

REGINA CÉLIA COURA DE ARAÚJO

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE CONCRETOS SUSTENTÁVEIS UTILIZANDO RCD COMO AGREGADO GRAÚDO, RESÍDUO DE MÁRMORE COMO AGREGADO MIÚDO E COM ADIÇÃO DE FIBRA SINTÉTICA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

Orientadora: Prof^a RITA DE CÁSSIA SILVA SANT'ANNA ALVARENGA – D. Sc.

Co-Orientador: Prof. ANTÔNIO EDUARDO POLISSENI – D. Sc.

VIÇOSA

2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A663a
2015

Araújo, Regina Célia Coura de, 1964-
Avaliação experimental de concretos sustentáveis utilizando
resíduo de construção e demolição como agregado graúdo,
resíduo de mármore como agregado miúdo e com adição de fibra
sintética / Regina Célia Coura de Araújo. – Viçosa, MG, 2015.
190f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Rita de Cássia Silva Sant Anna Alvarenga.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.166-190.

1. Concreto. 2. Resíduos de materiais de construção.
3. Resíduos industriais. 4. Mármore. 5. Fibras sintéticas.
6. Desenvolvimento sustentável. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.1834

REGINA CÉLIA COURA DE ARAÚJO

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE CONCRETOS SUSTENTÁVEIS UTILIZANDO RCD COMO AGREGADO GRAÚDO, RESÍDUO DE MÁRMORE COMO AGREGADO MIÚDO E COM ADIÇÃO DE FIBRA SINTÉTICA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

Aprovada: 20 de outubro de 2015.

Prof. Reginaldo Carneiro da Silva
(UFV)

Sérgio Kitamura
(IFSudeste-MG)

Prof. Antônio Eduardo Polisseni
(Co-Orientador)
(UFJF)

Maria Teresa Gomes Barbosa
(UFJF)

Prof^a Rita De Cássia Silva Sant'anna Alvarenga
(Orientadora)
(UFV)

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	3
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS.....	8
ABSTRACT	15
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA.....	16
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	20
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 CONCRETOS COM RCD	22
2.1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	91
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	92
3.1.1 CIMENTO PORTLAND	92
3.1.2 AGREGADOS.....	94
3.1.2.1 AGREGADO MIÚDO NATURAL (AMN).....	94
3.1.2.2 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO - RCD.....	95
3.1.2.3 AGREGADO GRAÚDO	98
3.1.2.4 AGREGADO MIÚDO DE REJEITO DE MÁRMORE TRITURADO (RMT).....	100
3.1.3 ÁGUA.....	101

3.1.4 FIBRAS DE POLIPROPILENO	101
<u>3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</u>	103
3.2.1 VERIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS	105
<u>3.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO.....</u>	106
3.3.1 CONSISTÊNCIA	106
<u>3.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO.....</u>	107
3.4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	107
3.4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	107
3.4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	109
3.4.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE	111
3.4.5 COEFICIENTE DE POISSON.....	113
3.4.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	113
3.4.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	114
3.4.8 ANÁLISE FATORIAL 2 ³	114
3.4.9 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ÓPTICA	116
<u>4 RESULTADOS E ANÁLISES.....</u>	118
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	118
4.2 ENSAIO DE CONSISTÊNCIA.....	119
4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	121
AS ANÁLISES DE REGRESSÃO POR EFEITOS CONTROLÁVEIS, UTILIZANDO A FERRAMENTA MINITAB, SÃO DADAS NA TABELA 4.5.	126
4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	129
AS ANÁLISES DE REGRESSÃO POR EFEITOS CONTROLÁVEIS, UTILIZANDO A FERRAMENTA MINITAB, SÃO DADAS NA TABELA 4.9.	134
4.5 DETERMINAÇÃO DA TRAÇÃO NA FLEXÃO	138
AS ANÁLISES DE REGRESSÃO POR EFEITOS CONTROLÁVEIS, UTILIZANDO A FERRAMENTA MINITAB, SÃO DADAS NA TABELA 4.12.	141
4.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE DE POISSON	144
4.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	147

4.8 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	149
4.9 ANÁLISE DE MICROESTRUTURAS POR MICROSCÓPIO ÓPTICO.....	151
5 CONCLUSÕES:	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Três campos sobrepostos definindo desenvolvimento sustentável - adaptado pela autora de BLOK 2011	17
Figura 2.1- Representação esquemática das fases de ciclo de vida – adaptada pela autora de BRAGANÇA (2011).....	27
Figura 2.2 – Resíduos de construção e demolição (2013).....	29
Figura 2.3 - Britador de mandíbula cônico - 2015	35
Figura 2.4 - Detalhe do mecanismo do britador de mandíbula cônico	36
(http://tecnicoemineracao.com.br - 2015).....	36
Figura 2.5 - Detalhe do funcionamento do britador cônico (http://www.sbmmine.com - 2015).....	37
Outro equipamento é o moinho-argamassadeira, que faz a fragmentação por meio de compressão (esmagamento) aplicada por rodas metálicas pesadas, que passam sobre o material. No mesmo compartimento (caçamba) onde é feita a moagem, faz-se a preparação de argamassas.....	38
Figura 2.6 – Peneira vibratória da Usina de Belo Horizonte - 2013.....	40
Figura 2.7 - Esquema de funcionamento de um classificador a ar vertical (KOHLEK; KURKOWSKI, 1998, modificado).....	41
Figura 2.8 - Esquema de funcionamento de um classificador do tipo ciclone a ar	42
Figura 2.9: Classificador espiral	42
Figura 2.10 - Área destinada à catação manual e separação magnética dos agregados reciclados na usina de Belo Horizonte - 2013.....	46
Figura 2.11 - Esquema de funcionamento do jigge modelo alljig	48
Figura 2.12 - Esquema do leito de um jigge ideal processando carvão (DIEUDONNÉ <i>et al.</i> , 2001, modificado).....	49
Figura 2.13 – Microestrutura do concreto.....	58
Figura 2.14 – Microestrutura do concreto reciclado.....	59
Figura 2.15 – Retração dos concretos com RCD e agregado natural (BUTTLER, 2003).....	61
Figura 2.16: Absorção de água por imersão (ANGULO, 2000).....	64
Figura 2.17 - Diagrama de tensão/deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto: revista <i>Téchne</i> , 2013.....	78
Figura 2.18 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem reforço de fibras: Figueiredo, 2011.....	84
Figura 2.19: Esquema de concentração de tensões para um concreto com o reforço de fibras: FIGUEIREDO (2011).....	85
Figura 2.20: Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo: FIGUEIREDO (2000).....	87
Figura 2.21: Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo: FIGUEIREDO (2000).....	87
Figura 3.1 – Constituição percentual do RCD em massa.....	96
Para a produção de RCD, a empresa de beneficiamento de entulho de Belo Horizonte possui uma estação do tipo fixa conforme ilustra a Figura 3.2.	96
Figura 3.2 – Fluxograma da usina de reciclagem da fração mineral do RCD	97
Figura 3.3 – Disposição do corpo-de-prova para ensaio de tração	108
Figura 3.4 – Esquema do ensaio de resistência à tração na flexão: Oliveira, 2007.	110

Figura 3.5 – Corpos de prova instrumentados para ensaio de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.	112
Figura 4.1 – Abatimento da mistura com RCD rejeito de mármore e fibra (S = 40 mm).	120
Figura 4.2 – Valores dos slumps das misturas.....	121
Figura 4.3 – Resistência média à compressão (MPa) x Tipos de misturas.....	123
Figura 4.4 – Resistência média à tração por compressão diametral (MPa) x Tipos de misturas.....	131
Figura 4.5 – Resistência média à tração na flexão (MPa) x Tipos de misturas.....	139
Figura 4.6 – Corpo-de-prova com RMT.....	140
Figura 4.7 – Módulo de elasticidade (GPa).....	145
Figura 4.8 – Coeficiente de Poisson.....	146
Figura 4.9 – Absorção de água por imersão.....	148
Figura 4.10 – Absorção de água por capilaridade (g/cm ²).....	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Sistema de classificação do RCD proposto por Lima (1999).	45
Tabela 2.2 – Propriedades de agregados de concreto reciclado.	64
Tabela 2.3 - Absorção de água de agregados de alvenaria de tijolos cerâmicos reciclados.	65
Tabela 2.4 – Massa específica e absorção de água de agregados graúdos reciclados separados por faixas de densidade – Carrijo (2005).....	73
Tabela 2.5 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes (BENTUR e MINDESS, 1990).	79
Tabela 2.6 – Propriedades Mecânicas Típicas de Fibras Sintéticas: ACI (2002).....	81
Tabela 3.1 – Composição química, resistência e índices físicos do cimento CIII E 32.	93
Tabela 3.2 – Caracterização física do AMN.	94
Tabela 3.3 – Caracterização física do RCD.	98
Tabela 3.4 – Caracterização do agregado graúdo – zona granulométrica 9,5/25	99
Tabela 3.5 - Características do mármore	100
Tabela 3.7 – traços dos concretos confeccionados.....	104
Tabela 3.8 – Detalhamento dos ensaios realizados.....	105
Tabela 4.1 – Nomenclatura dos traços dos concretos confeccionados.....	119
Tabela 4.2 – Abatimento dos concretos nas diferentes misturas.	120
Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão em MPa	122
Tabela 4.4 – Resultados obtidos na análise estatística da f_{cm} para resistência à compressão para CP com os diferentes tipos de misturas – valores de F.....	124
Tabela 4.5 - Factorial Fit: Resistência à compressão axial aos 63 dias versus am; fibra; ag	126
Tabela 4.6 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 63 dias de am; fibra; ag	126
Tabela 4.7 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (MPa)	130
Tabela 4.8 – Resultados obtidos na análise estatística da f_{tm} para resistência à tração por compressão diametral para CP com os diferentes tipos de misturas – valores de F.....	132

Tabela 4.9 - Factorial Fit: Resistência à tração por compressão diametral aos 63 dias versus am; ag; fibra	135
Tabela 4.10 – Análise de Variância da resistência à tração por compressão diametral aos 63 dias versus am; ag; fibra.....	136
Tabela 4.11 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão (MPa).....	139
Tabela 4.12 - Factorial Fit: Resistência à tração na flexão aos 28 dias versus am; ag; fibra	141
Tabela 4.13 – Análise de Variância da resistência à tração na flexão aos 28 dias versus am; ag; fibra.....	142
Tabela 4.14 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias	145
Tabela 4.15 – Resultados do ensaio de coeficiente de Poisson aos 28 dias	146
Tabela 4.16 – Resultados do ensaio de absorção por imersão dos concretos	148
Tabela 4.17 – Absorção de água por capilaridade.....	149

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Concreto Portland
A_i	Absorção de água por imersão
A_c	Absorção de água por sucção capilar
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AMA	Agregado miúdo artificial
AMN	Agregado miúdo natural
AR	Álcali-resistente
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DNITT	Departamento Nacional de Transporte Terrestre
CAA	Concretos auto-adensáveis
CBC	Concretos de bagaço de cana-de-açúcar
CCA	Cinzas de casca de arroz
cm	Centímetros
CP	Corpo-de-prova
CPII E 32	Cimento Portland composto com escória de alto forno e resistência à compressão mínima aos 28 dias de idade de 32 MPa.
CPIII 40 RS	Cimento Portland alto forno com resistência à compressão mínima aos 28 dias de idade de 40 MPa.
CP V ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CV	Coeficiente de variação
D	

DRX	Diâmetro
dm^3	Difração de raios-X
IPT	Decímetros cúbicos
E	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
E_{ci}	Exsudação
FRX	Módulo de elasticidade
f_c	Fluorescência de raios-X
f_{tc}	Resistência à compressão axial
f_{tf}	Resistência à tração por compressão diametral
F_o	Resistência à tração na flexão
F_α	Valor de Fisher calculado
f_{c7}	Valor de Fisher tabelado
f_{c14}	Resistência à compressão aos sete dias de idade
f_{c28}	Resistência à compressão aos catorze dias de idade
f_{c63}	Resistência à compressão aos 28 dias de idade
GPa	Resistência à compressão aos 63 dias de idade
Iv	Giga Pascal
m^3	Índice de vazios
mm	Metro cúbico
MPa	Milímetros
μm	Mega Pascal
N	Mícrons metro
NBR	Newtons

NM	Norma Brasileira Registrada
PH	Norma Mercosul
PIB	Pontes de Hidrogênio
p.p.m.	Produto Interno Bruto
ONU	Partes por milhão
RCD	Organização das Nações Unidas
RMT	Resíduo de construção e demolição
kg	Rejeito de mármore triturado
ton	Kilograma
%	Toneladas
°C	Porcentagem
#	Graus Celsius
	Abertura da malha da peneira

Agradeço a Deus, por todas as oportunidades que me foram apresentadas no decurso de minha vida, porque mesmo eu não aceitando algumas delas Ele ainda assim continua acreditando em mim.

Aos meus pais e irmãos que me ajudaram na minha formação, tanto como pessoa quanto na educação formal, fazendo com que tudo fosse mais ameno.

Ao Jorge, que sempre esteve presente, auxiliando-me em todas as adversidades e estimulando-me a sempre dar mais um passo na busca dos meus ideais.

Aos meus filhos, por todo amor que me foi propiciado na vida fazendo com que tudo tivesse sentido.

Aos professores Rita e Polisseni, pelo empenho e confiança para que este trabalho desse certo.

Ao Máximo, laboratorista do IFET, por todo auxílio nos ensaios.

Aos professores Kitamura e Cláudia do IFET, pela orientação e amizade durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Elisson do IFET, pela contribuição nos ensaios de microscopia.

À professora Teresa da faculdade de Engenharia da UFJF, meu agradecimento por todo incentivo durante toda minha vida profissional e acadêmica, estimulando-me sempre no desenvolvimento deste processo.

Ao professor Reginaldo, pela atenção e carinho.

Aos meus colegas de trabalho que souberam compreender este período na minha vida profissional, e que de alguma forma tiveram seu volume de trabalho aumentado, meus sinceros agradecimentos.

Ao professor Geraldo da faculdade de Engenharia da UFJF, por ter cedido o espaço de seu laboratório para a guarda do material desta pesquisa.

A todos, muito obrigada!

RESUMO

O trabalho consistiu em analisar algumas propriedades mecânicas, durabilidade e microscopia óptica dos concretos, efetuando-se um estudo comparativo entre o concreto confeccionado com cimento do tipo CII E 32, brita de gnaiss e areia natural de rio com os concretos executados, substituindo-se o agregado graúdo de brita de gnaiss por resíduo de construção (RCD) e utilizando rejeito de mármore triturado (RMT) como agregado miúdo natural, no intuito de avaliar a possibilidade do uso destes compósitos em estruturas. Foram confeccionadas em laboratório sete tipos de misturas para efetuar as combinações possíveis destes insumos. A alguns desses concretos foram ainda adicionadas fibras sintéticas. Os resíduos de construção e demolição foram coletados da Usina de Reciclagem de Entulho de Belo Horizonte e tiveram sua composição granulométrica adequada à granulometria da brita de gnaiss. O agregado miúdo de rejeito de mármore triturado foi obtido da Marshetti Moagem de Minérios Ltda, e sua granulometria foi adequada à granulometria da areia natural de rio. As propriedades dos concretos foram ainda analisadas por meio de um experimento de análise de regressão fatorial. Em termos gerais, o uso combinado de agregado graúdo reciclado com agregado miúdo reciclado e fibra foi vantajoso, mas as propriedades dos concretos foram tanto melhores quanto menor foi a porosidade (ou, maior massa específica) dos agregados. Alguns concretos com agregados reciclados chegaram a apresentar resistências mecânicas maiores que as do concreto de referência. Os resultados encontrados permitem afirmar que concretos com agregados reciclados podem ser usados em estruturas, mas com restrições.

Palavras-Chave: *Resíduo de construção e demolição, Reciclagem, Concreto, Estruturas.*

ABSTRACT

The work was to analyze some mechanical properties, durability and optical microscopy of the concrete, making a comparative study between the concrete made with cement CII type E 32, crushed stone gneiss and natural river sand with the run concrete, is replacing the coarse aggregate of gneiss gravel for construction waste (RCD) and using tailings crushed marble (RMT) as an aggregate natural kid in order to evaluate the possibility of using these composite structures. They were prepared in the laboratory seven types of mixtures to effect the possible combinations of these inputs. A few of these concretes were also added synthetic fibers. Waste from construction and demolition waste were collected from Scrap Recycling Plant of Belo Horizonte and had a suitable particle size to the particle size composition of gravel gneiss. The fine aggregate of crushed marble waste was obtained from Margran marmoaria, and its particle size was adequate to the grain size of natural river sand. The properties of the concretes were also analyzed by a regression analysis factorial experiment. In general, the combined use of recycled coarse aggregate and kid recycled with added fiber was advantageous, but the properties of the concretes were somewhat better as the porosity is lower (or higher density) of the aggregates. Some concrete with recycled aggregates come to have higher mechanical strength than the reference concrete. It was possible to state that concrete with recycled aggregates can be used in structures, but with restrictions.

Keywords : *construction and demolition waste , recycling , concrete, structures .*

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Atualmente, o principal desafio que o setor da construção enfrenta passa por encontrar o equilíbrio entre as diferentes edificações e simultaneamente desenvolver produtos que sejam sustentáveis durante a totalidade do seu ciclo de vida. A importância do ambiente construído no cotidiano da população revela a grandeza da interligação da indústria de construção com o Desenvolvimento Sustentável, uma vez que o homem passa a maior parte de seu tempo nos edifícios, locais onde mora ou trabalha.

Para que a construção sustentável seja uma realidade, os usuários devem olhar para as questões de sustentabilidade como um aspecto que, além de melhorar o desempenho ambiental dos seus edifícios, se traduz também no aumento de conforto e em menores custos de construção e utilização, além de serem tecnicamente viáveis.

Nos estudos para avaliação de sustentabilidade, o desenvolvimento sustentável pode ser visto como um item no centro dessa questão. Os valores éticos e culturais de um grupo são os pilares que definem sua política ambiental, no qual três setores principais e sobrepostos destacam-se: bem-estar sócio-econômico, qualidade ambiental e viabilidade econômica, o qual define o espaço para o desenvolvimento sustentável. Esta estrutura conceitual,

também pode ser referida como: pessoas, planeta e prosperidade (que anteriormente era definido como lucro), sendo assim, a Figura 1.1 mostra a estrutura básica em que objetivamente o significado de sustentabilidade fica realmente definido, Blok *et al* (2011).

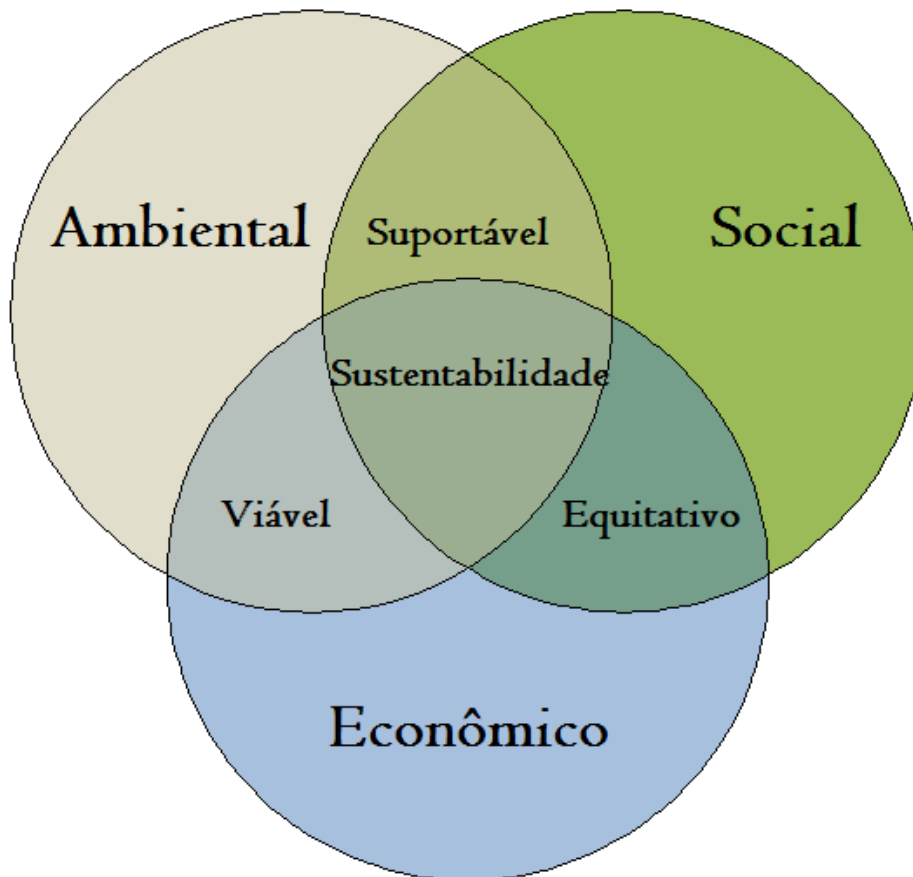


Figura 1.1 - Três campos sobrepostos definindo desenvolvimento sustentável - adaptado pela autora de BLOK 2011

Nas avaliações da sustentabilidade, as propriedades e/ou a construção em si, precisam ser analisadas de uma forma metodológica. Não só as propriedades do edifício e/ou a própria construção devem ser objeto de estudo, mas também todos os processos influentes e relevantes envolvidos numa construção, tanto quanto o funcionamento como também as possíveis demolições do edifício têm que ser tidos em conta. Todo o ciclo de vida de extração de materiais para construção, demolição, reutilização e conseqüentemente os de resíduos produzidos devem ser analisados. Isto requer uma abordagem de ciclo de vida integrado.

Em contrapartida, com o aquecimento do setor da construção civil nos últimos anos, tornou-se imperioso o estudo da utilização de materiais alternativos como substitutos dos insumos naturais utilizados, uma vez que as reservas de recursos naturais são finitas e, desta forma prolongando o ciclo de vida de alguns materiais consagrados utilizados na construção civil, tais como agregado graúdo oriundo de brita de gnaisse.

No Brasil, a demanda desses agregados vem aumentando a cada ano. De acordo com John (2000), o consumo estimado de agregados naturais, somente na produção de concretos e argamassas, era, no ano 2000, de aproximadamente 220 milhões de toneladas. Buest Neto (2006) menciona um consumo na ordem de 395 milhões de toneladas/ano. Serna (2009) divulgou que a produção brasileira alcançou um total de 279 milhões de toneladas de areia e 217 milhões de toneladas de rocha britada. Nesse período, a participação média dos agregados no valor da produção mineral nacional situou-se próximo de 18%.

Com relação à produtividade, a mineração brasileira de agregados tem muito a desenvolver, se comparada a dos países da Europa Ocidental e dos EUA, onde a mão de obra é treinada e grandes investimentos são feitos na modernização das instalações de produção. Nos Estados Unidos, por exemplo, o índice de produtividade varia de 1.500 a 2.000 m³/homem/mês, enquanto que, no Brasil, a média fica em torno de 250 m³/homem/mês no caso da areia (ALMEIDA, 2009).

Um dos maiores consumidores dessas matérias-primas é a construção civil, principalmente quando se fala de insumos para confecção de concreto, pois em sua composição, chega a possuir até três quartas partes (em volume) ocupadas pelos agregados, que são os agregados graúdos e miúdos. (NEVILLE, 2013).

