



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

João Gualberto Leite Figueirêdo Filho

AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE DE CONCRETOS CONTENDO
AGREGADO RECICLADO DE ARGAMASSA

Feira de Santana

Agosto/2011

João Gualberto Leite Figueirêdo Filho

**AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE DE CONCRETOS CONTENDO
AGREGADO RECICLADO DE ARGAMASSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador 1: Prof.^a Dr.^a. Mônica Batista Leite

Orientador 2: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

Feira de Santana

Agosto/2011

Ficha catalográfica: Biblioteca Central Julieta Carteado

Figueirêdo Filho, Joao Gualberto Leite

F49a Avaliação da trabalhabilidade de concretos contendo agregado reciclado de argamassa / Joao Gualberto Leite Figueirêdo Filho, 2011.

---f. : il.

Orientadora: Monica Batista Leite

Orientador: Paulo Roberto Lopes Lima

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) –
Universidade Estadual de Feira de Santana, 2011.

1. Concreto reciclado. 2. Agregado reciclado de argamassa. 3. Resíduo de construção e demolição. I. Universidade Estadual de Feira de Santana. II. Leite, Monica Batista, orient. III. Lima, Paulo Roberto Lopes, orient. IV. Título.

CDU : 624.012.45

João Gualberto Leite Figueirêdo Filho

**ESTUDO DA PRODUÇÃO DE CONCRETOS RECICLADOS CONTENDO
AGREGADOS DE ARGAMASSA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO O GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Feira de Santana, 19 de agosto de 2011.

Aprovada por:

Prof.^a Mônica Batista Leite, D.Sc. – Orientadora
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

Prof. Paulo Roberto Lopes Lima D.Sc. – Orientador
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

Prof. Washigton Almeida Moura, D.Sc.
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

Prof.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin, D.Sc.
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul)

DEDICATÓRIA

À vó Ana *in memoriam* pelo exemplo de
força e dedicação

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais (Aliana Reis Figueirêdo e João Gualberto Leite Figueirêdo) pelo exemplo de honestidade acima de tudo.

À minha esposa e companheira Bianca Lima e Santos Figueirêdo pelo amor e pelo apoio em todos os momentos.

Aos meus filhos Tipe, Clarinha, Gigi e Lulu, as grandes motivações de minha vida, pelo amor incondicional.

Aos meus irmãos, companheiros e amigos eternos de todas as horas.

Aos meus orientadores Paulo Roberto e Mônica Leite pela compreensão, dedicação e paciência.

Aos meus padrinhos Jerônimo e Cecília; a Ana Cecília, Léo (*in memoriam*), a tia Val, Lili. Todos contribuíram para este momento.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste projeto: Flávio Pereira, Wilson Pereira, Jodílson Amorim, Adolfo Bastos,...

Agradeço a Deus por colocar todas estas pessoas em minha vida e por todas as suas bênçãos.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE DE CONCRETOS CONTENDO AGREGADO RECICLADO DE ARGAMASSA

João Gualberto Leite Figueirêdo Filho

Agosto/2011

Orientador 1: Prof.^a Dr.^a. Mônica Batista Leite

Orientador 2: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

O concreto produzido a partir de resíduos de construção e demolição apresenta propriedades físicas diferentes do concreto convencional, o que influencia nas características do concreto no estado fresco e no estado endurecido. Neste trabalho foi avaliada a influência dos teores de substituição do agregado miúdo e gráudo natural, pelo agregado reciclado de argamassa (0, 50 e 100%) e da taxa de compensação da taxa de absorção destes agregados, sobre a trabalhabilidade e resistência à compressão dos concretos produzidos. A trabalhabilidade foi avaliada através dos ensaios de abatimento de tronco de cone, espalhamento pela mesa de Graff e tempo VeBe e a resistência à compressão de cada mistura foi avaliada aos 28 dias. Os resultados mostram que a textura rugosa e superfície irregular dos agregados reciclados reduzem a trabalhabilidade do concreto quando comparado com concreto convencional. A comparação entre os diferentes métodos de avaliação da trabalhabilidade demonstra que os ensaios com aplicação de energia dinâmica, mesa de Graff e tempo VeBe, são mais adequados para uso com concreto reciclado. Apesar da tendência de redução da resistência à compressão, é possível dosar concretos reciclados com mesma resistência que a matriz e trabalhabilidade adequada.

Palavras-chave: Trabalhabilidade, Concreto reciclado, Agregado reciclado de argamassa, Resíduo de Construção e Demolição, Resistência à compressão.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EVALUATION OF THE WORKABILITY OF CONCRETE WITH MORTAR RECYCLED AGGREGATE

João Gualberto Leite Figueirêdo Filho

Agosto/2011

Orientador 1: Prof.^a Dr.^a Mônica Batista Leite

Orientador 2: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

Department: Civil and Environment Engineering

To use of recycled aggregates in concrete is essential to improve the study of its characteristics and behavior. Usually the recycled concrete, made from construction and demolition waste aggregates, has different fresh and hardened properties. This work evaluated the influence of replacement of fine and coarse natural aggregates by recycled mortar aggregates (0, 50 and 100%) and the influence of the rate of compensation of the absorption rate of these recycled aggregates on the workability and compressive strength of concrete. The workability was evaluated by three tests: slump test, flow table and VeBe time. The compressive strength was evaluated at 28 days. The results show that the rough and irregular surface texture of the recycled aggregates reduce the workability of concrete compared to conventional concrete, which can be minimized with the increase in compensation rate of water absorption rate of aggregate. The comparison between different methods of evaluation of workability demonstrates that tests using dynamic energy are more suitable for use with recycled concrete. Despite the reduction in compressive strength with increasing addition of recycled aggregate and increased free water in the mix, it is possible to design recycled concrete as strong as the matrix and with adequate workability.

Keywords: Workability, Recycled concrete, Mortar recycled aggregate, Construction and Demolition Waste, Compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Relação entre a massa específica e absorção de água pelo RCD (Fonte: ÂNGULO, 2000).....	25
Figura 2	Relação entre o percentual de concreto e o percentual de absorção de água do resíduo (Fonte: Agrela <i>et al.</i> , 2011).....	26
Figura 3	Método de mistura <i>T SMA</i> (Fonte: Tam, Gao; Tam, 2005)	31
Figura 4	Percurso da fissura nos agregados leve e natural (Fonte: Newman e Owens, 2003)	34
Figura 5	Relação entre a Resistência à Compressão e a Resistência à Tração de concreto reciclado (Fonte: XIAO; LI; ZHANG, 2006).....	37
Figura 6	Relação entre o Módulo de Elasticidade e a Resistência à Compressão (Fonte: XIAO; LI; ZHANG, 2006).....	38
Figura 7	Representação Gráfica da tensão de escoamento (Fonte: FERRARIS, 1996).....	39
Figura 8	Relação abatimento de tronco de cone e teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto, onde: C16 (concreto com fck=16Mpa), C20 (concreto com fck=20Mpa) e Ref.10 (concreto referência) (Fonte: TOPÇU;SENGEL 2004).....	45
Figura 9	Abatimento em função do percentual de substituição do agregado miúdo reciclado, onde: CC (concreto referência), FRA"X" (concreto com teor de "X"% de substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de concreto) (Fonte: YAPRAK <i>et al.</i> , 2011)	45
Figura 10	Influência da granulometria na consistência do concreto com agregado graúdo reciclado (Fonte: LARBI, 2000, citado por GAYARRE, 2008).....	47
Figura 11	Relação entre o fator de forma e o abatimento (Fonte: CAZAL;JARA; ACOSTA, 2009).....	49
Figura 12	Beneficiamento do resíduo de argamassa para obtenção dos agregados miúdo e graúdo: a) Britador de mandíbulas; b) Peneiramento manual dos agregado.....	51
Figura 13	Absorção de água no tempo para o AMR.....	54
Figura 14	Absorção de água no tempo para o AGR	55
Figura 15	Curvas de composição granulométrica dos agregados utilizados	56
Figura 16	Ensaio de abatimento do tronco de cone: a) molde e placa metálicos; b) enchimento do molde e adensamento manual; c) retirada do molde; d) determinação do abatimento	59

Figura 17	Ensaio de Tempo VeBe: a) moldagem do cone; b) apoio do disco de acrílico sobre o tronco de cone e vibração posterior; c) término do ensaio quando o disco fica totalmente em contato com o concreto	60
Figura 18	Esquema do ensaio de espalhamento na mesa de Graff (Fonte: FERRARIS, 1996)	60
Figura 19	Resultados de abatimento de tronco de cone relativo dos concretos avaliados	.63
Figura 20	Comparação entre os abatimentos dos concretos de referência, 100%AMR e 100% AGR, com 60% de taxa de compensação para ambos	64
Figura 21	Relação entre abatimento de tronco de cone e teor de água livre inicial.....	65
Figura 22	Resultados relativos de tempo VeBe.....	67
Figura 23	Relação entre o tempo VeBe e o teor de água livre inicial das misturas.....	67
Figura 24	Resultados relativos de espalhamento na mesa de Graff.....	69
Figura 25	Relação entre o espalhamento e o teor de água livre.....	71
Figura 26	Comparação entre as medidas de trabalhabilidade: a) Abatimento e espalhamento; b) Abatimento e tempo VeBe.....	72
Figura 27	Comparação entre o ensaio de abatimento e espalhamento para visualização das classes de consistência: a) Abatimentos de misturas com diferentes consistências; b) Espalhamento de misturas com diferentes consistências	73
Figura 28	Resistência à compressão relativa das misturas estudadas.....	74
Figura 29	Resistência à compressão em função do teor de água livre inicial.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Diferentes composições de RCD em cidades brasileiras.....	21
Tabela 2	Resultados de abatimento para diferentes traços com agregado reciclado de concreto	46
Tabela 3	Abatimento para diferentes traços com substituição do agregado natural por agregado reciclado de concreto e agregado reciclado cerâmico.....	46
Tabela 4	Resultados de abatimento e tempo VeBe de concretos reciclados com diferentes teores de substituição.....	48
Tabela 5	Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP II Z 32	52
Tabela 6	Resultados da caracterização dos agregados miúdos	53
Tabela 7	Resultados de caracterização dos agregados graúdos.....	54
Tabela 8	Consumos de agregados por metro cúbico de concreto	57
Tabela 9	Teores de água livre inicial por metro cúbico para as misturas avaliadas.....	58
Tabela 10	Consumos de cimento por metro cúbico para as misturas avaliadas.....	58
Tabela 11	Resultados para o ensaio de abatimento de tronco de cone.....	62
Tabela 12	Resultados de Tempo VeBe	66
Tabela 13	Resultados de espalhamento pela mesa de Graff.....	69
Tabela 14	Relação entre os ensaios de abatimento, tempo VeBe e espalhamento conforme a classificação da plasticidade do concreto	71
Tabela 15	Resultados de resistência à compressão dos concretos estudados.....	74
Tabela 16	Resultados individuais de resistência à compressão axial das misturas avaliadas	89

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xi
SUMÁRIO.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	17
2 RCD PARA USO EM CONCRETOS.....	18
2.1 GERAÇÃO E BENEFICIAMENTO DO RCD.....	18
2.2 COMPOSIÇÃO DO RCD.....	20
2.3 AGREGADOS RECICLADOS DE RCD.....	21
2.3.1 Massa Específica e Absorção de Água.....	23
2.3.2 Textura e Forma.....	27
2.3.3 Teor de finos.....	27
2.4 CONCRETOS COM RCD.....	28
2.4.1 Produção de concreto com RCD.....	29
2.4.2 Propriedades mecânicas do concreto reciclado.....	32
3 TRABALHABILIDADE.....	39
3.1 TRABALHABILIDADE E REOLOGIA.....	39
3.2 PARÂMETROS QUE INTERFEREM NA TRABALHABILIDADE.....	41
3.3 FORMAS DE MEDIÇÃO DA TRABALHABILIDADE.....	42
3.4 TRABALHABILIDADE DOS CONCRETOS COM RCD.....	44
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	50
4.1 PARÂMETROS DE ESTUDO.....	50
4.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS.....	51
4.2.1 Coleta e Beneficiamento das Amostras do RCD.....	51
4.2.2 Cimento.....	51
4.2.3 Agregados.....	52
4.2.4 Água.....	56
4.3 DOSAGEM EXPERIMENTAL.....	56

4.3.1	Produção dos concretos	56
4.4	PROPRIEDADES AVALIADAS	59
4.4.1	Propriedades no estado fresco	59
4.4.1.1	Abatimento de tronco de cone	59
4.4.1.2	Ensaio de tempo VeBe	60
4.4.1.3	Ensaio de abatimento na mesa de Graff	60
4.4.2	Resistência à compressão axial (fc)	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1	TRABALHABILIDADE	62
5.1.1	Abatimento de tronco de cone	62
5.1.2	Tempo VeBe	66
5.1.3	Espalhamento pela Mesa de Graff	68
5.1.4	Faixas de medição e correlação entre os métodos	70
5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	73
6	CONCLUSÃO	77
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
6.1.1	Trabalhabilidade	77
6.1.2	Resistência à compressão	77
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
7	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICES	88
	APÊNDICE 1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	89

1 INTRODUÇÃO

Na tentativa de contribuir com o aumento do conhecimento sobre as características de materiais provenientes da reciclagem do Resíduo de Construção e Demolição (RCD), diversos pesquisadores desenvolveram técnicas de utilização no sentido de reinsserir este resíduo no ciclo construtivo (EGUSHI *et al.*, 2007; XIAO; FALKNER, 2007; LEITE, 2001; POON; KOU; LAM, 2005; TAM; GAO; TAM, 2005; TAM; TAM; LE, 2007; RAO *et al.*, 2007; KOU; POON, 2009; YANG *et al.*, 2011). Porém, características dos agregados reciclados, como elevada porosidade e absorção, textura rugosa e forma irregular, em comparação com agregados naturais normalmente utilizados, influenciam significativamente na qualidade dos concretos produzidos (ETXEBERRIA *et al.* 2007; TAM; TAM; LE, 2007).

Vários autores afirmam que a trabalhabilidade dos concretos é afetada pelo uso de agregados reciclados. De um modo geral, aponta-se a redução da trabalhabilidade, medida pela consistência, com o aumento do teor de agregado reciclado, bem como com o uso do agregado miúdo reciclado (BAIRAGI *et al.*, 1993; HANSEN, 1992; MALESEV *et al.*, 2010; TOPÇU; SENDEL, 2004; YANG *et al.*, 2011; YAPRAK *et al.*, 2011). Além disso, o agregado reciclado gera maior atrito entre as partículas e com a superfície, devido a sua textura superficial rugosa e forma irregular, o que também contribui para redução da trabalhabilidade (EVANGELISTA; BRITO, 2007; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; RAKSHVIR; BARAI, 2006; RASHWAN; ABOURIZK, 1997). De acordo com os autores, esse material promove um maior travamento das misturas de concreto, dificultando a mobilidade das partículas, que necessitarão de maior quantidade de pasta e maior energia de adensamento para vencer esta barreira.

Em seu estudo, Santos (1998) pôde observar, tanto pela micrografia quanto pela morfoscopia¹, uma textura mais áspera dos agregados de RCD em relação ao agregado convencional. Neville (1997) afirma que a textura do agregado influencia tanto sobre a demanda d'água como sobre a trabalhabilidade dos concretos produzidos.

Rao, Jha e Misra (2006) compararam a taxa de absorção de água de agregados miúdos e graúdos, encontrando valores que variam de 0,5 a 1% e de 3 a 12%, para os agregados naturais e reciclados, respectivamente. Desse modo, depreende-se que o agregado reciclado

¹ Morfoscopia – estudo da superfície dos minerais.

irá absorver parte da água de amassamento, alterando a relação água-cimento da mistura de concreto, reduzindo a sua trabalhabilidade. Para que isso não aconteça, é necessário então compensar essas taxas de absorção. Porém, sua compensação total pode aumentar a relação a/c final dessas misturas e provocar redução das resistências mecânicas.

No intuito de reduzir o efeito da taxa de absorção dos agregados reciclados e assim melhorar a trabalhabilidade dos concretos produzidos, diversos estudos foram realizados com o objetivo de compensar esta taxa absorção. Oliveira e Vasquez. (1996), Leite (2001), Poon e Yu (2001) e Poon *et al.* (2004) propuseram compensar a taxa de absorção realizando uma pré molhagem do agregado. Tam, Gao e Tam (2005) propuseram alteração na sequência de mistura, de modo que o agregado absorva parte da água antes da adição do cimento, o que de certa forma é uma maneira de promover a pré molhagem proposta por Oliveira e Vasquez (1996) e demais autores. Li, Xiao e Zhou (2009) propuseram envolver o RCD em material pozolânico, antes da mistura, o que promoveu uma colmatação dos poros superficiais, reduzindo assim a absorção de água do agregado. Qualquer que seja a forma de produção do concreto reciclado, o objetivo final é reduzir o efeito da elevada taxa de absorção, e melhorar tanto as propriedades no estado fresco, notadamente a trabalhabilidade, quanto melhorar o desempenho mecânico e de durabilidade.

Santiago *et al.* (2009) verificaram que mesmo aumentando a quantidade de água livre nas misturas de concretos reciclados houve uma redução na trabalhabilidade, contudo, a compactidade foi pouco influenciada devido ao fato de o RCD, ao absorver a água, simultaneamente liberar bolhas de ar que auxiliam na fluidez da mistura durante o processo de adensamento. Conclusão semelhante foi obtida por Leite (2001), em seu estudo com concretos reciclados. Para a autora, as misturas com agregados reciclados apresentam-se pouco fluidas, devido ao atrito promovido pelas partículas e à elevada taxa de absorção do agregado, e desse modo sugere que utilizar apenas o abatimento do tronco de cone para medir a trabalhabilidade das misturas de concretos reciclado não é vantajoso. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o ensaio de tempo VeBe tem mais significado se aplicado para a medida de trabalhabilidade de misturas menos fluidas, pois avalia a compactabilidade da mistura (JOHNSTON, citado por CECCATO, 1998).

Considerando a menor fluidez dos concretos reciclados, Leite (2001) estudou a trabalhabilidade desse material medida através dos ensaios de abatimento do tronco de cone e da determinação do tempo VeBe. Os resultados demonstraram que o uso do abatimento do tronco de cone como fator de controle da produção dos concretos reciclados é um tanto

ineficiente, uma vez que a quantidade de água adicionada às misturas, para que se obtenha o abatimento do concreto reciclado igual ao do concreto de referência, tende a ser maior que a necessária para que se produza misturas com o mesmo tempo de vibração VeBe, por exemplo. Tais resultados estão relacionados com o atrito promovido pelas partículas de agregado, que causa o travamento das misturas, resultando em menores valores de abatimento, uma vez que para essa medida o concreto escoar apenas sob a influência do peso próprio. Assim, depreende-se que para medida da trabalhabilidade de concretos reciclados seria importante utilizar métodos de ensaio que introduzissem energia de adensamento ao sistema, de modo a facilitar o escoamento do concreto e obter melhores medidas de trabalhabilidade.

Portanto, aprofundar o estudo das características físicas dos agregados reciclados e sua influência sobre a trabalhabilidade dos concretos produzidos é premissa básica para viabilizar a sua aplicação na produção de concretos com fins estruturais. Isso fará com que esse RCD torne-se um material atrativo, ao ponto da sua inserção na produção de concretos ser viável técnica e economicamente.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência do uso de agregado reciclado de argamassa sobre a trabalhabilidade e resistência à compressão de concretos.

E tem como objetivos específicos:

- avaliar a influência de diferentes taxas de compensação da taxa de absorção de água do agregado reciclado sobre a trabalhabilidade e resistência à compressão dos concretos, aos 28 dias;
- avaliar a influência de diferentes percentuais de substituição de agregados naturais por agregados reciclados de argamassa sobre a trabalhabilidade e resistência à compressão dos concretos, aos 28 dias;
- estabelecer uma correlação entre diferentes métodos de determinação da trabalhabilidade (abatimento de tronco de cone, tempo VeBe e mesa de Graff) para concretos reciclados.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para que se apresente de forma clara e objetiva, este trabalho foi estruturado em seis capítulos.

No primeiro capítulo foram descritas informações sobre a importância do uso do RCD, sua influência nas propriedades dos concretos, bem como, apresentam-se os objetivos geral e específicos.

No segundo capítulo foi discutido o desenvolvimento da produção de concreto com o RCD, apresentando trabalhos realizados e abordando as características do agregado, composição, geração, beneficiamento e características do RCD. A influência das características dos agregados reciclados na trabalhabilidade das misturas do concreto no estado fresco está descrita no terceiro capítulo.

O quarto capítulo apresenta o programa experimental, com o planejamento e metodologia dos ensaios, beneficiamento, seleção e caracterização dos materiais, bem como o método de dosagem experimental utilizado e as propriedades avaliadas.

No quinto capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos.

O sexto capítulo apresenta as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

2 RCD PARA USO EM CONCRETOS

Reinserir o RCD no ciclo construtivo seria uma forma de reduzir o volume de extração de agregados naturais para produção de concreto. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (ANUÁRIO MINERAL, 2010), o consumo de areia e rochas britadas no Brasil, em 2009, foi da ordem de 256 e 216 milhões de toneladas, respectivamente. A construção civil responde por 60 e 50%, respectivamente, do consumo destes minerais. Dentre as aplicações possíveis, o uso como agregados para produção de concretos seria o mais interessante, pela grande capacidade de absorção de resíduo apresentada por esse material, uma vez que o consumo de concreto cresce cada vez mais. Segundo Mehta e Monteiro (2008), em 2007 foram consumidos 6 bilhões de toneladas de concreto no mundo, ou seja, 1 tonelada para cada ser humano. Os agregados correspondem a cerca de 80% do volume dessas misturas (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Neste contexto, a seguir serão apresentados aspectos relacionados com a aplicação do RCD para produção de concretos.

2.1 GERAÇÃO E BENEFICIAMENTO DO RCD

Segundo Bakoo (2009) citado por Cabral (2007), a geração de resíduos de construção e demolição (RCD) é influenciada por diversos fatores, dentre estes, pode-se citar as práticas construtivas correntes. Resíduos também são gerados por guerras (KHALAF, DEVENNY; ALAN, 2004), desastres naturais, como terremotos, furacões e inundações, bem como por revitalizações de áreas urbanas degradadas, ou necessidade de adequação das edificações a novas aplicações (CHANDRA, 2004, citado por RAO; JHA; MISRA, 2007; LEITE, 2001). No Brasil, segundo Ângulo (2004), a demolição seletiva é pouco utilizada e boa parte dos resíduos é gerada na fase de construção.

Poon e Yu (2001) afirmam que em Hong Kong investimentos em infra-estrutura desde meados da década de 80, principalmente com a abertura de novas estradas, levaram a crescente geração de RCD, chegando a 32000 toneladas/dia, em 1998. Segundo o portal engenharia, arquitetura e construção (AECWeb, 2010), apenas em São Paulo são gerados 17000 toneladas/dia deste resíduo.

De um modo geral, embora os dados não sejam tão precisos, a partir dos trabalhos realizados por Leite (2001), Lovato (2007), Pinto (1999) e Tabsh e Abdelfatah (2009) observa-se uma variação de 0,21 a 0,89 t/hab.ano de RCD gerado dentre várias cidades

brasileiras estudadas. Tais dados permitem inferir que, no Brasil, há hoje uma geração de cerca de 105 milhões de toneladas de RCD por ano, utilizando uma taxa de geração média de 0,55 t/hab.ano. Considerando que grande parte desse resíduo é composta pela fração inerte, que pode ser reaproveitada como agregado, o ganho ambiental seria muito elevado.

