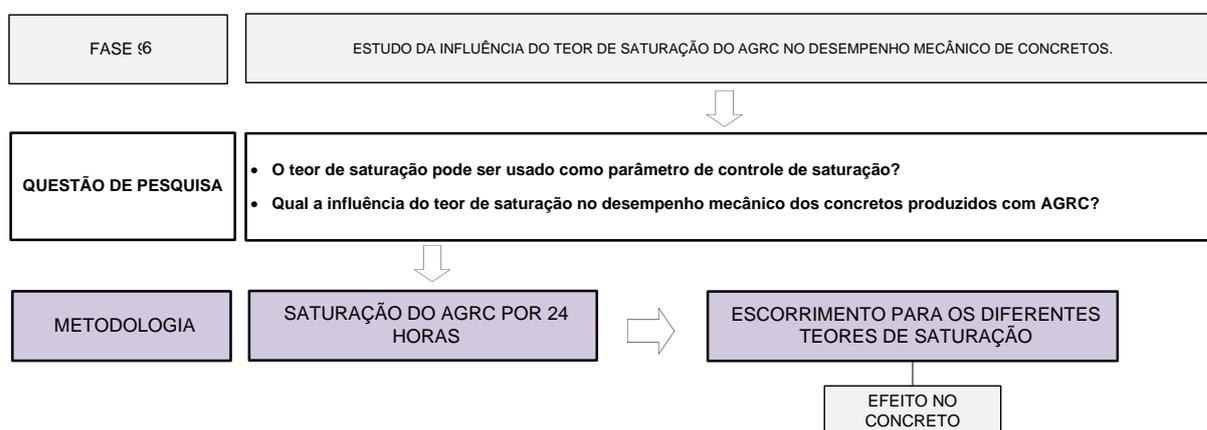


Figura 55: Esquema dos ensaios realizados na fase 6.

#### 3.7.1 Materiais e Métodos

Na fase 8 percebeu-se que o tempo de retirada do excesso de água por escorrimento influencia no desempenho do concreto. Entretanto, para que essa variável seja usada como parâmetro de controle, são necessários controles rígidos de temperatura e umidade. Dessa forma, decidiu-se avaliar a variável influência da saturação do AGRC sob a ótica de teor de saturação. Admitiu-se que os agregados submersos por um tempo de 24 horas teriam um teor de saturação igual a 100%. E que os demais teores seriam medidos a partir dessa referência. Para essa fase da pesquisa estipulou-se que os teores avaliados seriam 100%, 80%, 60%, 40% e 20%.

O processo para saturação do material consistia em pesar a massa de material seco, em seguida colocá-lo submerso em água por 24 horas. Passado este tempo retirava-se o agregado da água, deixava escorrendo por 5 minutos para retirar o excesso de água, e pesava-se o material. Esta massa correspondia ao agregado 100% saturado.

Para cada lote de agregado de concreto foi determinada a massa referente à condição 100% saturado. Uma vez determinada essa saturação, submeteu-se o agregado a um processo de

secagem ao ar livre, até alcançar o teor de saturação desejado. O controle dessa saturação foi feito por pesagens periódicas.

Uma vez alcançada à saturação desejada, partiu-se para a fase de produção dos concretos, seguido por moldagem e cura dos corpos de provas. Após 28 dias realizavam-se os ensaios para a determinação da resistência à compressão. O traço adotado para a produção desses concretos está disposto na Tabela 29

Tabela 29: Consumo dos materiais

$\alpha$	$a/c$	Traço Unitário (massa)			Quantidade de materiais (kg)				Consumo $m^3$	
		c	a	p	c	a	p	Água	Cc	Ca
56%	0,60	4,71	2,2	2,51	7,96	17,49	20	4,8	370,91	222,55

Neste concreto adotou-se a nova ordem de mistura que consistia em areia e cimento, parte da água de mistura, AGRC e o restante da água. Uma vez incorporado o AGRC contava-se um minuto e em seguida media-se a consistência. Por fim moldavam-se os corpos de prova, que seriam rompidos após 28 dias de cura.

### 3.7.2 Análise e Discussão dos Resultados

A Figura 56, Figura 57 e Figura 58 demonstram os comportamentos do concreto no estado fresco e endurecido, quando a taxa de saturação foi alterada.

Com relação ao abatimento, nota-se uma diferença entre os resultados alcançados pelas diferentes misturas. O comportamento observado é que quanto mais seco o AGRC, maior o abatimento. Supõe-se que o AGRC menos saturado possua mais água livre em sua superfície que demora a ser absorvida pelo AGRC, aumentando assim os valores de consistência do concreto.

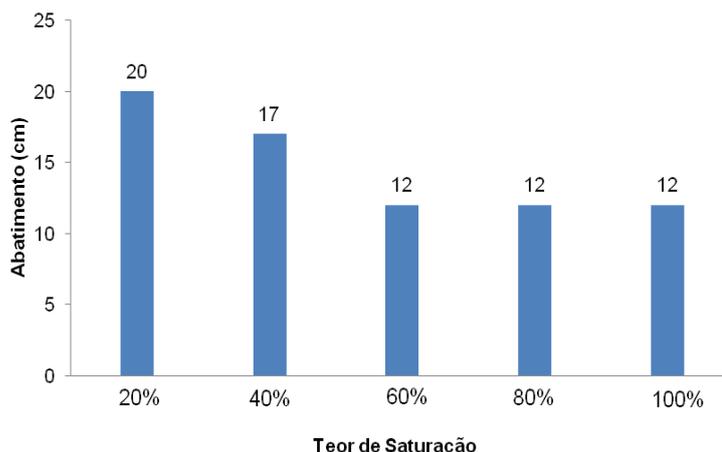


Figura 56: Influência do teor de saturação na consistência do concreto com AGRC.

Percebe-se pelos resultados apresentados na Figura 57 que para o traço estipulado, todos os concretos alcançaram resistência superior a 30 MPa, a um bom nível de variação conforme mostra a Tabela 30.