Todavia, apesar da construção civil ser um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais, ela também se apresenta como uma das mais eficazes alternativas para consumir materiais reciclados.

O reaproveitamento de resíduos pela indústria da construção civil vem se consolidando como prática importante para a sustentabilidade seja

atenuando o impacto ambiental gerado pelo setor ou apenas reduzindo custos. O processo de reciclagem de materiais deve ser feito de forma cautelosa e criteriosa para garantir o sucesso destes produtos no mercado (ÂNGULO *et al*, 2001).

Nas referências quanto à incorporação de resíduos na produção de materiais, Gonçalves (2000) evidencia a redução do consumo de energia para a produção do mesmo produto com resíduos, e pode, dependendo de onde esteja localizado o resíduo e seu mercado consumidor, diminuir distâncias de transporte e contribuir para a redução do custo.

Neville (2013) destaca que embora todas as propriedades do agregado possam ser examinadas, é difícil definir um bom agregado senão dizendo que com ele pode ser feito um bom concreto. Desta maneira, deve-se sempre usar o critério do desempenho no concreto.

Esta procura incessante de materiais substitutivos para a construção civil induz os pesquisadores a desenvolverem novos produtos por meio de resíduos, como uma alternativa para serem absorvidos pelo mercado de maneira segura e sustentável. Trata-se de uma tarefa complexa que envolve o conhecimento das características de todos os materiais que irão compor o produto final e ainda necessitam ser, entre outras propriedades, resistentes e duráveis, além de apresentar massa específica adequada ao uso e preço de mercado igual ou inferior ao daqueles produtos similares disponíveis e normalizados.

Corroborando com o que foi exposto, pretende-se neste trabalho realizar um estudo do comportamento de concretos com incorporação de resíduo de construção e demolição (RCD) como agregado graúdo e areia de rejeito de beneficiamento de mármore (RMT), como agregado miúdo. Buscando o incremento das propriedades do produto final, será avaliada a adição de fibra poliéster à mistura, analisando a interação com a mesma, buscando um concreto sustentável para fundações do tipo radier, canais de irrigação, capeamentos, concreto projetado para suporte e estabilização, ciclovias, passeios, dormentes para ferrovias, pátios de cargas de cais em áreas portuárias, defensas de concreto em rodovias e outros.

Embora existam em andamento inúmeros estudos com adição ou substituição de RCD e RCC (resíduo de construção civil) ao concreto, o que motivou esta pesquisa foi a carência de resultados experimentais sobre o comportamento do concreto com RMT, RCD, bem como a adição de fibras a estes concretos.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo desta tese foi efetuar um estudo comparativo entre o concreto confeccionado com cimento do tipo CPII E 32, brita de gnaiss e areia natural de rio com os concretos executados, substituindo-se o agregado graúdo de brita de gnaiss por resíduo de construção (RCD) e utilizando rejeito de mármore triturado (RMT) como agregado miúdo natural. Foram confeccionadas sete tipos de misturas para efetuar as combinações possíveis destes insumos. A alguns desses concretos foram ainda adicionadas fibras sintéticas.

Pretende-se avaliar as propriedades tecnológicas, fornecendo assim uma nova alternativa para a produção de concretos sustentáveis e ecológicos, além de contribuir com a redução do impacto ambiental provocado pela extração desordenada da areia natural e pedra de gnaiss.

Para alcançar com êxito os objetivos gerais deste trabalho, os objetivos específicos foram:

- a) caracterizar fisicamente os resíduos;
- b) adequar uma faixa granulométrica adequada que atenda de maneira satisfatória aos ensaios propostos e a normalização brasileira através do ensaio de caracterização dos materiais;
- c) determinar as características mecânicas (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) e de durabilidade (porosidade, absorção de água por capilaridade e absorção por imersão) dos concretos produzidos;
- d) avaliar estatisticamente os resultados obtidos.

Esse trabalho visa responder às seguintes questões: é viável a produção de concreto de cimento Portland confeccionado com RCD, RMT e fibra de polipropileno? Como o compósito se comporta frente à adição simultânea da fibra de polipropileno e os dois rejeitos de forma a garantir as propriedades da mistura?

Em suma, espera-se que os resultados obtidos neste trabalho constituam um contributo para os diversos setores da construção, principalmente para os das equipes de projeto, nas tomadas de decisões que potenciem a realização de edifícios de menor impacto ambiental em todo seu ciclo de vida e, por conseguinte, mais sustentáveis, bem como sirva de subsídio para elaboração de normas para concretos que utilizem RCD/RCC e RMT.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O trabalho é composto por sete capítulos, conforme descrito a seguir:

No Capítulo 1 é feita a introdução da pesquisa, destacando-se as justificativas e relevância, os objetivos e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2, discutem-se os aspectos relacionados com o desenvolvimento sustentável, consumo de matérias-primas na construção civil, alternativas de reaproveitamento e da reciclagem dos resíduos sólidos na construção civil. Expõe aspectos relativos às características e influências dos concretos com resíduos de construção e demolição (RCD) e rejeito de mármore (RMT) e, finalmente, são abordadas questões relativas às fibras, bem como alguns estudos realizados e/ou em andamento com estes materiais, enfocando a influência dos agregados e das fibras nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados, detalhando o programa experimental, suas características e ensaios realizados.

No Capítulo 4 são apresentadas as análises realizadas com os resultados dos ensaios e as relações obtidas entre os diversos parâmetros estudados.

Finalmente, o Capítulo 5 é dedicado às considerações finais sobre a relevância da pesquisa com base na revisão bibliográfica realizada.

capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETOS COM RCD

2.1.1 Considerações iniciais

O material mais largamente usado em construção é o concreto. Entre 2005 e 2012, enquanto o consumo de cimento avançou mais de 80%, o aumento do concreto preparado em centrais foi de 180%. Estima-se que as concreteiras tenham produzido 51 milhões de metros cúbicos no ano passado (ABCP, 2013).

Em termos mundiais, estima-se que anualmente são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, o que dá, segundo a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP), aproximadamente, um consumo médio de 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água. No Brasil, o concreto que sai de centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos (Revista Ibracon,

2009) ocasionado pelo crescimento do setor da construção civil e aquecimento da economia.

Apesar do PIB Brasil e do PIB da Construção terem sido projetados para 2017 estimando-se que a produção de concreto nas centrais atingirá 72,3 milhões de m³, crescimento de 41,2% no período de cinco anos, a uma taxa anual de 7,1%, (sem levar em conta a forte crise que o país tem atravessado). Este crescimento será alavancado pelo crescimento da construção civil, especificamente o das obras urbanas, que em 2010 consumiam 6,2% do total de concreto e em 2011 passaram a consumir quase 12% do total. Isto se dará por conta do crescimento dos investimentos nesse segmento e a necessidade de se criar cidades melhores como legado da realização dos eventos esportivos.

(<http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/noticias-da-engenharia/6060>, em 29/08/2013).

Em escala mundial, o impacto ambiental cumulativo dos processos de construção cresce de forma exponencial. Em Portugal, a maioria do impacto do ambiente construído está relacionada com o setor de habitação (Mateus, 2009). A nível ambiental, este setor está ligado direta e indiretamente ao consumo de uma grande quantidade de recursos naturais (energia, água, madeira, minerais, etc) e à produção significativa de resíduos.

A utilização adequada de materiais, produtos e tecnologias construtivas pode contribuir consideravelmente para um melhor desempenho ambiental de ciclo de vida e, por conseguinte, para a sua sustentabilidade.

No contexto da indústria civil, a quantidade de resíduos gerados alcança níveis preocupantes. Várias pesquisas sobre perdas na construção foram realizadas no Brasil, dentre alguns apontamentos destas pesquisas, destaca-se a grande variação das perdas de materiais, aumentando o custo do empreendimento (BUTTLER, 2003).

Através de dados obtidos pelo programa financiado pelo Habitare (2002), que avaliou as perdas médias em atividades de construção, pode-se

estimar que se as perdas fossem reduzidas para 6% (valor mínimo encontrado na pesquisa) seria possível aumentar a produção de edifícios em aproximadamente 25%.

Outra questão que atinge níveis preocupantes é a extração de matérias primas. O consumo de materiais naturais está crescendo na mesma proporção do crescimento da economia e da população, segundo Mattos e Wagner (1999), entre 1970 e 1995, o consumo do mundo cresceu 5,7 bilhões de toneladas para 9,5 bilhões de toneladas. Devido a este crescimento exagerado, as reservas de muitos materiais começam a ficar escassas, especialmente nas grandes cidades aonde já é necessário extrair algumas matérias primas a distâncias cada vez maiores. Conjuntamente, pode-se citar o problema de deterioração ambiental que está gerando problemas ecológicos nas áreas de proteção ambiental.

Utilizar agregado reciclado de RCD é, atualmente, uma necessidade primária para o setor da construção civil; maior consumidor de matérias-primas entre os setores industriais. Ao substituir agregado de rochas britadas por agregado reciclado, pode-se evitar que 95 milhões de toneladas de RCD sejam dispostas em aterros e assim evitar-se o consumo de recursos naturais não renováveis (ÂNGULO, 2011).

Quanto à produção de resíduos, o volume de entulho da construção e demolição gerado pode ser até duas vezes maior do que o volume de lixo sólido urbano de um país. No Brasil, essa proporção é de 60%, sendo que 70% deles podem ser reaproveitados (Vier, 2011). Esses valores, no entanto, podem ser ainda maiores se considerada a deficiência na classificação e separação desses materiais, bem como a quantificação dos resíduos oriundos de tipologias de construção diferentes.

Ainda é pertinente destacar outro inconveniente causado pela grande produção de resíduos da construção e demolição sem políticas de reaproveitamento: o impacto dos mesmos nos ambientes urbanos. Como exemplos desses impactos pode-se relacionar os prejuízos ao tráfego de veículos e pedestres, contaminação de solos e cursos d'água, proliferação de

vetores prejudiciais às condições de saneamento e saúde humana, e, sobretudo no Brasil, prejuízos à drenagem, resultando em enchentes cada vez mais catastróficas.

Estudos estimam que a construção civil empregue em suas atividades cerca de 20% a 50% do total dos recursos naturais não renováveis consumidos pela sociedade. Dentre as atividades extrativistas, destacam-se a exploração desordenada das jazidas para a extração de recursos minerais, muitos desses para a obtenção dos agregados que irão compor o concreto, os quais impossibilitam a recomposição do meio ambiente explorado e promovem a escassez do material.

O setor da construção civil tem sido um dos principais focos de políticas ambientais, a fim de se obter construções sustentáveis. Essa política requer como princípio básico a redução do uso de matérias primas não renováveis ou utilização de materiais reciclados que possam ser empregados de forma segura tanto para o meio ambiente quanto para a construção.

Uma possível forma de solução para esses problemas é reciclar o resíduo de concreto demolido (RCD), produzindo, dessa maneira, um agregado alternativo para estruturas de concreto.

Além do mais, a utilização adequada de materiais, produtos e tecnologias construtivas pode contribuir consideravelmente para um melhor desenvolvimento ambiental de ciclo de vida de um edifício e, por conseguinte, para a sua sustentabilidade. A avaliação do ciclo de vida é reconhecida internacionalmente como uma técnica analítica holística para a avaliação dos impactos ambientais associados a um produto, sistema ou serviço durante a totalidade do seu ciclo de vida.

O desenvolvimento das metodologias e ferramentas da avaliação do ciclo de vida vem promover a utilização de prática da construção mais sustentável, compreendendo as formas em que as estruturas construídas e as instalações são adquiridas e montadas, utilizadas e operadas, mantidas e reparadas, modernizadas e reabilitadas, e finalmente desmanteladas e demolidas ou reutilizadas e recicladas, fechando assim seu ciclo de vida.

Esta avaliação é uma abordagem útil para quantificar os possíveis impactos ambientais associados ao ciclo de vida de um produto, processo ou serviço, uma vez que identifica quantitativamente a energia e os materiais consumidos, e os resíduos liberados ao meio ambiente.

Três fases são consideradas na avaliação do ciclo de vida: from cradle-to-grave (“do berço ao túmulo”), que inclui a totalidade de vida de um produto, desde a extração das matérias-primas (“berço”) até a fase da deposição (túmulo), passando pela fase de utilização.

Numa análise from cradle-to-gate (“do berço à porta”) só se considera uma parte do ciclo de vida do produto, aquela que vai desde a extração até a porta da fábrica, englobando todos os processos anteriores ao seu transporte até o consumidor final. A fase from cradle-to-cradle (“do berço ao berço”) é uma variante da análise from cradle-to-grave, na qual a última fase do ciclo de vida deste produto corresponde a um processo de reciclagem (BRAGANÇA, 2011).

A avaliação do ciclo de vida dos edifícios e de outras construções tende a ser uma prática em expansão tanto no Brasil quanto no mundo, uma vez que as construções em geral e em particular o setor de edifícios, são responsáveis por uma porção importante dos impactos ambientais. O desenvolvimento de metodologias sobre o ciclo de vida das construções vem promover a utilização de práticas de construções mais sustentáveis.

Na Figura 2.1 são representadas esquematicamente as fases do ciclo de vida.

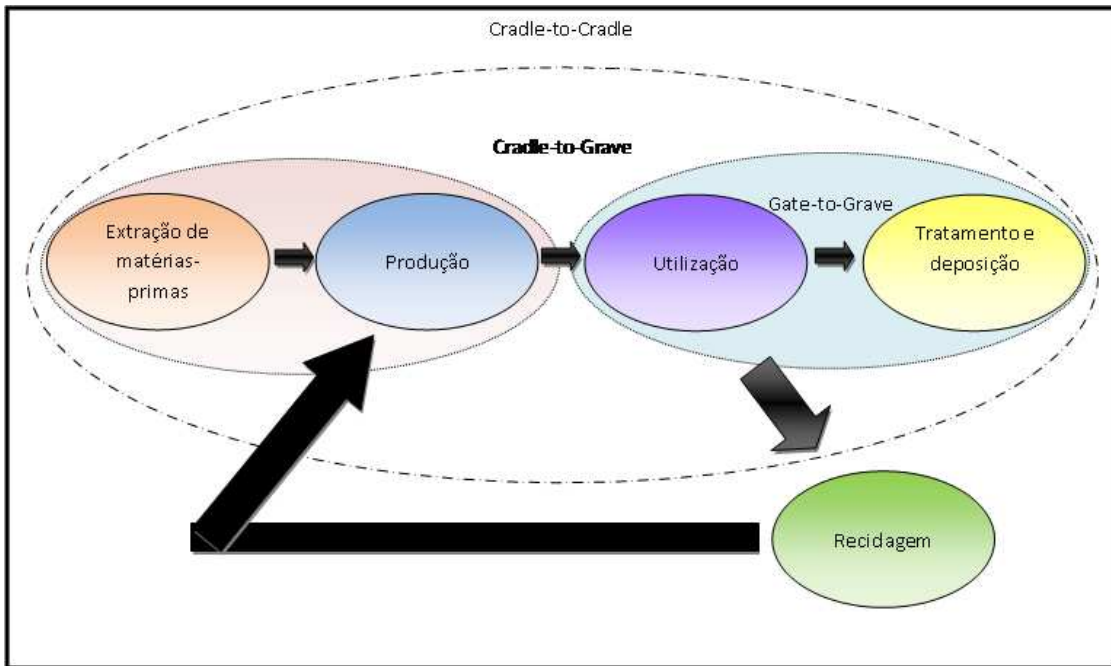


Figura 2.1- Representação esquemática das fases de ciclo de vida – adaptada pela autora de BRAGANÇA (2011).

Atualmente, há uma preocupação crescente com a sustentabilidade das construções e também com soluções construtivas que viabilizem um futuro mais sustentável para as edificações. Um passo importante para este desenvolvimento é a introdução de materiais reciclados, que valorizem o desenvolvimento dessas soluções, garantindo a sustentabilidade dos edifícios durante a totalidade do seu ciclo de vida, promovendo e tornando possível uma melhor integração entre os parâmetros ambientais, sociais, funcionais, econômicos e outros critérios convencionais.

2.1.2 O que são agregados de RCD

O RCD foi reciclado pela primeira vez na Alemanha por causa da necessidade de reconstruírem-se as cidades completamente destruídas pela 2ª Guerra Mundial (Levy, 2001), além da grande quantidade disponível de material na época. É por isso que a Europa foi o continente precursor em reciclagem e possui a maior experiência no assunto.

Hoje, estudos demonstram modelos para a redução do resíduo de construção e demolição, podendo ter como foco três tipos de abordagem tipicamente expressada como Redução-Reuso-Reciclagem.

Redução do resíduo é a primeira abordagem, a qual produz ótimos benefícios para o meio ambiente. Usando menos material e com menores custos, reduzindo a poluição com a manufatura e transporte, utilizando menos energia e água, além de não depositar esses materiais em terrenos a céu aberto. A redução de resíduos pode ser vista como tópico prioritário para planos de gerenciamento de resíduos.

Reutilizar é a segunda abordagem, a qual estende o ciclo de vida dos materiais e diminui a necessidade da extração de novos recursos naturais. Obviamente, uma construção inteira pode ser reutilizada, e.g. através de respectivamente de uma reabilitação consistente, sendo para o mesmo uso ou uma nova aplicação, economizando tanto dinheiro quanto recurso natural. Reutilizar significa também que o material pode ser utilizado para as mesmas propostas iniciais ou como mesmo materiais de antes da demolição, KAMRATH (2011).

Reciclar, a terceira abordagem, novamente conserva os recursos naturais e evita que diversos materiais sejam descartados em aterros sanitários ou locais impróprios. Nas demolições e reforma, estão presentes numerosas oportunidades para reciclar. A melhor forma de sustentabilidade é converter resíduos em novos produtos, reciclando-os. Materiais inertes, como concretos e tijolos, podem ser cominuídos e usado como agregados reciclados em concretos.

Vencer a barreira do baixo patamar tecnológico das edificações, através de um gerenciamento mais eficiente para a construção civil, resultará em produtos finais de maior qualidade. Porém, o fato de existir um desenvolvimento crescente nos centros urbanos, que leva as estruturas à obsolescência, e o fato delas possuírem uma vida útil limitada, com necessidade de manutenções e reparos, indubitavelmente induzem a uma contínua geração de resíduos. Deste modo, a disposição deste material e o aumento da demanda por matéria prima para execução de novas obras continuam a ser um problema que deve ser resolvido.

A reciclagem é, sem dúvida, a melhor alternativa para reduzir o impacto que o ambiente pode sofrer com o consumo de matéria prima e a geração desordenada de resíduos. Nos últimos anos a reciclagem de resíduos tem sido incentivada em todo o mundo, seja por questões políticas, econômicas ou ecológicas. A reciclagem de resíduos de construção irá minimizar também os problemas com o gerenciamento dos resíduos sólidos dos municípios. Haverá um crescimento da vida útil dos aterros, diminuição dos pontos de descarte clandestinos e redução dos custos de gerenciamento de resíduos. Adicionalmente, haverá um melhor bem estar social e ambiental.

Na Figura 2.2 pode-se observar a composição do resíduo de construção e demolição.



Figura 2.2 – Resíduos de construção e demolição (2013)

Os agregados reciclados podem ser os de resíduos granulares industriais, desde que tenham propriedades adequadas ao uso como agregado ou ainda proveniente do beneficiamento de entulho da construção civil, desde que estes apresentem no máximo 10% de outros materiais (papel, plástico, metal etc) e ausência de terra, matéria orgânica, gesso e amianto. Quando beneficiados passam a ser denominados agregados reciclados de construção.

No RCD, a fração que corresponde ao agregado miúdo contém, principalmente, pasta endurecida de cimento e gipsita que é inadequada para a produção de concreto. Entretanto, a fração que corresponde a agregado

graúdo, embora coberta de pasta de cimento, tem sido usada com sucesso em vários estudos de laboratório e de campo, (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.1.3 Classificação dos resíduos

Atualmente, ao meio técnico é ofertada duas formas de classificação de resíduos, sendo uma da ABNT e a outra pertencente ao Conama.

A conceituação e a proposição de procedimentos para a gestão de resíduos sólidos têm sido alvo de diversos órgãos governamentais, especialmente a partir da década de 1990.

Devido à quantidade de resíduo gerado por inúmeros processos de produção e a diferença entre estes, a ABNT NBR 10004:2004, Resíduos Sólidos – Classificação avalia os resíduos em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, que podem apresentar riscos à saúde pública e/ou ao meio ambiente, conforme descrito a seguir:

- a) resíduos Classe I – perigosos – apresenta riscos à saúde pública (provocando ou acentuando o aumento da mortalidade ou incidência de doenças), ao meio ambiente (quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada), ou características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, que estão definidas na norma em discussão;
- b) resíduos Classe II – não perigosos – são divididos em duas subclasses, a saber:
 - resíduos Classe II A – não inertes – aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – perigosos ou de Classe II B – inertes, podem ter as propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
 - resíduos Classe II B – inertes – aqueles que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 (2004), a mesma não solubiliza seus constituintes a

concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se: o aspecto, a cor, a turbidez, a dureza e o sabor.

A Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama de 5 de julho de 2002, também apresenta uma série de definições referentes ao tema, estabelecendo diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, tanto para os geradores (empresas construtoras) quanto às administrações públicas, por considerar que a disposição de resíduos da construção civil em locais inadequados contribui para a degradação da qualidade ambiental.

Considera, ainda, que a gestão de resíduos da construção (RCD) deve ser integrada (empresas/prefeituras) e proporcionar benefícios de ordem social, econômica e ambiental (minimizar os impactos).

No artigo 3.º, item I da Resolução 307 – Conama define-se a classificação do RCD da seguinte forma:

- I. Resíduos Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: materiais cerâmicas (tijolos, azulejos, blocos, telhas, placas de revestimento...etc) argamassa e concreto.
 - c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidos nos canteiros de obras.
- II. Resíduos Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros;
- III. Resíduos Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que

permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

- IV. Resíduos Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Os resíduos de Classe A citados na Resolução 307/2002 – Conama basicamente são resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados para concretos, provenientes da construção civil que comporão parte deste estudo, sendo:

- resíduos de construção civil – provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, bem como os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, etc., comumente chamados de entulhos de obras;
- agregado reciclado – é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infra-estrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;
- reutilização – é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo;
- reciclagem – é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação, devendo-se considerar todas as características do resíduo e, principalmente, seu risco ambiental, para que o desenvolvimento dos novos produtos tenha um bom desempenho e uma maior aceitação por parte dos consumidores;
- beneficiamento – é o ato de submeter um resíduo a operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições para que sejam utilizados como matéria-prima ou produto.

Deve-se ressaltar que a ABNT é a fonte que regulamenta a utilização de materiais para serem empregados na construção e que não existe até o

determinado momento norma específica de reutilização de RCD como agregados em concretos estruturais.

2.1.4 – Processos para obtenção de RCD/RCC

2.1.4.1 Cominuição

O processo de beneficiamento do RCD/RCC nas usinas recicladoras e nas obras é semelhante em termos de etapas e tipos de equipamento usados. Porém, usinas apresentam vários portes e complexidades, a depender do volume e da variabilidade do RCD/RCC recebido, demanda pelos agregados reciclados e características desejadas para o produto (LIMA, 1999; ALTHEMAN, 2002).