As possibilidades de aplicação dos agregados reciclados em concreto são promissoras, desde que sejam tomadas precauções com o tratamento dado ao material desde o seu beneficiamento até o momento da sua utilização. Para Ângulo *et al.* (2002), a atual tecnologia empregada nas centrais de reciclagem brasileiras não permite que os agregados reciclados sejam utilizados na produção de concretos. Isso se deve ao menor rigor das normas brasileiras na classificação dos agregados reciclados, e por isso são seguidas as especificações internacionais e, na maioria das vezes, os agregados não se enquadram nos critérios normativos.

Segundo Brito (2005), citado por Gonçalves (2007), as atividades de britagem, peneiramento e lavagem são etapas necessárias à reciclagem da fração inorgânica não-metálica do RCD. Na reciclagem da fração mineral deve-se levar em conta a presença de materiais indesejáveis, como solo, gesso, papel, papelão, entre outros. Portanto, o RCD deve passar por rigorosa seleção para, em seguida, serem reduzidos a dimensões compatíveis com a entrada dos britadores.

Segundo Hansen (1992), britadores de mandíbulas com abertura de 33 mm produzem agregados com 20% de finos abaixo de 5 mm. Gonçalves e Neves (2003) afirmam que as granulometrias e formas mais adequadas são obtidas quando o processo de britagem consiste na utilização inicial de um britador de mandíbulas, seguida de um britador rotativo.

Desse modo, pode-se afirmar que as características do RCD estão relacionadas a sua composição, forma de beneficiamento (trituração, lavagem e outros) e a qualidade do material presente em sua composição original.

Cazal, Jara e Acosta (2009) afirmam que, por sua vez, para os agregados naturais, além do tipo de triturador utilizado no beneficiamento e da granulometria obtida, suas características dependem também da rocha de origem. Percebe-se, dessa forma, uma semelhança entre os fatores que influenciam as propriedades dos agregados reciclados com aquelas que influenciam os agregados naturais, já que a qualidade do agregado reciclado também está relacionada à qualidade dos materiais que deram origem ao resíduo.

Desse modo, se verifica que dada a origem, variabilidade, composição e outras

características distintas do RCD, quando comparado ao agregado natural, há uma necessidade ainda maior de caracterizar o material, se o objetivo é sua utilização na produção de concretos.

2.2 COMPOSIÇÃO DO RCD

Os Agregados Reciclados (AR) apresentam, de modo geral, grande variedade de componentes. Estes materiais podem ser provenientes da demolição de construções, restos de materiais utilizados em construção, perdas, ou ainda sobras advindas da fabricação de materiais para a construção civil fora dos canteiros de obras. Além do aspecto relativo à origem do resíduo, a variabilidade da composição é evidenciada ainda mais devido à grande quantidade de materiais envolvidos na indústria da construção. Leite (2001) analisou a composição do resíduo proveniente de um aterro de inertes em Porto Alegre, e encontrou diversos materiais, como, concreto, argamassa, material cerâmico, rochas naturais, dentre outros.

A composição do resíduo também é variável em função da época do ano, região geográfica, tipo de obra, dentre outros fatores. Quando oriundos de obras de construção este depende do estágio no qual a obra se encontra. Por exemplo, quando no estágio de estrutura ter-se-á uma maior incidência de resíduos de concreto, aço e formas. Quando no estágio de acabamento ter-se-á uma maior incidência de argamassa, blocos e cerâmicas (POON; YU, 2001).

A Tabela 1 apresenta a composição média do RCD proveniente de diferentes localidades. Observa-se que na composição do RCD gerado nas cidades brasileiras há uma predominância das argamassas, o que já foi constatado por Pinto (1997).

O agregado reciclado produzido é normalmente misto, ou seja, uma mistura de concretos, argamassas, cerâmicas, rochas naturais, entre outros, sendo que cada uma destas fases possui características muito distintas. Nas usinas de reciclagem de RCD classe A², a única triagem é visual, e classifica o RCD como cinza (predominantemente resíduos à base de cimento) e vermelho (predominantemente resíduos cerâmicos, solos e outros) (ÂNGULO,

² Resíduo Classe A – São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados conforme a NBR15116 (ABNT, 2004).

2004). Esta separação tem levado à necessidade de realizar estudos da influência de cada uma das fases presentes no RCD.

Tabela 1 Diferentes composições de RCD em cidades brasileiras

Constituintes	São Carlos	São Paulo	Porto Alegre	Ribeirão Preto	Salvador	Campina Grande	Maceió
Argamassa	63,67	25,2	44,2	37,4	53	28	27,82
Concreto	4,38	8,2	18,3	21,1		10	18,65
Material Cerâmico	29,09	29,6	35,6	20,8	9	34	48,15
Cerâmica Polida	0,39	-	0,1	2,5	5	1	3,06
Rocha, Solo	0,13	32	1,8	17,7	27	9	-
Outros	2,34	5	-	0,5	6	18	2,32

Fonte: Adaptado de Cabral (2007)

De acordo com Leite (2001), a composição do RCD tem influência direta na análise do comportamento do agregado no concreto. Ou seja, cada componente influenciará proporcionalmente nas características do resíduo como um todo. Rao, Jha e Misra (2007), Tavakoli e Sorousian (1996) e Zaharieva *et al.*(2003), por exemplo, observaram que a alta absorção de água do RCD é resultado do alto nível de absorção da argamassa aderida ao grão do agregado reciclado de concreto. Pode-se, portanto, dizer que quanto maior o percentual de argamassa aderida na composição do RCD, maior será a taxa de absorção do resíduo como um todo. Tam, Tam e Le (2007) verificaram que, além da alta porosidade, a argamassa contida no RCD possui ainda uma baixa densidade, o que reduz a qualidade dos concretos produzidos.

2.3 AGREGADOS RECICLADOS DE RCD

Os estudos visando a utilização de RCD como agregado na produção de concreto vêm se desenvolvendo ao longo dos últimos 40 anos, embora os primeiros relatos de sua utilização, segundo Levy (1997), remontem ao Império Romano. Segundo Khalaf e Devenny (2004), desde o final da II Guerra Mundial, com os escombros das cidades alemãs sendo britados e reutilizados na sua reconstrução, deu-se efetivamente o início do desenvolvimento da tecnologia de reciclagem de RCD.

O RCD como agregado para produção de concreto possui composição e características específicas que devem ser analisadas para tornarem este material uma alternativa em substituição ao agregado natural. Segundo Mehta e Monteiro (2008), as características mais

importantes a serem estudadas para utilização de agregados em concretos são: granulometria, absorção de água, forma, textura, resistência à compressão, módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes nos materiais.

A grande maioria dos estudos internacionais referenciados neste trabalho utilizou o resíduo de concreto (RC) como agregado reciclado, enquanto que no Brasil as pesquisas avançaram na utilização do resíduo misto (RM), composto basicamente de concreto, argamassa, cerâmica e pedras naturais, em diferentes proporções, como visto nos estudos de Cabral (2007), Leite (2001), Lovato (2003), Vieira (2003), Reis (2009), Santiago (2008), entre outros. Para qualquer tipo de agregado a variabilidade das amostras dificulta a padronização de procedimentos na predição das características dos concretos produzidos. No caso do RC, características como idade, quantidade de argamassa aderida, resistência, qualidade da zona de transição, massa específica são fatores que influenciam na qualidade dos agregados. No RM outras características como proporção e qualidade dos constituintes são fatores que mais influenciam as propriedades dos agregados obtidos.

Num estudo realizado por Yang, Du e Bao (2011), por exemplo, foram encontrados percentuais de absorção de água em resíduo de concreto e resíduo de bloco cerâmico de 4,2% e 10,2%, respectivamente. Akbarnezhad *et al.*(2011), por sua vez, afirmam que a argamassa aderida é o principal limitador ao uso do RC em aplicações mais nobres, como o concreto estrutural (atualmente, limitado a 30%, no exterior), dadas suas características como alto percentual de absorção de água e baixa densidade.

A classificação do RCD Classe A em cinza (resíduo de concreto) e vermelho (resíduo cerâmico) tem se mostrado pouco eficiente para diferenciar as propriedades físicas dos agregados reciclados, como absorção de água e massa específica aparente (ANGULO *et al.*, 2003). No entanto são importantes para definir a resistência mecânica dos agregados e, conseqüentemente, dos concretos produzidos. Possivelmente também afetam a durabilidade do concreto, governada pela porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Este cenário provavelmente se traduz no fato de que, embora se observe diversas pesquisas em andamento, no Brasil tem-se normatizado o uso de RCD apenas para base e sub-base de pavimentação (NBR 15115, ABNT, 2004), e para pavimentação e concreto sem função estrutural (NBR 15116, ABNT, 2004). Isso permite que o agregado reciclado apresente propriedades mais heterogêneas, e assim, questões relativas com a triagem do material para obtenção de materiais de maior qualidade e desempenho sejam colocadas em segundo plano.

Na Holanda, por exemplo, a normalização, incluindo a especificação internacional européia para uso dos agregados de RCD, encontra-se bastante desenvolvida, quando comparada ao Brasil. O tratamento dado ao resíduo, por exemplo, requer triagem do material classe A antes do processamento na usina de reciclagem (HENDRIKS; PIETERSEN, 2000). Nesse caso, o RCD Classe A deve ser classificado como resíduos de concreto, de alvenaria ou misto, e assim, terá aplicações distintas. Entretanto, mesmo na Holanda, apenas 1% do mercado de empresas de demolição empregam a demolição seletiva, que separa a fração concreto estrutural das demais fases, permitindo a produção de agregados reciclados que, de acordo com a normalização vigente nestes países, podem ser utilizados na produção de concretos estruturais (KOWALCZYK *et al.*, 2002).

A seguir serão discutidos com maior profundidade aspectos relacionados com a massa específica, absorção de água, textura e forma dos agregados reciclados, que são as propriedades que apresentam maior influência para produção dos concretos reciclados.

2.3.1 Massa Específica e Absorção de Água

Etxeberria (2004) afirma que as diferenças entre os agregados reciclados e naturais são potencializadas por três fatores, listados a seguir:

- tamanho do agregado: a capacidade de absorção do agregado aumenta à medida que a granulometria diminui;
- quantidade de pasta aderida: a capacidade de absorção dos agregados reciclados de concreto depende da quantidade e qualidade da argamassa aderida;
- massa específica: existe uma clara dependência entre a massa específica e a capacidade de absorção de água, provocada em grande parte pela existência de pasta aderida.

Desta forma, agregados reciclados de concreto com grande quantidade de pasta aderida terão uma baixa massa específica e uma elevada absorção de água (Rao, Jha e Misra, 2007, Tavakoli e Soroushian, 1996 e Zaharieva *et al.*, 2003). No sentido de reduzir o percentual de argamassa aderida e melhorar tais características nesse material foram propostos diversos métodos de beneficiamento, dentre esses os métodos de beneficiamento térmico, mecânico, químico e mais recentemente o beneficiamento por microondas (AKBARNEZHAD *et al.*, 2011).

A grande maioria dos estudos internacionais envolvendo o concreto reciclado utiliza o resíduo de concreto Tipo II, conforme classificação RILEM (1994) e, segundo Akbarnezhad *et al.* (2011), a argamassa aderida é responsável pela baixa densidade e pelo alto percentual de absorção de água deste resíduo. Li, Xiao e Zhou (2009) quantificaram entre 20% e 70% o percentual de argamassa no resíduo de concreto. Estes valores dependem do tamanho do grão, resistência do concreto de origem e tipo de britador utilizado no beneficiamento.

Avaliando a proporção dos constituintes do Resíduo Misto (RM) gerado no Brasil, o agregado reciclado apresenta uma grande parcela de grãos de argamassa de revestimento ou assentamento, que constituem, em média, cerca de 40% da parcela mineral do resíduo de construção e demolição, a partir de dados apresentados por Cabral (2007) (Tabela 1). Essa característica tem uma influência muito grande nas propriedades do agregado produzido, visto que, comparado com os agregados reciclados de concreto, o agregado de argamassa tende a ser menos resistente e muito mais poroso. Isto porque, enquanto a relação água-cimento dos concretos produzidos no Brasil deve ser menor que 0,6 (NBR 6118, ABNT, 2003), as argamassas que dão origem ao agregado reciclado possuem relação água-cimento da ordem de 1,0 (CARASEK, 2007). Além disso, a forma de aplicação das argamassas também promove um aumento do índice de vazios do material, aumentando assim, a porosidade e a taxa de absorção desse material.

O fato é que o agregado reciclado de argamassa possui uma capacidade de absorção de água muito maior que os agregados normalmente utilizados na indústria da construção, variando de 8-10%, contra 1% dos agregados naturais. Devido a isso, o agregado reciclado absorve parte da água de amassamento o que influenciará a relação água-cimento da mistura e reduzirá a trabalhabilidade do concreto. Pode-se, de forma simplificada, comparar características da argamassa presente nas amostras de RCD encontradas no Brasil, como alto percentual de absorção, baixa resistência mecânica e baixa densidade, com a argamassa aderida ao concreto encontrado nos estudos internacionais referenciados.

Além disso, de um modo geral, os agregados reciclados possuem massa específica menor que os agregados naturais. Segundo Cabral (2007), isso ocorre devido às características das fases constituintes do RCD empregado na sua produção, já que estas são menos densas que os agregados naturais. Estudos realizados por Brito (2005), Khalaf e Devenny (2004), Limbachya, Leelawat e Dhir (2000) mostram que os valores de massa específica são de 12 a 30% menores que a massa específica do agregado natural.

Cabral (2007), buscando uma explicação a este fenômeno, observa que devido ao fato

destes agregados (argamassa e concreto) serem constituídos em grande parte por uma matriz de cimento, este comumente se apresenta menos denso que os agregados naturais. Além disso, o autor salienta que a presença de poros nesta matriz contribui para uma redução ainda maior na densidade deste material.

Ângulo (2000), por sua vez, observou a influência do resíduo cerâmico e relacionou a massa específica e a taxa de absorção dos agregados estudados (Figura 1). Observa-se uma maior absorção de água dos materiais cerâmicos, que apresentam menor massa específica, em comparação ao resíduo de concreto/argamassa. Isso demonstra que a porosidade do material, e sua constituição influenciam diretamente os valores de absorção de água.

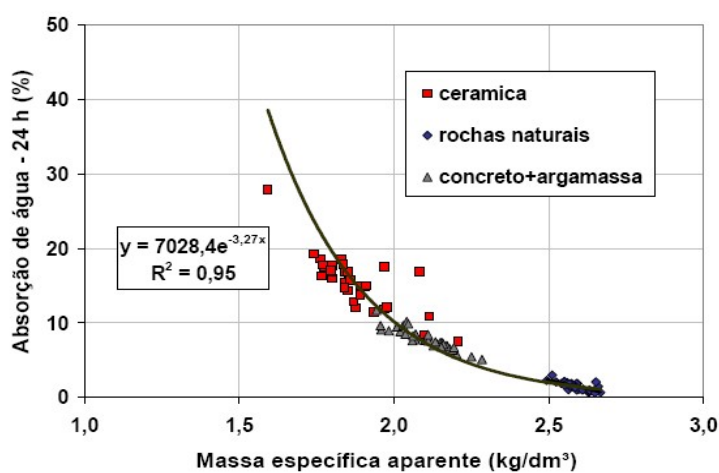


Figura 1 Relação entre a massa específica e absorção de água pelo RCD (Fonte: ÂNGULO, 2000).

Agrela *et al.* (2011) encontraram valores de absorção de água que variam de 2,1 a 14,4%, de acordo com o aumento do percentual de material cerâmico na composição do resíduo (Figura 2).

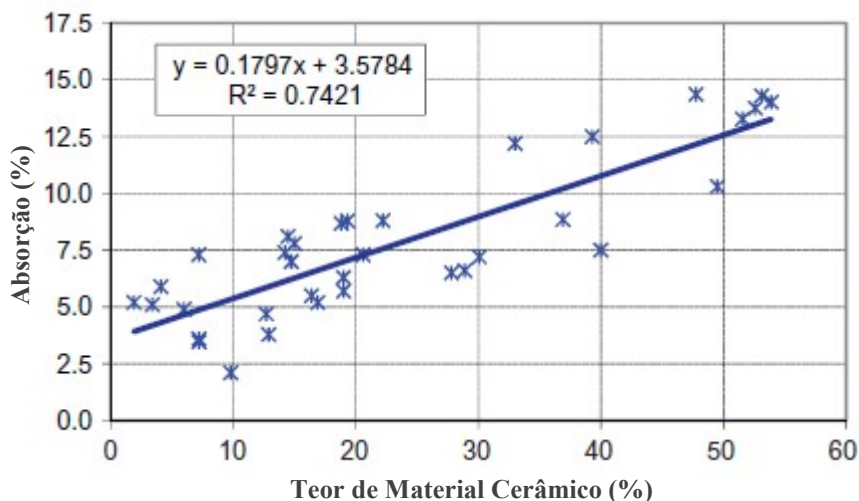


Figura 2 Relação entre o percentual de concreto e o percentual de absorção de água do resíduo (Fonte: Agrela *et al.*, 2011).

Brito (2005) concluiu, a partir de um conjunto de resultados experimentais, que a absorção de água aumenta com a diminuição da granulometria, muito por força do aumento da superfície específica, sendo esta tendência comum aos agregados reciclados e naturais.

De acordo com Barra (1996), outros fatores influenciam a absorção, como a condição inicial de umidade do agregado, tempo de permanência de contato do material com a água, se o agregado entra em contato primeiro somente com a água, ou com a pasta de cimento, entre outros. Assim, pode-se supor que, devido à elevada absorção de água dos agregados reciclados, se estes forem aplicados secos, durante o processo de mistura, parte da água ficará retida nos agregados, provocando uma diminuição da trabalhabilidade e da relação a/c efetiva e influenciando diretamente nas propriedades do concreto no estado endurecido.

No que tange à absorção de água do agregado reciclado, é importante salientar que esta não ocorre de forma linear. Bazuco (1999), Leite (2001), Reis (2009) e Santiago (2008), por exemplo, encontraram percentuais de absorção, para os agregados miúdos e graúdos reciclados, maiores que 50% para os primeiros 30 minutos de imersão do agregado em água. Agrela *et al.* (2011) encontraram um percentual de 85% da absorção relativa a 24h de imersão, nos primeiros 10 min, para o agregado graúdo de concreto. Além deste fator, Neville (1997) e Barra (1996) enfatizam que a absorção dos agregados se torna mais lenta, ou é interrompida pelo revestimento das partículas com a pasta de cimento, quando todos os materiais são misturados na betoneira para produção do concreto, e assim contribui para que não haja, na prática, absorção total. Diante disso, a compensação da taxa de absorção dos agregados reciclados pode ser feita de forma parcial, ou total, o que depende muito do percentual de substituição com o qual se está trabalhando e do tipo de concreto que se

pretende produzir, pois concretos com maiores consumos de cimento necessitarão de maiores taxas de compensação (LEITE, 2001).

2.3.2 Textura e Forma

Os agregados reciclados de concreto possuem uma superfície bastante porosa, com uma textura mais rugosa que a dos agregados naturais, que possuem uma textura geralmente lisa. Hamassaki (1996) classifica a superfície dos agregados naturais como praticamente polida, enquanto que a superfície dos agregados reciclados varia de áspera a muito áspera.

Santos (2008), citado por Reis (2009), em seus estudos com agregados mistos, usando dois tipos distintos de RCD, pôde comprovar que tanto a micrografia quanto a morfoscopia dos dois tipos de agregados reciclados confirmaram uma textura mais áspera em comparação ao agregado convencional.

Etxeberria *et al.* (2007) e Casal, Jara e Acosta (2009) concordam com Cabral (2007) quando coloca que a forma do agregado está diretamente ligada ao tipo de britador utilizado no beneficiamento e ao tipo de agregado utilizado.

Neville (1997) afirma que a forma e a textura do agregado influenciam tanto sobre a demanda d'água quanto sobre a trabalhabilidade dos concretos produzidos. Segundo o autor o efeito de travamento entre as partículas ásperas reduz a mobilidade dos agregados de forma diretamente proporcional a sua granulometria. Isto é, quanto maior a dimensão do agregado, maior este efeito de travamento. Desta forma, o autor conclui que misturas que utilizam partículas ásperas devem ter granulometria mais fina para reduzir a possibilidade de travamento entre estas partículas, e diminuir a demanda de água, cujo aumento influencia negativamente as propriedades mecânicas. Por outro lado, a textura e forma dos agregados podem influenciar positivamente as propriedades mecânicas dos concretos, promovendo um aumento na aderência mecânica (CANOVAS, 2002). Estes aspectos serão discutidos no item a seguir.

2.3.3 Teor de finos

Finos ou material pulverulento são as partículas menores que 150µm presentes na composição granulométrica dos agregados. Estas pequenas partículas possuem elevada

superfície específica e desta forma tendem aumentar a necessidade de água das misturas de concreto para uma determinada trabalhabilidade (NEVILLE, 1997). Porém, em pequenos teores têm um efeito lubrificador a mistura aumentando sua trabalhabilidade sem a necessidade do aumento da quantidade de água (ALEXANDER; MINDESS, 2005).

Para NEVILLE (1997), o aumento de 10% a 25% no teor de partículas menores que 150 μ m no agregado miúdo de pedra britada resulta em um pequeno decréscimo da resistência à compressão do concreto, tipicamente da ordem de 10%. Desse modo, constata-se que existe um limite para o percentual de finos presentes na mistura, onde, a partir deste haverá efeitos negativos a mistura produzida.

Grande parte das normas vigentes permite baixos teores de finos nas misturas de concreto, teores estes não superiores a 1% e 2%. O comitê RILEM TC 121-DRG (1994) estabelece limites entre 2 e 5% para o teor de finos máximo presente nos concretos produzidos com agregados reciclados.

Num estudo realizado por Abou-Zeid e Fakhry (2003) utilizando agregado de dolomita, variando o teor de finos nas misturas de concreto, observou-se que com o aumento do teor de finos, mantendo a relação a/c, há uma redução na trabalhabilidade da mistura. Esse comportamento foi atribuído a maior superfície específica destes finos, que promoveram uma maior demanda d'água da mistura.

No trabalho realizado por Lopes (2005), foram avaliadas misturas de concreto com agregado reciclado de RCD e verificou-se que com o aumento do teor de finos, houve um conseqüente ganho de trabalhabilidade (avaliado através do abatimento do tronco de cone) em comparação com o concreto de referência e com o concreto com agregado reciclado sem a presença de finos. O resultado pode ser atribuído ao efeito lubrificante dos finos, que reduziu o efeito de intertravamento entre os agregados, promovendo um maior abatimento sem a alteração da relação a/c. Outro resultado obtido neste estudo foi o aumento da massa específica que conseqüentemente elevou a resistência à compressão em 7%, aos 28 dias, em comparação ao concreto de referência.

2.4 CONCRETOS COM RCD

Para tornar possível a aplicação do material reciclado em concretos é necessário que o material atenda a alguns preceitos básicos. Hansen (1992) afirma que embora as

especificações variem de país para país, pode-se identificar exigências gerais a que qualquer agregado deve atender, inclusive o reciclado, tais como:

- ser suficientemente resistente para o tipo de concreto em que for usado;
- ser dimensionalmente estável conforme as modificações de umidade;
- não reagir com o cimento ou com o aço usado nas armaduras;
- não conter impurezas reativas;
- ter forma de partículas e granulometria adequadas à produção de concreto com boa trabalhabilidade.

Concretos produzidos com material reciclado normalmente apresentam características diferentes dos concretos convencionais, o que depende do tipo e qualidade do agregado reciclado. Algumas características do concreto modificadas pelo uso de reciclado são: resistência mecânica, absorção de água, porosidade e permeabilidade, retração por secagem, módulo de elasticidade, fluência e massa específica.