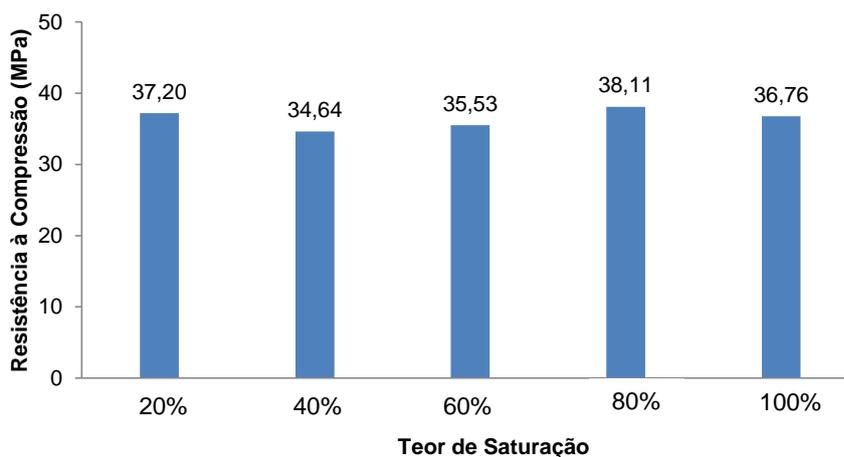


Figura 57: Influência do teor de saturação resistência à compressão do concreto com AGRC.

Tabela 30: Tratamento dos resultados de resistência à compressão

Resultados de Resistência à Compressão					
Resultados	100%	80%	60%	40%	20%
Média	36,76	38,11	35,53	34,64	37,20
Desvio Padrão	1,07	1,24	1,17	1,50	1,52
Coeficiente de Variação	3%	3%	3%	4%	4%

A partir desses resultados realizou-se uma análise de variância a fim de identificar qual a influência da taxa de saturação na resistência à compressão dos concretos aos 28 dias. Os resultados desta análise estão dispostos na Tabela 31 e Figura 58.

Tabela 31: Tratamento dos resultados de resistência à compressão

Análise de Variância						
	SQ	GDL	MQ	F <sub>(calc)</sub>	p	SIGNIFICÂNCIA
Teor de Saturação	67,67	4,00	16,92	9,86	0,00001	s
Erro	68,63	40,00	1,72			

SQ: Soma Quadrada, GDL: Grau de Liberdade, MQ: Média Quadrada, F(cal): valor calculado de F, p: nível de significância, s: significativo e ns: não significativo

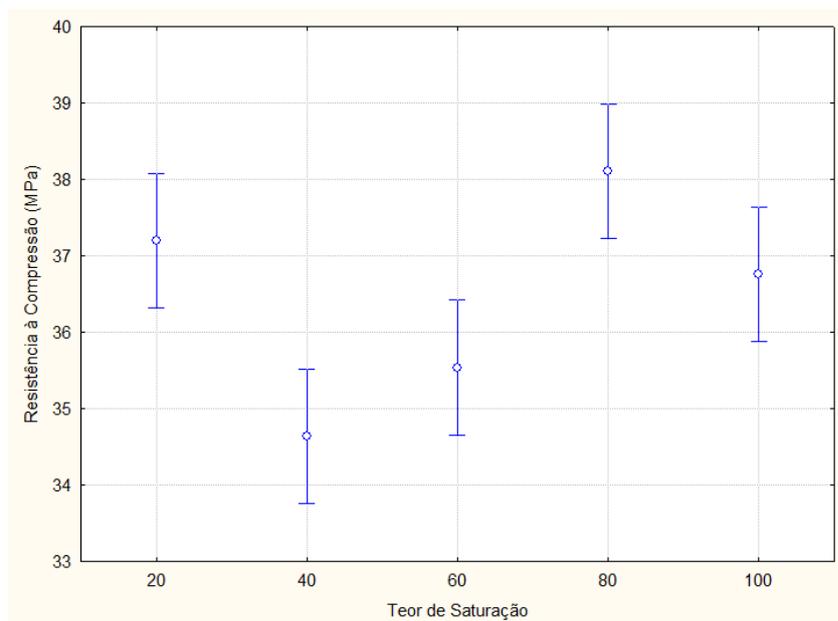


Figura 58: Análise de variância do concreto produzido com AGRC em função do teor de saturação.

Percebe-se que pelos resultados que a taxa de saturação tem influência significativa sobre a resistência do concreto produzido com os AGRC. Para mistura onde o AGRC estava 80% a resistência à compressão apresentou os melhores resultados. Comparando os comportamentos apresentados pela ANOVA do tempo de escoamento e do teor de saturação é possível afirmar que existe um teor ótimo de saturação do AGRC que promove um incremento de resistências.

Na mistura onde a taxa de saturação do AGRC era de 20% o incremento de resistência não era esperado, sendo assim decidiu-se repetir as misturas com o AGRC 40% saturado e com o AGRC 20%. Os resultados desta repetição estão dispostos na Tabela 32 e Figura 59 respectivamente, e demonstram existe uma diferença significativa entre essas duas misturas. A que utiliza o AGRC 20% saturado apresenta um incremento de resistência. Porém, os estudos realizados não são suficientes para avaliar o que rege esse comportamento.