A transformação do RCD/RCC em agregado nas usinas não é muito diferente do processo de obtenção de agregados naturais e, portanto, os equipamentos utilizados na produção destes podem ser diretamente usados, ou adaptados, se necessário, à reciclagem do resíduo de construção e demolição (Lima, 1999). Dessa forma, a linha de produção de agregados reciclados consiste em nada mais que operações unitárias empregadas pela engenharia de minas no tratamento de minérios: cominuição (fragmentação), separação de tamanho e concentração.

John *et al.* (2006) relacionam operações e alguns dos equipamentos usados em onze usinas fixas brasileiras. Na maioria delas, a operação de cominuição faz uso de um britador de impacto. A separação de tamanho é feita através de peneiramento em grande parte delas; a concentração é feita através de catação manual em todas as usinas, em conjunto com uma separação magnética em seis delas. Aparecem como operações auxiliares o transporte através de correia em quase todas as usinas, e o abatimento de poeira em três delas.

As operações unitárias e os equipamentos exercem influência sobre a classificação e composição, teor de impurezas, granulometria, forma e resistência dos grãos dos agregados reciclados (Lima, 1999). Não só esta

última característica, mas também a classificação e a composição guardam relação com a massa específica.

Apesar da grande importância da resistência, as outras propriedades dos agregados também merecem atenção, pois são igualmente capazes de influenciar as propriedades dos concretos. Assim, a seguir são apresentadas operações unitárias e exemplos de equipamentos usados no beneficiamento do RCD/RCC, bem como suas influências sobre as propriedades do agregado reciclado.

A obtenção da granulometria adequada para utilização em obras de engenharia é conseguida pela britagem por meio de mecanismos físicos de compressão (esmagamento), impacto, atrito, cisalhamento ou combinação entre eles (Pennsylvania Crusher, 2003; Figueira *et al.*, 2004). Alguns autores consideram ainda a abrasão, mas importante somente em alguns casos especiais de moagem (FIGUEIRA *et al.*, 2004).

Esta operação unitária pode ser feita por britagem ou moagem. Na reciclagem do RCD/RCC, a britagem é usada em geral quando se pretende obter majoritariamente grãos de maior dimensão (agregados graúdos). Já a moagem parece ser mais usada em obras, quando se visa obter principalmente grãos mais finos (agregados miúdos) para a produção de argamassas.

É comum haver a necessidade de submeter o RCD/RCC à fragmentação uma segunda vez utilizando-se o mesmo equipamento de cominuição ou um outro, o qual pode usar o mesmo mecanismo físico ou não. Isso irá depender da granulometria que se deseja para o agregado e também do tipo de equipamento usado. Surge então, no caso do uso de britadores, termos como britador/britagem primário(a) ou secundário(a).

Os equipamentos de britagem comumente usados em usinas são o britador de impacto e o de mandíbulas; em obras são os britadores de mandíbula de pequeno porte e os moinhos-argamassadeiras. Além destes existem outros tipos não tão comuns. São exemplos o britador giratório – semelhante ao britador cônico, mas com a carcaça externa invertida, usado em algumas plantas de reciclagem na Dinamarca (Coelho, 2001 apud Buttler,

2003), e os moinhos usados em obra somente para fragmentação e que não permitem preparo de argamassa no mesmo equipamento (LEITE, 2001; ALTHEMAN, 2002).

Como se verá, o processo de britagem influi na granulometria, na forma e na resistência dos grãos dos agregados obtidos.

Já o britador de mandíbulas fragmenta o material através da força de compressão (esmagamento) aplicada por uma ou duas superfícies (mandíbulas) (Figura 2.3 e 2.4). É muito usado na britagem primária.



Figura 2.3 - Britador de mandíbula cônico - 2015

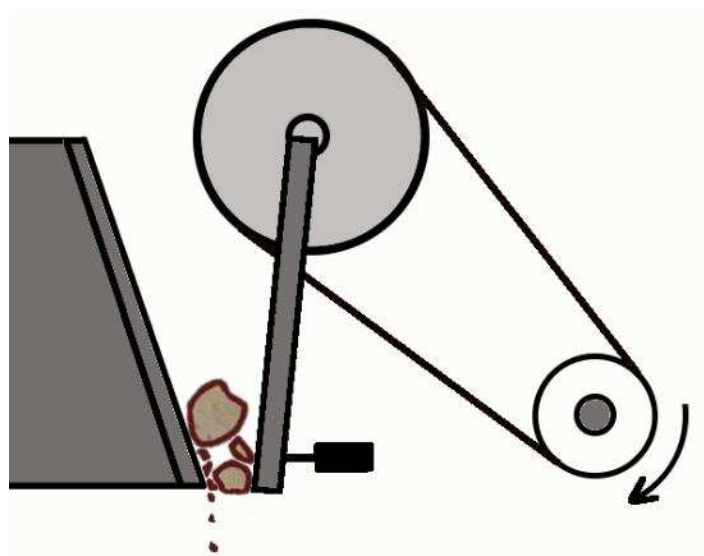


Figura 2.4 - Detalhe do mecanismo do britador de mandíbula cônico

(<http://tecnicoemineracao.com.br> - 2015)

Algumas das características do britador de mandíbulas:

- permite a obtenção de melhores curvas granulométrica para agregado a ser usado em concreto, quando o resíduo processado é de concreto estrutural (HANSEN, 1992 apud LIMA, 1999);
- fragmenta apenas uma pequena quantidade do agregado original do concreto britado (HANSEN, 1992 apud LEITE, 2001);
- produz grande porcentagem de graúdos – apenas cerca de 20% de finos ficam abaixo de 4,8 mm (HANSEN, 1992 apud LEITE, 2001; LIMA, 1999).

Segundo Leite (2001), não há consenso quanto à forma dos grãos dos agregados obtidos, pois cita que Hansen (1992) e Hendriks *et al.* (1998) apontam vantagem em relação à forma, enquanto Lima (1999) afirma que eles se mostram lamelares com tendência à baixa qualidade em virtude de apresentarem linhas de fratura muito pronunciadas. Contudo, Figueira *et al.* (2004) afirmam que o britador de mandíbulas é pouco adequado para materiais com tendência a produzir partículas lamelares, e Levy (2001), ao usar este equipamento em seu estudo, constatou a presença de grãos lamelares tanto nos agregados de concreto quanto nos agregados de alvenaria de tijolos cerâmicos – mas em maior quantidade nestes últimos.

Nos britadores de impacto, a fragmentação do material ocorre através do impacto entre martelos maciços fixos a um rotor e do choque contra placas de impacto fixas (Lima, 1999). É usado tanto em britagem primária como secundária (Angulo, 2005; Lima, 1999). Muitas vezes, este é o único britador usado.

Algumas das características do britador de impacto:

- proporciona grande redução das dimensões do material britado, gerando um agregado bem graduado, com grãos de tamanho e forma semelhantes, e boa quantidade de finos, o que muitas vezes dispensa a

britagem secundária (FIGUEIRA *et al.*, 2004; PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003; LIMA, 1999; SYMONDS, 1999);

- gera grãos de forma cúbica e arestas vivas, com boas características mecânicas, pois neste equipamento as partículas se partem nas linhas naturais de ruptura, gerando grãos mais íntegros (PENNSYLVANIA CRUSHER, 2003; LIMA, 1999; SYMONDS, 1999).

Segundo Hansen (1992 apud Leite, 2001), devido a sua distribuição granulométrica, os agregados produzidos nesse britador são mais apropriados ao uso em obras de pavimentação.

Os britadores de cone ou britador cônico fragmentam o material através da força de compressão advinda da aproximação e distanciamento do cone central em relação à carcaça externa (Figura 2.5), inclusive em movimentos verticais para cima e para baixo (FIGUEIRA *et al.*, 2004).



Figura 2.5 - Detalhe do funcionamento do britador cônico
(<http://www.sbmmine.com> - 2015)

O britador cônico só processa materiais com diâmetro máximo de 20 cm, o que faz com que o equipamento seja mais apropriado à britagem secundária (HANSEN, 1992 apud LEITE, 2001).

De acordo com Brito Filho (1999 apud Leite, 2001), Trio (2006) e THYSSENKRUPP (2006), o britador de cone dá origem a agregados com grãos cúbicos, no entanto, gera uma quantidade excessiva de finos. Ainda segundo o fabricante TRIO (2006), o aumento na velocidade de operação de seus britadores é capaz de tornar os grãos ainda mais cúbicos.

Nos britadores tipo moinho de martelos, o material é fragmentado de uma forma um tanto similar à britagem por impacto: inicialmente, choca-se com os martelos maciços fixos ao rotor e com a superfície interna da câmara. Entretanto, no fundo da câmara há uma grade que funciona como uma peneira, só permitindo passar aqueles grãos que já foram reduzidos a um tamanho inferior à sua abertura (FIGUEIRA *et al.*, 2004; LIMA, 1999).

Nessa região, a fragmentação dos grãos ocorre por atrito e cisalhamento (Pennsylvania Crusher, 2003). Em alguns moinhos, a retirada da grade inferior os transforma num britador de impacto.

Em virtude da abertura da entrada de materiais ser relativamente pequena e de produzir alta porcentagem de miúdos (Pennsylvania Crusher, 2003; LIMA, 1999), o equipamento é mais usado na britagem secundária, geralmente em conjunto com britadores de mandíbula (Lima, 1999). Há moinhos de martelo de pequeno porte que podem ser usados em obra.

De acordo com Pennsylvania Crusher (2003), moinhos de martelo produzem grãos cúbicos com um mínimo de planos e lascas.

Outro equipamento é o moinho-argamassadeira, que faz a fragmentação por meio de compressão (esmagamento) aplicada por rodas metálicas pesadas, que passam sobre o material. No mesmo compartimento (caçamba) onde é feita a moagem, faz-se a preparação de argamassas.

É também conhecido como moinho de rolo ou moinho de galgas e é usado somente para reciclagem na própria obra. O equipamento permite uma

boa cominuição de materiais menos resistentes, como restos de alvenaria e argamassas (GONÇALVES, 2001; LIMA, 1999; PINTO, 1999).

2.1.4.2 Peneiramento e classificação

As duas operações têm a finalidade de separar o material em frações de diferentes tamanhos, sendo que, segundo Carrisso e Correia:

No peneiramento existe uma separação segundo o tamanho geométrico das partículas, enquanto que na classificação a separação é realizada tomando-se como base a velocidade que os grãos atravessam um meio fluido. No processamento mineral o meio fluido mais utilizado é a água. A classificação a úmido é aplicada, habitualmente, para populações de partículas com granulometria muito fina onde o peneiramento não funciona de forma eficiente (2004, p. 197).

2.1.4.3 Peneiramento

O peneiramento é a operação de separação de tamanho mais usada nas usinas recicladoras e é realizado a seco ou a úmido, sendo o primeiro método o mais comum.

Na maioria dos casos, visa separar os agregados em duas frações principais: agregado miúdo ($\varnothing < 4,75$ mm) e agregado graúdo ($\varnothing \geq 4,75$ mm). No entanto, é possível encontrar usinas que utilizam diâmetro de corte diferente ou que dividam a fração graúda em subfrações como é o caso da usina de Itaquera (SP), a qual usa peneiras de abertura igual a 40 mm e 20 mm (Carrijo, 2005).

O peneiramento a úmido utiliza água para facilitar a passagem dos finos do material peneirado através da tela de peneiramento (Carrisso; Correia, 2004). A água também auxilia o desprendimento da fração fina, pulverulenta, que fica aderida aos grãos da fração graúda (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982 apud ANGULO, 2005).

O tipo de peneira mais usado nas usinas brasileiras é a peneira vibratória, contudo, as usinas de Londrina (PR) e Gentil (SP) utilizam peneira rotativa (Figura 2.6), também conhecida como *trommel* (CARRISSO; CORREIA, 2004; LATTERZA, 1998; LEVY, 2005).



Figura 2.6 – Peneira vibratória da Usina de Belo Horizonte - 2013.

Além de influenciar a granulometria do agregado obtido, a etapa de peneiramento pode interferir na composição do mesmo, atuando como operação de concentração. É o caso de processos de beneficiamento que através de peneiramento anterior à britagem eliminam a parte fina do RCD – $\phi < 8$ ou 10 mm, por exemplo – em virtude da mesma freqüentemente conter contaminantes, como partículas friáveis e matéria orgânica (LIMA, 1999).

2.1.4.4 Classificação

Nota-se a partir de vários trabalhos (Angulo, 2000; Cosper *et al.*, 1993; Harris, 1988; Kohler; Kurkowski, 1998; Lima, 1999; Tränkler *et al.*, 1996) que a classificação em usinas recicladoras é mais usada como uma etapa de remoção de impurezas do agregado graúdo reciclado do que como uma etapa de separação de tamanhos.

As impurezas seriam materiais que tendem a se concentrar nas frações finas e que não são apropriados à reciclagem como agregados, tais como

papéis, plásticos, espumas, madeira e outros, podendo ser também substâncias químicas contaminantes.

Além de remover as impurezas, que geralmente são materiais mais leves, a classificação também remove parte da fração mais fina dos agregados, inclusive parte daquela aderida aos grãos maiores.

É realizada após a fragmentação ou após o peneiramento que sucede à fragmentação, e, em muitas usinas de reciclagem, é feita a seco por meio de classificadores a ar que fazem uso de uma corrente de ar horizontal ou vertical ascendente (Figura 2.7).

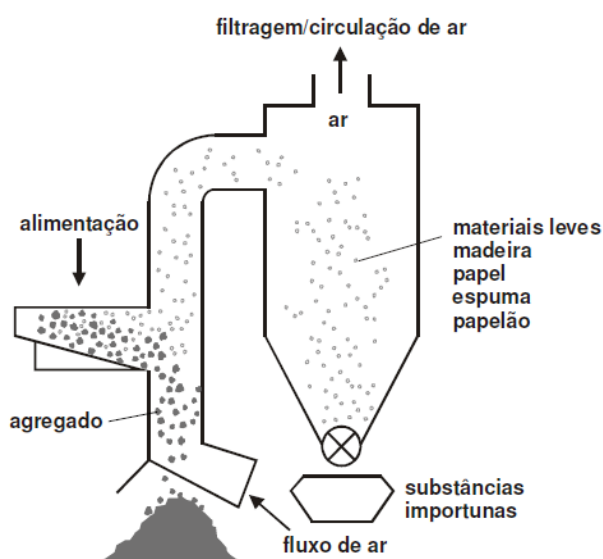


Figura 2.7 - Esquema de funcionamento de um classificador a ar vertical (KOHLEK; KURKOWSKI, 1998, modificado).

Outro classificador a seco também usado em usinas para remover materiais mais leves que a fração mineral reciclável do RCD é o ciclone a ar (Figura 2.8) (COSPER *et al.*, 1993; DOLAN *et al.*, 1999; HADJIEVA-ZAHARIEVA *et al.*, 2003; POON, 1997).

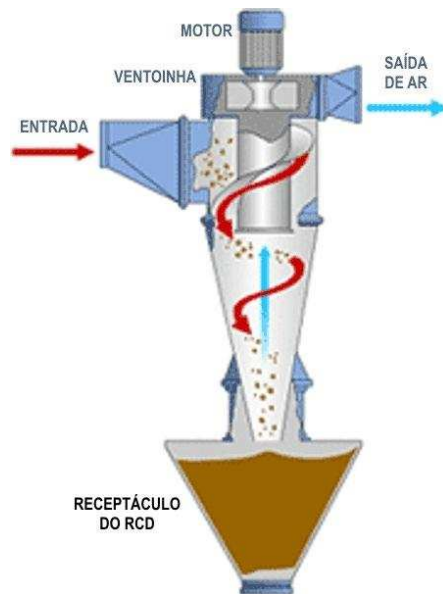


Figura 2.8 - Esquema de funcionamento de um classificador do tipo ciclone a ar (www.dustcollectorexports.com - 2014, modificado).

Um classificador usado para remover frações finas do agregado reciclado ($\phi < 0,15$ mm) é o classificador espiral (Figura 2.9), o qual opera com água (HANISCH, 1998 apud Angulo, 2005). O material mais fino transborda pela parte inferior da calha enquanto que o material mais pesado é transportado pelas hélices, sendo descarregado na parte superior. O nível de inclinação de todo o conjunto é uma das variáveis do processo (CARRISSO; CORREIA, 2004).



Figura 2.9: Classificador espiral (www.nawaengineers.com - 2014).

A classificação a úmido tem uma vantagem sobre a versão a seco: proporciona um efeito de lavagem dos agregados e, com isso, remove substâncias que podem ser prejudiciais, tais como cloretos e sulfatos (Tränkler *et al.*, 1996). Porém, o mesmo autor verificou que, apesar da lavagem proporcionada pela classificação a úmido conseguir retirar substâncias químicas nocivas presentes no agregado, a remoção das frações finas, quer seja através de peneiramento ou de classificação, é a operação mais eficiente em eliminar esses contaminantes.

Vê-se, assim, que a etapa de classificação, assim como o peneiramento, influencia a granulometria e a composição do agregado reciclado, também atuando como operação de concentração.

2.1.4.5 Concentração

No tratamento de minérios a operação de concentração é usada para minério mais concentrado, mais rico, na espécie mineral de interesse, removendo a ganga, a qual consiste no mineral ou conjunto de minerais não aproveitados. Essa separação seletiva dos minerais baseia-se nas diferenças entre suas propriedades, das quais se destacam o peso específico, a suscetibilidade magnética, a condutividade elétrica, as propriedades químicas de superfície, a cor, a radioatividade, a forma e ainda outras (LUZ; LINS, 2004).

De forma semelhante, usa-se a concentração para tornar o RCD ou o agregado de RCD reciclado mais rico na(s) fração(ões) de interesse, que pode ser o conjunto de todos os materiais de origem cerâmica, somente a fase concreto, somente os materiais com massa específica acima de determinado valor etc.

Além das operações originalmente concebidas para esse fim, outras atividades comuns usadas no beneficiamento do RCD podem também funcionar como operações de concentração. Dessa forma, atuam com o intuito de concentrar o RCD ou o agregado não só a separação magnética, a concentração gravítica, a separação em meio denso e a flotação, mas também a classificação/separação quanto à composição, o peneiramento e classificação e a catação (Angulo *et al.*, 2003; Angulo, 2005; Carrijo, 2005;

Hadjieva-Zaharieva *et. al*, 2003; Kohler; Kurkowski, 1998; Luz; Lins, 2004; Poon, 1997). As operações de peneiramento e classificação já foram comentadas anteriormente quanto à capacidade de concentrar; a seguir são comentadas outras operações.

2.1.4.6 Classificação/separação quanto à composição

Consiste em separar o resíduo em classes que englobem materiais com um mesmo atributo (recicláveis ou não, recicláveis para um mesmo fim, natureza, propriedade etc.). Em geral, é realizada por análise visual.

No Brasil, a resolução 307 (2002) do Conama estabelece quatro categorias, A a D, em que deve ser classificado o RCD, sendo as duas primeiras recicláveis. A classe A é composta de materiais de origem mineral, como argamassas, concretos, restos de pavimentos asfálticos, solos e materiais cerâmicos e, por isso, é frequentemente referida como fração mineral do RCD. Entretanto, a parte da fração mineral reciclável como agregado para uso em novos concretos e argamassas não inclui os restos de pavimentos asfálticos e os solos. Essa classificação, em termos gerais, distingue apenas os materiais quanto ao fato de serem recicláveis ou não e se o são para um mesmo fim ou não.

A classificação proposta por Lima (1999) para o RCD (Tabela 2.1) chega a ser mais detalhada, distinguindo os materiais quanto à natureza/origem e indicando seu campo de aplicação. Pode-se perceber que nessa classificação parece estar embutido o conceito de resistência potencial atrelada à natureza de cada fase. Dessa forma, os materiais são tidos como mais resistentes na seguinte ordem decrescente: concreto, argamassa e cerâmica (classes 1, 2 e 3, respectivamente).

Tabela 2.1 - Sistema de classificação do RCD proposto por Lima (1999).

Classe	Composição	Aplicação
1	Resíduo de concreto sem impureza	concretos estruturais ou fabricação de pré-moldados, entre outros serviços
2	resíduo de alvenaria sem impurezas	concretos e argamassas, entre outros serviços
3	resíduo de alvenaria sem materiais cerâmicos e sem impurezas	produção de concretos e pré-moldados de concreto
4	resíduo de alvenaria com presença de terra e vegetação	pavimentos asfálticos (base e sub-base) ou cobertura simples de vias não pavimentadas
5	resíduo composto por terra e vegetação	cobertura de aterros, regularização de terrenos e outros serviços
6	resíduo com predominância de material asfáltico	serviços de pavimentação

Fonte: Lima (1999)

A resolução do Conama citada anteriormente recomenda que o RCD seja segregado, preferencialmente, pelo gerador na origem. Nesse caso, a separação do resíduo em fases específicas da fração mineral – somente cerâmica vermelha ou argamassas, por exemplo – poderia ajudar a obter materiais um pouco mais homogêneos. A separação baseada em critérios visuais, no entanto, não é tão eficiente no sentido de conseguir agregados mais homogêneos quanto à resistência, por exemplo, porque é possível encontrar no RCD/RCC argamassas, concretos e cerâmicas de diferentes resistências.

Deixando-se de separar o material na fonte, repassa-se o papel às centrais de triagem ou usinas recicladoras, e então, nesse ponto do caminho, a

maior heterogeneidade de fases poderia dificultar ou inviabilizar a triagem dos materiais.

Um exemplo prático da baixa eficiência da classificação por análise visual da composição é a separação adotada nas usinas de Itaquera (SP) e Vinhedo (SP): agregados cinzas, em que há predominância de materiais à base de cimento e; vermelhos, em que há predominância de cerâmica vermelha. Tal separação é apontada como injustificável por Angulo (2005) em virtude dos teores médios de cerâmica vermelha nos agregados graúdos sequer ultrapassarem o valor de 24,2%.

2.1.4.7 Catação

A catação é uma operação, geralmente manual, realizada com o intuito de remover os contaminantes do RCD (Figura 2.10). Os contaminantes podem ser materiais não minerais inúteis à reciclagem como agregado, ou podem ser até mesmo um dos componentes da fração mineral do RCD que aparecem junto de uma fase específica a qual se quer reciclar separadamente, como seria o caso de fragmentos de cerâmica contaminando um resíduo de concreto.

A operação pode ser feita antes ou após a fragmentação do resíduo. Quando realizada após a fragmentação, a catação manual apresenta a desvantagem de os contaminantes poderem se apresentar em pequenos pedaços e, portanto, mais difíceis de serem identificados.



Figura 2.10 - Área destinada à catação manual e separação magnética dos agregados reciclados na usina de Belo Horizonte - 2013.

Nos Estados Unidos e na Alemanha há usinas que combinam a catação manual com uma catação mecanizada (DOLAN *et al.*, 1999).

Nem sempre a catação manual apresenta boa eficiência. As usinas norte americanas que só fazem uso desse tipo de catação normalmente estão limitadas a só conseguir remover papelão, madeira e metais (Dolan *et al.*, 1999). Além disso, a catação manual é um processo desagradável e potencialmente perigoso para as pessoas envolvidas (SYMONDS, 1999).

2.1.4.8 Separação magnética

A separação magnética tem por objetivo remover os contaminantes de natureza metálica e pode ser realizada antes ou após a fragmentação.

De acordo com Sampaio e Luz (2004), os materiais metálicos tanto podem ser atraídos quanto repelidos (materiais diamagnéticos) pelo campo magnético. Aqueles fortemente atraídos são chamados ferromagnéticos enquanto que aqueles fracamente atraídos são chamados paramagnéticos.