Com o desenvolvimento das pesquisas, já é possível concluir que a utilização de agregados reciclados em substituição aos agregados naturais, pode ser feita para obtenção de concretos com as mais variadas classes de resistência. Apenas são necessários cuidados durante o processo de produção dos concretos, para aperfeiçoar as misturas de modo a obter concretos com boa trabalhabilidade e propriedades no estado endurecido compatíveis com as necessidades de aplicação (BAIRAGI *et al.*, 1993; BRITO, 2005; FONTEBOA; ABELLA, 2007; GOMEZ-SOBERON, 2002; LEITE, 2001; TAM; GAO; TAM, 2005; ZORDAN, 1997).

2.4.1 Produção de concreto com RCD

A produção de concretos com material reciclado varia mais que as de concretos convencionais, pois além das alterações com a relação a/c e o consumo de aglomerantes, há ainda as mudanças determinadas por variações na composição e outras características físico-químicas dos agregados reciclados de RCD.

Barra (1996) afirma ser necessário utilizar um sistema de dosagem para produção de concretos com agregados reciclados que leve em consideração a influência das propriedades deste agregado sobre as propriedades do novo concreto.

Chen, Yen e Chen (2003) desenvolveram um estudo produzindo concretos com agregados reciclados de tijolos e concretos, utilizando os agregados reciclados em lotes separados de agregados graúdos reciclados, lavados e não lavados. Para os agregados lavados foram obtidos resultados de aproximadamente 90% da resistência à compressão do concreto de referência, enquanto que para os não lavados os resultados não ultrapassaram 75%. Segundo os autores a lavagem torna a superfície do agregado mais limpa permitindo uma melhor condição de aderência entre o agregado e a matriz.

Além do efeito da fração fina, outro fator a ser avaliado é a condição de umidade do agregado uma vez que, devido à elevada absorção de água dos agregados reciclados, se estes forem aplicados secos, durante o processo de mistura parte da água será absorvida pelos agregados, provocando uma diminuição da trabalhabilidade e da relação a/c efetiva (Poon *et al.*, 2004).

Agrela *et al.* (2011), Exteberria (2007), Leite (2001), Oliveira e Vasquez (1996) e Quebaud e Buyle-Bodin (1999) utilizaram a pré-molhagem dos agregados, minutos antes da mistura, em função da sua taxa de absorção, buscando minimizar esse efeito. Esse procedimento possibilitou uma melhoria na trabalhabilidade dos concretos produzidos, pois com a pré-molhagem os agregados absorviam menor quantidade de água do traço, melhorando o valor do abatimento. A pré-molhagem promove uma redução do transporte de água da pasta para o agregado.

Outro procedimento foi o utilizado por Tam, Gao e Tam (2005), intitulado mistura em duas etapas (*T SMA*³), no qual se propõe a divisão da mistura de concreto em duas fases. Segundo os autores isso reduz o efeito da porosidade do agregado reciclado nas propriedades do concreto. O procedimento consiste em misturar inicialmente os agregados secos durante 60 segundos e em seguida acrescentar metade da água e misturar por mais 60 segundos. Em seguida adiciona-se o cimento e continua a mistura por mais 30 segundos, quando então se adiciona a outra metade da água e mistura finalmente o concreto por mais 120 segundos (Figura 3). A redução do efeito da porosidade se dá, pois na primeira etapa de mistura o agregado absorverá parte da água durante os primeiros 60 segundos. Quando for adicionado o cimento, o agregado então estará com sua capacidade de absorção reduzida, proporcionando um maior percentual de água livre na mistura, melhorando assim a sua trabalhabilidade. Este

³ *T SMA* – *Two-Stage Mixing Approach* (TAM; GAO; TAM, 2005).

fenômeno foi citado por Poon *et al.* (2004) ao verificar que o abatimento inicial depende do percentual de água livre na mistura, enquanto que a perda de abatimento no tempo depende do teor de umidade do agregado.



Figura 3 Método de mistura *TSMA* (Fonte: Tam, Gao; Tam, 2005)

Vale ressaltar que no trabalho realizado por Tam, Gao e Tam (2005) não foi mencionado se houve uma correção na relação a/c em virtude desta absorção de água da primeira etapa. Pode-se supor que houve esta correção, pois, caso contrário, a água absorvida nesta primeira etapa comprometeria a trabalhabilidade e o abatimento a partir da segunda etapa. Afinal, parte da água ficaria presa no interior do agregado inicialmente seco, reduzindo assim o percentual de água livre da mistura.

Fazendo uma comparação entre o *TSMA* e o método da pré-molhagem, observa-se que ambos têm o mesmo objetivo, o de pré-umidificar o agregado, para assim reduzir a influência de sua taxa de absorção na trabalhabilidade e, conseqüentemente, nas propriedades do concreto no estado endurecido. Portanto, pode-se concluir que o *TSMA* é uma adaptação do método de pré-molhagem, sendo mais fácil de ser aplicado em canteiros de obra, uma vez que este método leva em conta os recursos disponíveis na maioria das obras correntes.

Contudo, é importante salientar que De Pawl, Thomas e Vyncke (1998), citados por Leite, (2001) e Barra (1996) afirmam que a absorção dos agregados porosos dentro das misturas de concreto no estado fresco é mais lenta, ou menor, do que quando o material encontra-se imerso em água pura. Devido a essas observações concluiu-se, ainda, que é impossível determinar com precisão as quantidades de água livre e água absorvida das misturas de concreto reciclado.

Poon *et al.* (2004) ainda colocam que a dificuldade no controle do fator água livre/cimento e da trabalhabilidade dos concretos com AR leva a um elevado grau de retração e fissuração do concreto no estado endurecido, em comparação ao preparado com agregados naturais. Além disso, Poon *et al.* (2004) reportam que a utilização de agregado graúdo reciclado (AGR) na condição saturado superfície seca tende a exsudar a mistura durante a

moldagem, devido a grande quantidade de água em seu interior. E que o alto grau de exsudação tende a aumentar a relação a/c nas proximidades da zona de transição, dotando esta região de uma menor resistência. Por conseqüência, a formação de uma rede de capilares durante a exsudação também poderá promover uma redução da durabilidade do concreto.

Desse modo, compensar parte da taxa de absorção do AR a partir de procedimentos como a pré-molhagem ou fazendo-se misturas em duas etapas (*T SMA*), quando não devidamente controlados, pode levar o agregado a condição de saturado superfície seca (SSS) levando a prejuízos na qualidade do concreto produzido.

Outro exemplo da necessidade de aprofundamento e controle das propriedades e característica do AR é quanto a sua rugosidade e geometria. Segundo Ravindrarajah, Loo Beng e Tam (1987), Carneiro e Quadros, (2001), Leite (2001), Zaharieva *et al.* (2003) e Tu, Chen e Hwang (2007), os agregados reciclados geralmente apresentam forma mais irregular e alongada e uma textura superficial mais áspera que os agregados naturais. Tanto a forma quanto a textura influenciam a mobilidade do agregado, que se entende como a capacidade destas partículas se movimentarem umas em relação as outras. Skalny e Mindess (1998) observaram ainda que a mobilidade do agregado afeta a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, observando que na utilização de agregados com baixa mobilidade é exigida uma maior energia para alcançar um mesmo grau de compactação.

Diante do exposto, a produção dos concretos reciclados deve considerar diversos aspectos, dentre os quais, se pode destacar: (i) aplicar um sistema de dosagem que considere as propriedades dos agregados reciclados; (ii) promover um beneficiamento adequado dos agregados reciclados, de modo a potencializar o desempenho dos concretos produzidos; (iii) considerar que o teor de finos, a taxa de absorção de água, a massa específica, a textura e forma dos agregados reciclados influenciam as propriedades do estado fresco e estado endurecido dos concretos; (iv) proceder a compensação total ou parcial da taxa de absorção dos agregados, de modo a obter misturas homogêneas, que apresentem boa trabalhabilidade.

2.4.2 Propriedades mecânicas do concreto reciclado

A diminuição da resistência dos concretos utilizando RCD está sendo alvo de muitas discussões. É muito comum encontrar resultados cujas misturas obtenham valores abaixo dos de referência. Ajdukiewicz e Kliszczewiz (2002), Gómez-Soberón (2002), Gómez-Soberón (2003), Zaharieva *et al.* (2003), Topçu e Sengel (2004), Xiao, Li e Zhang, (2005), Tu, Chen e

Zhang, (2007), Rahal (2007), Xiao e Falkner (2007), Shi-Cong (2009), Li, Xiao e Zhu (2009), Padmini (2009) e Yang *et al.* (2011) encontraram valores de resistência do concreto produzido com agregados reciclados na ordem de 5% a 30% menores que o concreto de referência, para um mesmo consumo de cimento para diversos percentuais de substituição tanto de agregados miúdos como de agregados graúdos.

Limbachiya (2000) citado por Levy e Helene (2000) afirma que o decréscimo da resistência nos concretos com agregados reciclados se dá, principalmente, devido à alteração da relação água/cimento (a/c). Zaharieva *et al.* (2002) enfatizam que o aumento da relação a/c provoca diminuição das resistências, mas o acréscimo de água na mistura, em função da alta taxa de absorção dos agregados reciclados, é necessário para atingir a trabalhabilidade adequada. Segundo Leite (2001), a maior porosidade e a menor resistência dos agregados graúdos reciclados são fatores que podem influenciar na redução da resistência à compressão.

Segundo Cabral (2007), esta variação dos resultados de resistência dos concretos produzidos com agregado reciclado ocorre devido a diversos fatores, dentre esses, o autor cita: (i) o tipo de britador utilizado na produção do agregado, que influencia na forma do agregado e, conseqüentemente, no teor de vazios do concreto produzido; (ii) o tipo de cimento; (iii) a composição dos resíduos utilizados; (iv) a metodologia de substituição adotada; dentre outros.

Brito (2005) verificou que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados na produção de concretos, mantendo a curva granulométrica e a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, pode conduzir a resistências semelhantes às do concreto convencional, desde que se utilize:

- menor percentual de substituição de agregados naturais por reciclados;
- menor teor de substituição de agregados finos reciclados, em detrimento de agregados grossos reciclados;
- agregados com melhores características e menor quantidade de impurezas;
- concretos de menor classe de resistência;
- aditivos, de modo a compensar as piores características dos agregados reciclados.

A resistência da matriz cimentícia também influencia nos resultados de resistência, além dos fatores citados por Cabral (2007). Neville (1997) coloca que no caso de concretos com agregados leves, que apresentam alta porosidade e baixa resistência como os agregados

reciclados, esta influência ocorre quando a matriz é menos resistente que o próprio agregado e este último não exercerá grande influência na resistência mecânica do concreto, uma vez que a ruptura possivelmente ocorrerá na matriz, sendo esta o elo mais fraco do sistema. Entretanto, quando a matriz é mais resistente que o agregado, a situação se inverte e o agregado passa a exercer uma maior influência sobre a resistência do concreto, e sua ruptura possivelmente ocorrerá pelo agregado. Esta situação é análoga a ocorrida no concreto de alto desempenho (CAD), pois devido à grande resistência da matriz, característica deste tipo de concreto, que se aproxima ou mesmo ultrapassa a do agregado, isso faz com que a ruptura se dê geralmente no agregado (Figura 4).

Katz (2003) encontrou, para altas relações a/c (0,60 e 0,75), resistências próximas a do concreto de referência, para percentuais de substituição de até 75% do agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado. Vázquez *et al.* (2006) constataram, a partir de vários trabalhos experimentais, que para uma taxa de substituição de 100% de agregados gráudos, a diferença de resistência é da ordem dos 20%, enquanto que, para substituições de até 50% as diferenças se situam entre 2 e 15%. Esta diferença pode atingir valores inferiores a 5% quando a taxa de substituição é limitada entre 20 a 30%. Etxeberria *et al.* (2007) encontraram diferenças entre 20 a 25% nas resistências à compressão de concretos com 100% de substituição de agregados gráudos, para a mesma relação a/c e quantidade de cimento do concreto de referência.

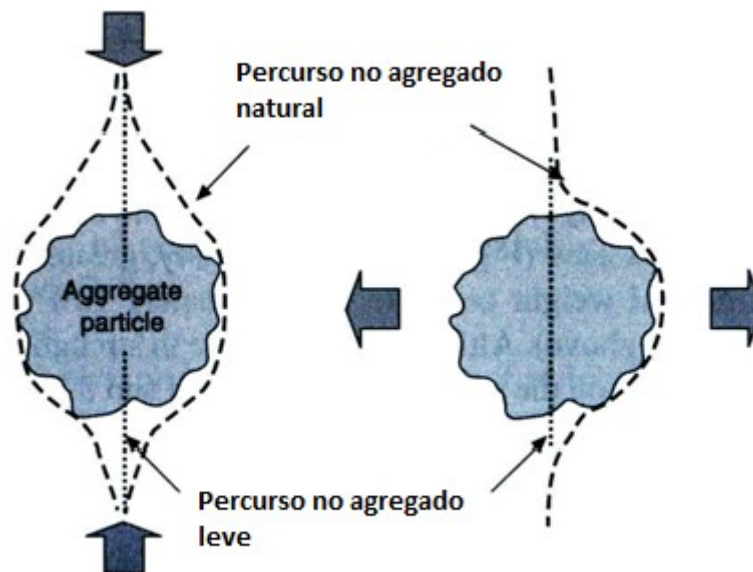


Figura 4 Percurso da fissura nos agregados leve e natural (Fonte: Newman e Owens, 2003)

Rahal (2007) obteve resistências à compressão de concreto com agregados graúdos reciclados de cerca de 90% da obtida no concreto de referência, tendo sido mantidas as proporções de mistura e a trabalhabilidade. A trabalhabilidade foi mantida à custa de um aumento da relação a/c, tendo sido verificado ainda uma evolução de 3 e 5% da resistência dos 28 para os 56 dias para o concreto de referência e concretos com agregados graúdos reciclados, respectivamente.

Rao, Jha e Misra (2006) encontraram resistências do concreto com AGR próximo ao convencional, para substituições de até 100%, desde que o fator a/c não ultrapasse 0,55. Porém, para um fator a/c de 0,40 a resistência cai para 75% em relação à resistência do concreto de referência. No mesmo estudo, o autor verificou uma queda de 15-20% na resistência à tração em relação a resistência obtida pelo concreto de referência com 100% de substituição do agregado.

Em relação à utilização de agregados finos reciclados na produção de concretos, Evangelista e Brito (2006) concluem que a resistência à compressão não parece ser afetada significativamente pelo percentual de substituição de agregados finos, pelo menos quando esta taxa não ultrapassa os 30%. Contudo, os autores enfatizam que estes resultados foram obtidos com agregados finos produzidos em laboratório, com granulometria e britagem controladas, sendo por isso previsível que agregados finos reciclados, obtidos de forma convencional tenham impurezas que reduzam o desempenho do concreto.

Segundo Evangelista (2007), Gonçalves (2007) e Leite (2001), a textura e a forma do agregado têm uma grande influência nas propriedades mecânicas do concreto reciclado, sendo mais intensa na resistência à tração que na compressão, especialmente quando se quer obter concretos de alta resistência. Quanto maior a rugosidade do agregado, maior a superfície de contato da pasta com o agregado e, portanto, há uma melhor aderência física e mecânica na zona de transição. A aderência mecânica, que permite a união em escala macroscópica, depende do estado superficial do agregado. É maior quanto maior for a rugosidade de sua superfície. Sendo assim, os agregados provenientes de processo de trituração proporcionam uma maior aderência e, por conseguinte, uma maior resistência à tração do concreto produzido, sendo amplamente utilizado em pavimentos de aeroportos e estradas (CANOVAS, 2002). No caso do concreto produzido com agregados graúdos reciclados, a sua maior rugosidade superficial faz com que o valor de resistência à tração seja afetado pela taxa de substituição de agregados naturais pelos reciclados, como acontece para a resistência à compressão. Assim, quando se compara um concreto convencional com um concreto

reciclado, com a mesma relação a/c, pode-se obter valores inferiores de resistência à tração para o último. Contudo, quando a comparação é feita entre concretos de iguais resistências à compressão, a correspondente resistência à tração tende a tomar valores superiores no concreto com agregados reciclados Gonçalves (2007).

De acordo com Leite (2001), o material reciclado possui maior área específica, contribuindo com maior área de aderência entre a argamassa e o agregado. Além disso, o material promove maior absorção da pasta de cimento pelos poros superficiais do agregado, quando comparado ao material natural usualmente empregado. Este fato pode proporcionar maior precipitação dos cristais de hidratação nos poros superficiais do agregado, permitindo maior fechamento da zona de transição do concreto, tornando a matriz e o agregado um bloco único de material, o que contribui para melhorar o desempenho final do concreto. Para o agregado miúdo reciclado, propriedades como maior rugosidade, que melhora a aderência, granulometria mais contínua e maior quantidade de finos, que diminuem a segregação, ajudam no efeito de preenchimento dos vazios, contribuindo para melhorar a resistência à compressão dos concretos com esses agregados.

Vázquez *et al.* (2006) observaram que, para a substituição total de agregados graúdos naturais por reciclados, as perdas na resistência à tração podem variar entre 6 e 20%. Mas, quando a taxa de substituição é inferior a 50%, as diferenças se tornam imperceptíveis.

Xiao, Li e Zhang, (2006) estabeleceram, a partir de resultados experimentais uma relação entre as resistências à tração e compressão (Figura 5) e observaram que há um ganho de resistência à tração com o aumento da resistência à compressão. Evangelista (2007) observou uma perda em ambas as propriedades com o aumento do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado, chegando a 10% e 30% de perda para a resistência à compressão e resistência à tração do concreto com 100% de substituição comparado ao concreto de referência, respectivamente.

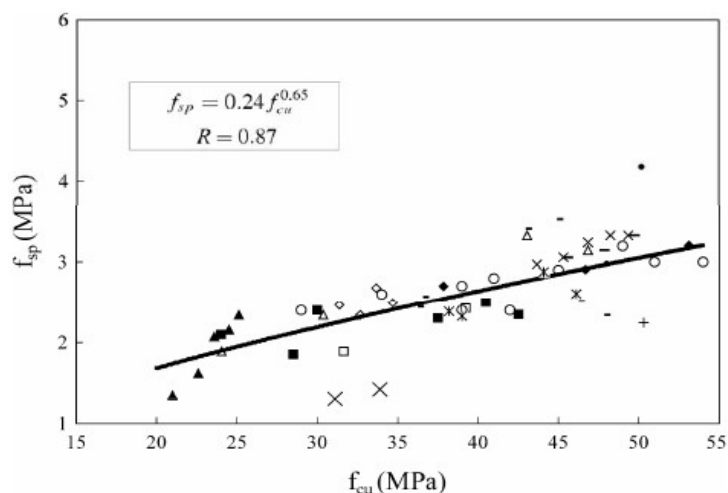


Figura 5 Relação entre a Resistência à Compressão e a Resistência à Tração de concreto reciclado (Fonte: XIAO; LI; ZHANG, 2006)

Vázquez *et al.* (2006) reportaram uma série de trabalhos experimentais, concluindo que o concreto com agregados reciclados apresenta uma diferença de módulo de elasticidade (sempre inferior quando comparado com concreto convencional) de:

- 10%, para taxas de substituição, em volume, de agregados graúdos naturais por reciclados de 50%;
- 20%, para taxas de substituição, em volume, de agregados graúdos naturais por reciclados de 100%;
- até 80%, quando existe substituição total, em volume, tanto da fração fina como da fração graúda.

Estes autores afirmam que substituições de até 20% afetam muito pouco o valor do módulo de elasticidade.

Xiao, Li e Zhang (2006) estabeleceram uma relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto (Figura 6) e observaram que há um aumento no valor do módulo de elasticidade com o aumento da resistência à compressão. Evangelista (2007) observou uma perda em ambas as propriedades, chegando a 10% e 18% para a resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto com 100% de substituição, comparado ao concreto de referência, respectivamente.

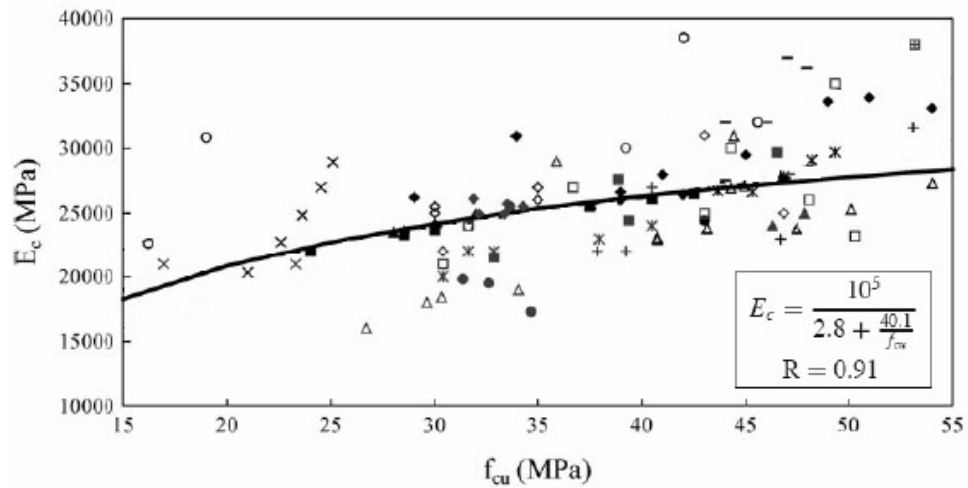


Figura 6 Relação entre o Módulo de Elasticidade e a Resistência à Compressão (Fonte: XIAO; LI; ZHANG, 2006)

Desta forma o estudo da produção do concreto reciclado deve ser aprofundado no sentido de minimizar os efeitos das características do agregado na mistura com o objetivo de promover um ganho na trabalhabilidade, mas, simultaneamente, minimizando o prejuízo sobre as resistências mecânicas.

3 TRABALHABILIDADE

3.1 TRABALHABILIDADE E REOLOGIA

Concreto pode ser considerado como um concentrado de partículas sólidas (agregados) imerso em um líquido (pasta de cimento). Em escala microscópica o concreto flui como um líquido e, quando um esforço cortante é aplicado num líquido, um gradiente de velocidade é induzido neste líquido. A proporcionalidade entre este esforço cortante e o gradiente de velocidade é denominado viscosidade (WONG *et al.*, 2001).

Segundo Ferraris (1996), a maioria das equações idealizadas para representar suspensões concentradas, como o concreto, tenta relacionar o concentrado com a sua viscosidade, ou relacionar a tensão de cisalhamento (τ) com a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), considerando apenas um valor para a viscosidade (μ - viscosidade plástica) em todo o sistema. Porém, para o concreto, devido à complexidade da suspensão (agregados em suspensão na pasta de cimento), esta hipótese não é válida já que a mistura (concreto) não se comporta como um único fluido, devido às interações entre os agregados, entre si, e a pasta. Portanto, para o concreto, um segundo fator deve ser considerado: a tensão de escoamento (τ_0), que fisicamente representa uma energia de ativação que estimula o início do movimento (Fluidez) do líquido.

Graficamente a tensão de escoamento (τ_0) é representada pelo ponto de intersecção entre a curva de viscosidade plástica (μ), plotada no gráfico de tensão de cisalhamento (τ) “versus” taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), com o eixo que representa a tensão de cisalhamento (Figura 7).