Tabela 32: Resultados da Análise de Variância (ANOVA) entre a posição do agregado na pilha e a resistência à compressão

Análise de Variância						
	SQ	GDL	MQ	Fcal	p	Significância
Teor de Saturação	27,16	1	27,16	6,774	0,019	s
Erro	64,15	16	4,01			

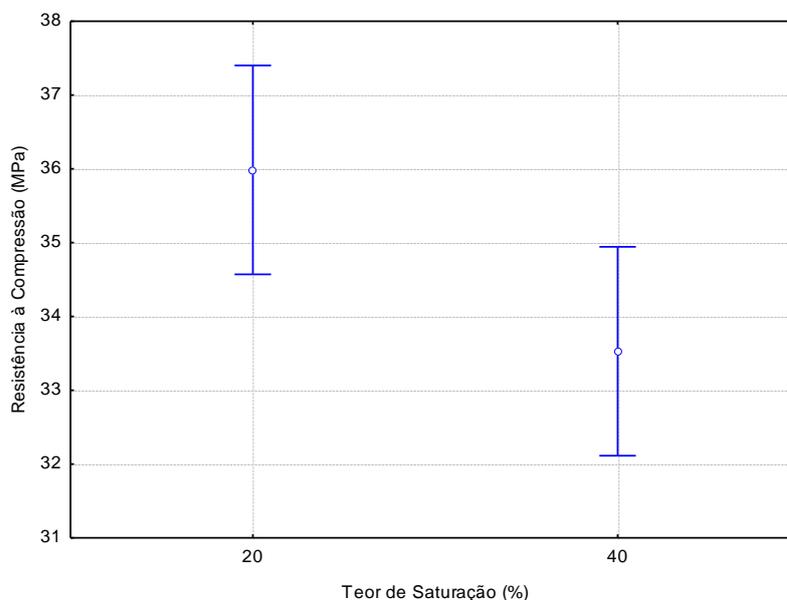


Figura 59: Análise de variância do concreto produzido com AGRC em função do teor de saturação.

### 3.7.3 Conclusões

Conclui-se com esses resultados que o teor de saturação influencia de maneira significativa no desempenho mecânico dos concretos com eles produzidos. O teor de 80% de saturação foi o que apresentou o maior incremento de resistência. Já o teor de 20% também apresenta um incremento de resistência, porém são necessários mais estudos para avaliar o tal fenômeno. Com relação ao abatimento, pode-se observar que quanto mais seco o AGRC maior o abatimento, vale ressaltar que essas leituras foram realizadas um minuto após o término da mistura, acredita-se que para essas situações tenha-se mais água livre na superfície que demora a ser absorvida pelo AGRC, aumentando assim os valores de consistência do concreto.

Na Figura 60 está o resumo dos resultados alcançados nas distintas fases.

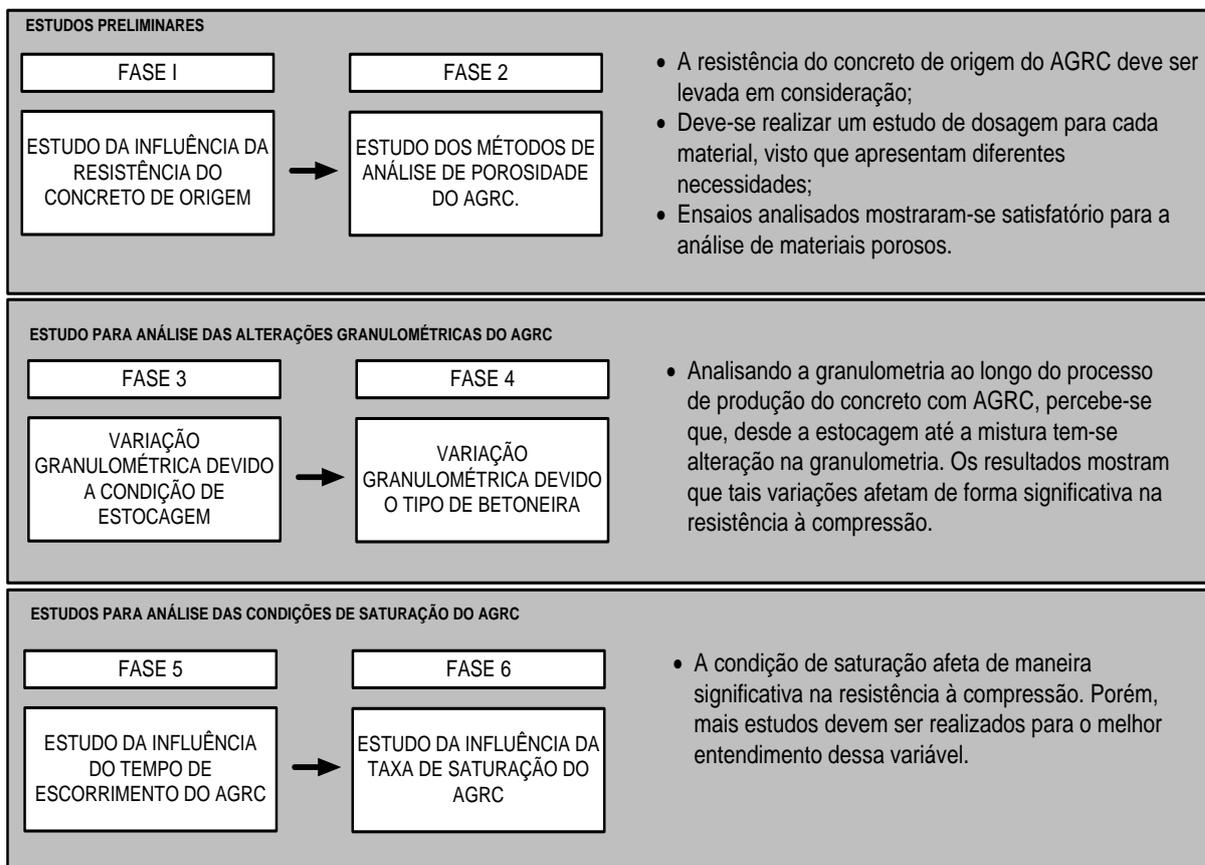


Figura 60: Resumo dos resultados alcançados.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal da presente tese de doutorado foi analisar os principais parâmetros que regem a variabilidade dos concretos produzidos com AGRC, visando à transferência tecnológica. Para tanto, foi necessário elaborar um grande experimento com fases distintas. Tais estudos permitiram ampliar o entendimento do tema agregado graúdo reciclado de concreto, bem como possibilitaram que os objetivos do estudo pudessem ser atendidos satisfatoriamente.

A partir dos experimentos realizados e dos resultados pertinentes apresentados pela literatura, diversas conclusões foram compreendidas no que diz respeito aos parâmetros que regem a variabilidade dos concretos produzidos com AGRC. Entretanto, como é comum nos trabalhos científicos, este estudo não exaure todas as lacunas do conhecimento relacionadas ao tema do trabalho.