Diante dessa diferença de comportamento, infere-se que a separação magnética não é capaz de remover todo o tipo de contaminante metálico presente no RCD, uma vez que nem todos eles são ferromagnéticos ou paramagnéticos.

2.1.4.9 Concentração gravítica

No processo de concentração gravítica, as “partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas são separadas uma das outras por ação da força da gravidade ou por forças centrífugas” (LINS, 2004, p. 241).

No beneficiamento do RCD o equipamento mais usado para tal finalidade é o jig (Figura 2.11), pelo que se pode notar a partir de Ângulo (2005), Carrijo (2005), Jungmann (1997), Kohler e Kurkowski (1998), Leite (2001) e Mesters e Kurkowski (1997). A jigagem é realizada após a britagem, e certas usinas a realizam em agregados com $0 < \phi < 32$ mm sem submetê-los a um peneiramento prévio para retirada da fração fina (JUNGMANN, 1997).

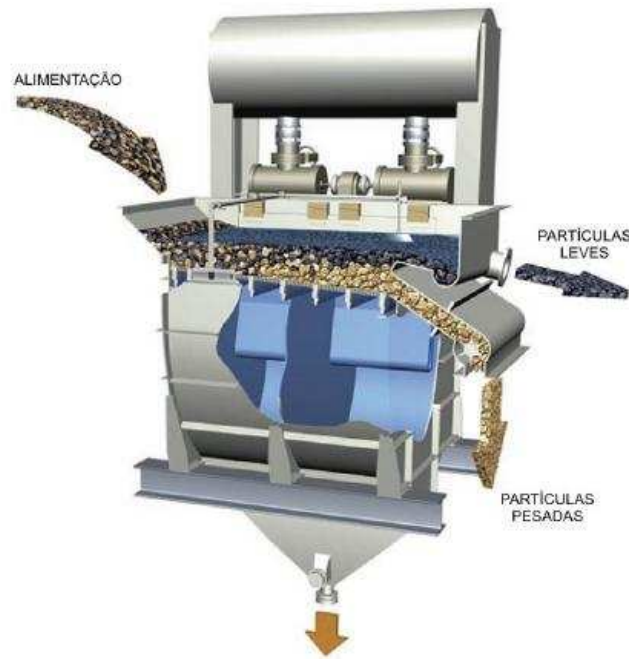


Figura 2.11 - Esquema de funcionamento do jigue modelo alljig

(www.allmineral.com, 2014).

O princípio de funcionamento dos jigues é a estratificação dos grãos de acordo com a massa específica (Figura 2.12) num leito pulsante de água onde atua a força da gravidade (JOHN *al.*, 2006; KOHLER; KURKOWSKI, 1998).

Segundo Kohler e Kurkowski (1998), a eficiência da separação sofre influência de vários fatores, dentre eles a diferença de densidade entre os materiais, as partes maiores das frações de diferentes densidades, a forma da partícula e o tipo de movimento da água.

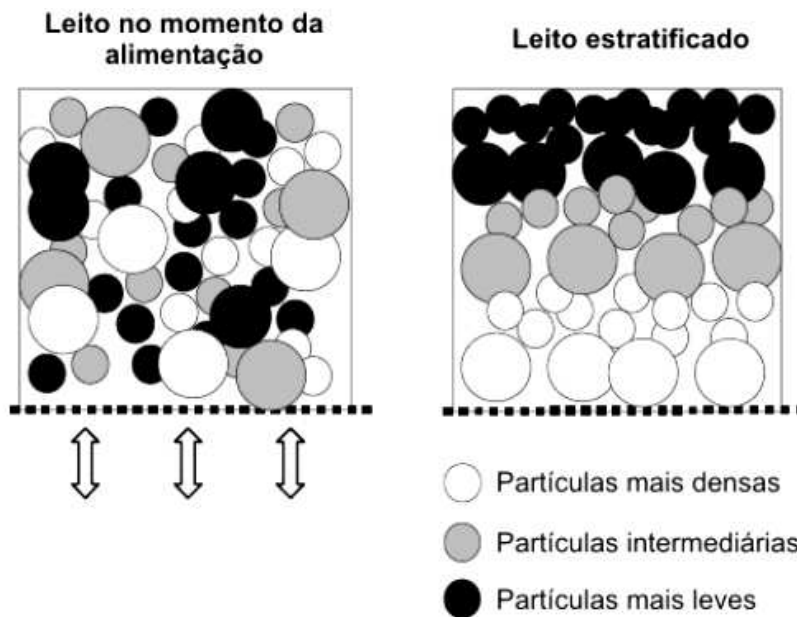


Figura 2.12 - Esquema do leito de um jig ideal processando carvão (DIEUDONNÉ *et al.*, 2001, modificado).

O uso de algumas das operações citadas anteriormente que visam concentrar o RCD ou o agregado dele obtido nem sempre levam a um produto homogêneo visto que, muitas vezes, elas atuam somente como operações de remoção de fases indesejáveis e nem sempre são 100% eficientes. Mesmo a classificação do RCD em resíduos de concreto, de alvenaria ou mistos não garante que os agregados reciclados tenham composição e propriedades físicas constantes (JOHN *et al.*, 2006).

Angulo (2005) e Carrijo (2005) constataram que a porosidade do agregado reciclado tem mais significância que sua natureza mineral e influencia diretamente sua resistência, módulo de deformação, absorção e massa específica e fator *a/c*. Assim, uma separação desses agregados por densidade é, de forma indireta, uma separação por resistência mecânica dos grãos (JOHN *et al.*, 2006). Isso mostra ser importante a realização da separação gravítica no beneficiamento do RCD/RCC, pois ela permitiria, inclusive, obter um agregado reciclado mais homogêneo. Agregados mais homogêneos, por sua vez, podem ser usados em aplicações de maior importância, tais como estruturas (MESTERS; KURKOWSKI, 1997).

De acordo com Kohler e Kurkowski (1998) e John *et al.* (2006) a jigagem também proporciona:

- separação de substâncias leves flutuantes como papel, madeira, espuma etc.;
- separação dos materiais com densidade menor que 2 g/cm³;
- efeito de lavagem sobre os agregados, removendo a fração pulverulenta aderida à superfície dos grãos e substâncias químicas contaminantes;
- redução do teor de finos.

A jigagem apresenta como desvantagem o grande consumo de água (2,42 m³/ton de agregado na Holanda, por exemplo). Entretanto, ela pode ser tratada e reutilizada no processo (JUNGMANN, 1997).

2.1.4.10 Separação em meio denso

A separação em meio denso é mais um processo de separação gravítica usado no tratamento de minérios. O meio denso é constituído de líquidos orgânicos, soluções de sais inorgânicos ou de uma suspensão estável de densidade pré-estabelecida. A densidade do meio deve ser intermediária entre as dos materiais a serem separados, de forma que aqueles com densidade inferior flutuem e aqueles com densidade superior afundem (CAMPOS *et al.*, 2004).

O uso da separação em meio denso é recomendada pela Rilem com a finalidade de separar e controlar o teor de partículas mais porosas presentes nos agregados reciclados (Ângulo *et al.*, 2004). É uma técnica mais rápida que a catação, pode ser usada com a fração miúda e também é uma forma de classificar a composição dos agregados reciclados (ÂNGULO *et al.*, 2004; OIKONOMOU, 2005).

Certos meios densos podem inviabilizar a operação para grandes quantidades de agregados. Carrijo (2005) constatou que o uso de cloreto de zinco não permite separações dos agregados reciclados em densidades maiores que 2,2 g/cm³, sem falar que mesmo depois de 96 horas imersos em água os agregados ainda apresentaram teor de cloretos solúveis suficiente

para retardar o tempo de hidratação do cimento. A autora também constatou problemas no uso de bromofórmio visto que o vapor do mesmo é tóxico, o que faz necessário trabalhar em ambiente controlado (uma capela, por exemplo) ou bem ventilado.

2.1.4.11 Flotação

A flotação não é uma operação muito usada no beneficiamento do RCD pelo que se nota na literatura.

É empregada na remoção de impurezas leves, como, por exemplo, plástico, madeira e papel (COSPER *et al.*, 1993; DOLAN *et al.*, 1999; QUEBAUD; BUYLEBODIN, 1999 apud ANGULO *et al.*, 2001).

Vários estudos realizados têm comprovado a viabilidade no aproveitamento de resíduos resultante do beneficiamento dos entulhos, como por exemplo:

Levy (1997) verificou a possibilidade de reciclagem do RCD, utilizando-o como matéria-prima alternativa para fabricação de argamassas. Comparando o comportamento dessas argamassas com os resultados apresentados nas bibliografias para argamassas mistas, à base de cimento, cal e areia, o autor concluiu que os revestimentos à base de cimento, entulhos de construção civis finamente moídos e areia média apresentaram significativos acréscimos de resistência à compressão e tração.

Estudos realizados Zordan (1997) com o objetivo de avaliar o comportamento de concretos produzidos com a utilização de materiais reciclados oriundos da usina de reciclagem de entulho instalada em Ribeirão Preto-SP indicaram uma possível aplicação na produção de componentes voltados para obras de infra- estrutura urbana.

Os materiais e métodos utilizados para o estudo da viabilidade da substituição parcial ou integral do agregado miúdo natural (AMN) por agregados miúdos obtidos da trituração de rejeitos de granitos em concreto de cimento Portland, foram apresentados por Kitamura (2006), concluindo que é tecnicamente viável a substituição do AMN pelos agregados miúdos obtidos

pelo beneficiamento do rejeito de granito, pois os mesmos apresentaram características que possibilitam obter misturas de concreto com propriedades adequadas ao uso corrente em estruturas de concreto.

Em seus estudos, Maciel (2008) utilizou o resíduo de construção para a produção de cerâmicas vermelhas, obtendo resultados dentro do padrão estabelecido por norma, viabilizando a fabricação de produtos de cerâmica vermelha.

Ainda têm-se os estudos apresentado por Coura (2009) que realizou uma pesquisa a qual foram caracterizadas três tipos de areias para produção de concreto, sendo eles resíduo de mármore triturado, resíduo de rocha gnáissica triturada e areias naturais, uma vez que a esse tipo de areia (natural) é um material com elevado consumo e com grande dificuldade de extração infringida pelos órgãos ambientais, além do esgotamento progressivo das reservas naturais.

Foram avaliados no que se refere a propriedades mecânicas (resistência à compressão do concreto e outros), módulo de deformação, coeficiente de Poisson, absorção e velocidade de propagação de pulso de ultrassônico, chegando à conclusão que o concreto com resíduo marmóreo é superior aos demais.

E, em Kitamura (2011) executou-se concreto com a substituição do agregado miúdo natural por resíduos de granito triturado, mostrando-se ser tecnicamente viável para as estruturas de concreto.

As resistências à compressão axial simples e à tração por compressão diametral dessas misturas contendo agregados miúdos artificiais oriundos do rejeito de granito obtiveram resultados favoráveis em relação à mistura de referência. A explicação para tal fato é, por ter as partículas do AMN formas arredondadas e lisas enquanto o dos grãos obtidos no processo de trituração dos rejeitos de granito é anguloso e possuem textura mais ásperas, proporcionando um melhor intertravamento e aderência com a pasta de cimento, minimizando as microfissurações nas zonas de transição agregado-pasta de cimento, incrementando essas resistências.

Outros trabalhos com a utilização do resíduo da construção civil em blocos de concreto avaliaram a substituição de agregados naturais por agregados reciclados de entulho o qual também obteve sucesso (DE PAUW, 1980).

Oliveira (2011) avaliou a substituição de resíduos de construção e demolição gerados na cidade de Petrolina-PE, para a produção de blocos de concreto. Os blocos foram produzidos com a separação dos resíduos em três frações: material cerâmico, concretos e argamassas e a mistura dos dois materiais. Observou segundo o critério da resistência à compressão mínima para a classe D da ABNT NBR 6136:2007, todos os blocos produzidos apresentaram resultados superiores aos 28 dias de idade, podendo classificar alguns como classe C e até mesmo B, caso dos resíduos de concreto e argamassa e misto.

Segundo Coelho (2011), foi estudada a influência da substituição de cimento Portland por resíduo moído de blocos cerâmicos na resistência mecânica do concreto auto-adensável. Os resultados obtidos mostraram que a diminuição na resistência à compressão foi proporcional ao aumento do teor de substituição. No entanto, constatou-se que essas diferenças de resistências tenderam a diminuir para a idade de 56 dias.

Tavares (2011) realizou um estudo comparativo entre as propriedades dos concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de RCD e concreto convencional. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples, tração por compressão diametral, tração na flexão e absorção de água. Pode-se dizer que os primeiros resultados foram satisfatórios.

Mohamad *et al* (2012) analisaram a viabilidade técnica do emprego de resíduos de construção e demolição (RCD) em substituição da areia natural na fabricação de concreto estrutural. Em seu trabalho, foi adotado um traço de referência para o concreto e, posteriormente a areia foi substituída pelo RCD nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100%. Como conclusão deste experimento, foi possível mostrar que a substituição da areia natural por RCD atendeu a viabilidade técnica, indo ao encontro da necessidade da região,

sendo uma alternativa sustentável para a redução da quantidade de resíduos de construção e demolição. Nesse programa experimental foi observado que a substituição parcial de 50% de RCD alcançou melhor resultado entre todas as demais substituições.

De modo geral a indústria da construção civil há muito tem se constituído em um setor com grande capacidade de absorver subprodutos gerados de outros processos de produção.

Nos estudos realizados por Ferreira *et al* (2012), foram utilizados agregados reciclados na confecção de concretos sendo avaliadas as características e propriedades desse concreto reciclado. Para tanto foram produzidos concretos com 0%, 50% e 100% de substituição de agregados graúdos e miúdos reciclados no concreto e sua posterior avaliação da compressão mecânica desses materiais. Foi utilizada uma dosagem de referência com uma relação água/cimento de 0,55 e cura de 3, 7, 14 e 28 dias.

Os resultados obtidos indicaram que não houve alteração significativa na redução da resistência à compressão dos concretos com substituição parcial e total de agregados naturais por reciclados. Dessa forma concluiu-se que a utilização dos agregados reciclados graúdos e miúdos na mistura do concreto é uma alternativa viável a ser utilizada na confecção de novos concretos.

Shi-Cong *et al* (2012) avaliaram a utilização de resíduos do concreto fresco provenientes das centrais de mistura como agregados graúdos no concreto em diferentes proporções de substituição e fatores água/cimento.

Evidenciou-se com o aumento da proporção de resíduos a redução da densidade e do módulo de elasticidade estático e o aumento da absorção de água e da permeabilidade ao íon cloreto. A resistência do concreto apenas aumentou para fatores de água/cimento menores que 0,35, demonstrando que esses resíduos podem ser utilizados em concretos sem função estrutural.

Cafange (2012) verificou a utilização de resíduo de borracha triturado em substituição de parte do agregado miúdo. Observou-se a influência do teor de borracha triturada nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Foi feito

um estudo em laboratório com proporções de 5 e 10% de substituição em massa, de areia por grânulos de borracha.

Os estudos demonstraram que há melhorias nas propriedades elásticas, sendo uma alternativa para aplicações onde o material pudesse estar sujeito a efeitos de impacto e também requerer resistência mecânica, tais como barreiras de proteção das rodovias, calçadas e revestimentos e concretos com baixa resistência estrutural.

Ferreira (2012) pesquisou sobre a utilização de resíduos industriais e agroindustriais para substituição parcial do clínquer do cimento. Os materiais pozolânicos com alto teor de sílica amorfa auxiliam na redução do consumo de cimento Portland e contribuem para a melhoria do desempenho mecânico e maior durabilidade de argamassas e concretos.

O trabalho avaliou blocos de concreto não estruturais produzidos com substituição parcial do cimento Portland por sílica ativa e por cinza de casca de arroz residual (CCA). Ambos os resíduos foram caracterizados por meio de análises de fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX), distribuição granulométrica (por difração a laser em solução aquosa) e curva de hidratação (temperatura em função do tempo).

Para analisar a reatividade dos mesmos foi medida a condutividade elétrica das amostras em um sistema com hidróxido de cálcio (CH). Foram confeccionados blocos de concreto não estruturais com uso desses resíduos, substituindo 10% do cimento Portland.

Os blocos não estruturais foram submetidos ao ensaio de absorção e de compressão axial aos 28 dias de idade. Os resultados obtidos mostraram que os blocos com a cinza de casca de arroz e a sílica ativa apresentaram bom desempenho mecânico.

Vanderlei (2012) verificou a resistência à compressão e da resistência à tração para concretos auto adensáveis (CAA) que contêm resíduos e subprodutos na sua composição. Foi avaliado o desempenho de dois traços de concretos auto adensáveis quanto à resistência à compressão e à tração

(compressão diametral). Os dois concretos foram produzidos com os mesmos materiais, sendo que em um deles parte do agregado miúdo é a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), na taxa de substituição de 10% da massa da areia.

Os materiais utilizados na pesquisa foram: cimento CP II E 32 brita basáltica, areia quartzosa, filler calcário calcítico, superplastificante policarboxílico de terceira geração, água e CBC. Os resultados demonstraram que a taxa de substituição de 10% de areia por CBC como agregado miúdo não promoveu diferenças significativas tanto na resistência à compressão quanto na resistência à tração.

Câmara (2012) testou a substituição de parte da areia por cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) na mistura de concretos. As misturas de concretos foram obtidas com a substituição de 5%, 10% e 20% da areia por CBC. Os testes mostraram que a adição de CBC à mistura de concreto resultou em melhor resistência à compressão do que a mistura convencional.

Com os resultados alcançados, concluiu-se que a CBC pode ser aplicada na Construção Civil não somente com a finalidade de sustentabilidade e preservação do meio ambiente, mas também com a finalidade de melhorar o desempenho de concreto e argamassas.

2.2 ESTUDOS REALIZADOS UTILIZANDO CONCRETOS COM AGREGADOS DE RCD

Em uma revisão de estudos feita por Mehta (1994), indica que, comparado ao concreto com agregado natural, o concreto do agregado reciclado teria no mínimo dois terços da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, bem como durabilidade satisfatória devido ao alto teor de álcalis. A presença de vidros triturados no agregado tende a produzir misturas de concreto pouco trabalháveis, assim como o alumínio que reagem com soluções alcalinas e causam expansão excessiva.

Em contrapartida, a utilização dos agregados de RCD impacta nas condições de mistura e na própria trabalhabilidade do concreto. Uma das

alterações é a perda de consistência ao longo do tempo, que é um problema inerente ao concreto independente do tipo de agregado utilizado (NEVILLE, 2013).

O agregado de RCD, por ser poroso, utiliza água livre de pasta de cimento quando não é devidamente pré-saturado, gerando uma perda de consistência mais rápida nos 20 primeiros minutos (LATTERZA, 1998).

Quando o agregado reciclado é adicionado na condição totalmente saturada, o ligeiro incremento de água livre na pasta reduz a perda de abatimento, ocasionado pela migração da água disponível no agregado para a pasta de cimento, aumentando a relação água efetiva/cimento, assim como a consistência do concreto.

Nesse sentido, a pré-saturação (entre 80% e 90% da absorção de água) tem sido recomendada por diversos pesquisadores, tanto para agregados leves quanto para agregados de RCD, Vasquez (1996), já que pela natureza porosa dos agregados de RCD, deve-se dosar o concreto com a menor quantidade de poros possível na pasta de cimento, melhorando assim suas propriedades mecânicas e durabilidade (DAMINELI, 2010).

Quando os agregados de RCD são adicionados secos no concreto, absorvem parte da água adicionada na pasta de cimento, ocorrendo a redução da relação água/cimento da pasta, implicando em perda de consistência e aumento discreto da resistência mecânica dos concretos (OLIVEIRA; VASQUEZ, 1996).

A água utilizada para realizar a saturação prévia desses agregados nunca deve ser considerada no cálculo da relação água/cimento desse tipo de concreto, quando se deseja comparar a resistência mecânica desse concreto com um concreto de referência com agregados convencionais. Isso porque a relação água/cimento ficaria muito maior do que realmente é dando a falsa impressão de que o concreto com agregado poroso pode ser mais resistente do que o concreto com agregado natural (sem poros) para uma dada relação água/cimento (ÂNGULO, 2011).

Outro aspecto importante dos concretos está na relação da macroestrutura do concreto em si e com os agregados naturais, onde se pode identificar dois principais constituintes: a pasta endurecida e partículas do agregado. Entretanto, a nível microscópico pode-se distinguir outra fase que está em contato com o agregado graúdo, trata-se da zona de transição que apresenta características distintas do restante da pasta e que geralmente é mais fraca do que as duas outras fases e, conseqüentemente exerce uma influência muito maior nas propriedades do material (Buttler, 2003), conforme identificado na Figura 2.13.

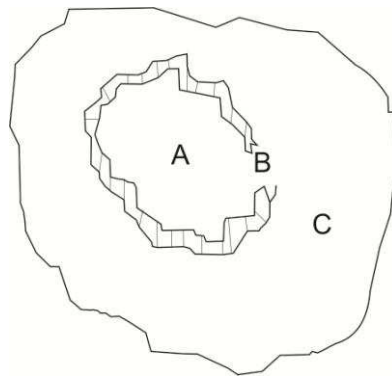


Figura 2.13 – Microestrutura do concreto

A = agregado

B = zona de transição

C = matriz de cimento

Com relação à microestrutura do concreto com agregado graúdo reciclado, nota-se que as propriedades do material são influenciadas principalmente pelas características da argamassa aderida ao agregado reciclado e pela nova matriz de cimento em contato com o reciclado, conforme observa-se na Figura 2.14.

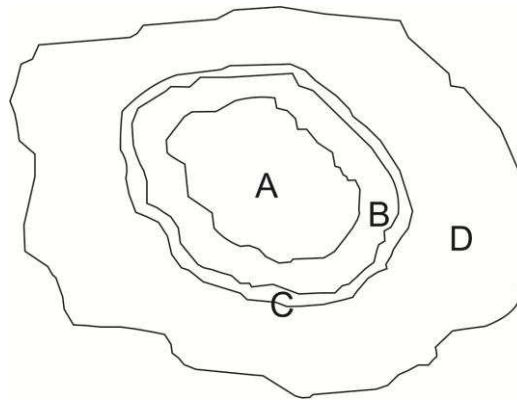


Figura 2.14 – Microestrutura do concreto reciclado.

A = agregado graúdo

B = argamassa aderida

A + B = agregado reciclado

C = zona de transição pasta/agregado

D = nova matriz de cimento

2.2.1 Influência dos agregados nas propriedades do concreto no estado endurecido

2.2.1.1 Retração

A retração hidráulica em estruturas de concreto é um fenômeno inevitável, e como é uma das principais causas da fissuração, assume fundamental importância, pois a sua ocorrência está associada à durabilidade do concreto.

Segundo Bastos e Cincotto (2000), a retração em compósitos à base de cimento é ligada diretamente à ocorrência de fenômenos patológicos nas construções, sendo uma das principais causas da fissuração e a ocorrência desta última, está ligada diretamente à durabilidade do concreto.

A retirada da água do concreto conservado em ar não saturado causa a retração hidráulica, ou por secagem. Uma parte dessa variação de volume é irreversível e deve ser diferenciada das variações reversíveis de umidade

causadas por exposição alternada a condições secas e úmidas, NEVILLE (2013).