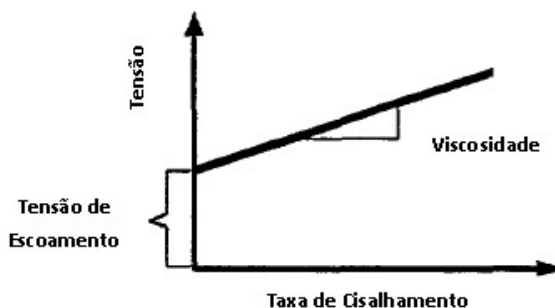


Figura 7 Representação Gráfica da tensão de escoamento (Fonte: FERRARIS, 1996)

Segundo Wong *et al.* (2001) o líquido que obedece esta curva é denominado líquido

de Bingham. Desta forma várias curvas relacionando a tensão de escoamento e taxa de escoamento foram idealizadas. Todas elas podem ser descritas pelas equações: Newtonianas, da lei de Power, Bingham, Herschel-Buckley, Von Berg/Ostwald-de Waele, Eyring, Robertson-Stiff e Atzeni *et al.*

Porém, de acordo com Tattersall (1976) e Struble (1994) citados por Ferraris (1996), para fluídos como o concreto, o modelo adotado deve considerar a tensão de escoamento. Desse modo, as equações que consideram pelo menos dois parâmetros, sendo um deles a tensão de escoamento, são as equações de Bingham e Herschel-Buckely. Na equação de Herschel-Buckely, entretanto, existe um parâmetro “n” que só é determinado a partir da plotagem da curva do fluído. Portanto, a equação que melhor representa a reologia do concreto é a equação de Bingham, devido aos parâmetros usados serem fatores que podem ser mensurados de forma independente. Além disso, segundo Tattersall (1976), citado por Ferraris (1996), a fluidez do concreto, na prática, parece obedecer muito bem a esta equação.

Várias terminologias são utilizadas para conceituar o concreto no estado fresco: coesão e fluidez são alguns destes termos utilizados para descrever o comportamento do concreto. Kosmatka *et al.* (1994), citado por Wong *et al.* (2001), utilizam três termos ao se referir a reologia do concreto: trabalhabilidade, consistência e plasticidade, conceituados desta forma:

- trabalhabilidade: é a medida da dificuldade ou facilidade de moldar, consolidar e dar acabamento ao concreto;
- consistência: está relacionado à capacidade do concreto fresco de fluir;
- plasticidade: define a moldabilidade do concreto.

Estas terminologias são definidas a partir de percepções qualitativas do observador e não do comportamento físico do material. Tattersall (1976), citado por Ferraris (1996), resumiu claramente a terminologia associada à trabalhabilidade do concreto classificando-a em três grupos:

- Classe I – Qualitativa: trabalhabilidade, fluidez, compactabilidade, estabilidade, acabamento, bombeabilidade, consistência, entre outros. Conceitos a serem utilizados apenas como forma de descrição generalizada sem atentar para a quantificação da propriedade;

- Classe II – Quantitativa empírica: abatimento, fator de compactação, VeBe, entre outros. A ser usado como uma forma simples de quantificar a trabalhabilidade sob circunstâncias particulares;
- Classe III – Quantitativa fundamental: viscosidade e tensão de escoamento. A ser utilizada em conformidade com a norma britânica.

A norma ASTM C 125 (ASTM, 1993) define a trabalhabilidade como a energia necessária para manipular o concreto no estado fresco, sem perda considerável da homogeneidade. O ACI 116R (ACI, 1990) descreve como a facilidade e homogeneidade com que o concreto no estado fresco pode ser manipulado desde a mistura até o acabamento. De acordo com Neville (1997), para se chegar a essa definição é necessário considerar a forma de adensamento, seja por apiloamento ou por vibração. Esse processo consiste na eliminação do ar aprisionado na mistura até se obter um material com a maior homogeneidade possível. Para Coutinho (1997), um concreto pode ser trabalhável com determinado equipamento e não o ser com outro, ou pode ser trabalhável só em certas condições de lançamento nas fôrmas devido a, por exemplo, o efeito parede e o espaçamento entre as armaduras.

Desta forma a noção de trabalhabilidade depende tanto da interpretação visual quanto física, e, segundo Neville (1997), o componente físico mais importante da trabalhabilidade é a consistência. Esse termo traduz propriedades intrínsecas da mistura fresca, relacionadas com a mobilidade da mistura e a coesão entre as partículas que a compõem, tendo em vista a uniformidade e a compacidade do concreto, além do bom rendimento durante a execução da estrutura. Se a mistura não apresenta boa trabalhabilidade, o adensamento fica comprometido, afetando a resistência do concreto.

3.2 PARÂMETROS QUE INTERFEREM NA TRABALHABILIDADE

Para Ferraris (1996) um dos aspectos relacionados à trabalhabilidade do concreto é a dificuldade na predição de fluidez da mistura a partir das propriedades dos seus constituintes (pasta de cimento e argamassa) ou das características da mistura (relação a/c, proporção e tipo de agregados, tipo de cimento e dosagem). Segundo o autor, dentre as dificuldades está a grande variação granulométrica dos agregados.

A trabalhabilidade do concreto pode ser influenciada tanto por seus materiais componentes como pelas condições sob as quais o concreto foi produzido. A lista de fatores

inclui: quantidade e finura do cimento, tamanho, angulosidade, textura superficial e proporção dos agregados, quantidade de ar incorporado, tipo e quantidade de aditivos e adições, temperatura do concreto, tempo e método de mistura e o tempo desde que o cimento e a água entraram em contato (FERRARIS, 1996).

Segundo Neville (1997), o principal fator que influencia na trabalhabilidade dos concretos é o teor de água da mistura. Se este parâmetro e outras proporções da mistura foram fixados, a trabalhabilidade é influenciada pelo tamanho máximo dos agregados, sua granulometria, forma e textura. Outro fator a ser considerado é a massa específica dos agregados já que, quando usados materiais com massas específicas diferentes, segundo Neville (1997), as proporções da mistura devem ser verificadas com base nos volumes absolutos de cada fração de tamanho. Para o autor, dos três fatores, relação água/cimento, relação agregado/cimento e teor de água, apenas dois são independentes. Por exemplo, se a relação agregado/cimento é reduzida, o teor de água deve ser aumentado para que o fator água/cimento seja mantido constante.

Segundo Wong et al (2001), para uma dada trabalhabilidade do concreto, um aumento na proporção dos agregados normalmente requer um aumento também no teor de água para que a mesma trabalhabilidade seja mantida. Segundo Canovas (2002), o teor de água pode ser reduzido, mantendo a mesma trabalhabilidade, quando agregados angulares forem substituídos por agregados arredondados. Para o autor, agregados britados, devido as suas partículas angulosas e alongadas, produzem concretos com menor trabalhabilidade e, portanto, requerem um maior teor de pasta. Agregados com alto percentual de absorção quando misturados, caso esta absorção não seja considerada, parte da água será absorvida pelo agregado ao final da mistura, reduzindo a sua trabalhabilidade.

3.3 FORMAS DE MEDIÇÃO DA TRABALHABILIDADE

Tattersal e Banfill (1993), citados por Wong et al (2001), analisaram os métodos existentes de avaliação da trabalhabilidade e os classificaram em dois grupos: (i) ensaios empíricos, e; (ii) ensaios *rigorosamente definidos*⁴. Segundo os autores a maioria dos ensaios avaliados são empíricos, fornecendo resultados que só podem ser interpretados no contexto da

⁴ Texto original de Wong et al. (2001, p.8) “[...]They classified the technologies into two groups: empirical and rigorously defined.[...]”

metodologia utilizada. Desta forma, resultados de diferentes ensaios não podem ser comparados. Outra deficiência destes ensaios é que estes medem apenas um dos fatores relacionados com a reologia do material, ou a viscosidade, ou a tensão de cisalhamento, ou seja, isso que representa que estão numa condição singular de operação.

Já os ensaios *rigorosamente definidos* utilizam princípios da reologia na avaliação da trabalhabilidade dos concretos. Segundo os autores o concreto fresco é avaliado como um fluido viscoso através do modelo de Bingham.

Ferraris (1996) também dividiu os métodos de avaliação da trabalhabilidade dos concretos em dois grupos:

- GRUPO 1 - Testes de um fator: estes medem apenas um fator ou valor reológico e, na maioria dos casos, o parâmetro fundamental não pode ser calculado a partir do fator medido, este é apenas associado para ser relacionado. Os ensaios são divididos em dois subgrupos:
 - relacionados à tensão de escoamento, pois medem a capacidade do concreto iniciar o fluxo, dentre eles: abatimento, Bola de Kelly, Viscosímetro e K-slump;
 - relacionados à viscosidade plástica, pois medem a capacidade da mistura fluir após a tensão aplicada ultrapassar a tensão de escoamento. Nesse subgrupo pode haver ainda uma subdivisão dos ensaios quanto à forma de aplicação da tensão, da seguinte forma:
 - a tensão é aplicada por vibração: tempo VeBe, Aparato LCL, Aparato de Teste de Vibração;
 - a tensão é aplicada por gravidade: Cone *flow*, Testes de preenchimento (Caixa em L, ou Caixa em U), Aparato *Orimet*.
- GRUPO 2 - Testes de dois fatores: os valores medidos por estes testes não são um cálculo direto da viscosidade e da tensão de escoamento. Os fatores medidos são indiretamente relacionados a estes de forma não trivial. Dentre os ensaios tem-se o Teste de Tattersall, aparato Bertta e reômetro BTRHEOM.

3.4 TRABALHABILIDADE DOS CONCRETOS COM RCD

De maneira geral, os concretos produzidos com agregado reciclado possuem menor trabalhabilidade que os concretos convencionais, para uma mesma relação teor de materiais secos/pasta. Isto possivelmente ocorre devido a maior absorção do agregado reciclado que torna a mistura mais seca, e assim menos trabalhável.

Rashwan e Abourizk (1997), citados por Leite (2001), afirmam que a trabalhabilidade de concretos com agregados reciclados não depende principalmente da quantidade de água existente na mistura, como é o caso do concreto convencional, mas sim da forma e da textura do agregado reciclado utilizado. Estas duas propriedades proporcionam, principalmente, um maior travamento das misturas de concreto, dificultando a mobilidade das partículas, que necessitarão de maior quantidade de pasta para vencer esta barreira. Esta conclusão também foi obtida nos estudos realizados por Rakshvir e Barai (2006).

Hansen e Narud (1983), citados por Leite, (2001), concluíram que concretos produzidos com agregados reciclados necessitam de 5% a mais de água livre para atingir os mesmos índices de abatimento dos concretos convencionais. Além disso, observaram que a forma mais angular e superfície mais áspera do agregado reciclado são responsáveis por esta maior necessidade de água livre.

Topçu e Sengel (2004) avaliaram a influência do percentual de substituição do agregado gráudo natural pelo agregado gráudo reciclado de concreto no abatimento de concretos com 16 MPa (C16) e 20 MPa (C20) em relação a um concreto de referência (Ref.10). O autor verificou que com o aumento do teor de substituição há uma redução no abatimento (Figura 8), devido a uma redução da quantidade de água livre, em função da absorção do agregado, o que se reflete no aumento de consistência.

Topçu e Sengel (2004) constataram uma redução de 15 a 25% na trabalhabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, medida pelo abatimento de tronco de cone, para um percentual de 100% de substituição. Já Bairagi, Ravande e Pareek (1993) encontraram percentuais de redução bem maiores (33% a 50%), sendo que esta perda ficou mais evidenciada nos primeiros 15 minutos após a mistura dos materiais.

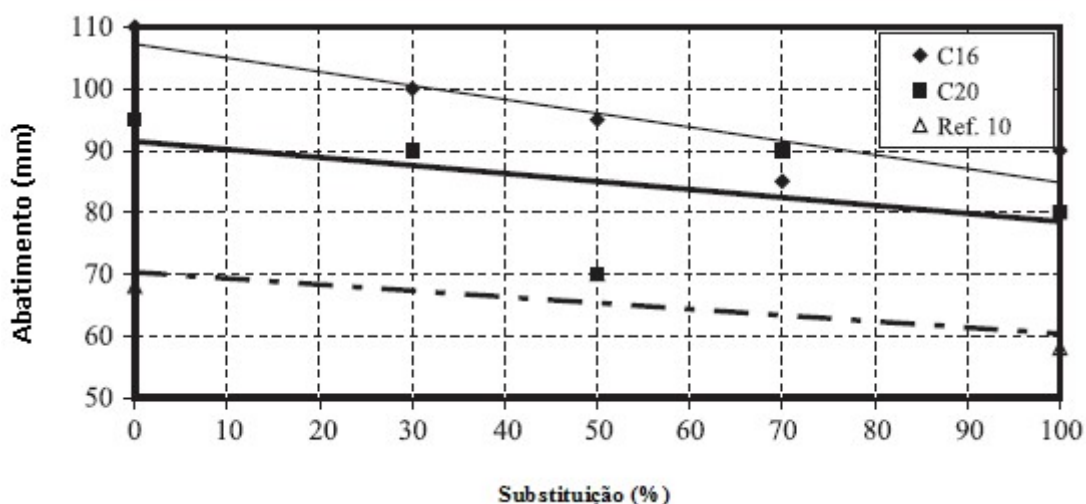


Figura 8 Relação abatimento de tronco de cone e teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto, onde: C16 (concreto com $f_{ck}=16\text{Mpa}$), C20 (concreto com $f_{ck}=20\text{Mpa}$) e Ref.10 (concreto referência) (Fonte: TOPÇU;SENGEL 2004)

Yaprak *et al.* (2011) avaliaram a influência da substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado de concreto (FRA) nos percentuais de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 100% (Figura 9). Observa-se uma redução no abatimento com o aumento no percentual de substituição. Para este estudo, não houve compensação da taxa de absorção do agregado e a mesma relação a/c e o mesmo volume de superplastificante foram admitidos para todas as misturas. Este procedimento provavelmente potencializou o resultado obtido, haja visto que, com o aumento da percentual de substituição, há o conseqüente aumento da demanda d'água dos agregados, reduzindo assim a relação a/c efetiva, reduzindo a trabalhabilidade das misturas.

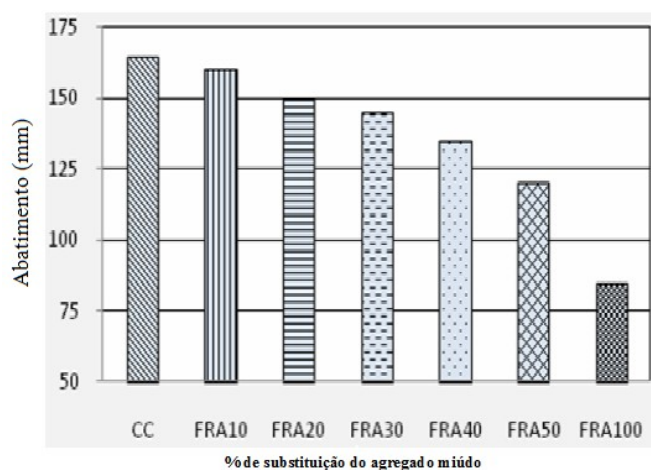


Figura 9 Abatimento em função do percentual de substituição do agregado miúdo reciclado, onde: CC (concreto referência), FRA"X" (concreto com teor de "X"% de substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado de concreto) (Fonte: YAPRAK *et al.*, 2011)

Malesev, Radonjanin e Marinkovic (2010) avaliaram a trabalhabilidade, através do abatimento de troco de cone, imediatamente após a mistura e após 30 minutos, em traços com 0% (R0), 50% (R50) e 100% (R100) de substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto, fazendo a compensação do percentual de absorção de água dos agregados (Tabela 2). Observa-se uma perda de trabalhabilidade com o aumento do percentual de substituição para o abatimento imediato.

Tabela 2 Resultados de abatimento para diferentes traços com agregado reciclado de concreto

Traço	Abatimento (mm)	
	Imediato	Após 30min.
R0	160,0	100,0
R50	145,0	85,0
R100	110,0	90,0

R0: Concreto referência
R50: Concreto com teor de substituição de 50% do agregado graúdo natural por reciclado de concreto
R100: Concreto com substituição total do agregado graúdo natural por reciclado de concreto

Fonte: Malesev (2010)

Yang *et al.*, (2011) testaram a trabalhabilidade, medida pelo abatimento, de traços de concreto reciclado utilizando variados percentuais de resíduo de concreto (RC) e resíduo cerâmico (RCer), conforme observa-se na Tabela 3. Com o aumento do percentual de RCer, há uma conseqüente redução no abatimento. Segundo os autores esta redução se torna mais acentuada para o concreto com resíduo cerâmico na ordem de 50%; pois, dada a sua menor resistência, este está mais propenso a se quebrar durante o processo de mistura, o que altera a configuração granulométrica e aumenta a capacidade de absorção do agregado, reduzindo o teor de água livre da mistura.

Tabela 3 Abatimento para diferentes traços com substituição do agregado natural por agregado reciclado de concreto e agregado reciclado cerâmico

Traço	Abatimento (mm)
RC 0%	33
RCer20% RC 80%	20
Rcer50% RC50%	10
RC100%	24

Fonte: YANG *et al.*, (2011)

De acordo com Topçu e Sengel (2004), para concretos produzidos substituindo apenas o agregado graúdo houve uma necessidade de 5% de água adicional para se obter o mesmo abatimento que o concreto de referência. Por outro lado, quando substituídos ambos os agregados, a necessidade de água aumentou para 15%. Este mesmo resultado, para a substituição de 100% de ambos os agregados, foi encontrado por Topçu e Sengel (2004) e foi

atribuída a maior absorção do agregado e a sua textura mais áspera.

Numa análise mais profunda, Larbi (200) citado por Gayarre (2008) atribui a perda da trabalhabilidade com o tempo à quebra do agregado graúdo durante o processo de mistura. Segundo o autor, durante o processo de mistura a quebra do agregado eleva o percentual de absorção do agregado, reduzindo assim a trabalhabilidade da mistura. Decorrido esta mudança, as curvas do concreto de referência e do concreto reciclado avançam paralelamente (Figura 10). Yang *et al.* (2011) também atribui a perda de trabalhabilidade, dentre outros aspectos, à fragilidade do agregado reciclado de concreto (argamassa aderida) e cerâmico, que apresentam a possibilidade de quebra durante a mistura.

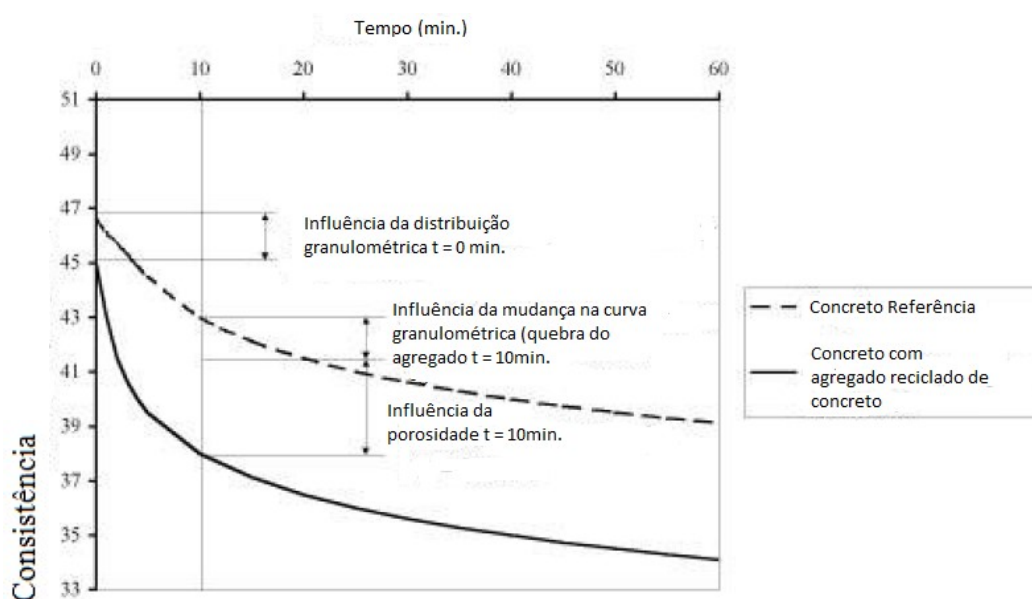


Figura 10 Influência da granulometria na consistência do concreto com agregado graúdo reciclado (Fonte: LARBI, 2000, citado por GAYARRE, 2008)

A maioria das pesquisas com concretos reciclados utiliza o abatimento do tronco de cone como medida de trabalhabilidade (FONTEBOA; ABELLA 2007; LEITE, 2001; MALESEV; RADONJANIN; MARINKOVIC, 2010; TOPÇU; SENDEL, 2002; TU; CHEN; HWANG, 2007; YANG *et al.*, 2011; YAPRAK *et al.*, 2011) No entanto, Leite (2001) fez uma avaliação do método quando utilizado para medir a trabalhabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados. Segundo a autora, o ensaio de abatimento do tronco de cone pode ser considerado como um índice qualitativo da estabilidade e da fluidez da mistura de concreto no estado fresco. Apesar de bastante utilizado, são observadas nele dispersões muito elevadas, com valores que chegam a cerca de 70 % (DURIEZ, 1961, citado por COUTINHO, 1997).

Conforme Mehta e Monteiro (2008), o ensaio de abatimento não é muito indicado para medir a consistência de misturas muito fluidas ou muito secas. Para Leite (2001) utilizar apenas o abatimento do tronco de cone para medir a trabalhabilidade das misturas de concretos reciclado não é vantajoso, uma vez que este material apresenta-se muito mais seco e com maior atrito que as misturas de concreto convencional. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o ensaio VeBe tem mais significado se aplicado para a medida de trabalhabilidade de misturas mais secas. Este ensaio mede o tempo necessário para remoldagem do concreto de uma forma tronco-cônica para a forma cilíndrica, avaliando a compactabilidade da mistura (JOHNSTON, 1984 citado por CECCATO, 1998). Seu uso permite a avaliação visual da exsudação e é um ensaio influenciado pela consistência do concreto.

Embora não existam muitos trabalhos utilizando o ensaio VeBe para avaliar a trabalhabilidade dos concretos reciclados, Leite (2001) sugere a sua utilização pois, como há uma componente dinâmica neste ensaio, talvez isso traduza melhor a trabalhabilidade do concreto reciclado, dado as características do agregado.

Nos resultados obtidos por Leite (2001) foi observado que houve uma certa uniformidade no tempo VeBe para as misturas estudadas, enquanto que o resultado do abatimento, para as mesmas misturas, teve resultados variados, mesmo com a variação da relação água/cimento (Tabela 4). Isso demonstra que o travamento provocado pela textura rugosa e pela forma irregular dos grãos do RCD é minimizado pelo ensaio dinâmico, enquanto que pelo abatimento estas características são mais evidenciadas, influenciando assim nos resultados dos ensaios.

Tabela 4 Resultados de abatimento e tempo VeBe de concretos reciclados com diferentes teores de substituição

Traço	a/c	Abatimento (mm)	Tempo VeBe
Referência	0,40	15	6,47
50%AMR	0,49	65	4,78
50%AGR	0,48	35	4,39
50%AMR	0,69	40	4,16
50%AGR	0,70	30	4,82
50%(AMR-AGR)	0,79	25	4,42
100% (AMR-AGR)	0,71	70	3,12

Fonte: Adaptado de Leite (2001)

Hansen e Narud (1983) observaram que a forma dos agregados reciclados tende a ser bastante angular em relação ao agregado natural, o que irá se refletir também na trabalhabilidade da mistura. A forma irregular e textura rugosa em conjunto prejudicam o efeito rolamento dos grãos, devido ao maior atrito entre as partículas, que influencia na

trabalhabilidade do concreto produzido. Este efeito tende a ser compensado com a adição de uma maior quantidade de água na mistura, o que ocasiona um aumento na relação a/c, e uma consequente perda de qualidade da matriz do concreto.