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir das análises realizadas, bem como enumera sugestões para pesquisas futuras que visem expandir o entendimento sobre o assunto.

### 4.1 CONCLUSÕES POR FASES DE EXPERIMENTOS

#### 4.1.1 *Análise do efeito da resistência do concreto de origem nas características dos AGRC e nas propriedades dos concretos produzidos com os mesmos.*

Com relação ao efeito do concreto de origem nas características dos agregados resultantes pode-se concluir que:

- O agregado gerado por um concreto de menor resistência (15 MPa) gera mais finos que um agregado gerado por um concreto de maior resistência (30 MPa). Essa maior geração de finos não afeta na massa específica, mas afeta nos resultados de taxa de absorção e a composição granulométrica.

A respeito do efeito do concreto de origem nas propriedades dos concretos com eles produzidos pode-se dizer que:

- Para produzir concretos em faixas de resistências pré-determinadas, fixando a consistência e a relação água/cimento, e variando somente o tipo de agregado, tem-se que aumentar o consumo de cimento, se não for utilizado aditivo. Esse aumento se faz necessário para evitar o travamento dos grãos lamelares e com maior taxa de absorção.
- A respeito do módulo de elasticidade, os resultados mostraram-se coerente com a bibliografia, de que quanto maior a resistência do concreto de origem, maior a diferença entre o módulo de elasticidade do concreto convencional e do concreto com AGRC.
- Diante dos concretos de origem analisados, o de 30 MPa, mostrou-se mais adequado para a produção de AGRC. Do ponto de vista de desempenho mecânico, o concreto produzido com AGRC<sub>30</sub> apresentou um menor coeficiente variação, um menor consumo de cimento e um maior módulo de elasticidade. Por conta desses resultados, as conclusões que seguem dizem respeito a situações onde se utilizou o AGRC<sub>30</sub>.

#### 4.1.2 *Análise da variação da forma original do AGRC.*

No que diz respeito a alteração da forma do AGRC, pode-se concluir que é possível alterar a forma original do AGRC através do beneficiamento em moinho de bolas. Porém, não se sabe se essa alteração influencia de forma significativa no desempenho do concreto.

#### 4.1.3 *Análise da porosidade do AGRC.*

No que diz respeito a porosidade tem-se que:

- O método Leite (2001) e Leite et al. (2011), respectivamente para determinação da massa específica e taxa de absorção, mostraram-se adequados na caracterização dos AGRC.
- Percebeu-se também que, para esta situação, os grãos menores apresentaram uma menor massa específica e uma maior taxa de absorção que os grãos maiores. Acredita-se que os grãos menores sejam composto por uma quantidade maior de argamassa, por conta disso são mais leves e apresentam uma maior porosidade.

#### 4.1.4 *Análise da alteração da composição granulométrica do AGRC durante a estocagem.*

Com relação a alteração granulométrica durante a estocagem pode-se observar que:

- Considerando-se o estoque em recipiente de 200 litros, pode-se dizer que existe uma alteração granulométrica do AGRC ao longo da pilha de estocagem, com um maior teor de finos meio e no fundo da pilha.
- Ao avaliar o efeito dessa alteração granulométrica na resistência dos concretos com eles produzidos, nota-se que a resistência do concreto produzido com agregado do topo difere-se significativamente da resistência do concreto com agregado do meio e do fundo.

#### 4.1.5 *Análise da variação granulométrica do AGRC a durante a mistura de concretos em betoneiras de eixo vertical e eixo inclinado.*

Os resultados apresentados mostram que:

- Durante a mistura de concretos com AGRC em diferente betoneiras tem-se a quebra dos grãos, provocando a alteração da distribuição granulométrica, pela diminuição de grãos nas frações superiores.
- Avaliaram-se também duas ordens de colocação dos materiais, a fim de minimizar o efeito da quebra. Os resultados mostraram que as ordem de mistura avaliadas não impedem a quebra dos grãos, e promovem alterações estatisticamente iguais. Contudo, ao comparar o efeito dessa quebra no desempenho do concreto, notou-se que as ordens de misturas avaliadas não influenciam de maneira significativa na resistência à compressão.
- Com relação ao tipo de misturador adotado, a análise estatística demonstrou que as misturas realizadas em betoneiras de eixo vertical geram mais finos que as misturas realizadas em betoneiras de eixo inclinado. O efeito desse comportamento no desempenho do concreto foi um incremento de resistência nas misturas realizadas em betoneira de eixo vertical. Acredita-se que os finos gerados durante a misturas,

preencheram os vazios existentes e densificaram o esqueleto granular, o que justificaria o seu melhor desempenho.

- Com relação a betoneira de eixo inclinado notou-se que a mesma não é a mais indicada para misturas com AGRC. Uma vez que existe uma variação granulométrica ao longo da betoneira, que leva a resultados de resistência à compressão com elevado coeficiente de variação.

#### 4.1.6 *Análise do tempo de retirada do excesso de água por escoamento do AGRC no desempenho mecânico de concretos.*

Com relação ao tempo de retirada do excesso de água por escoamento pode-se dizer que:

- O tempo de escoamento tem influência significativa sobre a resistência à compressão. Acredita-se que os agregados reciclados apresentem um teor ótimo de saturação de água, ao longo do tempo, que leva a um melhor desempenho mecânico.

#### 4.1.7 *Análise do teor de saturação do AGRC no desempenho mecânico de concretos.*

Com relação ao teor de saturação admite-se que:

- O teor de saturação afeta significativamente a resistência à compressão do AGRC. Todavia, para que essa variável seja usada como parâmetro de controle, mais estudos a respeito do fenômeno do transporte de líquidos nos poros do AGRC devem ser realizados.