A variação de volume do concreto ao secar não é igual ao volume de água retirado. A perda de água livre, que ocorre antes, causa pouca ou nenhuma retração. Com o prosseguimento da secagem, a água adsorvida é removida e, nesse estágio, a variação de volume da pasta de cimento hidratada não restringida é aproximadamente igual à perda de uma camada de água com espessura de uma molécula, da superfície de todas as partículas de gel.

Um dos fatores que influenciam a retração da pasta de cimento hidratada destaca-se a relação água/cimento, ou seja, quanto maior esta relação, maior a quantidade de água evaporável na pasta cimento além de determinar a velocidade à qual a água pode se deslocar para a superfície do concreto NEVILLE (2013).

Complementa ainda o próprio Neville (1997) que a retração é provavelmente uma das propriedades menos desejáveis do concreto. Quando restringida, a retração pode resultar em fissurações, fato este que pode prejudicar a aparência do concreto e o torna mais vulnerável ao ataque por agentes externos, prejudicando a sua durabilidade. Mas, mesmo a retração não restringida é prejudicial: elementos de concreto não adjacentes se contraem afastando-se uns dos outros, abrindo, assim, fissuras externas. A retração também é responsável pela perda parcial de protensão dos cabos de concreto protendido.

O tamanho e a granulometria do agregado não tem influência sobre a magnitude da retração, mas agregados maiores permitem misturas mais pobres, resultando, portanto menor retração.

O teor de água no concreto influencia a retração indiretamente reduzindo o volume do agregado que exerce contenção. Este efeito de contenção da retração exercido pelo agregado, as propriedades elásticas do agregado determinam o grau de contenção. Os agregados leves, de um modo geral, resultam maior retração, principalmente devido ao fato de o agregado, tendo

um módulo de elasticidade menor, oferece menor contenção à pasta de cimento. Os agregados leves que têm uma proporção maior de material fino passante na peneira 75 μm apresentam uma retração ainda maior, pois os finos tendem a uma maior proporção de vazios, NEVILLE (2013).

Sendo assim, no caso de concretos com agregados reciclados, a retração por secagem é um importante aspecto a ser analisado, pois está ligada intimamente a durabilidade do concreto e, concretos com agregados de RCD retraem mais que os concretos com agregados naturais. A presença da água ocorre tanto nos poros da pasta de cimento quanto nos poros do agregado. Desta forma, quando esses concretos são expostos a elevadas temperaturas e situações de predominância de ventos sempre implica em uma maior evaporação. Como consequência, ocorre uma maior retração volumétrica quando comparado aos concretos com agregados convencionais, Buttler, (2003) como se pode observar na Figura 2.15.

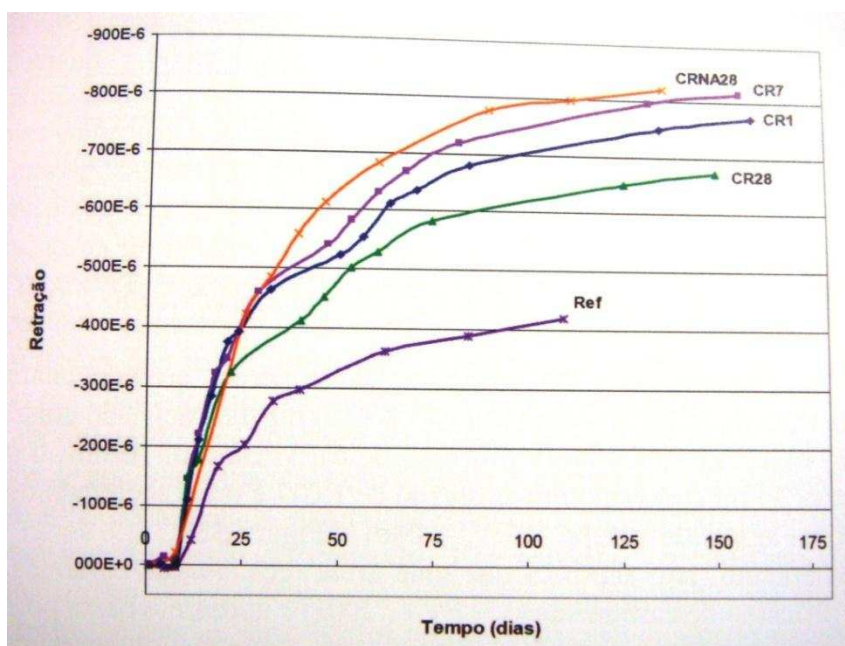


Figura 2.15 – Retração dos concretos com RCD e agregado natural (BUTTLER, 2003).

Uma forma de controlar a retração excessiva é manter a pré-saturação entre 80% e 90% da absorção de água para agregados de RCD.

Inúmeros fatores podem influenciar a retração por secagem, tais como:

- condições ambientais;
- tipo litológico dos agregados;
- dimensão máxima característica;
- propriedades físicas do agregado;
- proporções do material (principalmente a quantidade de água);
- microfissuras (interface pasta/agregado);
- cura do concreto e outros.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a retração por secagem é influenciada principalmente pelo módulo de deformação do agregado. A influência das outras características do agregado pode ser indireta, isto é, através do seu efeito no conteúdo de agregado do concreto ou na capacidade de adensamento da mistura de concreto.

A influência das características do agregado, principalmente o módulo de deformação, foi confirmada pela pesquisa de Troxell *et al.* apud Mehta e Monteiro (1994) sobre fluência e retração do concreto. Os resultados do pesquisador mostram que a retração por secagem aumentou cerca de 2,5 vezes quando um agregado com alto módulo de deformação foi substituído por um agregado com baixo módulo de deformação.

Segundo Furnas (1997), a capacidade das partículas de agregado em restringir as deformações da pasta de cimento depende de vários fatores importantes:

- extensibilidade relativa da pasta e a compressibilidade do agregado (módulo de elasticidade);
- a ligação ou contato entre a pasta e o agregado;
- a contração da pasta no estado fresco;
- grau de fissuração da pasta de cimento;
- variação de volume das partículas de agregado devido à secagem.

A utilização de menos água de amassamento reduzirá substancialmente a retração. Um aumento no volume de água do concreto não irá somente aumentar a relação água/cimento, mas irá também reduzir o

volume de agregado, conseqüentemente aumentando a retração do concreto. Para uma dada relação água/cimento, tanto a retração por secagem como a fluência aumenta com o aumento do consumo de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994; FURNAS, 1997).

2.2.1.2 Porosidade

Os agregados de RCD geralmente são mais porosos que os agregados naturais. Gómez-Soberón (2001) comprovou que os teores crescentes de substituição de agregado natural por agregado reciclado de concreto implicavam num aumento da porosidade do concreto, principalmente os poros capilares.

Desta maneira não é aconselhável o uso de concretos com agregados reciclados na forma aparente. Recomenda-se sempre o uso de pinturas para atuarem como barreira ao processo de degradação ocasionada pela carbonatação e, conseqüentemente, ao processo de corrosão de armadura do concreto.

A absorção de água é uma das propriedades ligadas à porosidade cuja determinação é das mais simples. As duas propriedades são diretamente proporcionais.

Em conseqüência da variação da porosidade do agregado reciclado, a absorção de água também apresentará variabilidade. Angulo (2000) constatou que a absorção de cada uma das fases que compunham o agregado reciclado produzido na usina de Santo André (SP) variou e que as fases tenderam, em geral, a ser cada vez mais porosas na seguinte ordem: rochas, concretos/argamassas e cerâmicas (Figura 2.16 - Absorção de água por imersão, após 24 horas, de fases do agregado graúdo de RCD reciclado da usina de Santo André). Dessa forma, é de se esperar que quanto maior for a quantidade de fases mais porosas, como a cerâmica, por exemplo, maior será a absorção do agregado.

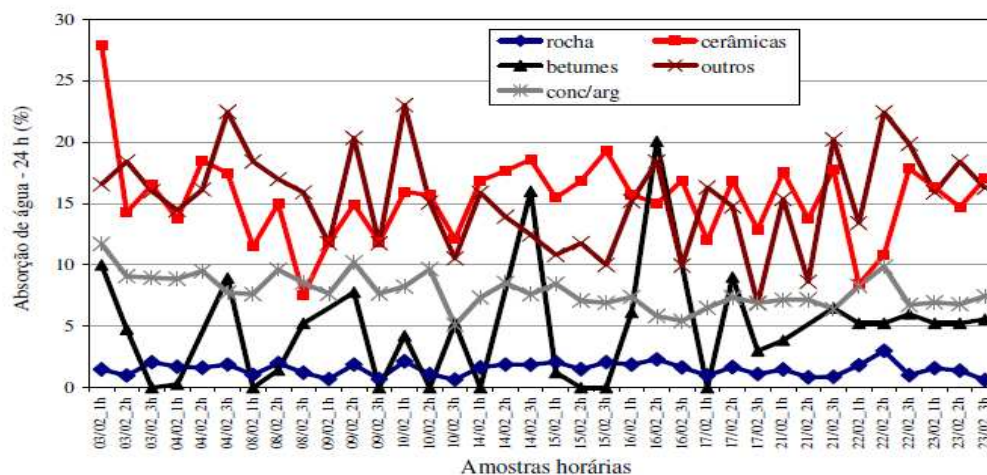


Figura 2.16: Absorção de água por imersão (ANGULO, 2000).

Vários estudos têm observado que a absorção de água é maior para as frações de menor granulometria. São exemplos os estudos de Hansen e Narud (1983), que analisaram agregados de concreto reciclado (Tabela 2.2), e o de Poon e Chan (2006) (Tabela 2.3), que, dentre outras fontes, analisaram agregados de alvenaria de tijolos cerâmicos.

Tabela 2.2 – Propriedades de agregados de concreto reciclado.

Tipo de agregado	Fração granulométrica (mm)	Massa específica (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Perda de abrasão Los Angeles (L500)	Volume de argamassa aderida aos grão de rocha natural (%)
Reciclado (H)	4-8	2,34	8,5	30,1	58
	8-16	2,45	5,0	26,7	38
	16-32	2,49	3,8	22,4	35
Reciclado (M)	4-8	2,35	8,7	32,6	64
	8-16	2,44	5,4	29,2	39
	16-32	2,48	4,0	25,4	28
Reciclado (L)	4-8	2,34	8,7	41,4	61
	8-16	2,42	5,7	37,0	39
	16-32	2,49	3,7	31,5	25

Fonte: Hansen e Narud (1983)

H = concretos britados em britador de mandíbulas de alta resistência;

M =concretos britados em britador de mandíbulas de média resistência;

L =concretos britados em britador de mandíbulas de alta resistência.

Tabela 2.3 - Absorção de água de agregados de alvenaria de tijolos cerâmicos reciclados.

Propriedade	Tamanho do agregado		
	20 mm	10 mm	< 5 mm
Absorção de água (%)	18,4	19,5	30,9

Fonte: Poon e Chan (2006)

Hansen e Narud (1983) verificaram que a maior absorção das frações menores do agregado de concreto reciclado é devida à maior quantidade de argamassa aderida aos grãos das mesmas. Poon e Chan (2006) também atribuem a maior absorção das frações menores à maior quantidade de argamassa aderida aos grãos de menor tamanho.

A partir desses dois estudos, vê-se que a maior absorção de água das frações de menor granulometria dos agregados reciclados acontece em razão das mesmas conterem materiais mais porosos e, conseqüentemente, menos resistentes. A provável causa para isso é que, conforme Figura 2.22, tais materiais tendem a se fragmentar mais que os materiais mais resistentes.

A capacidade de absorção de água dos agregados reciclados apresenta ainda a característica de se pronunciar numa velocidade mais rápida que a dos agregados naturais de forma que aquele pode chegar à quase saturação em questão de minutos.

Leite (2001) e Carrijo (2005) usaram um ensaio modificado para determinação da absorção dos agregados de RCD reciclado de seus estudos. Em tal ensaio a absorção é medida não só às 24 horas, mas também ao longo dos primeiros minutos e horas do período de imersão. Enquanto Leite (2001) constatou que os agregados, tanto miúdos quanto graúdos, atingiram cerca de 50% da absorção total em 10 minutos, Carrijo (2005) observou, para este

mesmo tempo, que os agregados graúdos separados em faixas de densidade atingiram entre 70% e 86% da absorção total de água.

Em muitos casos citados na literatura, 10 minutos é o tempo para o qual a absorção começa a se processar de forma mais lenta; em outras palavras, é o ponto em que a curva da absorção em função do tempo inicia um comportamento assintótico.

A avaliação da absorção de água nos momentos iniciais é importante porque o concreto no estado fresco pode ter parte considerável da água de mistura absorvida pelos agregados reciclados e, conseqüentemente, sofrer perda de consistência. Oliveira e Vazquez (1996) e Poon *et al.* (2004) verificaram que o uso do agregado em condições extremas, isto é, totalmente seco ou saturado com superfície seca, não tem efeitos positivos sobre o concreto, pois foram observados desde perda de trabalhabilidade até ligeiros decréscimos da resistência mecânica, por exemplo.

O uso, então, do agregado numa condição intermediária de umidade tenderia a minimizar ou anular os efeitos negativos da alta absorção. Tendo isso em vista, Leite (2001) e Carrijo (2005) fizeram uso do resultado do ensaio citado anteriormente para realizar uma pré-molhagem do agregado no momento de preparo do concreto.

É preciso observar, no entanto, que na produção do concreto a quantidade de água que o agregado reciclado pode absorver irá depender de fatores como a sua condição inicial de umidade, o tempo de permanência em contato com a água, se o agregado entra em contato primeiro somente com a água, ou com a pasta de cimento, entre outros (BARRA, 1996 apud LEITE, 2001).

2.2.1.3 Resistência à compressão

Todos os materiais dos quais o concreto é composto afetam diretamente a sua resistência e o seu desempenho final. Assim, os agregados também são extremamente importantes para análise criteriosa das propriedades do concreto. Qualquer variação dos materiais componentes do concreto merece

um estudo sistemático e isso também se aplica ao agregado reciclado, principalmente quando se pensa que eles correspondem até 80 % de toda mistura (LEITE, 2001).

O componente agregado é o principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. A massa específica do agregado graúdo influi diretamente na massa específica do concreto, sendo também diretamente proporcional à resistência do concreto (Buttler, 2003), isto é, quanto maior a porosidade do agregado (índice de vazios), menor será sua resistência tornando-se o elo mais fraco da mistura.

Segundo Neville (2013), as características do agregado, como granulometria e textura também influem, embora de maneira menos significativa nas propriedades do concreto. Para agregados com grande diâmetro característico ou de forma lamelar ocorre a formação de um filme de água junto às paredes do agregado (exsudação interna), enfraquecendo sua ligação com a pasta.

Por outro lado, agregados de diâmetros menores aumentam a superfície de contato entre o agregado e a pasta de cimento, elevando a resistência do concreto.

No caso de agregados graúdos reciclados, a qualidade do resíduo de concreto é fundamental na determinação das propriedades mecânicas do novo concreto. A argamassa aderida ao agregado reciclado pode representar o elo mais fraco da mistura quando sua resistência for menor que a resistência da nova zona de transição, especialmente devido à sua maior porosidade.

A resistência do concreto com agregados de RCD, por serem mais porosos, será menor que a do concreto com agregado natural. Essa resistência pode ser aumentada pela redução da relação água/cimento, reduzindo a porosidade da pasta de cimento.

Por outro lado, quando se deseja obter concretos com resistência à compressão superior àquela do concreto que deu origem ao agregado reciclado, a fraca aderência entre a argamassa antiga e o agregado original

pode levar à redução da resistência à compressão do concreto reciclado, quando comparado ao concreto de referência com mesma relação água/cimento, comprometendo assim o objetivo final.

Entretanto, quando a resistência do concreto de origem do agregado reciclado é maior que a do novo concreto de referência, o desempenho mecânico do concreto reciclado é melhor (Tavakoli e Soroushian, 1996). Estes pesquisadores concluíram ainda que um aumento na perda por abrasão *Los Angeles* ocasionado pela baixa resistência do material juntamente com taxa de absorção elevada que favorece a migração da água da pasta de cimento para os poros dos agregados, podem levar a uma redução da resistência dos concretos confeccionados com agregados reciclados.

A verificação da viabilidade técnica da adição de resíduo oriundo dos rejeitos de mármore triturado na produção de concretos auto-adensáveis foi estudado por BARBOSA *et al* (2012).

Os resultados apontaram que os concretos elaborados com o rejeito de mármore apresentaram características mecânicas e de durabilidade superiores, comprovando a viabilidade da utilização desses rejeitos na confecção de concreto auto-adensáveis.

Levy e Helene (2000) realizaram três misturas de concreto, uma de referência, a segunda utilizando 50 % de agregado graúdo de concreto e a terceira utilizando 50 % agregado graúdo de alvenaria, em três proporções 1:3, 1:4,5 e 1:6, tendo como fator de controle das misturas o abatimento de 70 ± 20 mm, ou seja, as relações a/c variavam para cada traço.

Os autores obtiveram como resultado aos 28 dias uma redução nos valores de resistência dos concretos com agregado de alvenaria que variou de 23 a 37 %. Para os concretos com agregado de concreto os resultados de resistência obtidos foram semelhantes aos do concreto de referência.

Observou-se nos resultados que o tipo de componente utilizado para produção do concreto exerce influência sobre a resistência à compressão dos concretos. A menor resistência e maior porosidade dos agregados de

alvenaria, compostos de argamassa e blocos cerâmicos, são apontadas como as causas desta redução.

Machado Jr *et al.* (2000) realizaram misturas de concreto reciclado utilizando agregado graúdo reciclado de 19,0 e 9,5 mm, separadamente, com teores de substituição de 0%, 50% e 100%.

Os resultados obtidos não apresentaram diferença significativa em relação às duas graduações testadas, todavia os concretos reciclados apresentaram aumento de cerca de 15% e 19% nos valores de resistência em relação aos concretos de referência.

Os autores atribuem este comportamento a alta absorção dos agregados reciclados que não foi compensada para produção dos concretos. Neste caso, foi mencionada, também, a possibilidade de “cura úmida interna” por parte do agregado reciclado durante o endurecimento da pasta, fenômeno que ocorre com os agregados leves de alto poder de absorção descritos por NEVILLE (2013).

2.2.1.4 Módulo de deformação

O módulo de deformação do concreto com agregados de RCD é fortemente afetado pela porosidade. Segundo Levy (1997), este fato se deve à camada de argamassa antiga aderida à superfície do agregado reciclado de concreto e a maior porosidade dos materiais que compõem o resíduo.

Como os agregados de RCD contêm poros e estão microfissurados pela britagem, o módulo de deformação diminui à medida que aumenta o teor de substituição do agregado natural por esses agregados (ÂNGULO, 2005).

Isto ocorre porque o volume desse material no concreto é muito superior ao volume da pasta de cimento. Quando se fixa a porosidade do agregado, o módulo é governado pela relação água efetiva/cimento da pasta de cimento (LATTERZA, 1998).

Os concretos com agregados graúdos reciclados de concreto, estudados por Salem e Burdette (1998), apresentaram uma redução nos valores de

módulo de deformação de cerca de 9% aos sete dias, e 16% aos vinte e oito dias, comparados aos concretos convencionais.

De acordo com os autores, esta redução se deve à camada de argamassa antiga aderida às partículas do agregado reciclado. Esta confere ao agregado reciclado maior deformabilidade, assim como ao concreto confeccionado com este material.

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade de um agregado não são propriedades frequentemente mensuradas em razão da dificuldade de se ensaiar as partículas isoladamente; porém, assim como a resistência à abrasão, são muito influenciadas pela porosidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

A resistência à compressão do agregado graúdo pode ser determinada de forma indireta através da medição da resistência à compressão do concreto. Substitui-se os agregados graúdos de um concreto de resistência conhecida pelos agregados graúdos a serem estudados. Se com este agregado obtém-se um concreto com resistência à compressão menor e, particularmente, se muitos grãos aparecem rompidos após a ruptura do corpo-de-prova, conclui-se que a resistência do agregado é inferior à resistência à compressão desse concreto (NEVILLE, 1997).

Foi com base nesses critérios que Carrijo (2005) constatou a baixa resistência à compressão de agregados reciclados de seu estudo.

De forma semelhante à resistência à compressão, infere-se o módulo de elasticidade do agregado reciclado, pois, segundo Neville (1997), o módulo de elasticidade do concreto é tanto maior quanto maior o módulo de elasticidade do agregado.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) apesar do comportamento não linear do concreto, é necessária uma estimativa do módulo de deformação, o qual é a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea, dentro de um limite proporcional, adotado para determinar as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais.

Assim como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade do concreto depende da porosidade de suas fases (pasta, agregado e zona de transição). Dessa forma, muitos comportamentos observados na resistência repetem-se no módulo de elasticidade.

No caso do agregado, sua dimensão máxima, forma, textura superficial, granulometria e composição mineralógica também podem influir no módulo de elasticidade por influenciar a microfissuração da zona de transição. Todavia, a porosidade é mais importante em virtude de estar ligada à sua rigidez e resistência (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Da mesma forma que para a resistência à compressão, Khatib (2005) observou que os concretos produzidos tanto com agregado miúdo de concreto quanto com agregado miúdo de tijolos apresentaram módulo de elasticidade menor que o concreto convencional. Quanto maior o teor de substituição do agregado, menor foi o módulo de elasticidade. Porém, os concretos produzidos com agregados de tijolos apresentaram menores reduções.

À maior idade (90 dias), estes concretos apresentaram redução de 9,9% contra 16,4% dos concretos contendo agregado de concreto, mostrando que, apesar de ser mais poroso, o agregado miúdo de tijolos foi menos prejudicial.

Isto leva a crer que no caso do agregado miúdo reciclado, além da porosidade, outras características típicas dos agregados reciclados, tais como forma mais angular, textura superficial mais rugosa e granulometria eventualmente mais contínua também são relevantes.

O mesmo experimento fatorial de Leite (2001) apontou que os seguintes fatores tinham influência significativa sobre o módulo de elasticidade: relação a/c , teor de substituição do agregado graúdo e a interação teor de substituição do agregado graúdo x teor de substituição do agregado miúdo; sendo os dois primeiros os fatores de maior influência.

O módulo de elasticidade foi tanto menor quanto maior foram os valores desses dois fatores, comprovando que alterações que levam ao aumento da

porosidade das fases do concreto são capazes de reduzir o valor desta propriedade.

Da mesma forma que os outros estudos citados anteriormente, Gómez-Soberón(2002) verificou que a diminuição do módulo de elasticidade do concreto esteve associada ao aumento da porosidade do mesmo em consequência do aumento do teor de substituição do agregado natural por agregado de concreto reciclado.

Carrijo (2005) observou que o módulo de elasticidade dos concretos diminuiu à medida que a massa específica dos agregados reciclados diminuiu, comprovando que os agregados menos densos possuíam menor módulo de elasticidade. No entanto, Neville (1997) lembra que agregados com resistência e módulo de elasticidade moderados ou baixos podem ser bons para a preservação da integridade do concreto quando submetido a tensões devidas a variações de volume de origem hidráulica ou térmica.

A resistência à abrasão do agregado oferece um indicativo da qualidade do material a ser utilizado no concreto, pois ela representa a resistência à fragmentação por choque e atrito das partículas de agregado graúdo. Os agregados reciclados apresentam menor resistência ao impacto e ao desgaste por abrasão que os agregados naturais (LEITE, 2001).