Cazal, Jara e Acosta (2009) avaliaram a influência de agregados naturais com diversos fatores de forma na trabalhabilidade dos concretos (Figura 11). Segundo o autor o coeficiente de forma é a relação entre o volume do agregado e a quantidade de esferas circunscritas e este volume. Logo, quanto mais próximo de 1(um) for este fator, a forma do agregado é mais próxima de uma esfera. Foram encontrados os menores valores para o coeficiente de forma/trabalhabilidade para os agregados britados, devido a maior angulosidade de seus grãos. Pode-se afirmar, segundo o estudo, que existe uma relação entre o coeficiente de forma do agregado e a respectiva trabalhabilidade do concreto produzido com o mesmo. E que esta forma depende do tipo de beneficiamento sofrido.

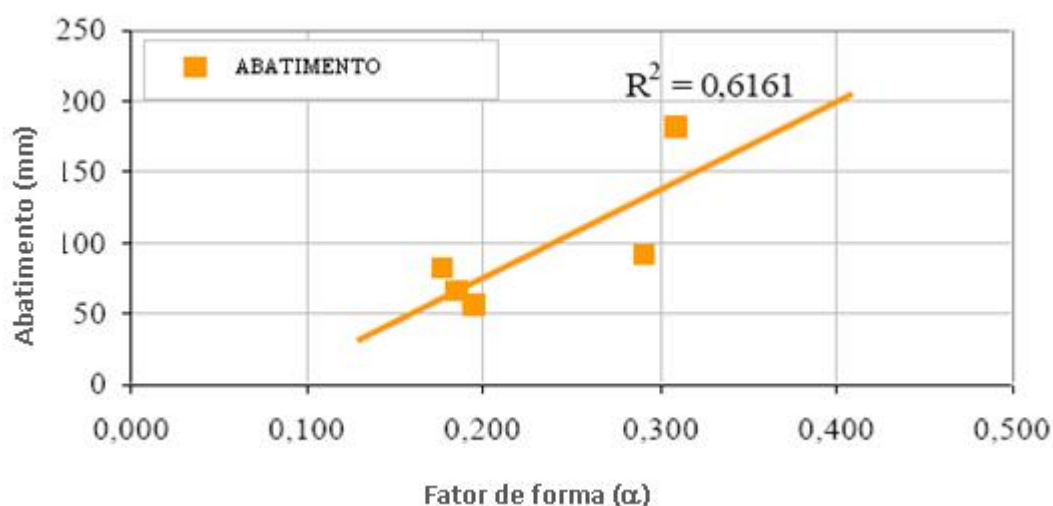


Figura 11 Relação entre o fator de forma e o abatimento (Fonte: CAZAL; JARA; ACOSTA, 2009)

Resumidamente viu-se que a textura, forma e absorção de água do RCD influenciam na trabalhabilidade do concreto produzido, implicando em variações em outras propriedades. A determinação da trabalhabilidade pelo abatimento do tronco de cone também pode não ser a mais adequada. Por isso, devem ser efetuadas outras avaliações, de modo a minimizar a influência das características dos agregados sobre a medida de trabalhabilidade dos concretos, e assim maximizar suas propriedades no estado endurecido.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este trabalho é parte integrante de um projeto de pesquisa intitulado “Controle dos parâmetros responsáveis pela variabilidade dos agregados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) com vistas à transferência tecnológica”, desenvolvido em parceria com a UFRGS, UNISINOS e UFPA. O projeto tem como objetivo investigar os parâmetros de controle da variabilidade dos agregados de resíduos de construção e demolição, de modo a desenvolver materiais de baixo impacto ambiental para aplicação na Habitação de Interesse Social. A seguir será apresentado o programa experimental desenvolvido, de modo a contribuir com o andamento desse projeto. Todo o programa experimental foi desenvolvido nos Laboratórios de Tecnologia da Universidade Estadual de Feira de Santana.

4.1 PARÂMETROS DE ESTUDO

No sentido de atingir os objetivos propostos neste trabalho foi desenvolvido um projeto experimental que contribua para o entendimento do comportamento do material reciclado em concretos produzidos com o mesmo. Desta forma, foram estudadas a trabalhabilidade dos concretos no estado fresco e a resistência à compressão dos concretos no estado endurecido, após 28 dias de cura úmida. Os parâmetros de controle desse estudo foram:

- teor de substituição do agregado miúdo: 0 – 50 – 100%;
- teor de substituição do agregado graúdo: 0 – 50 – 100%;
- taxa de compensação da taxa de absorção dos agregados reciclados: 60 – 70 – 80 – 90%.

Desse modo, foram produzidas 32 misturas de concreto reciclado mais uma mistura de referência. As variáveis de resposta foram resultados que poderiam ser medidos e que permitissem avaliar a qualidade dos concretos produzidos a partir da interação dos parâmetros fixos. Neste trabalho foram consideradas as seguintes variáveis de resposta:

- trabalhabilidade, medida a partir do ensaio de abatimento de tronco de cone, tempo VeBe e espalhamento na mesa de Graff,
- resistência à compressão axial, aos 28 dias.

4.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS

4.2.1 Coleta e Beneficiamento das Amostras do RCD

As amostras de resíduo foram obtidas de várias obras de demolição e de pontos de descarte clandestino em Feira de Santana/BA e transportadas para o Laboratório de Materiais de Construção da UEFS.

Todo resíduo foi beneficiado antes da sua utilização. Como o RCD era misto, o mesmo passou por uma análise gravimétrica, para separação das fases inertes (concreto, argamassa, material cerâmico, pedras naturais, entre outros), e retirada das impurezas, como papel, papelão, plásticos, madeira, gesso, materiais metálicos, entre outros.

A fase argamassa, objeto deste trabalho, foi separada e submetida à britagem e ao peneiramento para obtenção dos agregados graúdo e miúdo. A britagem do resíduo de argamassa foi realizada em laboratório, utilizando um britador de mandíbulas da marca PRINCEMAQ®, linha C M-170, modelo 2015C (Figura 12a). Depois de concluída a fase de britagem iniciou-se o peneiramento que foi executado manualmente (Figura 12b). O agregado miúdo consiste em todo material passante na peneira de 4,8mm e o agregado graúdo todo material passante na peneira de 25mm e retido na peneira de 4,8mm.



(a)



(b)

Figura 12 Beneficiamento do resíduo de argamassa para obtenção dos agregados miúdo e graúdo:
a) Britador de mandíbulas; b) Peneiramento manual dos agregado

4.2.2 Cimento

Para a produção dos concretos foi utilizado o Cimento Portland Composto com Pozzolana (CP II Z), Classe 32 MPa. Este tipo de cimento foi escolhido por ser comumente comercializado na região. O cimento foi avaliado de acordo com os métodos os prescritos na

NBR 11578 (ABNT, 1991), e os resultados apresentados na Tabela 5 atendem aos limites especificados por essa norma.

Tabela 5 Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP II Z 32

Propriedade avaliada – Método de ensaio	Resultado obtido	Limites NBR 11578 (ABNT, 1991)
Resíduo na peneira #75 μ m - MB 3432 (ABNT, 1991)	0,5%	$\leq 12,0\%$
Início de pega NBR – NM 65 (ABNT, 2003)	2:55 h	$\geq 1h$
Fim de pega NBR – NM 65 (ABNT, 2003)	5:05 h	$\leq 10h$
Expansibilidade a frio - MB 3435 (ABNT 1999)	0,0	$\leq 5,0$ mm
Resistência a compressão - NBR 7215 (ABNT, 1996)	Idade (dias) 3	$10,0 \geq$ MPa
	7	$20,0 \geq$ MPa
	28	$32,0 \geq$ MPa
Massa Específica - NBR NM 23 (ABNT, 2001)	2,90 g/cm ³	-

4.2.3 Agregados

Para produção dos concretos, como agregados naturais, foram utilizados: uma areia quartzosa, oriunda do Rio Jacuípe e uma brita de origem granítica, da Pedreira Rio Branco, ambos do Município de Feira de Santana/BA. Os agregados reciclados de argamassa (ARArg) foram obtidos como descrito no Item 4.2.1.

Todos os agregados foram caracterizados conforme os métodos prescritos na NBR 7211 (ABNT, 2005), com exceção da determinação da taxa de absorção de água dos agregados reciclados, que foi feita pelo método proposto por Leite (2001), adaptado por REIS (2009). Além disso, as massas específicas dos agregados reciclados foram determinadas conforme o método estabelecido por Leite (2001).

Os resultados de caracterização dos agregados miúdos e graúdos utilizados estão apresentados na Tabela 6 e na Tabela 7, respectivamente.

Observa-se que os agregados miúdos e graúdos reciclados apresentaram redução na massa específica de 3% e 10%, respectivamente, com relação aos agregados naturais, enquanto na massa unitária as reduções foram de 3% e 15%, respectivamente. Isto está diretamente associado ao aumento da porosidade dos grãos do agregado reciclado. Como esse material é constituído essencialmente de argamassa há uma tendência dos agregados tanto graúdos, quanto miúdos apresentarem resultados muito próximos de massa específica. Mas, no caso da massa unitária, como essa propriedade está muito relacionada com a forma dos grãos e os espaços vazios existentes entre eles. Era de se esperar que sua redução no agregado

gráudo reciclado em relação ao gráudo natural fosse bem maior que no caso do agregado miúdo. Como resultado da porosidade há um aumento da absorção do agregado reciclado que passa a ser cerca de 7 e 14 vezes maior que o agregado miúdo e gráudo natural, respectivamente. No entanto, por ser constituído totalmente de argamassa reciclada, o agregado reciclado apresentou valores de absorção menores que aqueles verificados para agregados reciclados que possuem, além de argamassa, concreto e cerâmica, em sua composição. Para estes, os valores de absorção variam de 7,5% a 12,1% (SANTIAGO, 2010; CHEN *et al.*, 2003). Isso porque os agregados oriundos da moagem de material cerâmico apresentam absorção da ordem de 12% (BRITO, 2005).

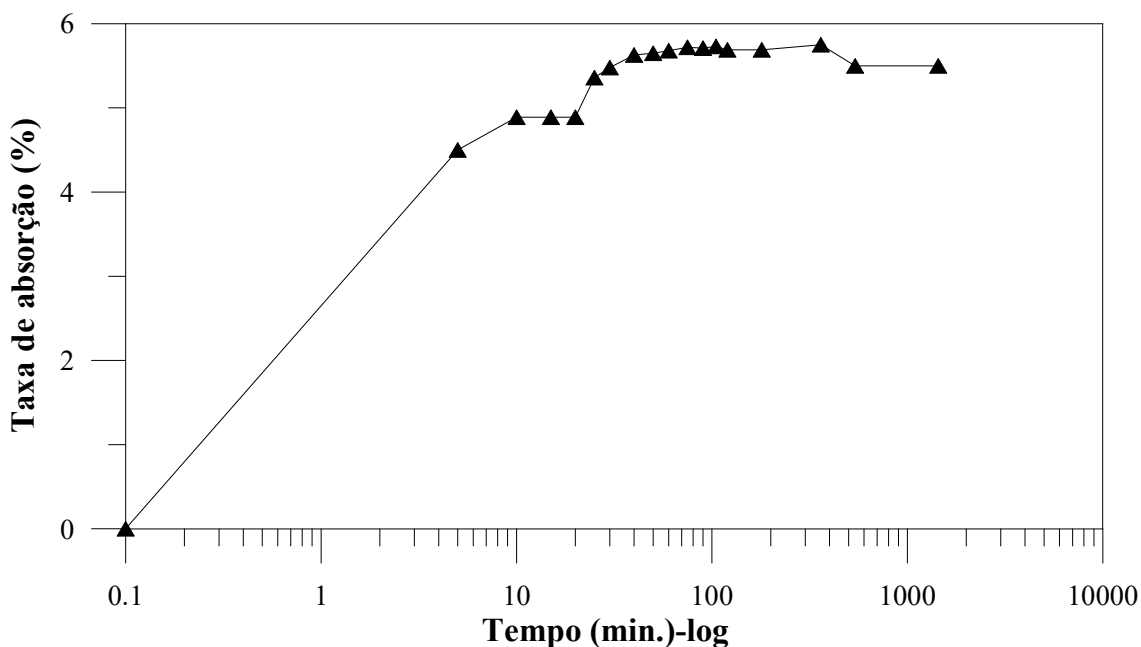
Os resultados de absorção no tempo estão apresentados nos gráficos da Figura 13 e da Figura 14, respectivamente, para os agregados, miúdo e gráudo, reciclados de argamassa.

Tabela 6 Resultados da caracterização dos agregados miúdos

Propriedades Avaliadas – Método de Ensaio	Natural – AMN		Reciclado – AMR		NBR 7211 (2005)
Abertura da peneira (mm)	%RI	%RA	%RI	%RA	
4,8	0	0	0	0	
2,4	3	3	9	9	
1,2	9	12	13	22	
0,6	26	39	18	40	-
0,3	43	81	24	64	
0,15	16	98	18	82	
Menor que 0,15	3	100	18	100	
Dimensão máxima característica (mm) – NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,40		4,80		
Módulo de finura – NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,32		2,17		
Massa específica (kg/cm ³) – NBR NM 52 (ABNT, 2003)	Aparente		2,49		-
	SSS		2,51		-
	Seco		2,54		-
Massa específica (kg/cm ³) - LEITE, (2001)	-		2,45		
MASSA UNITÁRIA (kg/cm ³) – NBR 7251 (ABNT, 1982)	1,45		1,40		
Absorção de água (%) – NBR NM 30 (2003)	0,8		-		
Absorção de água (%) - LEITE, (2001)	-		5,5		
Material Pulverulento (%) – NBR NM 46 (ABNT, 2003)	-		7,9		

Tabela 7 Resultados de caracterização dos agregados graúdos

Propriedades Avaliadas – Método de Ensaio		Natural – AGN		Reciclado - AGR		NBR 7211 (2005)
Abertura da peneira (mm)		%RI	%RA	%RI	%RA	
25		0	0	0	0	
19		17	17	0	0	
12,5		79	96	42	42	
9,5		4	100	30	71	-
6,3		0	100	17	88	
4,8		0	100	8	96	
Fundo		0	100	4	100	
Dimensão máxima característica (mm) – NBR NM 248 (ABNT, 2003)		25,0		19,0		
Módulo de finura – NBR NM 248 (ABNT, 2003)		7,16		6,67		
Massa específica (kg/cm ³) – NBR NM 52 (ABNT, 2003)	Aparente	2,81		-		
	SSS	2,79		-		
	Seco	2,78		-		
Massa específica (kg/cm ³) - LEITE, (2001)		-		2,52		
MASSA UNITÁRIA (kg/cm ³) – NBR 7251 (ABNT, 1982)		1,49		1,12		
Absorção de água (%) – NBR NM 53 (2003)		0,4		-		
Absorção de água (%) - LEITE, (2001)		-		5,6		
Material Pulverulento (%) – NBR NM 46 (ABNT, 2003)		0,7		0,3		<1%

**Figura 13** Absorção de água no tempo para o AMR

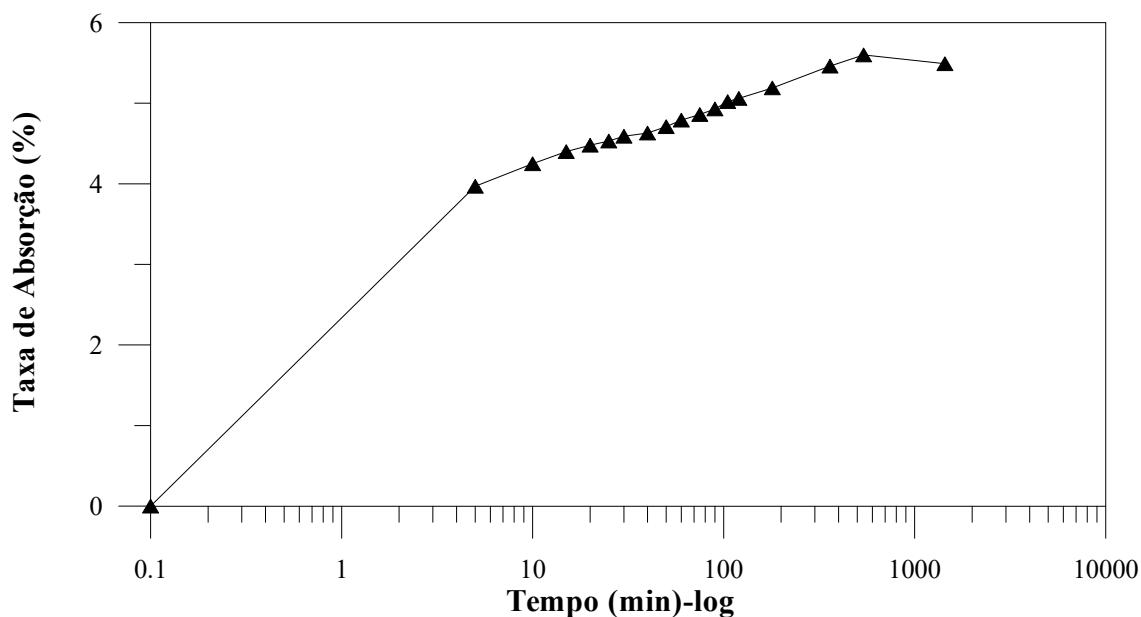


Figura 14 Absorção de água no tempo para o AGR

Observa-se que o agregado miúdo absorve cerca de 90% da água absorvida em 24h, nos primeiros 10 minutos de imersão, para o agregado graúdo, essa é de 78%. Sendo este agregado poroso, é necessário compensar esta taxa de absorção. A literatura recomenda algumas formas de compensação (Pré-molhagem, mistura em duas etapas, entre outros). Como esta taxa de absorção pode prejudicar a trabalhabilidade dos concretos produzidos, haja vista que parte da água de amassamento será absorvida durante o processo de mistura, para efeito de avaliação da influência da taxa compensação da absorção destes agregados sobre a trabalhabilidade dos concretos, esta taxa foi compensada em diferentes percentuais (60%, 70%, 80% e 90%).

As curvas granulométricas dos agregados (Figura 15) mostram que os agregados reciclados apresentam menores granulometrias que os agregados naturais, além disso, que esses materiais tendem a uma distribuição menos descontínua que os agregados naturais. Tais características influenciam tanto na demanda de água, reduzindo-a, quanto no melhor arranjo entre as partículas de agregados.

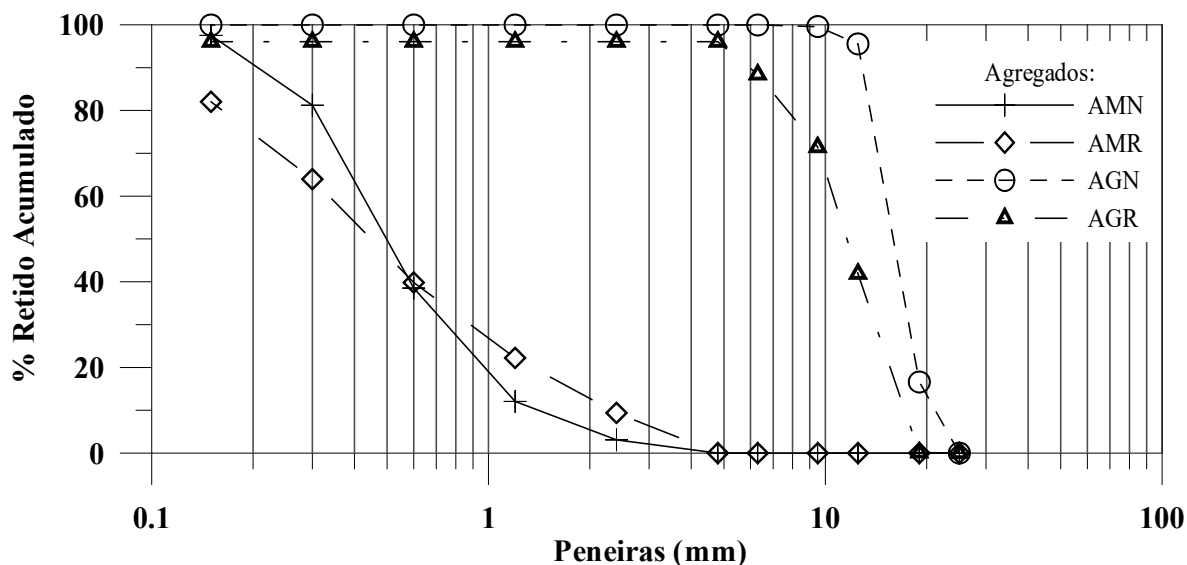


Figura 15 Curvas de composição granulométrica dos agregados utilizados

4.2.4 Água

Foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento da cidade de Feira de Santana, disponibilizada pela Universidade Estadual de Feira de Santana.

4.3 DOSAGEM EXPERIMENTAL

Foi testada uma mistura de concreto de referência, dosada com base no Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), proposto por De Larrard (1999), utilizando o *software* Betonlab Pro3® (SEDRAN e DE LARRARD, 2000), desenvolvido no LCPC, cujas etapas de dosagem estão descritas de forma detalhada em Reis (2009). O concreto foi dosado para uma resistência de 25,0 MPa, aos 28 dias de idade, e para apresentar um abatimento de tronco de cone de 100 ± 20 mm. As características dos materiais foram inseridas no software Betonlab Pro3®, no qual foi estabelecido um traço unitário, em massa, de 1:1,46:2,01:0,45 (c:amn:agn:a/c), cujo consumo de cimento é de $461,7 \text{ kg/m}^3$.

4.3.1 Produção dos concretos

Após definido o traço unitário de referência foram obtidos os traços dos concretos reciclados, através de substituições dos agregados naturais pelos agregados de argamassa. Para tanto, foram levados em consideração os percentuais de substituição (50% e 100%) para

ambos os agregados (graúdo e miúdo), e a compensação em volume, de acordo com as massas específicas dos agregados reciclados, com o objetivo de evitar diferença no volume de material. Através da Equação (1) foi calculada a compensação de volume para os agregados reciclados.

$$M_{AR} = M_{AN} * \frac{\gamma_{AR}}{\gamma_{AN}} \quad (1)$$

Onde:

M_{AR} = massa do agregado reciclado (kg)

M_{AN} = massa do agregado natural (kg)

γ_{AR} = massa específica do agregado reciclado (kg/cm³)

γ_{AN} = massa específica do agregado natural (kg/cm³)

Os consumos de agregados por metro cúbico de concreto para cada uma das misturas estão apresentados na Tabela 8. Ao todo foram produzidas 33 misturas, sendo uma de referência.