## 4.2 CONCLUSÕES GERAIS

Segundo os resultados deste estudo, e em concordância com o que relata a literatura, pode-se concluir que concretos produzidos com AGRC de boa qualidade, geram resultados satisfatórios de resistência à compressão, com um baixo coeficiente de variação. E mesmo utilizando o AGRC em substituição total ao  $AG_{NAT}$  é possível produzir concretos com resistências superiores a 30 MPa. Contudo, para um melhor desempenho do material é necessário realizar estudos específicos que respeitem suas características intrínsecas. E que mesmo sofrendo variações na estocagem e durante a mistura em betoneiras distintas, a resistência à compressão não sofre influência significativa.

Assim, como conclusão geral, pode-se dizer que uma vez identificados os pontos de variabilidade dos AGRC, é possível realizar a produção de concretos com AGRC para fins estruturais, com baixa variabilidade.

## SUGESTÕES DE PESQUISAS

Visto que o estudo ficou limitado pelas variáveis propostas, e que durante a sua realização surgiram novos questionamentos, sugere-se que:

- Analise as propriedades mecânicas de concretos com AGRC, em diferentes proporções, tomando o cuidado de realizar o estudo de dosagem para cada situação;
- Analise as propriedades de concretos com AGRC, adições e aditivos em diferentes combinações;
- Estudos para avaliar durabilidade de concretos estruturais com AGRC em substituição total ao agregado convencional.
- Estudos para avaliar se a alteração granulométrica em pilhas de estocagem ocorre nos agregados naturais. E qual dessa alteração granulométrica quando se trabalha com diferentes alturas de estocagem.
- Estudos que analisem de maneira mais aprofundada o comportamento dos concretos com AGRC 20% saturados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo: Abrelpe, 2011.
- ALAEJOS, P. G.; SÁNCHEZ, M. J. Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete. In: International Rilem Conference on the use of Recycled Materials in Buildings and structures, Barcelona. Proceedings... Bagnaux, France: Elsevier, v. 2, p. 693-702, 2004.
- ALTHEMAN, D. Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil. Relatório Final das Atividades de Iniciação Científica. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP, 2002.
- AMORIM, P. M. E. Influência das condições de cura no desempenho em termos de durabilidade de betões com agregados reciclados de betão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa. 2008.
- ANGULO, S. C. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- ANGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- AJDUKIEWICZ, A. & KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. Cement and Concrete Composites, 24(2), 269-279. 2002.
- ARIAS, E. G. Nuevo método de dosificación sostenible para hormigones com áridos reciclados. Tesina de Especialidad-Universitat Politècnica da Catalunya, Barcelona, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Test Method for Ball Penetration in Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete. ASTM C360-92. 1999
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. EN Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. ASTM C125. 1995
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. A indústria de cimento e a sustentabilidade. Disponível em: <<http://notes.abcp.org.br:8080/Producao/clipp/clipp.nsf/d25eb76a1d94d3d503256aef0041dbbe/0d53b4f2511c777f832578b2004c28db?OpenDocument>>. Acesso em: 12 março de 2011
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248. Rio de Janeiro. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto - Especificação. NBR 7211. Rio de Janeiro. 2009
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. NBR NM 30. Rio de Janeiro. 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. NBR NM 49. Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 52. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 53. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado - Determinação da massa unitária e dos espaços vazios. NBR NM 45. Rio de Janeiro. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos. NBR 7219. Rio de Janeiro. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. NBR NM 67. Rio de Janeiro. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. NBR NM 68. Rio de Janeiro. 1998

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. NBR 5738. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. NBR 5739. Rio de Janeiro. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação do módulo de deformação estático e diagrama tensão-deformação – Método de ensaio. NBR 8522. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. NBR 7809. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Terminologias. NBR 9935. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Lastro-padrão - Determinação da forma do material. NBR 6954, 1989. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. NBR 15112. Rio de Janeiro. 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural - Requisitos. NBR 15116. Rio de Janeiro. 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. NBR 9833. Rio de Janeiro. 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". NBR NM 51. Rio de Janeiro. 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem. NBR NM 22. Rio de Janeiro. 2004

BARRA, M. Estúdio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en sua aplicación como hormigón armado. Tese de Doutorado, Universidade Politécnic da Catalunha, Barcelona. 1996

BARRA, M., VASQUEZ, E., “The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete”. Waste Management, Vol. 16, pp. 113-117, 1996.

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

BELAGRAA, L; BEDDAR, M. Study of the Mechanical Performance of a Recycled Aggregate Concrete with Admixture Addition. Journal of Civil Engineering, 99-103, 2013.

BENETTI, J. K. Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.

BLUMENSCHNEIN, R. N. A sustentabilidade na cadeia produtiva da indústria da construção. Tese (Doutorado em Engenharia) – Centro de Desenvolvimento Sustentável - Doutor em Desenvolvimento Sustentável. Universidade de Brasília, 2004.

BRITO, J. Agregados reciclados e a sua influência nas propriedades dos betões. Lição de síntese para provas de agregação em Engenharia Civil, Lisboa, 2005.

BRITO, J.; ALVES, F. Concrete with recycled aggregates: the portuguese experimental research. Materials and Structures, 2010.

BRITO FILHO, Jerson A. Cidades versus entulho. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo. Anais... São Paulo: Comitê Técnico do IBRACON; CT 206 – Meio Ambiente, 1999.

BUTTLER, A. M. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto-influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. 187p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CABRAL, A. E. B. Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. 248p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos - Doutor em ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, 2007.

CARRIJO, P. Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

CARNEIRO, A. P.; CASSA, J. C. S.; BRUM, I. A. S. Características do entulho e do agregado reciclado. In: Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção - Projeto Entulho Bom. Salvador: Edufba, 2001.

CHAVES, A. P.; FERREIRA, F. M. Estocagem, homogeneização. [S.l.: s.n.], [Apostila]. 1996.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução 01/1986. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>>. Acesso em: 19 junho de 2009.

\_\_\_\_\_. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002.

\_\_\_\_\_. Resolução 307, de 05 de julho de 2002. Dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Poder Executivo. Brasília, 2002.