O método mais usado na determinação da resistência à abrasão é o ensaio americano de abrasão *Los Angeles*, que combina abrasão e atrito. Ele mostra boa correlação não só com o desgaste real dos agregados no concreto, mas também com a resistência à compressão e a resistência à flexão do concreto confeccionado com tal agregado (NEVILLE, 1997).

Vê-se, então, que o módulo de elasticidade é influenciado pela porosidade do agregado reciclado de forma semelhante à resistência à compressão. Com base nisto e nos estudos aqui discutidos, pode-se concluir que o uso de agregados mais densos (menos porosos) permite obter concretos reciclados menos deformáveis (maior módulo de elasticidade).

Hansen e Narud (1983) constataram que a perda por abrasão *Los Angeles* dos agregados de concreto reciclado foi maior que a dos agregados naturais para as três faixas granulométricas estudadas (Tabela 2.4), sendo tanto maior o desgaste quanto menor era a granulometria.

Isto corrobora com a afirmação dos autores de que a maior quantidade de argamassa aderida às frações menores implica no ponto fraco do agregado de concreto reciclado.

Tabela 2.4 – Massa específica e absorção de água de agregados graúdos reciclados separados por faixas de densidade – Carrijo (2005)

Agregado	Sigla	Densidade	Origem	Massa específica (g/cm³)	Absorção de água (%)
Reciclado	d1	d < 1,9	vermelho	1,74	15,32
			cinza	1,78	14,65
	d2	1,9 < d < 2,2	vermelho	2,02	9,01
			cinza	2,11	8,05
	d3	2,2 < d < 2,5	vermelho	2,49	2,84
			cinza	2,53	2,03
	d4	d > 2,5	vermelho	2,62	1,40
			cinza	2,60	1,51
Natural				2,68	0

Especificamente para o agregado de concreto reciclado, e possivelmente para a fase concreto presente em agregados reciclados mistos, a idade do mesmo influencia a perda por abrasão.

Foi o que observou Buttler (2003) ao analisar a perda por abrasão *Los Angeles* às idades de 1, 7 e 28 dias (41,68%, 30,48% e 28,75%, respectivamente). O autor atribuiu a grande perda na primeira idade estudada à grande quantidade de partículas de cimento não hidratadas aderidas à superfície do agregado. Note-se, no entanto, que a diferença entre as perdas aos 7 e 28 dias foi pequena.

Ainda de acordo com Buttler (2003), a norma americana ASTM C33 (*Standard Specification for Concrete Aggregates*) estabelece que agregados só podem ser usados na produção de concreto se sua perda por abrasão for inferior a 50%. A NBR 15116 (2004) não faz nenhuma menção a essa propriedade dos agregados reciclados.

Mehta e Monteiro (1994) fazem algumas observações sobre parâmetros que podem influenciar o módulo de deformação dos concretos, uma vez que esse está intrinsecamente ligado à fração volumétrica, à massa específica, ao módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento e às características da zona de transição.

Os autores apontam que o módulo de deformação do agregado está ligado principalmente à sua porosidade e, em grau um pouco menor, ao diâmetro máximo do agregado, forma, textura, granulometria e composição mineralógica.

Entretanto, é a rigidez do agregado que controla a capacidade de restrição da deformação da matriz e esta rigidez é determinada pela sua porosidade. Para agregados de baixa porosidade, os valores de módulo de deformação variam de 69 GPa a 138 GPa e para agregados menos densos estes valores estão na faixa de 21GPa a 48 GPa.

Os agregados leves apresentam valores de módulo entre 7 GPa e 21 GPa. A matriz da pasta de cimento apresenta resultados de módulo que variam entre 7 GPa e 28 GPa.

Estes valores são regidos pela porosidade das pastas, que por sua vez é controlada pela relação a/c, pelo grau de hidratação do cimento, pelo conteúdo de ar da mistura e pela presença de adições minerais. Na zona de transição existe a influência dos espaços vazios, das microfissuras e dos cristais de hidróxido de cálcio orientados sobre as relações de tensão/deformação.

Com base nas características que influenciam o módulo de elasticidade apontadas acima, pode-se dizer que o módulo de elasticidade dos agregados reciclados está bem próximo dos valores de módulo apresentados pela matriz da pasta de cimento, visto que a composição dos resíduos de construção e demolição se dá basicamente a partir de materiais de base cimentícia.

2.3 CONCRETOS COM FIBRAS

Há cerca de 5.000 anos atrás, há evidências da inserção de asbesto para reforçar postes de argila e os egípcios usavam a palha para reforçar seus tijolos de barro (Mehta, 1994). Na Antiga China, há indícios do uso de fibras para a construção de sua famosa muralha. Estudos científicos sobre o comportamento das fibras deram-se apenas na década de 50 com a entrada das fibras de aço e vidro (TANESI; FIGUEIREDO, 1999).

O concreto contendo cimento hidráulico, agregados miúdos e/ou graúdos e fibras discretas descontínuas é chamado de concreto reforçado com fibras. As fibras podem ser de várias formas e tamanhos. São feitas de materiais variados tais como plástico, vidro, materiais naturais ou de aço, que são as mais utilizadas.

Os concretos com ou sem fibras podem ser definidos como compósitos, uma vez que material compósito é definido como uma combinação macroscópica de, pelo menos, dois materiais distintos, possuindo uma fronteira

reconhecível entre eles, cujas fases principais são a pasta, os poros, o agregado e as fibras se forem o caso (FIGUEIREDO, 2011).

Shah (1983) menciona que geralmente as fibras de reforço são descontínuas e distribuídas randomicamente na matriz de concreto, e normalmente não são utilizadas para substituir a armadura convencional do concreto. Devido à flexibilidade de sua fabricação, o concreto reforçado com fibras pode ser econômico e ter muitas aplicações como material de construção tais como aduelas pré-moldadas para revestimento de túneis e pavimentos portuários e aeroportuários.

Em contraponto, de acordo com o ACI (2002), a opção pelas fibras (descontínuas e distribuídas aleatoriamente) em detrimento às barras de aço de reforço ou pré-reforço, que também aumentam a resistência do concreto, é um processo mais econômico, devido à simplicidade do seu processo de fabricação.

Mas apesar de todos os benefícios, as fibras incorporadas ao concreto também podem agregar desvantagens em seu uso. O principal é o aspecto estético que pode ser comprometido, já que parte das fibras pode permanecer em sua superfície, mesmo após o correto procedimento com relação ao acabamento superficial. Além disso, a falta de uma normalização para a fabricação e parâmetros de qualidade ainda inibem a popularização das fibras no mercado (MAIA, 2011).

Apesar disto, nos últimos anos tem-se registrado um crescimento quanto ao uso de fibras, principalmente no que diz respeito ao combate da fissuração por retração do compósito.

As principais aplicações das fibras de aço como reforço de concreto são descritas pela ACI R544/84, sendo:

- em camadas de recobrimentos de estruturas como barragens e vertedouros a fim de resistir a danos provocados pela cavitação da água;

- em pistas de aeroportos ou de auto-estradas, com a finalidade de se obter pavimentos com menor espessura e maior resistência à abrasão;
- em concretos refratários obtidos pela adição de fibras ao concreto utilizando-se cimento com alto teor de alumina;
- na estabilização de túneis ou de minas;
- na confecção de cascas finas de concreto;
- como reforço à armadura de barras de aço nas estruturas resistentes à explosões;
- em estruturas resistentes à ação sísmica.

Cangiano *et al.* (2005) relatam que após cerca de 40 anos de pesquisa, o CRFA é hoje em dia largamente empregado em estruturas onde não é essencial a utilização do concreto armado para a integridade e segurança, como por exemplo, em túneis, elementos pré-fabricados leves, etc. Atualmente as fibras também são utilizadas como reforço em estruturas sujeitas à flexão e à força cortante tais como vigas protendidas pré-fabricadas, elementos de alma fina para cobertura, segmentos de túneis, etc.

2.3.1 Conceito de fibra

A fibra é um material fino, fibrilado e alongado. São elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que as dimensões da seção transversal. Na natureza, as fibras podem ser encontradas inclusive nos seres vivos, pois são elas que fazem a função estrutural dos tecidos. Podem ser utilizadas com diversas finalidades, dependendo da sua origem e composição.

As estruturas com malha fibriladas possuem a vantagem de promover um aumento na adesão entre a fibra e a matriz, devido a um efeito de intertravamento (BENTUR; MINDESS, 1990).

Na Figura 2.17, é apresentado o diagrama de tensão e deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade.

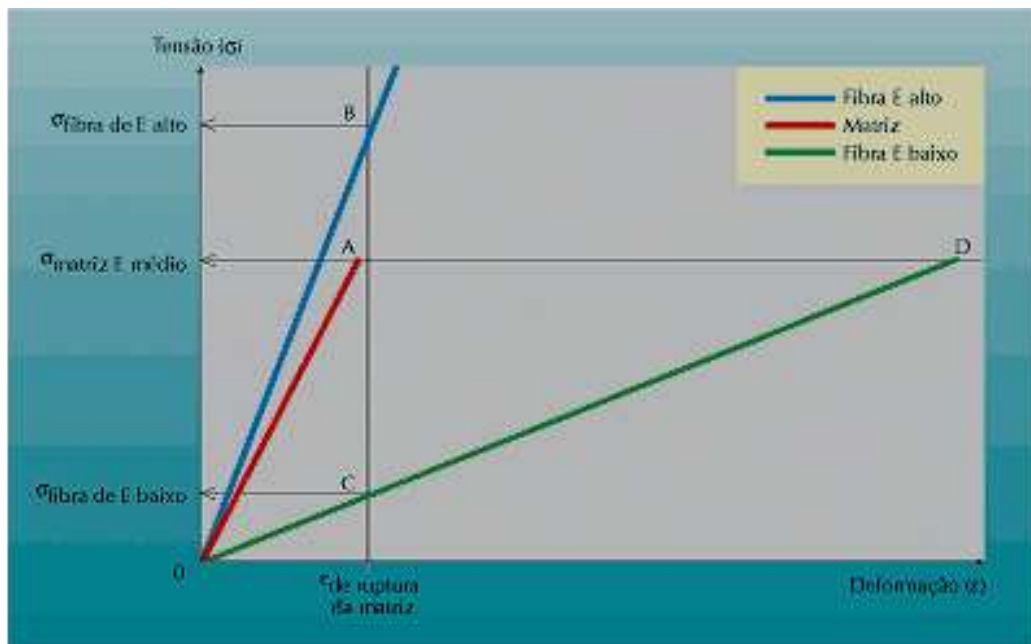


Figura 2.17 - Diagrama de tensão/deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto: revista Técnica, 2013.

Muito deve ser estudado ainda no sentido da obtenção de uma metodologia de dosagem e controle das fibras no concreto para que seja possível um controle satisfatório da fissuração. Mindess (1995) chega a apontar a utilização de fibras no concreto como de grande interesse tecnológico mesmo em estruturas convencionais de concreto armado, onde, em conjunto com o concreto de elevado desempenho aumenta a competitividade do material, quando comparado com outras tecnologias como a das estruturas de aço por exemplo.

O material do qual a fibra foi produzida é que irá definir o módulo de elasticidade e a resistência mecânica da mesma, sendo que estas são as duas propriedades que mais influenciam a capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto (FIGUEIREDO, 2012).

Na Tabela 2.5 é apresentado valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes (BENTUR e MINDESS, 1990).

Tabela 2.5 - Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes (BENTUR e MINDESS, 1990).

Material	Diâmetro (μm)	Densidade (g/cm^3)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,60	70-80	2-4	0,5-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,60	160-200	3-3,5	2-3
Polipropileno	20-200	0,90	5-7,7	0,5-0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Nylon	-	1,1	4,0	0,9	13-15
Celulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3,0
Polietileno	-	0,95	0,3	$0,7 \times 10^{-3}$	10
Fibra de madeira	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	10-50	1-50	-	0,8	3,0
Matriz de cimento para comparação		2,50	10-45	$3,7 \times 10^{-3}$	0,02

A escolha da fibra a ser empregada em uma mistura varia de acordo com as características pretendidas, visto que os diversos tipos de fibras sintéticas disponíveis no mercado possuem propriedades mecânicas muito divergentes como se pode observar na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Propriedades Mecânicas Típicas de Fibras Sintéticas: ACI (2002)

Tipo de fibra	Diâmetro equivalente (mm x 10 ⁻³)	Peso específico (g/cm ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Alongamento final (%)	Temperatura de ignição (°C)	Temperatura de derretimento, oxidação e decomposição (°C)	Absorção de água pela ASTM D 570(% do peso)
Acrílico	12,7-104,14	1,16-1,18	268,90-999,77	13790-19306	7,5-50,0	-	221,11-235	1,0-2,5
Aramida I	11,94	1,44	2930,37	62055	4,4	alta	482,22	4,3
Aramida II (Módulo elevado)	10,16	1,44	2344,30	117215	2,5	alta	482,22	1,2
Carbono, PAN HM (Poliacrilonitrilo com base, Módulo elevado)	7,62	1,6-1,7	2482,20-3033,80	379914,5	0,5-0,7	alta	400	Zero
Carbono, PAN HT (Poliacrilonitrilo, elevada resistência à tração)	8,89	1,6-1,7	3447,50-3999,10	230293	1,0-1,5	alta	400	Zero
Carbono, pitch GP (base isotrópica)	9,91-12,95	1,6-1,7	482,65-792,93	27580-34475	2,0-2,4	alta	400	3,7
Carbono, pitch HP (alta performance)	8,89-17,78	1,8-2,15	1516,90-3102,75	151690-482650	0,5-1,1	alta	500	Zero
Nylon	22,86	1,14	965,30	5171,25	20	-	200-221,11	2,8-5,0
Poliéster	19,81	1,34-1,39	227,54-1103,20	17237,5	12-150	593,33	207,22	0,4
Polietileno	25,4-1016	0,92-0,96	75,85-586,08	4998,88	380	-	133,89	Zero
Polipropileno	-	0,90-0,91	137,90-689,50	3447,50-4826,50	15	593,33	165,56	zero

2.3.2 O compósito e a interação fibra-matriz

A matriz é formada pela zona de transição entre agregado e a pasta de cimento propriamente dita. É constituída por diferentes tipos de compostos hidratados do cimento, sendo os de maior relevância os silicatos hidratados, o carbonato de cálcio e a etringita.

A zona de transição apresenta características diferentes do restante da pasta, sendo caracterizada pela sua maior porosidade e heterogeneidade. Esta porosidade é decorrente da elevação da relação água/cimento em decorrência do filme de água que se forma em torno do agregado gráudo. Verifica-se também uma falha na aderência entre pasta e agregado, que é relacionada pela formação de grandes cristais que apresentam superfície específica menor, fato este que diminui a força de adesão ou Forças de Van der Waals, (BUTTLER, 2003).

Todas essas características contribuem para que a zona de transição seja considerada o elo fraco do conjunto, estando sujeita a micro-fissuração devida a pequenos acréscimos de carga, variações de volume e umidade.

Segundo Silva (2000), os principais tipos de ligações presentes numa pasta de cimento-agregado são elencados a seguir:

- ligação mecânica: por rugosidade superficial do agregado em que os cristais dos componentes hidratados do cimento envolvem as protuberâncias e as asperezas da superfície dos materiais aglomerados;
- aderência devido à absorção pelo agregado, da água contendo parte do aglomerante dissolvido: o qual após penetrar na superfície da partícula, cristaliza-se no mesmo tempo que a pasta, ligando-se a ela;
- atração: entre a pasta de cimento e a superfície do agregado por força de Van der Waals, sendo uma força puramente da física;
- continuidade da estrutura cristalina do inerte nos produtos da hidratação do cimento: espécie de ligação na qual os cristais dos componentes do cimento hidratado prolongam os do agregado, tendo em comum entre si as suas redes cristalinas;

- aderência química: entre os produtos de reação da hidratação do cimento e as superfícies do agregado.

No caso de concretos com agregados reciclados, a zona de transição pode representar o elo fraco do conjunto, desde que sua resistência seja menor que a resistência da argamassa aderida ao agregado reciclado.

Outra questão importante a ser considerada, é a reduzida capacidade de resistência à tração do concreto que é associada à sua dificuldade de interromper a propagação das fissuras quando a estrutura de concreto é submetida a este tipo de esforço. Isso ocorre quando a direção de propagação das fissuras é transversal à direção principal de tensão, a área disponível para suporte de carga é reduzida, causando aumento das tensões presentes nas extremidades das fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

As fibras de polipropileno, quando adicionadas ao concreto, dificultam a propagação destas fissuras devido ao seu elevado módulo de elasticidade. Pela capacidade portante pós fissuração que o compósito apresenta, as fibras permitem uma redistribuição de esforços no material mesmo quando utilizada em baixos teores. Este conceito é de caráter relevante para o cálculo de estruturas contínuas como os pavimentos e os revestimentos de túneis (FIGUEIREDO, 1997).

Para melhor entender este comportamento deve-se lembrar de que o concreto, como um material frágil, apresenta-se sempre susceptível às concentrações de tensões quando do surgimento e propagação de uma fissura a partir do aumento da tensão a ele imposta, conforme é apresentado na Figura 2.18.

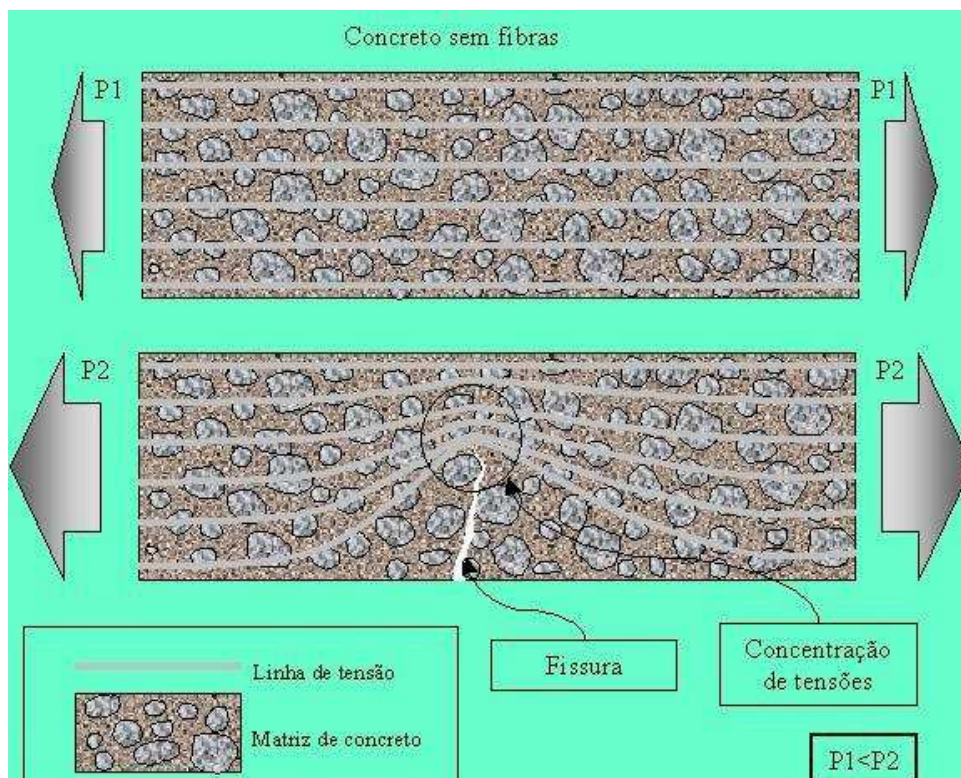


Figura 2.18 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem reforço de fibras: Figueiredo, 2011

No caso do concreto simples, apresentado na Figura 2.18, uma fissura irá representar uma barreira à propagação de tensões, representada simplificada pelas linhas de tensão. Segundo (Figueiredo, 2011), este “desvio” irá implicar numa concentração de tensões na extremidade da fissura e, no caso desta tensão superar a resistência da matriz, ocorre a ruptura abrupta do material.

Caso o esforço seja cíclico, pode-se interpretar a ruptura por fadiga da mesma forma, ou seja, para cada ciclo há uma pequena propagação das microfissuras e, conseqüentemente, um aumento progressivo na concentração de tensões em sua extremidade até o momento da ruptura do material.

Assim, a partir do momento em que se abre a fissura no concreto ele rompe abruptamente, caracterizando um comportamento tipicamente frágil. Ou seja, não se pode contar com nenhuma capacidade resistente do concreto fissurado.

Quando se adicionam fibras ao concreto, este deixa de ter o caráter marcadamente frágil. Isto ocorre pelo fato da fibra servir como ponte de transferência

de tensões pelas fissuras, minimizando a concentração de tensões nas extremidades das mesmas, conforme o ilustrado na Figura 2.19.

Com isto tem-se uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no concreto que passa a ter um comportamento pseudo-dúctil, ou seja, apresenta certa capacidade portante pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

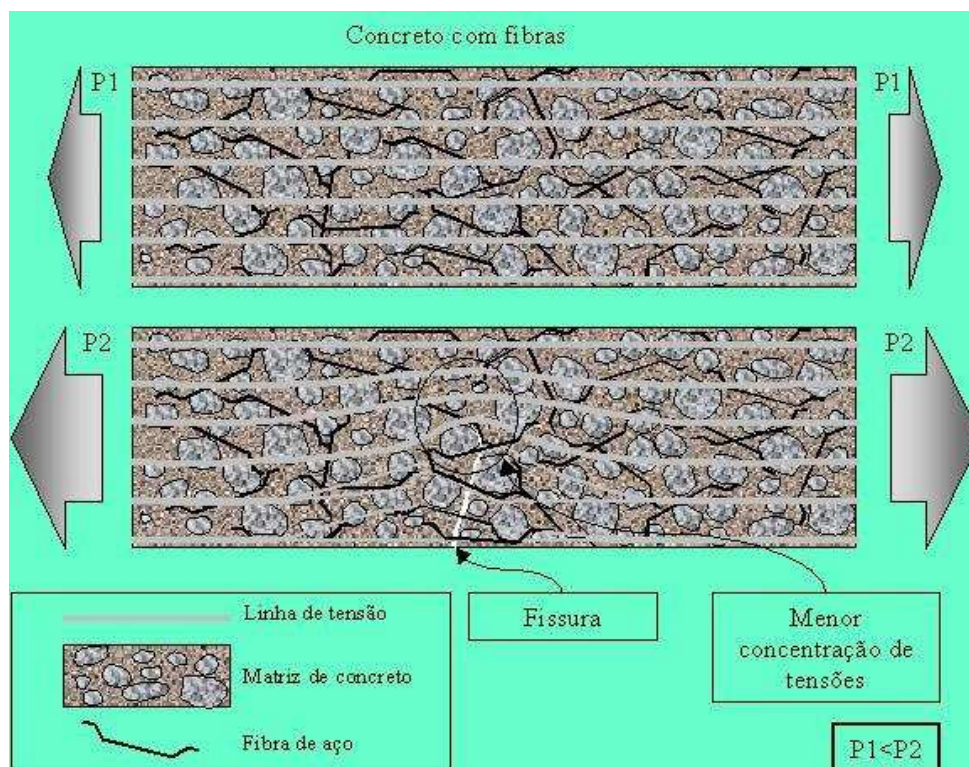


Figura 2.19: Esquema de concentração de tensões para um concreto com o reforço de fibras: FIGUEIREDO (2011).