Tabela 8 Consumos de agregados por metro cúbico de concreto

Mistura	Agregado Miúdo		Agregado Graúdo	
	AMN	AMR	AGN	AGR
Referência	674,9	-	971,2	-
50%AMR	332,2	334,8	971,2	-
100%AMR	-	669,6	971,2	-
50%AGR	674,9	-	485,6	423,4
100%AGR	674,9	-	-	846,8
50%(AMR-AGR)	332,2	334,8	485,6	423,4
100%(AMR-AGR)	-	669,6	-	846,8
50%AMR-100%AGR	332,2	334,8	-	846,8
100%AMR-50%AGR	-	669,6	485,6	423,4

A partir das taxas absorção determinadas para o agregado miúdo reciclado (AMR) (Tabela 6) e para o agregado graúdo reciclado (AGR) (Tabela 7), foi feita a compensação parcial nos percentuais de 60, 70, 80 e 90%. Os teores de água livre inicial de cada mistura estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 Teores de água livre inicial por metro cúbico para as misturas avaliadas

Mistura	REF	Taxa de Compensação da Taxa de Absorção			
		60%	70%	80%	90%
Referência	207,8	-	-	-	-
50%AMR	-	218,8	220,6	222,5	224,3
100%AMR	-	229,8	233,5	237,2	240,9
50%AGR	-	221,7	224,0	226,3	228,7
100%AGR	-	235,6	240,3	244,9	249,5
50%(AMR-AGR)	-	232,7	236,9	241,0	245,2
100%(AMR-AGR)	-	257,7	266,0	274,3	282,6
50%AMR-100%AGR	-	246,7	253,1	259,6	266,1
100%AMR-50%AGR	-	243,8	249,8	255,8	261,8

A partir dos teores de água livre das misturas foram calculados os consumos de cimento para cada mistura. Estes valores estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 Consumos de cimento por metro cúbico para as misturas avaliadas

Mistura	REF	Taxa de Compensação da Taxa de Absorção			
		60%	70%	80%	90%
Referência	461,70				
50%AMR		418,8	413,6	408,1	402,8
100%AMR		369,9	359,1	348,4	337,7
50%AGR		434,7	428,0	421,4	414,4
100%AGR		413,7	400,1	386,7	431,4
50%(AMR-AGR)		397,8	385,6	373,7	361,5
100%(AMR-AGR)		327,6	303,5	279,4	255,4
50%AMR-100%AGR		376,5	357,9	339,1	320,2
100%AMR-50%AGR		348,6	331,2	313,8	296,4

Os concretos foram produzidos utilizando-se uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 140 litros. A seguinte seqüência da produção foi adotada:

- imprimação da betoneira com uma dosagem de concreto de 1:2:3:0,65 (cimento: areia: brita: água/material cimentante). Após a imprimação, o material excedente caiu livremente, com o misturador em movimento;
- lançamento do agregado graúdo;
- adição de metade da água ao agregado graúdo, seguida de 20 segundos de mistura;
- adição do cimento, mais 20% da água, seguida de 1 a 2 minutos de mistura;
- adição do agregado miúdo, seguida do restante da água (30%);
- após a adição de todos os componentes no misturador, o equipamento continuava em movimento até que se completasse 5 minutos de mistura.

Após a mistura, foram efetuadas as determinações das propriedades dos concretos no estado fresco e no estado endurecido.

4.4 PROPRIEDADES AVALIADAS

4.4.1 Propriedades no estado fresco

Além do ensaio de abatimento do tronco de cone, devido à influência do agregado reciclado de argamassa na redução do efeito de rolamento entre as partículas no concreto em seu estado fresco, devido ao atrito, principalmente pela sua geometria e textura, decidiu-se pela utilização, também, de métodos dinâmicos para avaliação da trabalhabilidade. Portanto, foram utilizados ainda os ensaios de tempo VeBe e mesa de Graff para avaliação deste parâmetro.

4.4.1.1 Abatimento de tronco de cone

Embora seja um ensaio estático, o Abatimento do Tronco de Cone mede a consistência e a fluidez do material, permitindo que se controle a uniformidade do concreto. A principal função deste ensaio é fornecer uma metodologia simples e convincente para se controlar a uniformidade da produção do concreto. Desde que, na dosagem, se tenha obtido um concreto trabalhável, a constância do abatimento indicará a uniformidade da trabalhabilidade. No Brasil, este ensaio é regulamentado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998) e é executado conforme esquema apresentado na Figura 16a, b, c, d. Este ensaio foi executado logo após a conclusão da mistura.

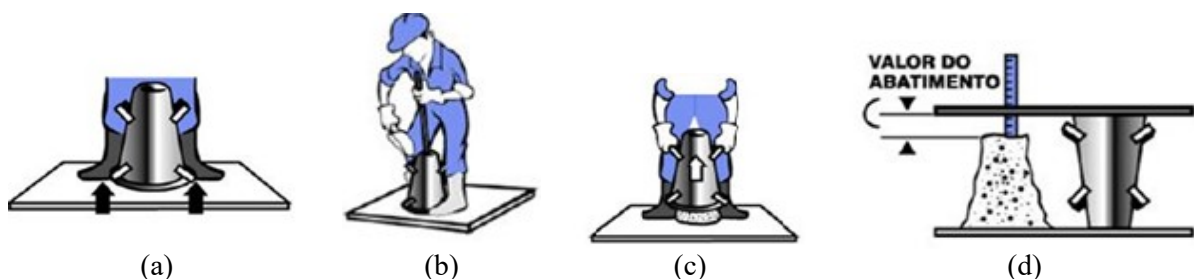


Figura 16 Ensaio de abatimento do tronco de cone: a) molde e placa metálicos; b) enchimento do molde e adensamento manual; c) retirada do molde; d) determinação do abatimento

4.4.1.2 Ensaio de tempo VeBe

Este ensaio é prescrito pelo ACI 211.3 (ACI, 1987) e consiste em fazer a remoldagem de um tronco de cone dentro de um recipiente cilíndrico. A remoldagem ocorre pelo efeito de vibração e compactação aplicados simultaneamente, conforme se observa na ilustração da Figura 17. O resultado do ensaio é o tempo necessário para remoldagem.

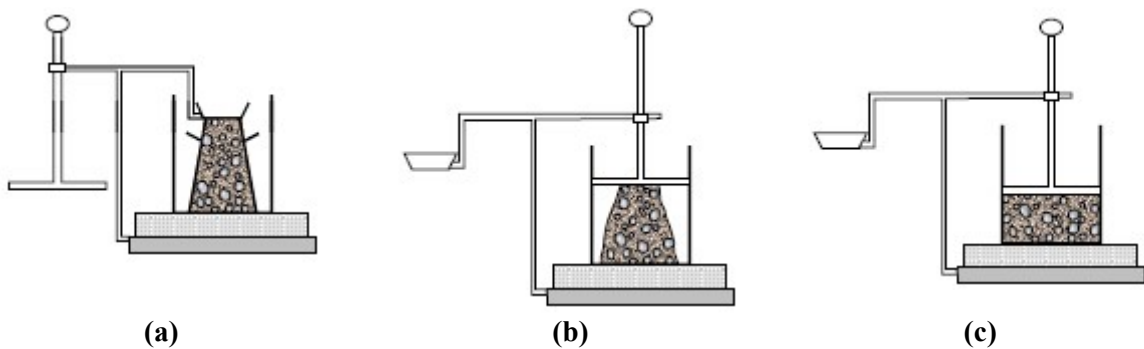


Figura 17 Ensaio de Tempo VeBe: a) moldagem do cone; b) apoio do disco de acrílico sobre o tronco de cone e vibração posterior; c) término do ensaio quando o disco fica totalmente em contato com o concreto

4.4.1.3 Ensaio de abatimento na mesa de Graff

No Brasil, este ensaio está regulamentado pela NBR NM 68 (ABNT, 1998). Para sua execução utiliza-se um cone com dimensões de 20 cm de diâmetro na base, 13cm de diâmetro no topo e 20 cm de altura. A mistura deve ser moldada em 2 camadas iguais, adensadas com 10 golpes com soquete. Após a retirada do molde são aplicados 15 golpes na mesa, em 15 segundos. O resultado do ensaio é o diâmetro de espalhamento do concreto.

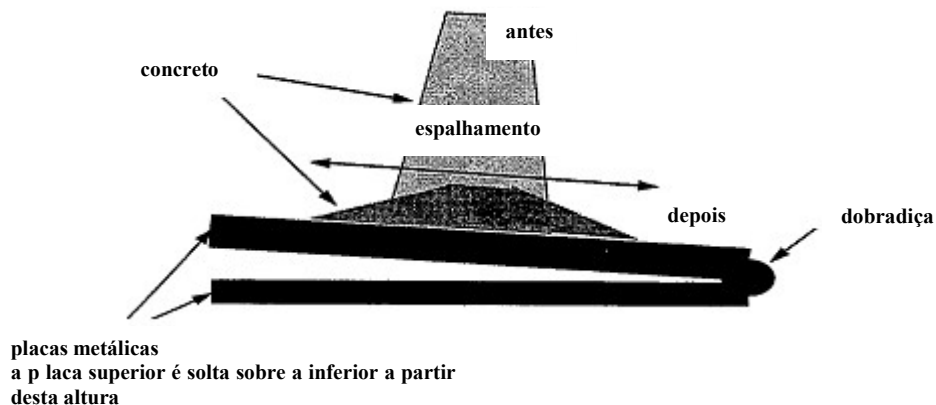


Figura 18 Esquema do ensaio de espalhamento na mesa de Graff (Fonte: FERRARIS, 1996)

4.4.2 Resistência à compressão axial (f_c)

Para determinar a resistência à compressão axial das misturas foram moldados 4 corpos-de-prova cilíndricos por mistura, com 200mm de altura e 100mm de diâmetro, de acordo as prescrições da norma NBR 5738 (ABNT, 2003), que foram ensaiados aos 28 dias de idade. O ensaio de resistência à compressão dos concretos foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007).

Os corpos-de-prova foram adensados com vibrador de agulha de imersão. As amostras foram curadas ao ar, nas primeiras 24 horas, e, depois de desmoldadas, foram mantidos em câmara de cura úmida, com temperatura de $23\pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa maior que 95%, onde permaneceram até a idade de ensaio.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 TRABALHABILIDADE

5.1.1 Abatimento de tronco de cone

Os resultados no ensaio de abatimento de tronco de cone para os diferentes concretos produzidos estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 Resultados para o ensaio de abatimento de tronco de cone

Mistura	REF	Abatimento (mm)			
		60%	70%	80%	90%
Referência	95	-	-	-	-
50%AMR	-	70	80	80	90
100%AMR	-	60	95	75	125
50%AGR	-	70	80	85	65
100%AGR	-	20*	20*	35	40
50%(AMR-AGR)	-	40	55	70	90
100%(AMR-AGR)	-	10*	65	60	70
50%AMR-100%AGR	-	10*	25*	20	45
100%AMR-50%AGR	-	30	55	45	65

* Misturas muito secas, com tendência à segregação.

De forma geral, nos resultados obtidos para o abatimento do troco de cone houve uma tendência ao aumento da fluidez das misturas com o aumento do percentual de compensação da taxa de absorção dos agregados. Isso se deve ao fato de que com o aumento do percentual de compensação está aumentando o teor de água livre inicial da mistura, o que contribui para tornar a mistura mais plástica e aumentar o valor de abatimento. Contudo, para os concretos reciclados foram verificadas reduções de até 90% nos valores de abatimento em relação ao concreto de referência, exceto para a mistura 100%AMR com 90% de taxa de compensação que apresentou um aumento no abatimento de aproximadamente 32%. Verifica-se que mesmo com o aumento do teor inicial de água livre, para compensar a absorção, tal comportamento nos concretos reciclados se deve ao travamento das misturas, em função dos agregados reciclados apresentarem textura rugosa e forma irregular. Assim, há um aumento do atrito interno e redução na mobilidade das misturas. Esse comportamento foi relatado por diversos autores, a exemplo de Topçu e Sengel (2004), Poon, Kou e Lam (2007), Reis (2009) e Yang *et al.* (2011).

Os resultados de abatimento relativo de todas as misturas, em relação ao abatimento da mistura de referência, podem ser observados no gráfico da Figura 19.

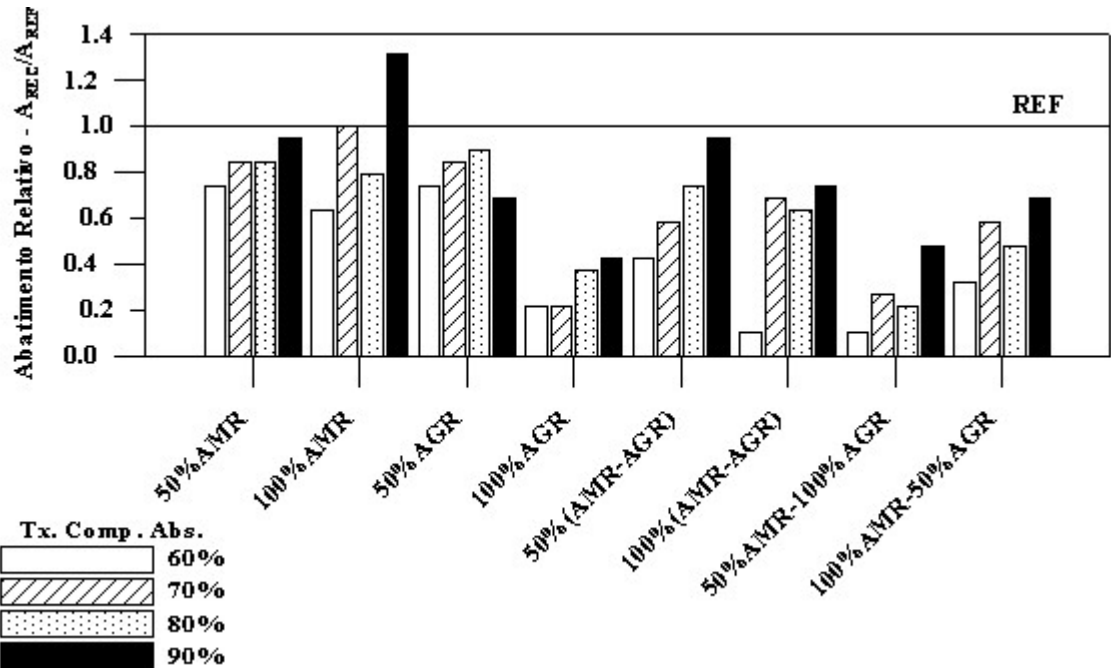


Figura 19 Resultados de abatimento de tronco de cone relativo dos concretos avaliados

As misturas com substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado de argamassa foram as que apresentaram as menores reduções no abatimento em relação ao concreto de referência. Com o uso do agregado miúdo reciclado de argamassa há um aumento do teor final de pasta nessas misturas, em função do elevado teor de finos no agregado, como observado na composição granulométrica (Tabela 6). Isso faz com que haja um aumento na coesão dessas misturas e assim, também melhora o seu acabamento. Desse modo, mesmo para baixas taxas de compensação da taxa de absorção de água do agregado (60 e 70%) as reduções no abatimento não são tão intensas, no máximo 35%, para mistura 100%AMR com 60% de taxa de compensação (Figura 20b). É importante enfatizar que como o agregado reciclado utilizado é proveniente do beneficiamento de argamassa, parte dos finos presentes no material pode ter promovido um efeito de melhor preenchimento dos vazios na mistura. Neville (1997) discute a presença de ultrafinos em misturas de concreto. Segundo o autor, materiais ultrafinos são partículas menores que $300\mu\text{m}$ que promovem um efeito de lubrificação da mistura, reduzindo o atrito entre as demais partículas. Na análise granulométrica do AMR observa-se um percentual de 36% de material menor que $300\mu\text{m}$ e 18% de material menor que $150\mu\text{m}$. Desta forma, para misturas com maior teor de substituição de AMR, devido ao seu maior percentual de ultrafinos, provavelmente compensou parte do efeito de travamento provocado pela textura e rugosidade das partículas de maiores dimensões.



Figura 20 Comparação entre os abatimentos dos concretos de referência, 100%AMR e 100% AGR, com 60% de taxa de compensação para ambos

Estudos desenvolvidos por Khatib (2005) e Shi-Cong, Kou e Poon (2009), que avaliaram o efeito da substituição do agregado miúdo de concreto, mostraram resultados para o abatimento que aumentavam com o aumento do teor de substituição. O mesmo comportamento foi obtido por Poon *et al.* (2004), avaliando o efeito da substituição do agregado miúdo reciclado de concreto na trabalhabilidade de concreto auto-adensável. Avaliou também esta propriedade através do espalhamento do cone de Abrams e observou que, com o aumento do percentual de substituição, houve um aumento do valor do espalhamento. Os autores atribuíram este fenômeno ao aumento do teor de água livre para compensar a taxa de absorção do agregado reciclado.

Avaliando o efeito do agregado graúdo reciclado de argamassa (AGArg), observa-se que a inclusão desse material promove uma maior redução no abatimento dos concretos, o que se deve a uma maior tendência ao travamento da mistura provocado pela textura e rugosidade do agregado. O aumento do teor de água livre inicial, em função da compensação da taxa de absorção do agregado, apresenta menor influência nos resultados de abatimento que para as misturas com AMR. Por exemplo, a mistura 100%AGR com taxa de compensação de 60% mostra uma redução de cerca de 80% no valor de abatimento, quando comparado com o concreto de referência. Além da redução do abatimento, observou-se que estas misturas apresentam-se mais ásperas (Figura 20c).

Para melhor caracterização da trabalhabilidade das misturas foi estabelecida a relação entre o abatimento e o teor de água livre, apresentada no gráfico da Figura 21. Nesta figura são apresentadas as faixas ou classes de consistência, com base na classificação apresentada por Delibes (1993), citado por Canovas (2002). Verifica-se que as misturas 50%AMR-100%AGR e 100%(AMR-AGR), com taxa de compensação de 60%, encontram-se na faixa mais baixa do abatimento (muito seca a seca) para o qual o ensaio de abatimento não é

recomendável. Tais misturas, de fato, apresentaram segregação durante o ensaio.

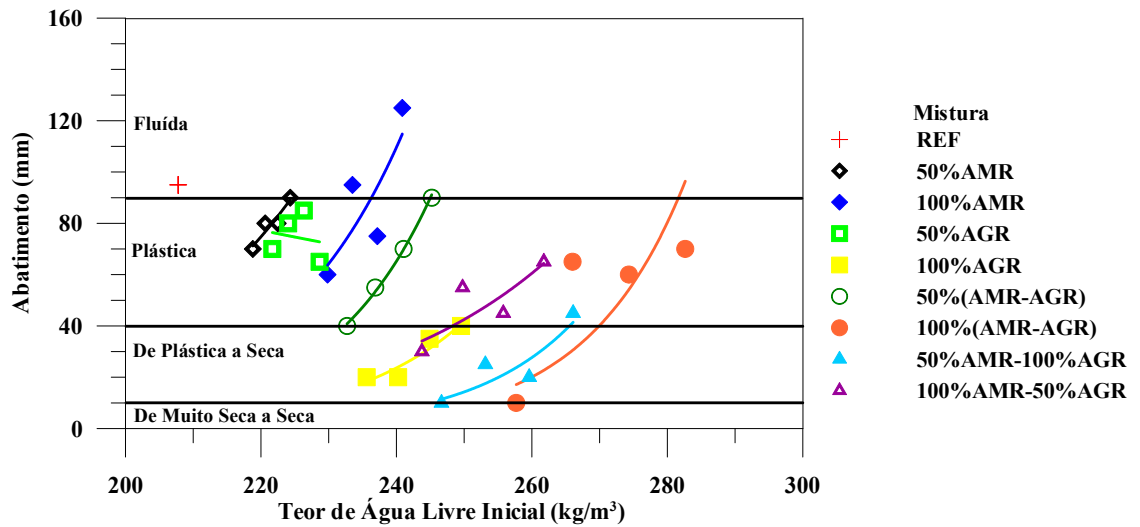


Figura 21 Relação entre abatimento de tronco de cone e teor de água livre inicial

De uma maneira geral, verifica-se uma tendência ao aumento do valor obtido no abatimento com o aumento do teor de água livre inicial dos concretos reciclados e a permanência da maioria da mistura na fase classificada como plástica. Verifica-se ainda que para manter a mesma trabalhabilidade, os concretos com maior teor de agregado reciclado necessitam de maior teor de água livre.

Resultado semelhante foi obtido por Poon *et al.* (2004) em misturas utilizando o resíduo de concreto como agregado graúdo, com diversos graus de umidade (seco em estufa, seco no ambiente e saturado superfície seca).

É importante salientar que as reduções nos valores de abatimento, para os concretos reciclados, não indicam, *a priori*, uma redução de trabalhabilidade, ou seja, uma dificuldade adicional de lançamento e adensamento do concreto. Durante a moldagem dos corpos-de-prova de concretos reciclados verifica-se que, com a aplicação da energia de vibração, o comportamento plástico do mesmo se assemelha ao convencional para muitas misturas. Isto ocorre principalmente porque no ensaio de abatimento a medida de trabalhabilidade está relacionada apenas com a tensão de escoamento, medindo apenas a habilidade do concreto em começar a escoar, o que se deve basicamente ao peso próprio. A interrupção no fluxo se dá em função de parâmetros relacionados com a mobilidade da mistura, como atrito interno, forças de coesão e viscosidade (Ferraris, 1996).

5.1.2 Tempo VeBe

Os resultados de determinação do Tempo VeBe estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 Resultados de Tempo VeBe

Mistura	REF	Tempo VeBe (seg.)			
		60%	70%	80%	90%
Referência	4,98	-	-	-	-
50%AMR	-	3,52	3,41	5,83	3,49
100%AMR	-	4,22	4,47	4,43	2,96
50%AGR	-	4,77	4,73	3,56	3,66
100%AGR	-	9,12	8,40	5,49	6,07
50%(AMR-AGR)	-	7,10	5,53	3,95	3,76
100%(AMR-AGR)	-	23,18	3,46	4,01	4,43
50%AMR-100%AGR	-	10,17	4,04	5,54	4,44
100%AMR-50%AGR	-	19,72	11,54	5,45	5,15

De forma geral nos resultados obtidos para o ensaio observa-se uma redução no tempo VeBe com o aumento do percentual de compensação da taxa de absorção. Resultado esperado em virtude do conseqüente aumento no teor de água livre inicial da mistura. Verifica-se, ainda, que quando o ensaio incorpora energia, as diferenças de trabalhabilidade entre o concreto convencional e o reciclado são reduzidas, o que pode ser observado no gráfico da Figura 22.

Os resultados mostram que as misturas com maiores teores de agregado graúdo reciclado - 100%(AMR-AGR), 50%AMR-100%AGR – apresentaram tempo de vibração até 465% e 396% maiores que o concreto de referência, para taxa de compensação de 60%. Essas misturas podem ser consideradas muito secas (Figura 23), segundo classificação de Delibes (1993), citado por Canovas (2002). No ensaio de abatimento essas misturas apresentaram-se muito ásperas, com tendência à segregação, como identificado na Tabela 11, o que justifica a necessidade de um maior tempo de vibração, para a sua compactação e a inadequação do ensaio de abatimento para determinar a trabalhabilidade dessas misturas.

Assim como ocorre com o abatimento, o tempo VeBe sofre maior influência da incorporação de agregado graúdo reciclado que do agregado miúdo reciclado. Por exemplo, nas misturas com substituição de 50 e 100% de AMR, a mistura mais consistente teve um resultado de tempo VeBe 17% maior que o concreto de referência (concreto mais viscoso), enquanto as misturas com os mesmos teores de substituição do agregado graúdo (50 e 100% de AGR) o tempo VeBe ficou 83% maior que o resultado de referência.