CASTRO, A. L.; LIBÓRIO, J. B. L. Considerações sobre o processo de produção de concreto de alto desempenho para estruturas pré moldadas. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Pré Moldados, São Carlos, 2005.

CASUCCIO, M., et al., Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building MATERIALS*, 2007.

CAVALHEIRO, A. P. Contribuição para a implementação de agregado reciclado de concreto em uma empresa de pré-fabricados de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

CORINALDESI, V. Mechanical and elastic behavior of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Cement and Building Materials*, 24(1), 1616-1620. 2010

CHEN, H. J. , YEN, T. & CHEN, K. H. Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 1-8. 2002

COUTINHO, A. - Fabrico e propriedades do betão. Vol. I, II e III, LNEC, Lisboa, 2000

DE LARRARD, F. de. Concrete mixture proportioning. A scientific approach. 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM, Pavimento rígido – Determinação da consistência do concreto pelo consistômetro VeBe – Método de ensaio: ME 064/04, Rio de Janeiro, 1994.

DAMINELI, B. L. Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos reciclados de resíduos de construção e demolição. (Dissertação em Engenharia) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.

DHIR, R. K. and PAINE, K. A Recycled aggregates in concrete: a performance related approach. *Magazine of concrete research*. 2010.

DIAS, J. F. Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo. (Tese de Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

ETXEBERRIA, M. “Experimental study on microstructure and structural behaviour”, Tese de Doutorado, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, 2004.

FE, E. P. Empleo del árido reciclado de hormigón em lá fabricación de hormigón estructural. Tesis (Maestría) –Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, 2012.

FERNANDES, C. G.; MOTTA, L.M.G. Caracterização de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção Civil. Anais do XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. ANPET, Recife, 2005.

FERREIRA, L. M. M. “Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão. Influência da pré-saturação”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007

FONSECA, F. B. Desempenho estrutural de paredes de alvenaria de blocos de concreto de agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GONÇALVES, A.; NEVES, R. “Agregados reciclados”, Seminário sobre agregados, LNEC, Lisboa, 2003.

GOMES, P. C. C. et al. Projeto desentulho para a cidade de Maceió. Maceió: Sebrae, Fundepes, Ufal, 2005. Relatório Técnico

GOMES, M., “Betões estruturais com incorporação de agregados reciclados de betão e cerâmicos com reboco”, Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., MARTÍNEZ-ABELLA, F. (2008). Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. Building and Environment, 43: 429-437. doi:10.1016/j.buildenv.2007.

GONÇALVES, P. Betão com agregados reciclados. Análise comentada da legislação existente. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

HABERT G., ROUSSEL N. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. Cement and Concrete Composites, 31, 397-402. 2009

HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concrete International, Vol. 5, N. 1, 1983.

HANSEN, T. – Recycling of demolished concrete and masonry. Report of technical committee 37-DRC, Demolition and Reuse of Concrete, Taylor & Francis, London. 1992.

HASABA, S. et al. Drying shrinkage and durability of concrete made of recycled concrete aggregates. Japan Concrete Institute, vol. 3, pp. 55-60. 1981.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, 1992. 349p.

ISAIA, G. E., et al., Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais, IBRACON, 2007

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS – IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. <[www.ibge.gov.br/home/estatistica/.../pnsb2008/PNSB\\_2008.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/.../pnsb2008/PNSB_2008.pdf)>. Acesso em: 12 out. 2011

JOHN, V.M. Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar. Disponível em: <[http://www.reciclagem.pcc.usp.br/des\\_sustentavel.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/des_sustentavel.htm)>. Acesso em: 12 out. 2011

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, RILEM Publications, RILEM, Barcelona, pp. 545-553. 2004

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A.– Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, Construction and Building Materials 23, 2009

KAKIZAKI, M.; EDAHIRO, H.; TOCHIGI, T. ;NIKI, T., Effect of mixing method on mechanical properties and pore structure of ultra high-strength concrete, 1992 Istanbul Conference. 1992

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement & Concrete Research*, n. 33, 2002.

KOBAYASHI, S; KAWANO, H. Properties and usage of recycled aggregate concrete. Demolition and reuse of concrete and masonry: reuse of demolition waste. London, 1988.

KIM, Y. J; CHOI, Y. W. Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. *Construction & Building Materials*, n. 30, 2012.

KOU, SHI-CONG; POON, CHI-SUN; ETXEBERRIA, M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement & Concrete Composites*, n. 33, 2011.

LATTERZA, L. M. Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

LEITE, M. B. Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001. 270 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEITE, M. B.; CORDEIRO, L.N.P; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. Proposta de adaptação do procedimento proposto por Leite (2001) para determinação da absorção de agregados reciclados de resíduo de construção demolição. In CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 7º, 2011, Fortaleza. Anais CINPAR, 2011.

LEVY, S. M. Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos. São Paulo. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 1997.

LEVY, S. M. A influência de argamassas endurecidas e resíduos cerâmicos, finamente moídos, nas propriedades de novas argamassas, II Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas, Salvador da Bahia, Brasil, pp. 51-63; 1997.

LEVY, S. M. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. 194 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo-SP, 2001

LOPEZ-GAYARRE, F. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Management*, v.29 n.12, p.3022-3028. 2009

LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, Vol. 33, November, p. 574-580, 2000

LOVATO, P. S. Verificação dos Parâmetros de Controle de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição para Utilização em Concreto. Porto Alegre, 180p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007

MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. ed. G. C. Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2007.

MARMASH, B. The properties of recycled precast concrete hollow core slabs for use as replacement aggregate in concrete. *Waste Materials in Construction*. N.º 1. 2000.