Com a utilização de fibras será assegurada uma menor fissuração do concreto (Li, 1992). Este fato pode vir a recomendar sua utilização mesmo para concretos convencionalmente armados (Mindess, 1995). Deve-se ressaltar que o nível de tensão que a fibra consegue transferir pelas fissuras depende de uma série de aspectos como o seu comprimento e o teor de fibras.

2.4 ESTUDOS COM FIBRAS

Os primeiros estudos sobre a fibra de vidro como reforço de massas cimentícias data da década de 1950, na antiga URSS. Estas eram constituídas por borossilicato (*E-glass*) ou soda-cal-silica (*A-glass*). Pouco tempo depois, foi identificado que tais fibras eram facilmente destruídas devido à alta alcalinidade da matriz à base de cimento (pH 12,5) (ACI, 2002).

A pesquisa continuada, no entanto, possibilitou o desenvolvimento de uma fibra de vidro álcali-resistente (*AR-glassfiber*), através da adição de zircônia em sua composição. No entanto, durante muito tempo o conhecimento necessário à fabricação dessa nova fibra foi protegido, o que não impossibilitou sua ampla aplicação na indústria da construção, especialmente nas duas últimas décadas.

Maidl, (1991) fez uma análise profunda dos fatores que influenciam a eficiência das fibras. Observou-se que quanto mais direcionadas as fibras estiverem em relação ao sentido da tensão principal de tração, melhor será o desempenho do compósito.

Como consequência prática desta pesquisa, recomenda-se a utilização de fibras cujo comprimento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto (em outras palavras, deve haver uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras de modo que estas interceptem com maior frequência a fissura que ocorre no compósito).

Esta compatibilidade dimensional possibilita a atuação da fibra como reforço do concreto e não como mero reforço da argamassa do concreto. Isto é importante pelo fato da fratura se propagar preferencialmente na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta para concretos de baixa e moderada resistência mecânica.

Esta interação fica mais bem demonstrada nas Figuras 2.20 e 2.21.

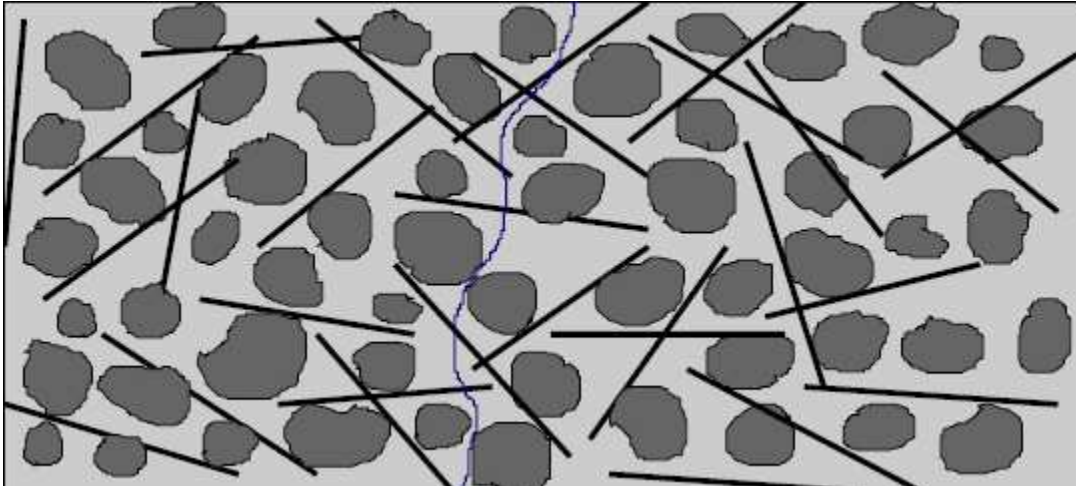


Figura 2.20: Concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo: FIGUEIREDO (2000)

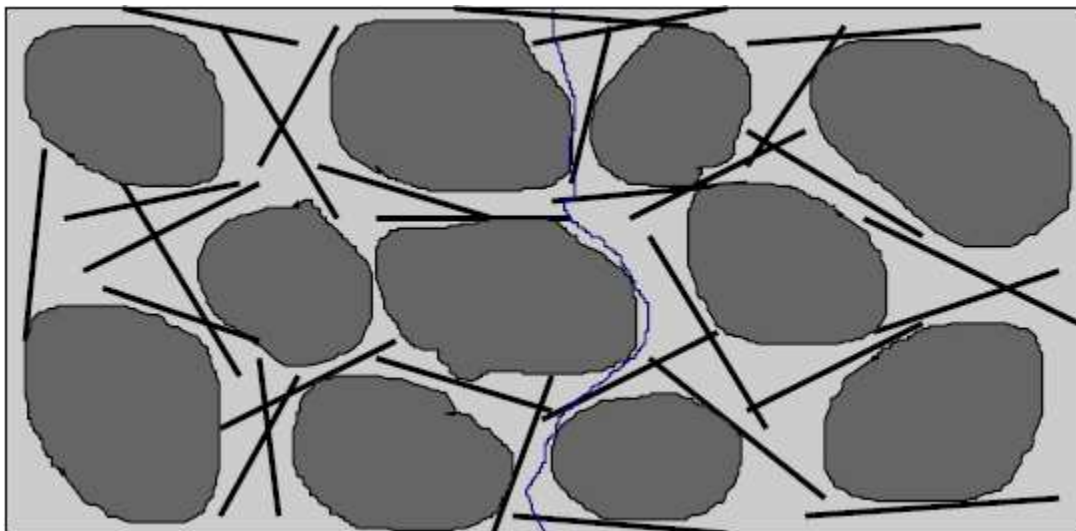


Figura 2.21: Concreto reforçado com fibras onde não há compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo: FIGUEIREDO (2000).

Fibras de nylon, com densidade específica de $1,14 \text{ kg/dm}^3$ foram utilizadas por Nascimento *et al.* (1997) *apud* Freire (2003) como reforços de argamassa de cimento conferindo a esse material redução na retração por secagem.

As fibras plásticas, em especial as de polipropileno, são resistentes aos ácidos, álcalis, água do mar e produtos químicos, além de possuírem grande resistência à quebra e à abrasão e serem menos susceptíveis ao desgaste e ao rasgo (FREIRE, 2003).

Dafico *et al* (1997) *apud* Freire (2003) avaliaram o uso de quatro teores de fibra de polipropileno em argamassas de assentamento de blocos cerâmicos com furos na vertical. Concluíram que o teor de 0,5% garantiu maior trabalhabilidade à argamassa fresca e pequena redução na compressão diametral dos corpos-de-prova.

Na pesquisa de Kitamura (2006) mostraram-se os benefícios da adição de fibras de aço em misturas de concreto. Ficou constatado que a fragilidade do concreto foi consideravelmente reduzida pela adição de fibras de aço na massa cimentícia. A ocorrência deste fato deu-se devido ao impedimento da propagação das fissuras ocasionado pelas fibras de aço, uma vez que as fissuras são inerentes à baixa capacidade de tração e ductilidade deste compósito. O teor de fibras de aço utilizados no concreto foi de 0,7%, em volume, pode ser considerado como o de melhor custo-benefício para o aumento da resistência à tração por compressão diametral do corpo-de-prova.

Araújo (2007) fez uma análise da resistência mecânica do compósito fibra vegetal + raspa de borracha + cimento, para viabilização de um sistema construtivo em pré-moldados, fazendo parte deste sistema as placas de vedação, vigas e pilares. A verificação da influência da utilização das fibras de bambu e raspas de borracha como agregados foi feita por meio do ensaio de resistência à tração na flexão utilizando-se protótipos de viga e de pilar.

Concluiu-se que a utilização do bambu como agregado é viável em zonas rurais e urbanas carentes, atendendo a aspectos ecológicos.

Hii e Al-Mahaidl (2007) compararam os resultados experimentais de vigas de concreto armado solicitadas à torção reforçadas com compósitos de fibras de carbono. Verificou-se que a contribuição da fibra na resistência à torção foram 52% em média maiores do que as convencionais.

Dave e Desai (2008) compararam por meio de experimentos as propriedades mecânicas de dois traços de concreto diferentes reforçados com fibras de polipropileno, poliéster e de vidro. Apesar de identificada a redução da trabalhabilidade em todos os casos, correlacionada ao aumento da dosagem de fibras, a resistência à compressão aumentou continuamente também em todas as amostras, embora de forma pouco significativa.

O uso de fibras naturais teve, como maior incentivo, a diminuição de custos de materiais fibrosos e o fato de evitarem o uso do amianto. Porém, em alguns casos, apresentam elevada absorção de água ocasionando, após a cura do cimento, a retração do concreto e a consequente perda de aderência entre o mesmo e a matriz (BARBOSA, 2008).

Hadi (2011) fez uma investigação sobre o comportamento das lajes de concreto reforçado com dois tipos diferentes de fibras: as de fibras de aço e de polipropileno na razão de 0,5% e 1% respectivamente. Os resultados deste programa experimental demonstraram que a adição de 1% por volume de fibra de aço obteve melhor performance quanto à flexibilidade das lajes, sendo que a flecha aumentou significativamente quando as fibras de aço e polipropileno foram adicionadas ao concreto. Além do mais, as lajes que receberam a fibra de aço tiveram uma flecha maior do que as que receberam fibras de polipropileno. O colapso final nas lajes sem adição de fibras ocorreu antes das lajes com fibras.

Barbosa *et al* (2012) estudou a reutilização das fibras metálicas de pneus inservíveis, adicionando-as à massa cimentícia com a finalidade de avaliar as propriedades do concreto endurecido, onde pode concluir que:

- As fibras de pneus, tanto as finas como as grossas mostraram ser passíveis de aplicação em concretos, melhorando sua capacidade de resistência à tração na flexão de no mínimo 17,5%;
- não ocorreu redução significativa dos concretos em absorver esforços de compressão;
- estas fibras apresentaram uma dificuldade de aplicação devido à aglutinação, requerendo cuidados durante a mistura. Esta aglutinação é reduzida à medida que o diâmetro é aumentado (fibra grossa).

Aliado a esses estudos, tem-se também uma grande variedade de fibras sintéticas que vem sendo desenvolvidas nas indústrias petroquímicas e têxteis para uso na construção civil. Isso se justifica pela grande diversidade de materiais e compostos disponíveis, além das diferentes aplicações que o mercado consumidor exige.

A maior aplicação na construção civil, atualmente, ocorre na confecção de lajes planas, embora na proporção de apenas 0,1% do volume total. Quando utilizada em porcentuais mais elevados, entre 0,4% e 0,7%, oferecem melhorias significativas quanto à tenacidade, distribuição das rachaduras e largura das fendas (MAIA, 2012).

Maia (2012) pesquisou a viabilidade técnica, comercial e econômica de uma mistura destinada à fabricação de dormentes de concreto armado, empregando uma mistura constituída por cimento Portland, agregado miúdo (proveniente do rejeito do beneficiamento do mármore), agregado graúdo (proveniente do britamento de rocha gnáissica), fibra de vidro (rejeitos de fibra ótica) e água. A mistura de concreto apresentou-se como uma tecnologia inovadora, cujos fatores ambientais e sociais que integram o conceito de desenvolvimento sustentável foram suficientemente explorados e atendidos.

capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Procura-se avaliar neste estudo as propriedades tecnológicas dos concretos obtidos com agregado graúdo proveniente do beneficiamento do resíduo de construção e demolição, agregado miúdo resultante do beneficiamento de mármore triturado e fibra polipropileno, além de fazer uma análise comparativa entre os concretos obtidos nesta pesquisa que são:

- concreto de referência de 25 MPa com 100% de pedra de gnaissse como agregado graúdo e 100% de areia natural de rio como agregado miúdo.
- concreto referência e adição de fibra de polipropileno;
- concreto com 100% de RCD como agregado graúdo e 100% de areia natural de rio como agregado miúdo;
- concreto com 100% de RCD como agregado graúdo e 100% de areia natural de rio como agregado miúdo e fibra polipropileno;
- concreto com 100% de pedra de gnaissse como agregado graúdo e 100% de areia artificial de mármore como agregado miúdo;
- concreto com 100 % RCD como agregado graúdo , 100% de areia artificial de mármore como agregado miúdo;
- concreto com 100% de pedra de gnaissse como agregado graúdo, 100% de areia artificial de mármore como agregado miúdo e fibra polipropileno;
- concreto com 100 % RCD como agregado graúdo , 100% de areia artificial de mármore como agregado miúdo e fibra polipropileno.

A viabilidade de utilização do resíduo será verificada por meio das características físicas, químicas e ambientais do material, propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, retração hidráulica, módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson), e de durabilidade do concreto (porosidade, absorção de água por sucção capilar e absorção por imersão).

Os resultados obtidos na análise dos ensaios citados serão comparados a fim de se verificar as vantagens e ou desvantagens do emprego deste novo material e a possibilidade ou não do uso dos agregados em questão.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland

No programa experimental foi utilizado Cimento Portland CII - E - 32 (com escória de alto-forno), produzido pela Holcim do Brasil S.A., da marca Barroso.

As análises químicas, físicas e propriedades mecânicas do cimento utilizadas estão conforme a normalização brasileira, ABNT NBR 11578:1997.

A fim de caracterizar o produto empregado são apresentados a seguir os resultados da análise física e química fornecidos pelo fabricante, (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Composição química, resistência e índices físicos do cimento CII E 32.

Compostos	Teor (%)	Ensaio Físicos	NBR 11578	Resistência à compressão	NBR 11578		
SiO ₂	24,28	Início de pega (min.)	204	≥60	Idade (dias)	fc (MPa)	
Al ₂ O ₃	7,30	Fim de pega (min.)	266	≤600	1	7,8	-
Fe ₂ O ₃	2,23	Finura #325 (%)	14,8	≥12,0	3	20,4	≥10,0
CaO	57,15	A/C (%)	26,2	-	7	28,1	≥20,0
MgO	3,26	Superfície específica (cm ² /g)	4028	≥2600	28	37,7	≥32,0
K ₂ O	0,59	Expansão a quente (mm)	0,0	≤5,0			
C ₃ A	4,90	RI (%)	1,68	≤2,5			
CO ₂	4,75	PF (1000°C)	4,76	≤6,5			
SO ₃	1,84						
Sulfeto	0,23						

3.1.2 Agregados

3.1.2.1 Agregado miúdo natural (AMN)

Foi utilizada areia natural quartzosa, proveniente do leito do rio do Peixe, da região de Juiz de Fora /MG.

O AMN foi caracterizado segundo a ABNT NBR 7211:2009, como ilustrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Caracterização física do AMN.

Composição granulométrica (ABNT NBR NM 248:2003)	
PENEIRA – Abertura (mm)	Total Retido (%)
4,75	2,00
2,36	19,00
1,2	47,00
0,6	67,00
0,3	87,00
0,15	99,00
<0,15	100,00
Massa específica (NBR NM 52)	2,62 kg/dm ³
Massa específica aparente (NBR NM 52)	1,50 kg/dm ³
Módulo de finura (NBR 7211)	3,21
Teor de argila (NBR 7218)	Isento
Teor de material pulverulento (NBR NM 46)	0,78%
Impureza orgânica (NBR NM 49)	<300 p.p.m.
Dimensão máxima característica (NBR 7211)	4,75 mm
Absorção de água (NBR NM 30)	1,95%

3.1.2.2 Resíduo de construção e demolição - RCD

O RCD utilizado nesta pesquisa foi coletado da Usina de Reciclagem de Entulho de Construção Civil, localizada na cidade de Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais. Esta empresa tem como objetivo transformar os resíduos da construção civil em agregados reciclados, desde que estes resíduos apresentem no máximo 10% de outros materiais (papel, plástico, metal, etc) e ausência de terra, matéria orgânica, gesso e amianto.

Na reciclagem do RCD foram utilizadas operações para conformação do material, tais como (CHAVES *et al.*/2006):

- separar e fragmentar preliminarmente as peças do concreto armado de grandes dimensões, antes da alimentação no britador;
- eliminar fragmentos grandes de materiais indesejáveis (madeira, aço, papel) ou contaminantes (gesso, cimento, amianto) por triagem;
- cominuir o fragmento de RCD como agregado;
- remover a fração poliéster ferrosa e pequenos fragmentos de materiais indesejáveis leves (papel, madeira) remanescentes dos agregados de RCD, melhorando a sua pureza;
- remover as partículas porosas de cerâmica vermelha quando se deseja produzir agregado de RCD de alta qualidade.

A análise dos constituintes do resíduo foi realizada com o intuito de verificar o percentual dos materiais componentes do RCD, a qual pode ser observada na Figura 3.1.

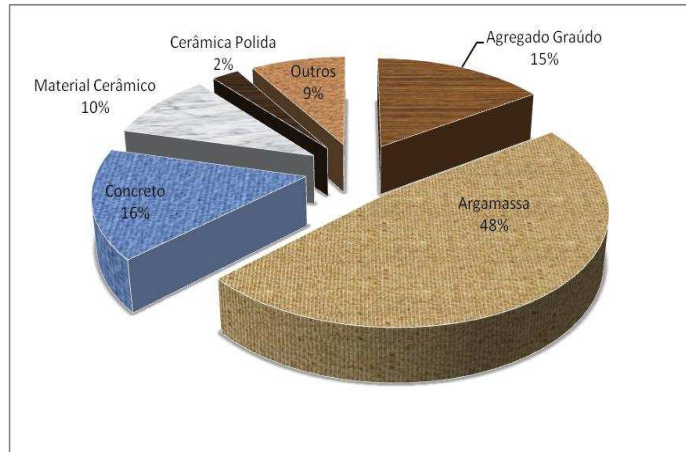


Figura 3.1 – Constituição percentual do RCD em massa.

Para a produção de RCD, a empresa de beneficiamento de entulho de Belo Horizonte possui uma estação do tipo fixa conforme ilustra a Figura 3.2.

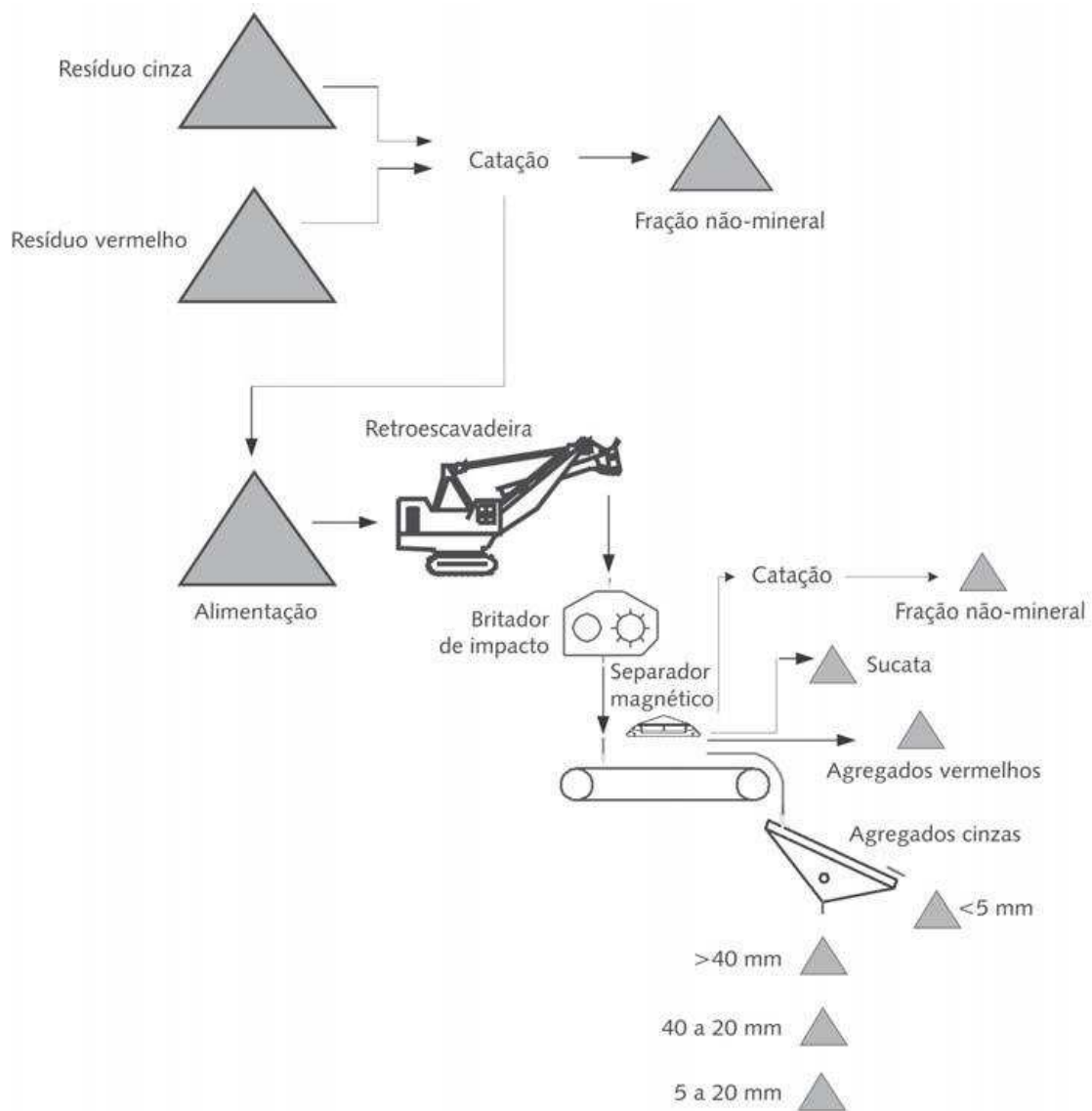


Figura 3.2 – Fluxograma da usina de reciclagem da fração mineral do RCD

Fonte: Ângulo *et al.*, (2009)

Para a caracterização do RCD foram avaliadas suas propriedades físicas conforme Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Caracterização física do RCD.

Composição granulométrica (ABNT NBR NM 248:2003)	
PENEIRA – Abertura (mm)	Total Retido (%)
6,30	0
4,75	80
2,36	97
1,18	97
0,60	98
0,30	99
0,15	99
<0,15	100
Massa específica (NBR NM 52)	2,33 kg/dm ³
Massa específica aparente (NBR NM 52)	1,03 kg/dm ³
Módulo de finura (NBR 7211)	5,64
Teor de argila (NBR 7218)	Isento
Teor de material pulverulento (NBR NM46)	5,46
Impureza orgânica (NBR NM 49)	<300 p.p.m.
Dimensão máxima característica (NBR 7211)	6,30 mm

3.1.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado para a confecção dos corpos-de-prova de concreto de cimento Portland foi a brita gnáissica, oriunda da pedreira Pedra Sul, localizada na cidade de Matias Barbosa, Minas Gerais.

A caracterização da brita de gnaiss utilizada nesta pesquisa foi classificada segundo a normalização brasileira (ABNT NBR 7211:2009). Os resultados dessa última análise são mostrados nas Tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4 – Caracterização do agregado graúdo – zona granulométrica 9,5/25

Composição granulométrica (ABNT NBR NM 248:2003)	
PENEIRA – Abertura (mm)	Total Retido (%)
25,00	2
19,00	12
12,50	70
9,50	95
6,30	99
4,75	99
2,36	99
1,18	99
0,60	99
0,30	99
0,15	99
Fundo	100
Diâmetro máximo	25,00mm
Módulo de finura	7,01
Massa específica real (NBR 9776)	2,72 kg/dm ³
Massa específica aparente (NBR NM 53)	1,48 kg/dm ³
Teor de material pulverulento (NBR 7219)	0,59%

3.1.2.4 Agregado miúdo de rejeito de mármore triturado (RMT)

Para os concretos com substituição total de agregados miúdo, foi utilizada areia artificial proveniente do beneficiamento de mármore, com diâmetro Max = 4,75 mm e MF = 2,75.