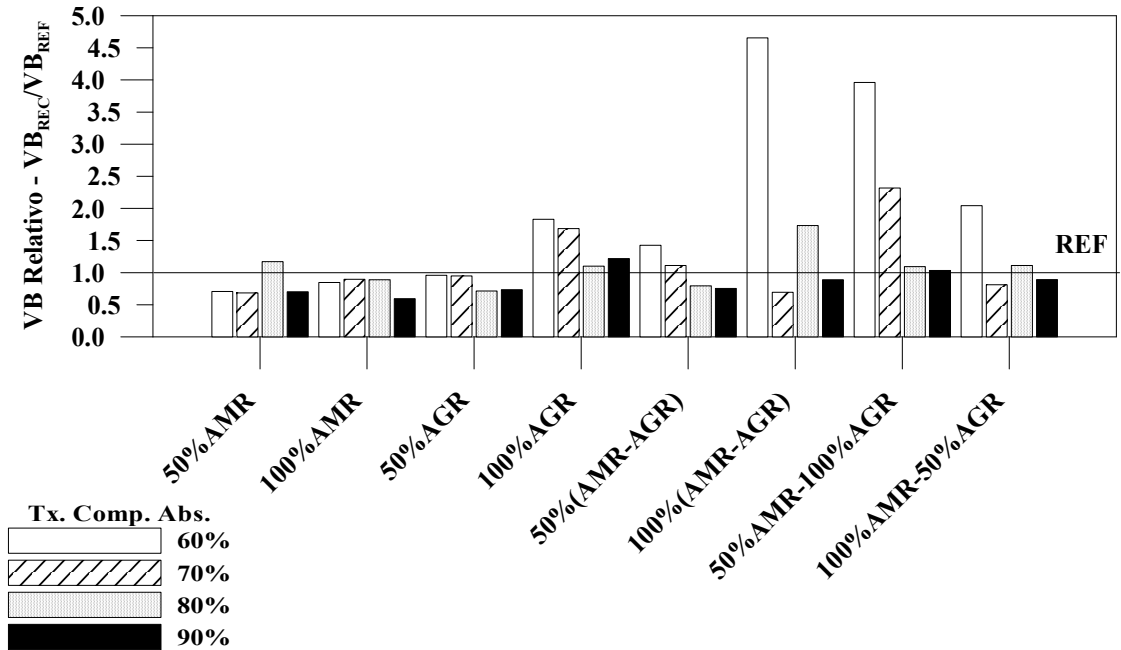


Figura 22 Resultados relativos de tempo VeBe

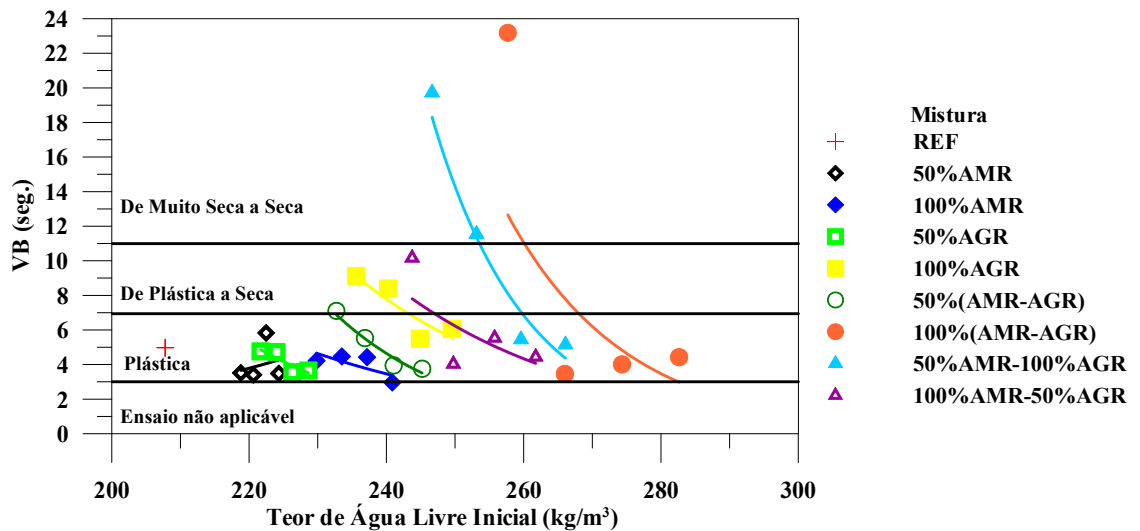


Figura 23 Relação entre o tempo VeBe e o teor de água livre inicial das misturas

Analisando a Figura 23, verifica-se que para manter o mesmo tempo VeBe misturas com maior teor de agregado reciclado precisam de um aumento no teor de água livre inicial. As misturas 100%(AMR-AGR) (60% de taxa de compensação), 50%AMR-100%AGR (60 e 70% de taxa de compensação) foram classificadas como Muito seca a Seca e as misturas 100%(AMR-AGR) (60 e 70% de taxa de compensação), 100%AMR-50%AGR (60% de compensação) foram consideradas como Seca a Plástica. As demais misturas foram todas consideradas plásticas. As classes de consistência para o Tempo VeBe são um pouco diferentes das classes de consistência para o ensaio de abatimento, o que se deve à forma de

execução dos ensaios, e ao parâmetro reológico que está sendo medido.

Como já mencionado, a forma e textura superficial dos agregados reciclados provoca um efeito de travamento entre grãos (aumento do atrito interno) que impede uma medida correta da trabalhabilidade quando se utiliza um ensaio estático como o abatimento do tronco de cone. No caso dos ensaios dinâmicos, a vibração pode contribuir para que as bolhas de ar eliminadas durante a absorção de água pelo agregado reciclado promovam um rolamento entre os componentes da mistura, facilitando o seu escoamento, devido a uma redução no efeito do atrito interno, como foi observado por Leite (2001) e Santiago (2008). Pode-se dizer que os concretos reciclados apresentam um comportamento parecido com o de concretos com ar incorporado. Segundo Wong *et al.* (2001), os concretos que usam aditivos incorporadores de ar apresentam um aumento no volume de pasta, melhorando a consistência e reduzindo a segregação e exsudação.

O ensaio de tempo de vibração VeBe considera apenas um dos parâmetros do modelo de Bingham, a viscosidade plástica (μ), que governa o fluxo após o seu início. A vibração faz com que a tensão de cisalhamento (τ) seja maior que a tensão de escoamento (τ_0), o que produz o fluxo (Ferraris, 1996). Nesse ensaio a energia de vibração é muito intensa, fazendo com que o atrito interno seja eliminado, as forças de adesão aumentem e a viscosidade diminua, por isso sua grande capacidade de medir a trabalhabilidade de concretos muito secos ou secos, como é o caso dos concretos com altas taxas de agregados graúdos reciclados.

5.1.3 Espalhamento pela Mesa de Graff

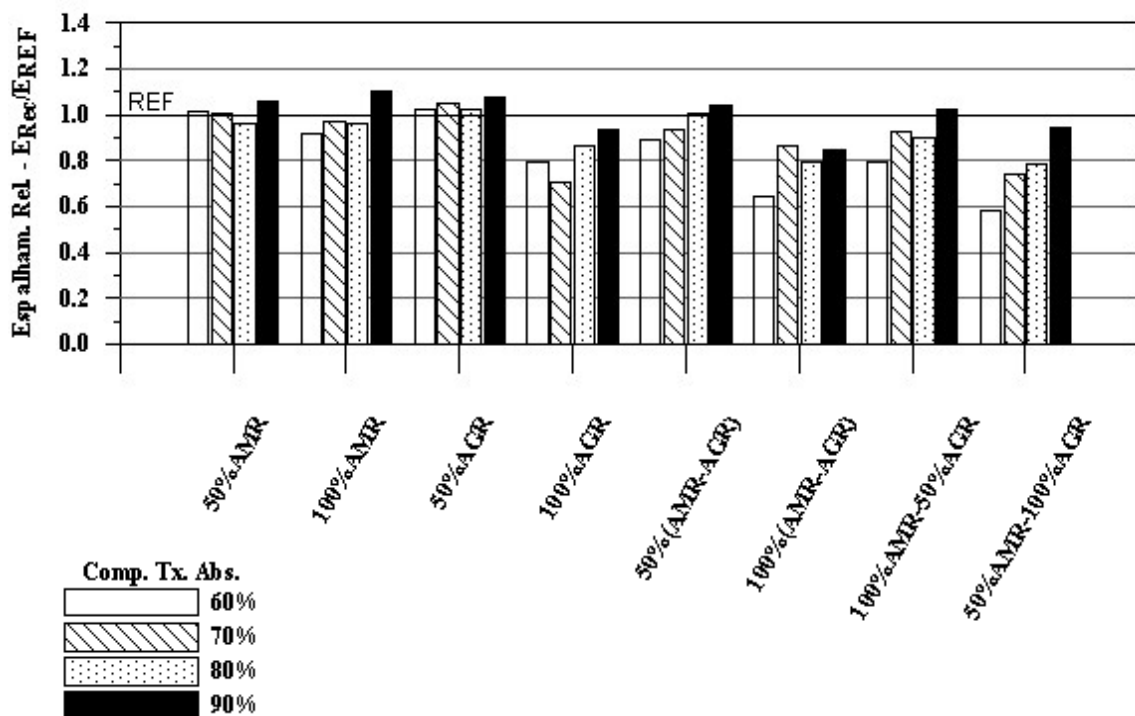
Os resultados obtidos no ensaio de espalhamento pela mesa de Graff para os diferentes concretos produzidos estão apresentados na Tabela 13.

Avaliando o espalhamento obtido pelo ensaio na Mesa de Graff verifica-se que como esse ensaio também incorpora energia, as diferenças de trabalhabilidade entre o concreto convencional e o reciclado são menores. Contudo, esse ensaio é mais sensível a questões relacionadas com a falta de coesão e segregação das misturas que apresentam trabalhabilidade baixa ou muito baixa.

Tabela 13 Resultados de espalhamento pela mesa de Graff

Mistura	REF	Espalhamento (mm)			
		60%	70%	80%	90%
Referência	370	-	-	-	-
50%AMR	-	375	373	358	393
100%AMR	-	340	360	355	408
50%AGR	-	380	390	380	400
100%AGR	-	295*	250*	320	345
50%(AMR-AGR)	-	330*	345	373	385
100%(AMR-AGR)	-	315*	320	240	315
50%AMR-100%AGR	-	295*	338*	333	380
100%AMR-50%AGR	-	295	285	290	350

Para o espalhamento, as maiores reduções de trabalhabilidade foram observadas no grupo de misturas com 60% de taxa de compensação da taxa de absorção do agregado reciclado, cujos valores reduziram em no máximo 42%, como se observa no gráfico da Figura 24. Com o aumento da taxa de compensação (90%) os resultados de espalhamento, ou foram maiores que os do concreto de referência, ou apresentaram reduções de no máximo 15% (Figura 24).

**Figura 24** Resultados relativos de espalhamento na mesa de Graff

Como ocorre no ensaio de tempo VeBe, para o ensaio de espalhamento na mesa de Graff é a viscosidade plástica (μ) que irá governar o fluxo do material após o seu início, em função da tensão de cisalhamento (τ) ser maior que a tensão de escoamento (τ_0). (Ferraris,

1996). As forças de atrito interno são eliminadas pela vibração imposta ao material. Há uma redução da viscosidade, contudo, o concreto deve ter uma capacidade mínima de escoar sem perder a coesão. Por isso, esse ensaio não se aplica a misturas muito secas ou secas, cujas forças de coesão são muito pequenas e existe uma tendência à segregação, como ocorreu em algumas das misturas estudadas, a exemplo das misturas 100%AGR, 100%(AMR-AGR) e 50%AMR-100%AGR. O aumento da taxa de compensação da absorção faz com que os concretos reciclados apresentem menor atrito e viscosidade e maior coesão, e assim, o espalhamento passa a ser uma medida mais adequada para trabalhabilidade desses concretos, conforme pode ser observado na Tabela 13.

5.1.4 Faixas de medição e correlação entre os métodos

A Figura 21 e Figura 23 apresentam os resultados de abatimento e tempo VeBe, respectivamente. Nessas figuras também podem ser visualizados os limites de classificação das misturas quanto a sua plasticidade para correlacionar os dois ensaios, que foram estabelecidos por Delibes (1993), citado por Canovas (2002). Os concretos foram então divididos em cinco classes de consistência: 1 – Muito Seca a Seca, 2 – Seca a plástica, 3 – Plástica, 4 – Fluida, 5 - Líquida. De acordo com o autor, o ensaio de tempo VeBe não é adequado para medir consistência de misturas fluidas e líquidas, cujo tempo VeBe é menor que 3 segundos. Por sua vez, o ensaio de abatimento não se presta a medir consistências de misturas secas ou muito secas, cujo abatimento é menor que 10 mm.

Por outro lado, o ensaio de espalhamento na mesa de Graff é adequado para medida de trabalhabilidade de misturas fluidas (Neville, 1997) com medida do espalhamento variando de 400 a 650 mm. De fato, a NBR NM 68 (1998) estabelece que o método se aplica a concretos com um espalhamento mínimo de 350 mm.

Na tentativa de estabelecer uma classificação para a trabalhabilidade dos concretos medida pelo espalhamento, foram definidos os limites apresentados na Figura 14, com base nos limites dos ensaios de abatimento e tempo VeBe, definidos por Delibes (1993), citado por Canovas (2002) e de observações efetuadas em laboratório. Neste trabalho, 350 mm será considerado o limite mínimo de espalhamento para misturas fluídas, atendendo aos objetivos da NBR NM 68 (1998). Esses limites foram traçados no gráfico da Figura 25 com os resultados de espalhamento obtidos com os concretos avaliados nesse estudo.

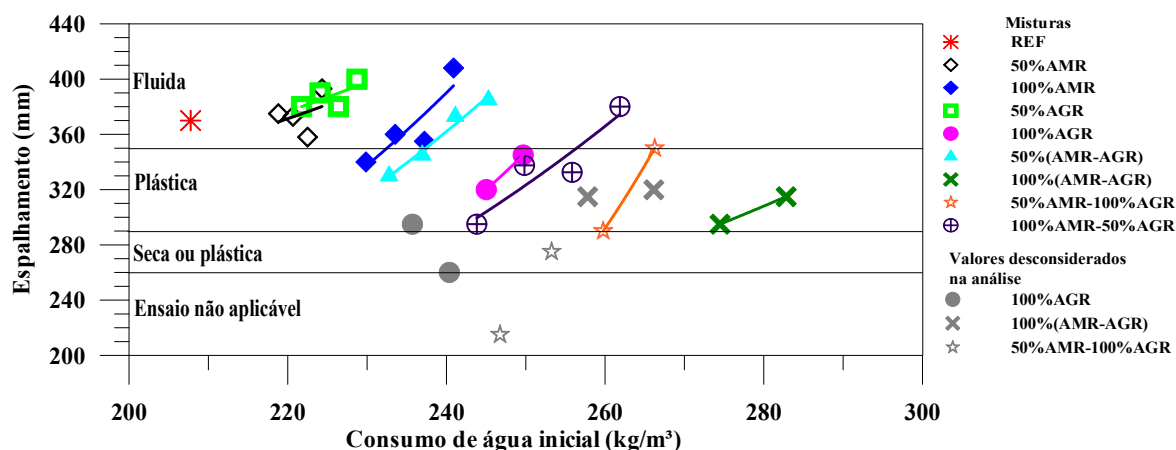
Tabela 14 Relação entre os ensaios de abatimento, tempo VeBe e espalhamento conforme a classificação da plasticidade do concreto

Classes de consistência	Abatimento (mm) ¹	Tempo VeBe (s) ¹	Espalhamento (mm) ²
Muito Seca a Seca	0 – 10*	30 – 10	< 260 *
Seca a Plástica	10 – 40	5 – 10	260 – 290
Plástica	40 – 90	3 – 5	290 – 350
Fluida	90 – 150	*	> 350
Líquida	>160*		

¹ Adaptado de Delibes (1993), citado por Canovas (2002).

² Limites estabelecidos pelos autores com base nos resultados obtidos no ensaio de espalhamento, em comparação com os resultados dos ensaios de abatimento e tempo VeBe.

* Ensaio inadequado para faixa de medição.

**Figura 25** Relação entre o espalhamento e o teor de água livre

Analisando a Figura 25, verifica-se que algumas misturas classificadas como secas a plásticas no ensaio de abatimento foram classificadas dentro do intervalo de misturas plásticas no ensaio de espalhamento, o que se deve à componente dinâmica existente nesse ensaio. É claro que essa classificação é uma primeira tentativa de estabelecer parâmetros de análise baseados em limites de trabalhabilidade medida pelo espalhamento na mesa Graff. Devem ser realizados outros testes, com outras misturas, variando consumos de cimento, granulometria e tipo de agregados, entre outros, de modo a aumentar a confiabilidade dos resultados.

É importante salientar que assim como o equipamento do ensaio de abatimento (cone de Abrams), o equipamento para o ensaio de espalhamento pode ser considerado bastante simples e perfeitamente aplicável aos canteiros de obras, sendo de fácil manuseio e apresentando pequena influência do operador na obtenção dos resultados. Diferente do equipamento que mede o tempo VeBe, que apresenta maior custo de aquisição e maior dificuldade de operação.

Além de tentar estabelecer limites de consistência para o ensaio de espalhamento, foi realizada uma comparação entre os resultados encontrados para o abatimento e os demais ensaios conforme pode ser visto na Figura 26. É importante ressaltar, no entanto, que os ensaios medem fenômenos físicos diferentes e que são muito sensíveis ao tipo de agregado e granulometria (NEVILLE, 1997). A comparação tem o propósito de correlacionar as medidas obtidas para os concretos reciclados produzidos neste trabalho. Relações logarítmicas naturais foram obtidas entre o espalhamento e o abatimento e entre o tempo VeBe e o abatimento, com coeficientes de correlação de 0,844 e 0,799, respectivamente.

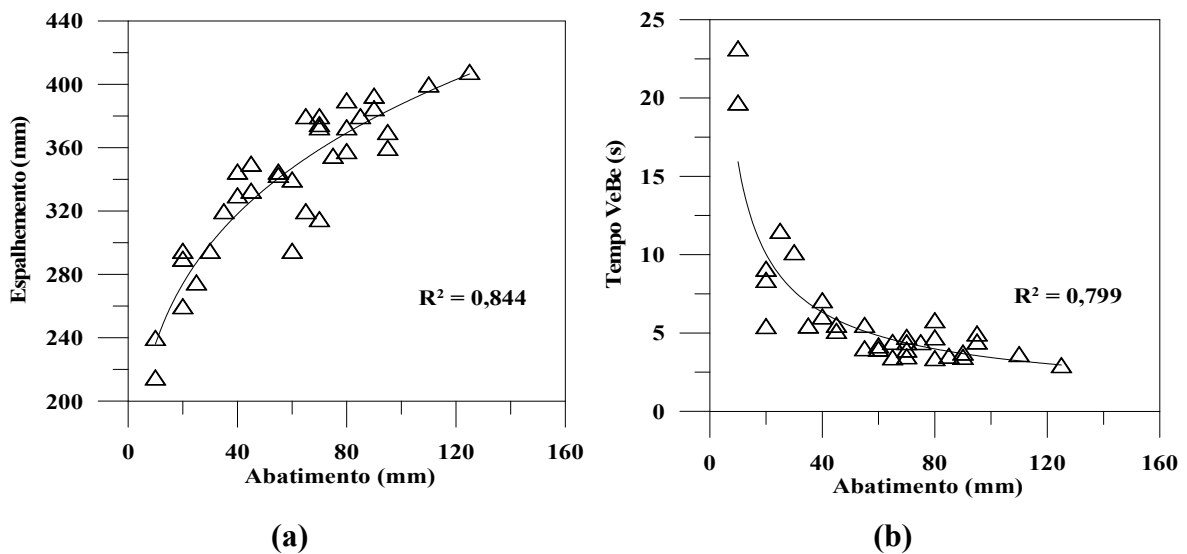


Figura 26 Comparação entre as medidas de trabalhabilidade: a) Abatimento e espalhamento; b) Abatimento e tempo VeBe

Na Figura 27 observa-se uma comparação visual entre os métodos de abatimento (Figura 27a) e o espalhamento (Figura 27b), para as misturas plástica, de plástica seca e de muito a seca a seca, de acordo com as faixas para o abatimento. Verifica-se que na mistura muito seca a seca houve segregação do material durante o ensaio de abatimento, confirmando que apesar do ensaio de abatimento ter sido realizado, este não é aplicável para este tipo de mistura.



Figura 27 Comparação entre o ensaio de abatimento e espalhamento para visualização das classes de consistência: a) Abatimentos de misturas com diferentes consistências; b) Espalhamento de misturas com diferentes consistências

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados de resistência média à compressão, desvio padrão e coeficiente de variação estão apresentados na Tabela 15.

Observa-se que de um modo geral a incorporação de agregados reciclados reduz a resistência à compressão (Figura 28). As maiores reduções foram identificadas para a mistura 100%(AMR-AGR), com qualquer taxa de compensação, sendo que para 90% de taxa de compensação verifica-se a maior redução encontrada, 23%.

Cinco misturas apresentaram resistência maior que a referência: 50%AMR (com 60, 80 e 90% de compensação da taxa de absorção); 100%AMR (com 60% de compensação da taxa de absorção) e 100%AMR (com 60% de compensação da taxa de absorção). A mistura 50%AMR apresentou aumento de 2% e 7% na resistência à compressão, para taxas de compensação de 80 e 90%, respectivamente. A mistura 100%AMR apresentou aumento de 3%, para taxa de compensação de 60%. Em seus estudos com agregados reciclados, Ajdukiewicz e Kliszczewiz (2002), Vieira (2003), Khatib (2005), Leite (2001) também identificaram um aumento de resistência à compressão em misturas com agregados reciclados. Nesses estudos observou-se que o aumento do teor de substituição de agregado miúdo reciclado fez aumentar a resistência à compressão, o que corrobora os resultados

apresentados.

Tabela 15 Resultados de resistência à compressão dos concretos estudados

Misturas	$f_{cm} \pm S_d$ (CV)				
	Referência	Misturas com taxa de compensação da taxa de absorção do agregado reciclado			
		60%	70%	80%	90%
REF	32,8±1,7 (5,2)	-	-	-	-
50%AMR	-	32,5±0,4 (1,2)	31,7±1,9 (5,9)	33,3±1,3 (3,9)	35,0±0,5 (1,5)
100%AMR	-	33,8±1,3 (4,0)	29,3±1,5 (5,3)	30,2±0,7 (2,2)	31,3±0,7 (2,4)
50%AGR	-	35,7±1,2 (3,5)	31,1±1,7 (5,4)	31,2±2,3 (7,5)	31,2±1,2 (3,6)
100%AGR	-	32,5±0,3 (1,0)	30,5±0,8 (2,5)	29,5±1,7 (5,7)	30,2±2,0 (6,5)
50%(AMR-AGR)	-	31,3±2,2 (7,1)	32,9±0,8 (2,3)	30,6±1,7(5,5)	27,1±2,1 (7,8)
100%(AMR-AGR)	-	26,5±1,4 (5,4)	27,0±1,3 (4,7)	28,5±0,4 (1,3)	25,4±0,8 (3,0)
50%AMR-100%AGR	-	30,1±2,7 (9,0)	28,3±1,0 (3,4)	28,8±1,6 (5,6)	29,0±0,9 (3,1)
100%AMR-50%AGR	-	27,7±0,6 (2,2)	28,2±1,0 (3,6)	29,4±1,5 (5,1)	29,7±0,4 (1,4)

f_{cm} = resistência média à compressão (MPa) / s_d = desvio padrão (MPa) / CV = coeficiente de variação (%)

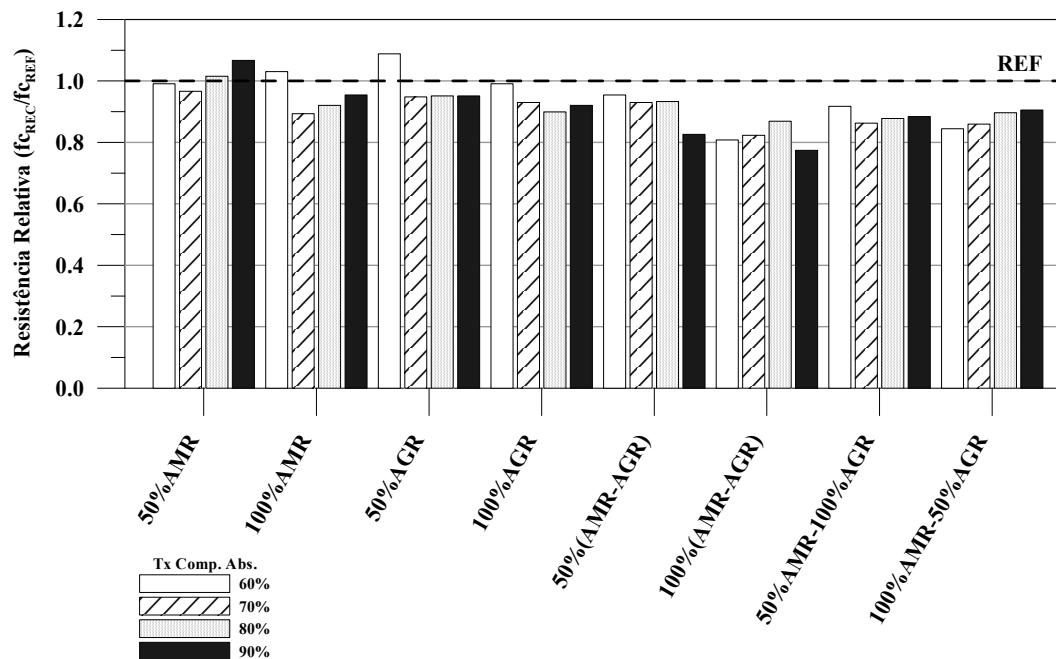


Figura 28 Resistência à compressão relativa das misturas estudadas

A mistura 50%AGR apresentou aumento de 8,8% para taxa de compensação de 60%. Apesar de resultados anteriores (AJDUKIEWICZ; KLISZCZEWIZ, 2002, VIEIRA, 2003; KHATIB, 2005; LEITE, 2001) indicarem uma tendência de redução da resistência do concreto pela introdução de um grão frágil na mistura, neste caso acredita-se que, com a baixa taxa de compensação utilizada, a absorção do agregado graúdo reduziu a relação a/c real da

mistura, ocasionando o aumento de resistência. Para mistura 100%AGR e taxa de compensação de 60% a resistência foi aproximadamente igual a da matriz. Para as demais taxas de compensação, as fragilidades introduzidas pelo uso do agregado graúdo reciclado não foram compensadas pela alteração da relação a/c resultando em redução de resistência.