- MALESEV, M.; RADONJANIN, V; MARINKOVIC, S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. Sustainability. 2010
- MANZI, S. MAZZOTTI, BIGNOZZI, M. C. Effect of adhered mortar of recycled concrete aggregates on long-term concrete properties. Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies., disponível em: <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>. Acesso: 15.10.13
- MATIAS, D., BRITO, J. de, “Betão com agregados grossos reciclados de betão e recurso a adjuvantes”, Campanha experimental realizada no IST, Relatório ICIST DCT nº 3 / 05, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2005
- MEHTA, P.; MONTEIRO, P. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994. 57.
- MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- MORALES, M. M., ZAMORANO M., MOYANO A. R., ESPINOSA, V. Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. Cement and Building Materials. nº 25, pp. 742-748, 2011
- MOVASSAGHI, R. Durability of reinforced concrete incorporating recycled concrete as aggregate (RCA). Master of Applied Science in Mechanical Engineering Research Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2006.
- NEALEN, A.; RÜHL, M. Consistency aspects in the production of concrete using aggregates from recycled demolition material. Darmstadt Concrete, nº 12, TU Darmstadt. 1997
- NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2ª ed. rev. atual. São Paulo: Pini, 1997
- NUNES, W. C. Influência do agregado graúdo reciclado de resíduo de construção predial nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007
- PADMINI, A. K; RAMAMURTHY; MATHEWS, M. S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. Cement and Building Materials, 23(1), 829-836. 2009
- POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Use of Recycled Aggregates in Moulded Concrete Bricks and Blocks. Construction and Building Materials, v.16, n.5, p.281-289, July. 2002.
- OLIVEIRA, D. M. Desenvolvimento de Ferramenta Para Apoio à Gestão de Resíduos de Construção e Demolição Com Uso de Geoprocessamento: caso Bauru, SP. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) \_ Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.
- ORTIZ, O.; PASQUALINO, J. C.; CASTELLS, F. Environmental Performance of Construction Waste: comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. Journal of Waste Management, v. 30, n. 4, p. 646-654, 2010.
- OYANADEL, V. V. L. Influencia Del Contenido de Adiciones Puzolánicas y Del Proceso de Elaboración de La Mezcla em La Resistencia Mecánica Del Hormigón. Chile. Memoria para optar al título de ingeniera civil – Departamento de Ingeniería Civil – Universidad de Chile, 2009.
- PADOVAN, R. G. Influência da pré molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

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

POON, C.S., SHUI, Z.H., LAM, L., FOK, H., KOU, S.C. "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete". *Cement and Concrete Research* n° 34, pp. 31-36, 2004

POPE, A.W., JENNINGS, H.M., "The Influence of Mixing on the Microstructure of Cement Paste/Aggregate Interfacial Zone and on the Strength of Mortar," *Journal of Materials Science*, 27, [23] 6452-6462, 1992

RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environmental*, Vol. 42, p. 407-415, 2007.

REJEB, S. K. Improving compressive strength of concrete by a two-step mixing method. *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, p. 585-592, 1996.

RAHMAN, I. A. Assessment of Recycled Aggregate Concrete. *Modern Applied Science*, Vol. 3, Nº 10, 2009.

RAVINDRARAJAH, S. R; TAM C. T. "Properties of Concrete made with Crushed Concrete as Coarse Aggregate", *Magazine of Concrete Research* – 37(130), pp 29 – 38. 1995

RASHWAN, M. S.; ABOURIZK, S. The properties of recycled concrete: factors affecting strength and workability. *Concrete International*, Vol. 19, N. 07, 1997.

RAO, A.; JHA, K.; MISRA, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, no 50, p. 71–81, 2007.

SALAS, A., J. Roesler, D.A. Lange, "Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements", presented at the 89th Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., 2010.

SANCHEZ, M. Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tese de Doutoramento em Construção, Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, 2004.

SANTOS, J.; BRANCO, F.; BRITO, J. (2002) – Mechanical properties of concrete with coarse recycled concrete aggregates. *Sustainable Building* 2002.

SOBERÓN, J. G., "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, an experimental study", *Cement and concrete research*, n.º 32, pp. 1301-1311, 2002.

TAM, V.W.Y., Tam, C., LE, K.N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling* 50, 82e101, 2007.

TAM V. W. Y. (2008) "Economic Comparison of Concrete Recycling: A Case Study Approach", *Resources Conservation and Recycling, ScienceDirect* – 52: 821 – 828, 2008.

TENÓRIO, J. J. L. Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção demolição visando aplicações estruturais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007

TSENG, E. Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: o caso do Rodoanel Metropolitano Mário Covas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte). Universidade de São Paulo, São Paulo 2010.

TOPÇU, I. B.; SENDEL, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pg. 1307-1312, 2004.

UDDIN, M. T, HASNAT, A, MOHAMMAD, A. A, SHAMIM, Z. B. Recycling of Brick Aggregate Concrete: An Extended study on Some Key Issues. Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Disponível em: <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>. Acesso: 15.10.13.

ULSEN, C. Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição. Tese (Doutorado) –Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

United Nations Environment Programme (2010). Urgent Need to Prepare Developing countries for Surge in E-Wastes. Disponível em: <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=612&ArticleID=6471&l=en&t=long>. Acesso em: 14 abr. 2010.

UNE-EN 1015-2. Methods of test for mortar for masonry. Part 2: Bulk Sampling of mortars and preparation of test mortars.

VÁZQUEZ, et al., “Draft of Spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete”, Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, International RILEM Conference, pp. 511-525, Barcelona, 2004

VIEIRA, G. L. Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre-RS. 151p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

XIAO, J.; FALKNER, H. Bond behavior between recycled aggregate concrete and steel rebars. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pg. 395-401, 2007.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pg. 1187-1194, 2005.

WERLE, A. P. Determinação de Propriedades de Concretos com Agregados Reciclados de Concreto, com ênfase na Carbonatação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

WERLE, A. P.; KULAKOWSKI, M. P.; KAZMIERCZAK, C. S. Manual de montagem e operação de câmara de carbonatação. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, 2010.

YONG, P.C; TEO, D. C. L. Utilisation of Recycled Aggregate in Concrete. *UNIMINAS E-Journal of Civil Engineering*, Vol. 1, Issue 1, 2009.

ZORDAN, S. E. A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, Campinas, 1997.

## APÊNDICE A – Resultados de Resistência à compressão aos 28 dias

Tabela A1: Resultados individuais de resistência à compressão, aos 28 dias, dos concretos produzidos na FASE 1.

<b>Tipo de Agregado</b>	<b>20 MPa</b>	<b>30 MPa</b>	<b>40 MPa</b>
AGN	19,53	29,27	42,32
AGN	19,92	29,49	44,02
AGN	20,05	28,50	43,88
AGN	19,46	29,27	42,89
AGN	18,69	30,19	45,71
AGN	18,59	29,84	45,92
AGN	18,59	27,79	42,89
<b>Média</b>	19,26	29,19	43,95
<b>Desvio Padrão</b>	0,58	0,75	1,30
<b>CV</b>	3%	3%	3%
<b>Tipo de Agregado</b>	<b>20 MPa</b>	<b>30 MPa</b>	<b>40 MPa</b>
AGRC15	25,76	31,67	43,45
AGRC15	26,18	32,45	45,22
AGRC15	24,94	34,49	45,92
AGRC15	22,82	34,85	43,38
AGRC15	26,27	31,01	42,83
AGRC15	26,17	35,86	44,58
AGRC15	26,47	33,75	44,58
<b>Média</b>	25,52	33,44	44,28
<b>Desvio Padrão</b>	1,20	1,65	1,02
<b>CV</b>	5%	5%	2%
<b>Tipo de Agregado</b>	<b>20 MPa</b>	<b>30 MPa</b>	<b>40 MPa</b>
AGRC30	19,28	33,08	46,84
AGRC30	18,65	35,91	49,59
AGRC30	18,9	33,65	46,06
AGRC30	19,6	35,34	47,54
AGRC30	18,82	33,55	48,65
AGRC30	19,71	36,03	51,58
AGRC30	19,71	35,50	48,62
<b>Média</b>	19,24	34,72	48,41
<b>Desvio Padrão</b>	0,42	1,15	1,70
<b>CV</b>	2%	3%	4%

Tabela A2: Resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos produzidos com AGRC na FASE 3.

<b>Condição de Estocagem</b>					
<b>Posição</b>	<b>Fc (MPa)</b>	<b>Posição</b>	<b>Fc (MPa)</b>	<b>Posição</b>	<b>Fc (MPa)</b>
TOPO	32,19	MEIO	36,03	FUNDO	35,93
TOPO	33,16	MEIO	36,70	FUNDO	36,21
TOPO	33,29	MEIO	36,89	FUNDO	38,64
TOPO	32,06	MEIO	35,16	FUNDO	33,71
TOPO	34,32	MEIO	35,51	FUNDO	35,39
TOPO	33,17	MEIO	34,67	FUNDO	37,24
TOPO	32,36	MEIO	34,55	FUNDO	36,58
TOPO	32,31	MEIO	35,30	FUNDO	36,5
TOPO	33,12	MEIO	36,10	FUNDO	36,22
TOPO	33,37	MEIO	38,44	FUNDO	36,53
Média	32,94	Média	35,94	Média	36,30
Desvio	0,70	Desvio	1,18	Desvio	1,26
CV	2%	CV	3%	CV	3%

Tabela A3: Valores de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos produzidos com AGRC na FASE 4.

<b>Betoneira de Eixo Vertical</b>		
<b>Amostra</b>	<b>Ordem Tradicional</b>	<b>Ordem Inversa</b>
CP1	38,54	36,41
CP2	37,62	37,46
CP3	37,87	35,9
CP4	38,69	38,39
CP5	38,51	37,19
CP6	38,82	38,57
CP7	39,58	37,44
Média	38,52	37,34
Desvio	0,64	0,97
C.V	2%	3%

Tabela A4: Valores de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos produzidos com AGRC na FASE 4.

<b>Betoneira de Eixo Inclinado</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Ordem Tradicional</b>		<b>Ordem Inversa</b>	
CP1	28,55	32,03	26,46	34,11
CP2	29,99	36,1	28,42	34,08
CP3	30,62	35,06	32,08	31,69
CP4	35,05	31,66	30,62	30,24
CP5	31,35	30,03	31,66	30,93
CP6	35,6	31,92	27,17	29,71
CP7	36,82	32,95	27,69	35,25
Média	32,57	32,82	29,16	32,29
Desvio	3,20	2,10	2,27	2,17
C.V	10%	6%	8%	7%

Tabela A5: Média do valores de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos produzidos com AGRC na FASE 5.

<b>Tempo de escorrimto</b>	<b>Taxa de saturação</b>	<b>Média Fc</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação</b>
5 minutos	100%	31,13	0,636	2
10 minutos	77%	35,09	0,535	2
30 minutos	70%	32,89	0,725	2
60 minutos	60%	31,77	0,965	3

Tabela A6: Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos produzidos com AGRC na FASE 6.

<b>Resistência à Compressão</b>					
<b>CP</b>	<b>100%</b>	<b>80%</b>	<b>60%</b>	<b>40%</b>	<b>20%</b>
1	35,30	39,58	35,15	35,95	37,81
2	37,93	37,87	35,10	33,27	37,94
3	36,66	38,79	35,15	34,57	36,91
4	38,42	38,88	35,4	33,24	38,24
5	37,65	37,85	37,46	35,36	37,86
6	36,83	35,78	33,32	35,29	33,78
7	35,92	39,59	35,30	35,54	38,38
8	36,50	37,48	36,33	33,80	35,78
9	35,64	37,15	36,60	36,24	38,08
Média	36,76	38,11	35,53	34,64	37,20
Desvio Pad.	1,07	1,24	1,17	1,14	1,52
C.V	3%	3%	3%	3%	4%

Tabela A7: Resistência à compressão aos 28 dias dos concretos produzidos com AGRC na FASE 6 (REPETIÇÃO).

<b>Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)</b>		
<b>CP</b>	<b>20%</b>	<b>40%</b>
1	37,52	34,11
2	37,00	33,57
3	34,85	34,00
4	36,97	35,63
5	36,24	33,2
6	36,62	33,61
7	36,24	32,20
8	35,85	35,09
9	35,89	35,30
Média	36,35	34,08
Desvio Padrão	0,79	1,10
C.V	2%	3%