O teor de água livre inicial também influencia os resultados de resistência à compressão, como pode ser observado na Figura 29. Para as misturas com substituição de apenas um tipo de agregado, quando se utiliza 60% de taxa de compensação, ocorre a falta de água na mistura, para compensar a absorção, e por isso, há um aumento nas resistências, que são função da redução da relação água/cimento na mistura. Por outro lado, ainda não há água suficiente para promover um adensamento adequado e se observa uma redução nas resistências para a taxa de compensação de 70%. À medida que a taxa de compensação aumenta para 80 e 90% (maior teor de água livre inicial) pode ocorrer um dos fenômenos descritos abaixo:

- ocorre uma elevação nas resistências – mistura 50%AMR – devido à melhoria no adensamento, que reduz a quantidade de vazios aprisionados. E ainda, um preenchimento de vazios da matriz promovido pelo alto teor de finos do agregado miúdo reciclado, aumentando a sua densidade e contribuindo para as resistências finais;
- ocorre uma menor taxa de redução da resistência – misturas 100%AMR e 50%AGR – devido à melhoria do adensamento. Contudo, como nessas misturas a relação a/c é maior que na mistura 50%AMR, a resistência à compressão reduz devido a uma redução no consumo de cimento e aumento no teor de água livre, como pode ser observado na Tabela 10 e na Tabela 9, respectivamente, pois o agregado não absorve toda água adicional colocada na mistura, em função da colmatação da superfície dos grãos pelos grãos de cimento, como descrito por Barra e Vasquez (1998). Isso faz com que haja uma sobra de água livre na mistura, que contribui pra redução da resistência do concreto reciclado, quando comparado com o concreto de referência.
- à medida que o teor dos dois tipos de agregados reciclados aumenta, aumenta também o teor de água livre inicial, o que faz com que as resistências dos concretos reciclados sejam sempre menores que a resistência à compressão do concreto de referência para essas misturas.

Na Figura 29 observa-se de forma geral uma tendência à redução das resistências à

compressão dos concretos produzidos, em função do aumento do teor inicial de água livre das misturas.

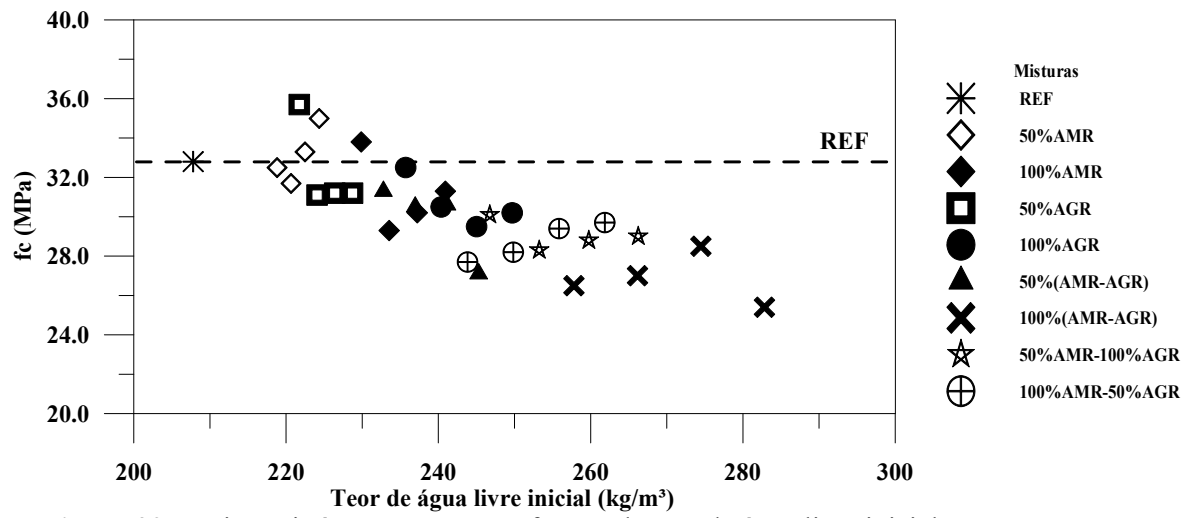


Figura 29 Resistência à compressão em função do teor de água livre inicial

6 CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1.1 Trabalhabilidade

A partir da análise dos resultados apresentados nesse trabalho pode-se fazer os seguintes comentários:

- o aumento do teor de água livre inicial nas misturas de concreto reciclado, a partir do aumento da taxa de compensação de absorção do agregado, melhora a trabalhabilidade dos concretos, permitindo que haja um melhor adensamento do material.
- a textura rugosa e superfície irregular dos agregados reciclados fazem com que o abatimento dos concretos reciclados seja menor que o abatimento do concreto convencional de referência, mesmo com o aumento do teor de água para compensar a absorção. O atrito interno nessas misturas é maior e interrompe o fluxo de escoamento do concreto nessas misturas. Isso torna esse ensaio pouco adequado para medida de trabalhabilidade de concretos reciclados.
- os ensaios de tempo VeBe e espalhamento na mesa de Graff apresentam-se mais adequados à determinação da trabalhabilidade dos concretos reciclados, pois aplicam uma componente dinâmica na determinação da propriedade, o que implica em reduzir a viscosidade e atrito interno das misturas e melhorar as forças de coesão, mesmo para pequenos incrementos do teor de água.
- a partir dos ensaios de abatimento e tempo VeBe as misturas foram classificadas entre plástica e seca. Tal classificação foi estendida para o ensaio de espalhamento de forma a se obter uma correlação entre os resultados obtidos nos três métodos distintos.

6.1.2 Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão sofrem influência do teor de água, consumo de cimento e taxa de substituição dos agregados naturais pelos reciclados. O aumento do teor de agregado graúdo reciclado faz aumentar o consumo de água, o que reduz o consumo de cimento e, conseqüentemente, reduzindo a resistência à compressão.

Para teores de substituição da ordem de 50% de agregado miúdo ou graúdo e taxas de compensação de 80 e 90% tanto a trabalhabilidade quanto a resistência à compressão podem ser consideradas satisfatórias, quando comparadas com o concreto de referência.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Num trabalho de dissertação não é possível fechar todas as lacunas do conhecimento sobre o comportamento de um material. Desse modo, existem muitos trabalhos que ainda podem ser desenvolvidos no sentido de contribuir para a ampliação do conhecimento. Assim, podem ser sugeridos os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Realizar um estudo de dosagem de concretos reciclados baseado no ensaio de espalhamento como medida da trabalhabilidade.
- Avaliar a influência da taxa de compensação em concretos com diferentes faixas de resistência de dosagem.
- Avaliar a influência da taxa de compensação da absorção do agregado reciclado de argamassa sobre as propriedades físicas.
- Avaliar a influência da taxa de compensação da absorção do agregado reciclado de argamassa sobre a durabilidade.
- Avaliar a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo reciclado sobre as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

7 REFERÊNCIAS

ABOU-ZEID, M.N.; FAKHRY, M.M. **Short-term impact of high-aggregate fines on concrete incorporating water reducing admixtures**. ACI Material Journal. P280-285, Julho 2003.

AKBARNEZHAD, A; ONG, K.C.G.; ZHANG, M.H.; TAM, C.T.; FOO, T.W.J. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials** V. 25 p. 3469–3479, 2011.

ALEXANDER, M.;MINDESS. S. **Aggregates in Concrete**. New York, 2005. 448p.

AGRELA, F.; SÁNCHEZ de JUAN, M.; AYUSO, J.; GERALDES, V.L.; JIMÉNEZ, J.R. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. **Construction and Building Materials**. Vol. 25, pg. 3950–3955, 2011.

AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWIZ, A. Influence of Recycle Aggregates on Mechanical Properties of HS/HPC. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 24, pg. 269-279, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Annual Book of ASTM Standards**. Section 4: Construction. v. 04.02: Concrete and Aggregates. 2007. 940p.

AMON KATZ **Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete**, v.33, p.703-711, 2003.

ÂNGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção de demolição reciclados**. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2000, 155p.

ÂNGULO, S. C.; ULSEN, C.; KAHN, H.; JOHN, V.M. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 5, 2002, São Paulo. **Anais**.

ÂNGULO, S.C. Characterisation and recyclability of construction and demolition waste in Brazil. In: Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications with Alternative Materials, 2003b, San Sebastian. **Proceedings**. ISCOWA. p.209-218.

ÂNGULO, S.C.; Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. In: **i Conferência latino-americana de construção sustentável. X encontro nacional de tecnologia do ambiente construído**. São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado em estado solto – determinação da massa unitária: **NBR 7251**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado para concreto: **NBR 7211**. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – determinação da absorção e massa específica do agregado graúdo: **NBR 9937**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – determinação da composição granulométrica: **NBR 7217**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman: **NBR 9776**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – determinação da absorção de água em agregados miúdos: **NBR 9777**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – ensaio de qualidade do agregado miúdo: **NBR 7221**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – determinação da resistência à compressão: **NBR 7215**. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica: **NBR 6474**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone: **NBR 7223**. Rio de Janeiro, 1982.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto fresco – perda de abatimento: **NBR 10342**. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto: **NBR 5738**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos sólidos: **NBR 10004**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone - método de ensaio.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - **NBR NM 68**: Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff.

BAIRAGI N. K.; RAVANDE K., PAREEK V. K. Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. **Resources, Conservation and Recycles**, Vol. 9 P.109-126. 1993.

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

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

BRITO, J. de. **Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões**, Lição de Síntese, Provas de Agregação em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2005.

BRITO FILHO, Jerson A. Cidades versus Entulho. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM EM CONSTRUÇÃO CIVIL, 2. Comitê Técnico do IBRACON; CT 206 – Meio Ambiente. **ANAIS**. P.56-57. São Paulo. 1999.

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**. São Carlos, 2007. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2007, 250p.

CARNEIRO, A. P.; QUADROS, B. E. C. *et al.* **Características do entulho e do agregado reciclado**. In: **PROJETO ENTULHO BOM. Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção**. A. P. Carneiro, I. A. S. Brum, J. C. S. Cassa (Eds). Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. p 142-187

CAZAL, A.C.; Jara R.C.; Acosta A. M. Influencia de la forma y la textura de los agregados gruesos en las propiedades del hormigón. **ibracon 2009. ANAIS**.

CECCATO, M. R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. São Paulo, 1998. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

CHEN, H. J.; YEN, T.; CHEN, K.H. Use of buildings rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Resources**. V.33, p.125-132, 2003.

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

PAUW, P. DE; THOMAS, P.; VYNCKE, J.; *et al.* Shrinkage and creep of concrete with recycled materials as coarse aggregates. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.;

EGUCHI, K.; TERANISHI, K.; NAKAGOME, A.; KISHIMOTO, H.; SHINOZAKI, K.; NARIKAWA, M. Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. *Construction and Building Materials*, v.21, 2007, p. 1542-1551.

ETXEBERRIA, M. **Experimental study on microstructure and structural behaviour**, Tese de Doutoramento, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, 2004.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, Spain, v. 37, p. 735–742, 2007.

EVANGELISTA, L., Brito, J. Concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**. Vol 29, pp 397-401. Enero 2007.

FERNANDEZ CANOVAS, M. **Hormigón**, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 2005

FONTEBOA, B. G.; ABELLA, F. M. Shear strength of recycled concrete beams. *Construction and Building Materials*, Spain, v.21, 2007, p.887-893.

González-Fonteboa. B., Martínez-Abella, F., Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Influencia de la variación de los parâmetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre SUS propiedades físicas y mecânicas. **Materials and mechanical properties. Building and Environment 43** (2008) 429–437

GAYARRE, FERNANDO LÓPEZ. Gijon, 2008. Dissertação (Doutorado) – Universidad de Oviedo. 328p.

GÓMEZ-SOBERÓN, José M.V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregates an experimental study. **Cement and Concrete Research 32** (2002) 1301– 1311.

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

HAMASSAKI, L. T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M. C. Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria. In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E

REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1997. 170 p. p.107–115.

HAMASSAKI, L. T.; **Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria. In: Workshop – Reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil.** São Paulo, 1996. PP. 107-115.

HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. **Concrete International**, v. 5, n. 1, p. 79-83, 1983.

HANSEN, T.C. Recycled of demolished concrete and masonry. London: Chapman & Hall, 1992. 316p. Part One: **Recycled aggregates and recycled aggregate concrete**, p. 1-160. (RILEM TC Report 6).

HENDRIKS C. F.; PIETERSEN H.S. Sustainable Raw Materials: **Construction and Demolition Waste**, RILEM Publication, Cachan Cedex, France, 2000.

KHALAF, F.M.; DEVENNY, A. Performance of brick aggregate concrete at high temperatures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol.6, n.6 pg. 556-565, 2004b.

KHALAF, F.M; DEVENNY, A, ALAN, S. Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in Concrete: review. **ASCE J Mater Civil Engineering**, 2004:331–40.

KHATIB JM. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement Concrete Res.** 2005 ; 35(4):763–9.

KHATIB, JM., Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research** 35 (2005) 763– 769.

KOU, S. C.; POON, C. S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. **Cement Concrete Composite**, doi: 10.1016/j, 2009.

KOU, S. C.; POON, C. S.; CHAN, D. Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. **Materials and Structures**, v.41, p.1191-1201, 2008.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Dissertação Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2001.

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

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

Li, J., XIAO, H, ZHOU, Y. Influence of coating recycle aggregates surface with pozzolanic powder on properties of recycle aggregate concrete. **Construction and buildings Materials**. V23. 1287-1291. 2009.

Li, X. Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I: material behaviour of recycled aggregate concrete. **Resource Conserv Recycle**. v53 (1–2). P.36–44, 2008.

LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 213-225.

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

LOPES, L.R. Avaliação da interface dos finos no desempenho de concretos com resíduos de construção e demolição. Londrina, 2005. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual de Londrina. 2005, 148p.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concretos**. Porto Alegre, 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007, 180p.

MALESEV, M; RADONJANIN, V.; MARINKOVIC, S. Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. www.mdpi.com/journal/sustainability V.2, 1204-1225. 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. PINI. São Paulo, 1997. 828p.

NEWMAN, J.; OWENS, P. Properties of lightweight concrete. **Advanced Concrete Technology** (2003).

OLIVEIRA M. B., E. VARQUEZ. The influence of retained moisture in aggregate from recycling on the properties of new hardened concrete. **Waste Management**. 16 (1996) 113-117.

PADMINI, A.K., Ramamurthy, K., Mathews, M.S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials** 23 (2009) 829–836

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999, 189p.

PINTO, T. P. Resultados da gestão diferenciada. **Téchne**, n. 31, p. 31-34, nov/dez. 1997.

POON CS, Shui ZH, Lam L, Fok H, Kou SC. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cemente and Concrete Res.** 2004;34:31–6.

POON, C. S.; CHAN D. Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. **Construction and Buildings Materials.** Vol.20 2006;569-577.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. **Materials and Structures**, v.40, p.981-988, 2007.

POON, C. S.; YU, A. T. W.; NG, L.H. On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. **Resources, Conservation and Recycling**, v.32, p.157-172, 2001.

QUEBAUD, M. R.; BUYLE-BODIN, F. A reciclagem de materiais de demolição: utilização dos agregados reciclados no concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 5., 1999, São Paulo. **Anais.** [CD-ROM]. São Paulo: ABCP, 1999. Arquivo: 3-01, 14p.

QUEBAUD, M. R.; ZAHARIEVA, R.; WIRQUIN, E.; BUYLE-BODIN, F. Influência do teor em agregados proveniente da reciclagem de materiais de demolição (agregados reciclados) na permeabilidade do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 41., 1999, Salvador. **ANAIS.** [CD-ROM]. São Paulo: IBRACON, 1999. Arquivo: 2-1-18, 16p.

RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environment**, v. 42, p. 407–415, 2007.

RANVIDRARAJAH, R. S.; LOO BENG, Y. H.; TAM, C. T. Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 39, n. 141, p. 214-220, 1987.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v.50, p.71-81, 2006.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources Conservation & Recycling**, India, v. 5, p.71-81, 2007.

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

REIS, CARINE N. DA SILVA. **Influencia da utilização de agregado miúdo de RCD na aderência aço-concreto reciclado.** Feira de Santana, 2009. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana. 2009.

RILEM RECOMMENDATION. Specification for concrete with recycle aggregates. **Materials and Structures**. N.27, p.557-9, 1994.

SANTIAGO, E. Q. R. **Utilização de agregados de EVA e RCD para obtenção de concretos leves**. Feira de Santana, 2008. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana. 2008, 168p.

SHI-CONG, Kou, Chi-Sun, Poon. Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. **Construction and Building Materials** **23** (2009) 2877–2886

SINDUSCON- BA, Sindicato da Indústria da Construção Civil - Bahia http://www.sinduscon-ba.com.br/exibe_noticia, 2009.

SKALNY, J. y MINDESS, S. **Materials Science of Concrete V**, The American Ceramic Society, Ohio, Cap. 3, 1998.

TABSH S. W.; ABDELFAH A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Buildings Materials**. 2009, v.23 1163-7.

TAM WYV, Gao XF, Tam CM. Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Res** 2005;35(6):1195–203.

TAM, V, TAM, C.M., LE, K.N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. **Resources, Conservation and Recycling** **50** (2007) 82–101.

TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. Drying shrinkage behavior of recycled aggregate concrete. **Concrete International** v. 18, n. 11, p. 58-61, 1996a.

TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. **ACI Materials Journal**, v. 93, n. 2, p. 182-190, 1996b.

TOPÇU BI, SENGE S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. **Cement and Concrete Res** 2004;34(8):1307–12.

TU, T. Y.; CHEN, Y. Y.; HWANG, C. L. Properties of HPC with recycled aggregates. **Cement Concrete Comp**, v.36, p.943-950, 2007.

VAZQUEZ, E.; ALAEJOS, P.; SANCHEZ, M.; ALEZA, F.; BARRA, M.; BURÓN, M.; CASTILLA, J.; DAPENA, E.; ETXEBERRIA, M.; FRANCISCO, G.; GONZÁLEZ, B.; MARTÍNEZ, F.; MARTÍNEZ, I.; PARRA, J.; POLANCO, J.; SANABRIA, M. **“Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural”**, Comisión 2, Grupo de Trabajo 2/5 “Hormigón reciclado”, Monografía M-11 ACHE, Madrid, 2006.

VIEIRA, G. V. **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, 2003. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2003. 150 p.

VIVIAN W.Y. TAM, C.M. TAM Economic comparison of recycling over-ordered fresh concrete: A case study approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v.52, p.208-218, 2007.

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

XIAO, J. Z.; LI, J. B.; ZHANG, C. “On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete - an overview”, **Materials and structures**, vol. 39, pp. 655-664, 2006.

XIAO, J-Zh, Li J.B, Zhang Ch (2005) Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, 35(6):1187–1194.

YANG, JIAN; DU, QIANG; BAO YIWANG. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. **Construction and Building Materials**, v.25, p.1935-1945, 2011.

YAPRAK, H.; ARUNTAS, H.Y.; DEMIR, I.; SIMSEK, O.; DURMUS, G. Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. **International Journal of the Physical Sciences** Vol. 6(10), pp. 2455-2461. 18 May, 2011

ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F.; WIRQUIN, E. Assessment of the surface permeation of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 25 p.223- 232, 2003.

ZAHARIEVA, R; BUYLE-BODAN, F; SKOCZYLAS, F; WIRQUIN, F Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.25, p. 223-232, 2002.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. Campinas, 1997. 140 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil - FEC, Universidade Estadual de Campinas.

APÊNDICES

**APÊNDICE 1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DO PROGRAMA
EXPERIMENTAL**

Tabela 16 Resultados individuais de resistência à compressão axial das misturas avaliadas

Misturas	Resistência à Compressão (MPa)																			
	REF				Taxa de compensação da taxa de absorção de água															
					60%				70%				80%				90%			
Referência	32,0	31,6	29,7	34,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50%AMR	-	-	-	-	31,3	31,6	32,0	32,1	33,9	30,5	25,0	29,6	32,9	30,8	34,7	32,2	35,2	35,4	34,1	34,4
100%AMR	-	-	-	-	35,3	32,9	26,5	33,1	24,8	24,9	24,9	30,8	30,8	27,4	30,4	29,5	31,6	27,3	31,9	30,5
50%AGR	-	-	-	-	30,3	35,2	34,6	33,5	29,4	26,9	23,6	32,8	33,9	30,3	29,2	29,5	33,9	32,7	31,6	26,3
100%AGR	-	-	-	-	20,3	28,7	29,5	24,2	27,3	25,3	28,3	25,8	27,9	29,0	28,2	31,4	32,2	28,3	27,4	30,1
50%(AMR-AGR)	-	-	-	-	33,8	30,5	25,0	29,6	25,6	20,6	32,3	33,4	27,0	29,2	32,4	30,0	27,6	28,9	24,7	24,8
100%(AMR-AGR)	-	-	-	-	24,8	27,2	22,4	27,4	27,6	25,5	24,7	27,7	24,4	25,9	25,9	23,3	24,0	24,5	25,9	25,8
50%AMR-100%AGR	-	-	-	-	32,9	27,4	22,2	22,2	27,9	26,8	29,4	27,6	27,4	30,6	28,4	26,9	28,4	30,1	27,7	28,6
100%AMR-50%AGR	-	-	-	-	28,4	20,1	21,4	22,2	27,7	26,8	29,4	27,6	31,0	28,0	29,3	27,3	29,0	29,2	29,7	30,0