O RMT foi coletado em uma empresa localizada na cidade de Mar de Espanha, Estado de Minas Gerais, que utiliza apenas mármore em seu processo de beneficiamento. Nesta empresa, os cacos de mármore, após a lavagem e secagem, foram para o processo de moagem, em moinhos de bolas, ressaltando-se que os mesmos passaram previamente pelo britador de mandíbulas. Só então foram separados por peneiramento e ensacados por fração granulométrica.

Para a caracterização do RMT foram avaliadas suas propriedades químicas e físicas.

As propriedades químicas são mostradas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Características do mármore

Principais Elementos	Teor (%)
Ca	18,1
Mg	12,9
CaO	25,4
MgO	7,8
Classificação: Magnesiano	

Fonte: COURA (2009)

As características físicas do RMT, na composição granulométrica similar ao AMN, foram determinadas de acordo com as normas da ABNT e são mostradas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Caracterização física do RMT na composição granulométrica.

Composição granulométrica (ABNT NBR NM 248: 2003)	
PENEIRA – Abertura (mm)	Total retido Retido (%)
4,75	4
2,36	9
1,18	25
0,60	52
0,30	87
0,15	98
<0,15	100
Diâmetro máximo	4,75mm
Módulo de finura	2,75
Massa específica real (NBR 9776)	2,91 kg/dm ³
Massa específica aparente (NBR NM 52)	1,74 kg/dm ³
Teor de argila (NBR 7218)	Isento
Teor de material pulverulento (NBR 7219)	5,0%
Impureza orgânica (NBR NM 49)	<300p.p.m.
Absorção de água (NM 30)	1,27%
Abrasão “Los Angeles” (NM 51)	63,10%

3.1.3 Água

A água utilizada na confecção e imersão dos corpos-de-prova de concreto provém da empresa CESAMA, responsável pelo abastecimento de água da cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais.

3.1.4 Fibras de polipropileno

Foram utilizadas fibras de polipropileno homopolímero aditivadas do tipo Fibras Sintéticas Estruturais Nervuradas da marca MACROFORTE, as quais

fazem parte de uma geração de fibras de alta performance para reforço de concreto e são capazes de substituir armaduras convencionais e fibras de aço com desempenho equivalente. Podem ser utilizadas em obras marítimas, subterrâneas ou de superfície.

Os macro-monofilamentos de polipropileno aditivados dão origem às fibras que são cortadas a partir da extrusão desses filamentos. As nervuras em relevo se estendem ao longo de todo comprimento do mesmo, e foram desenhadas para dar ancoragem ao concreto.

Estas fibras possuem o formato de fio cilíndrico e nervurado, com comprimento nominal de 50 mm, diâmetro $d_e = 0,675$ mm e fator de forma $\lambda_n = l_f / d_f = 71$. São encontradas na cor cinza, possuindo resistência à tração do fio de 500 MPa e módulo de Elasticidade $\geq 6,5$ MPa. Estas fibras recebem tratamento em sua superfície e, portanto são bem fáceis de dispersar dentro do concreto, e argamassas.

Estas fibras sintéticas nervuradas são compatíveis, com aditivos redutores de água, endurecedores de superfície, líquidos de cura e salgamentos em geral.

Outras características são elencadas:

- Absorção: nula
- Densidade específica: 0,90 - 0,92
- Condutividade elétrica: baixa
- Condutividade térmica: baixa
- Resistência a ácidos e sais: alta
- Ponto de derretimento: 165°C
- Ponto de ignição: > 550°C
- Álcali resistente: 100%g/m

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o intuito de obter concretos sustentáveis, propõe-se incrementar os estudos de Kitamura (2011) e Coura (2009), desenvolvendo um compósito utilizando o resíduo de mármore (RMT) em substituição total ao agregado miúdo natural (AMN) e o resíduo de construção e demolição (RCD) em substituição total ao agregado graúdo de gnaiss (AGN) com aplicação do mesmo percentual de fibras, resultando assim um concreto ecológico e sustentável.

Os materiais e métodos utilizados para o estudo da viabilidade da substituição parcial ou integral do agregado miúdo natural por agregados miúdos obtidos da trituração de rejeitos de mármore em concreto de cimento Portland, foram apresentados por Coura, (2009) concluindo que é tecnicamente viável a substituição do AMN pelos agregados miúdos obtidos pelo beneficiamento do rejeito de mármore, pois os mesmos apresentaram características que possibilitam obter misturas de concreto com propriedades adequadas ao uso corrente em estruturas de concreto.

Comparando-se os resultados obtidos com as misturas propostas por Kitamura (2011) e Coura (2009) com as propriedades tecnológicas dos concretos obtidos com as substituições descritas juntamente com a interação da massa cimentícia e fibra polipropileno, é apresentado a seguir o programa experimental a ser desenvolvido.

Para a realização dos ensaios, utilizou-se uma mistura de referência composta de areia natural de rio como agregado miúdo (AMN) e pedra de gnaiss como agregado graúdo (AGN). A resistência característica à compressão axial simples aos 28 dias foi projetada para 25 MPa.

Foram formuladas outras sete novas misturas. A primeira delas foi confeccionada com areia de rio, brita de gnaiss e 0,7% de fibra polipropileno (C2). Na segunda mistura, o AGN foi substituído por agregado de RCD (adicionados em massa e zona granulométrica na faixa de 4,75/12,5), e agregado miúdo natural (C3). A terceira mistura foi realizada com os mesmos materiais da segunda mistura, adicionando-se a fibra de polipropileno (C4). A

quarta mistura foi elaborada com agregado graúdo natural e RMT, proveniente do beneficiamento do rejeito de mármore (C5). A quinta mistura foi executada com agregado graúdo de RCD e RMT (C6). A sexta mistura possui os mesmos componentes da quarta mistura, mas com adição de 0,7% de fibra polipropileno (C7). A sétima mistura foi elaborada conforme a quinta mistura, adicionando-se a fibra de polipropileno (C8).

A metodologia empregada na realização deste estudo foi experimental e comparativa. Para tanto, foram realizados ensaios de caracterização dos agregados e dosagem, sendo analisadas as propriedades do concreto fresco e endurecido.

O traço adotado neste estudo foi determinado pelo método de dosagem desenvolvido pelo IPT e descrito por Helene e Terzian (1993), fixando-se um teor de argamassa seca igual a 50% e um abatimento de tronco de cone de aproximadamente 80 ± 10 mm.

O traço, em massa, utilizado foi: 1:1,73:2,73:0,50, sendo cimento : agregado miúdo : agregado graúdo : água.

Na Tabela 3.7 ficam explicitados os traços adotados em relação ao cimento.

Tabela 3.7 – traços dos concretos confeccionados

MISTURA	TEOR DE ADIÇÃO (%)	TRAÇO (kg) CP II – 32– E
1 ^a	Referência (AGN+AMN)	1: 1,73: 2,73: 0,50
2 ^a	Referência + fibra polipropileno	1:1,73:2,73:0,007:0,50
3 ^a	100% RCD + 100% AMN	1: 1,73: 2,73: 0,50
4 ^a	100% RCD+100%AMN+fibra polipropileno	1:1,73:2,73:0,007:0,50
5 ^a	100% AGN + 100% RMT	1:1,73:2,73:0,50
6 ^a	100% RCD + 100% RMT	1:1,73:2,73:0,50
7 ^a	100% AGN+100%RMT+fibra polipropileno	1:1,73:2,73:0,007:0,50
8 ^a	100%RCD+100% RMT+fibra polipropileno	1:1,73:2,73:0,007:0,50

3.2.1 Verificação das propriedades dos concretos

Cumpra esclarecer que as misturas foram testadas nas idades indicadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Detalhamento dos ensaios realizados.

CONCRETO					
	Ensaio	Idade	Dimensões do CP	Número de corpos-de-prova	
				Cimento CP II E	
				Por Idade	Total
Misturas de concreto	Resistência à compressão axial (NBR5739)	7	10x20cm	6	48
		14		6	48
		28		6	48
		63		6	48
	Resistência à tração por compressão diametral (NBR7222)	7	10x20cm	6	48
		14		6	48
		28		6	48
		63		6	48
	Resistência à tração na flexão (NBR12142)	28	15x15x50cm	4	32
	Módulo de elasticidade (NBR 8522)	28	15x30cm	3	24
	Coefficiente de Poisson (NBR8522)	28	15x30cm	3	24
	Densidade de massa no estado endurecido	120	10x20cm	8	64

3.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

3.3.1 Consistência

A consistência do concreto é composta de pelo menos dois componentes principais: a fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade, e a coesão, que representa a resistência à exsudação ou à segregação.

Os agregados reciclados são, em geral, mais irregulares, angulares e de textura mais áspera e rugosa que os agregados naturais (Ângulo, 2000; Carneiro *et al.*, 2001; Leite, 2001) e estas características também sofrem variabilidade, pois dependem da composição do resíduo e do equipamento de cominuição usado (LEITE, 2001).

O agregado reciclado também pode se apresentar mais lamelar que o agregado natural. Partículas finas e achatadas podem reduzir a resistência do concreto quando o agregado tem uma carga aplicada no seu lado achatado (Tam; Tam, 2007). Grãos mais angulares e mais lamelares tendem a prejudicar a consistência do concreto, exigindo então, mais água ou teor de pasta para que os concretos reciclados alcancem consistência adequada (LEITE, 2001; LIMA, 1999; TAM; TAM, 2007).

A textura mais rugosa dos agregados reciclados também afeta a consistência do concreto. Porém, também permite uma melhor aderência com a pasta de cimento, o que pode melhorar a resistência mecânica do compósito. Outra causa da maior aderência é o engrenamento proporcionado pela entrada de parte da pasta dentro dos poros capilares que se abrem a partir da superfície do agregado.

A consistência dos concretos desta pesquisa será avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme ABNT NBR NM 67:1998.

3.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO

3.4.1 Ensaio de resistência à compressão axial

A ABNT NBR 5739:2007 prescreve o método de ensaio para determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland.

O resultado da resistência à compressão é a média das resistências à compressão dos corpos-de-prova ensaiados na mesma idade.

Os resultados individuais, médias e coeficientes de variação estão apresentados no Capítulo 4.

A resistência à compressão axial foi obtida utilizando-se a expressão:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

onde:

f_c – resistência à compressão axial (MPa);

F – força máxima obtida no ensaio (N);

A – área da seção transversal do corpo-de-prova (mm²).

3.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Estes ensaios foram realizados conforme a ABNT NBR 7222:2011.

A moldagem e a cura de corpos-de-prova cilíndricos foram realizadas conforme a ABNT NBR 5738:2003.

O corpo-de-prova deve ser colocado, de modo que fique em repouso ao longo das duas geratrizes diametralmente opostas, sobre o prato da máquina de compressão. Entre os pratos e o corpo-de-prova colocam-se duas tiras de madeira, do mesmo comprimento da geratriz do CP e seção transversal, conforme Figura 3.19.

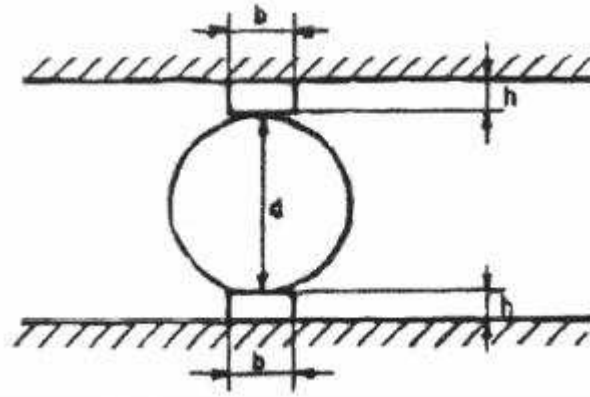


Figura 3.3 – Disposição do corpo-de-prova para ensaio de tração

(ABNT NBR 7222:1994): Oliveira, 2007

onde:

$$b = (0,15 \pm 0,01) d$$

$$h = (3,5 \pm 0,5) \text{ mm}$$

Para a idade de 28 dias foram ensaiados seis corpos-de-prova a tração por compressão diametral para cada mistura, o qual resultou num total de 48 corpos-de-prova.

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela seguinte expressão:

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi dL} \quad (3.3)$$

onde:

$f_{t,D}$ – resistência à tração por compressão diametral em MPa, com aproximação de 0,05 MPa;

F – força máxima obtida no ensaio (N);

d – diâmetro do corpo-de-prova (mm);

L – altura do corpo-de-prova (mm).

Segundo Süssekind (1985) e Ceccatto (2003), como as tensões de tração não são constantes em toda a seção transversal do cilindro, um coeficiente corretivo deve ser introduzido na expressão abaixo para compensar o fato de existência de compressão, próximo aos bordos carregados, na direção normal à do carregamento, sendo, portanto utilizado o coeficiente de 0,85. Mehta e Monteiro (1994) afirmam que o ensaio de tração por compressão diametral superestima a resistência à tração do concreto de 10% a 15%, o que justifica a adoção do coeficiente de minoração. Assim a expressão utilizada deve ser a seguinte:

$$f_{t,D} = 0,85 \frac{2F}{\pi dL} \quad (3.4)$$

onde:

$f_{t,D}$ – resistência à tração por compressão diametral em MPa, com aproximação de 0,05 MPa;

F – força máxima obtida no ensaio (N);

d – diâmetro do corpo-de-prova (mm);

L – altura do corpo-de-prova (mm).

3.4.3 Resistência à tração na flexão

O método para determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos (ABNT NBR 12142:2010) consiste em aplicar uma carga controlada sobre o corpo-de-prova a ser ensaiado e verificar a carga de ruptura.

Conforme a norma, a resistência a tração na flexão foi medida em corpos de prova prismáticos de concreto de dimensões de 10 cm x 10 cm x 50

cm (largura x altura x comprimento), onde foi aplicada uma carga concentrada a 1/3 de cada um dos elementos de apoio do CP conforme Figura 3.20.

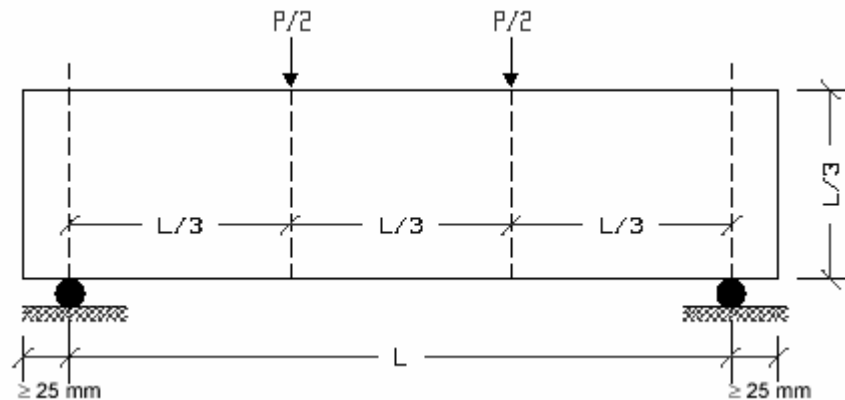


Figura 3.4 – Esquema do ensaio de resistência à tração na flexão: Oliveira, 2007.

Neste ensaio os corpos-de-provas foram mantidos em processo de cura úmida até a idade de 28 dias. Para cada mistura foram ensaiados 4 CP's, em um total de 32 CP's.

Para calcular a resistência à tração na flexão devem ser observadas as seguintes situações:

1º) Caso a ruptura ocorra no terço médio da distância entre os elementos de apoio, calcular a resistência à tração na flexão pela expressão:

$$f_{ctm} = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.5)$$

onde:

f_{ctm} – resistência à tração na flexão (MPa);

P – força aplicada (N);

L – distância entre cutelos de suporte (mm);

b – largura média do corpo-de-prova na seção de ruptura (mm);

d – altura média do corpo-de-prova na seção de ruptura (mm).

Salienta-se que nesta pesquisa a distância entre os cutelos de suporte foi de 150 mm.

2º) Caso a ruptura ocorra fora do terço médio, a uma distância deste não superior a 5% de l , a resistência à flexão deve ser calculada pela expressão:

$$f_{ctm} = \frac{3Fs}{bd^2} \quad (3.6)$$

onde:

a - distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo mediante a tomada de, pelo menos, três medidas ($a \geq 0,283 l$).

3º) Caso a ruptura ocorra além dos 5% citados anteriormente, ou seja, $a < 0,283 l$, o ensaio deve ser descartado.

3.4.4 Módulo de elasticidade

De acordo com a ABNT NBR 8522:2008 o módulo de elasticidade à compressão é a caracterização da deformabilidade do concreto endurecido, sendo que, os corpos-de-prova cilíndricos podem ser moldados ou extraídos da estrutura, sendo que o diâmetro deve ser maior que quatro vezes o tamanho máximo nominal do agregado graúdo, e atender a ABNT NBR 5738:2015.

Os números de corpos-de-prova empregados neste ensaio foram cinco, onde em dois foram efetuados ensaios de resistência à compressão a fim de obter um valor médio para a determinação dos níveis de carregamento a serem aplicados e os demais, instrumentados para o ensaio de módulo de elasticidade. Foi determinado o módulo de elasticidade, sob carregamento estático, à compressão axial simples, aplicando-se um carregamento crescente à velocidade de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s, até que fosse alcançada uma tensão (σ_b) de aproximadamente 30% da resistência à compressão do concreto (f_c).

Este nível de tensão foi mantido por 60 segundos. Em seguida, reduziu-se a carga, à mesma velocidade do processo de carregamento, até o nível da tensão básica (σ_a) que corresponde a 0,5 MPa. Foram realizados mais dois ciclos de carga e descarga, alternadamente, durante períodos de 60 segundos cada. Depois do último ciclo de pré-carga e após 60 segundos sob a tensão σ_a , registrou-se a deformação específica ε_a . Carregou-se novamente o corpo-de-prova com tensão σ_b , após uma espera de 60 segundos, foi registrada a deformação ε_b , o que pode ser observado na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Corpos de prova instrumentados para ensaio de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

O módulo de elasticidade, E_{ci} , é calculado pela seguinte expressão:

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad (3.7)$$

onde:

E_{ci} – módulo de elasticidade (GPa);

σ_b – tensão maior, 0,3 f_c (MPa);

σ_a – tensão básica, 0,5 MPa (MPa);

ε_b – deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão maior;

ε_a – deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão básica.

3.4.5 Coeficiente de Poisson

Os ensaios foram realizados em conformidade com a NBR 8522/2008.

O coeficiente de Poisson é dado pela seguinte expressão:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{tf} - \varepsilon_{ti}}{\varepsilon_{lf} - \varepsilon_{li}} \quad (3.8)$$

onde

μ – coeficiente de Poisson;

ε_{tf} – deformação transversal específica final, para 30% da tensão de ruptura;

ε_{ti} – deformação transversal específica inicial, com tensão a 0,5 MPa;

ε_{lf} – deformação longitudinal específica final, para 30% da tensão de ruptura;

ε_{li} – deformação longitudinal específica inicial, com tensão a 0,5 MPa;

3.4.6 Absorção de água por imersão

Esse ensaio avalia a porosidade do concreto em corpos-de-prova. De acordo com a ABNT NBR 9778:2009, a absorção é dada pela expressão:

$$A_i = \frac{m_a - m_b}{m_b} \times 100 \quad (3.9)$$

onde

A_i – absorção de água por imersão (%);

m_b – massa do corpo-de-prova seco em estufa (g);

m_a – massa do corpo-de-prova imerso em água por 72 horas (g).

3.4.7 Absorção de água por capilaridade

Foi utilizada a ABNT NBR 9779:2012 para execução desse ensaio optando-se por determinar as massas dos corpos-de-prova com 72 horas, contadas a partir da colocação destes em contato com a água.

A absorção de água por capilaridade é expressa em g/cm^2 e calculada dividindo o aumento de massa pela área da seção transversal da superfície do corpo-de-prova em contato com a água, de acordo com a seguinte expressão:

$$A_c = \frac{A - B}{S} \quad (3.10)$$

onde

A_c – absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

A – massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água (g);

B – massa do corpo-de-prova seco (g);

S – área da seção transversal (cm^2).

3.4.8 Análise Fatorial 2³

O objetivo é estabelecer dois níveis (- e +) dos fatores controláveis de interesse A, B e C, cujos tratamentos são constituídos por todas as combinações entre os seus níveis: A-B-C-, A-B+C-, A+B-C-, A+B-C+, A-B+C+, A+B-C+, A+B+C- e A+B+C+, sendo:

A + = agregado graúdo de brita;

A - = agregado graúdo de RCD;

B + = agregado miúdo natural de rio;

B - = agregado miúdo de RMT;

C+ = ausência de fibra sintética no concreto e,

C - = fibra sintética.

As hipóteses referentes aos três efeitos principais de A, B e C (H_{01} , H_{02} e H_{03}) e aos das três interações duplas AxB, AxC e BxC (H_{04} , H_{05} e H_{06}) e ao efeito de interação tripla AxBxC (H_{07}) são dadas por:

$$H_{01}: e_A = \bar{y}_{y+..} - \bar{y}_{y-..};$$

$$H_{02}: e_B = \bar{y}_{y.+.-} - \bar{y}_{y.-.};$$

$$H_{03}: e_C = \bar{y}_{y..+-} - \bar{y}_{y..-};$$

$$H_{04}: e_{AB} = \frac{(\mu_{Y--.} + \mu_{Y++}) - (\mu_{Y-.+} + \mu_{Y+--})}{2} = 0;$$

$$H_{05}: e_{AC} = \frac{(\mu_{Y--.} + \mu_{Y++}) - (\mu_{Y-.+} + \mu_{Y+--})}{2} = 0;$$

$$H_{06}: e_{BC} = \frac{(\mu_{Y--.} + \mu_{Y++}) - (\mu_{Y-.+} + \mu_{Y+--})}{2} = 0 e$$

$$H_{07}: e_{ABC} = \frac{(\mu_{Y--.} + \mu_{Y-.+} + \mu_{Y+--} + \mu_{Y+++}) - (\mu_{Y---} + \mu_{Y-++} + \mu_{Y+-+} + \mu_{Y+-})}{4} = 0.$$

As hipóteses H_{04} , H_{05} , H_{06} e H_{07} contrastam médias com produtos positivos entre os sinais dos níveis A, B e C contra aquelas que possuem produtos negativos. Portanto, as diferenças entre as médias de Y das combinações positivas e negativas correspondem às estimativas dos efeitos das interações duplas e tripla.

Se ocorrer apenas a significância do efeito da interação AxBxC sem a presença dos efeitos das interações duplas ($e_{AB} = e_{AC} = e_{BC} = 0$) e dos principais ($e_A = e_B = e_C = 0$), então serão observadas as comparações entre as médias de "Y", visto a interação tripla ser positiva e negativa respectivamente:

$$\begin{aligned}
 (\bar{y}_{Y..+} = \bar{y}_{Y.+} = \bar{y}_{Y+..} = \bar{y}_{Y+++}) &> (\bar{y}_{Y...} = \bar{y}_{Y.++} = \bar{y}_{Y++..} = \bar{y}_{Y+++}); \text{ e} \\
 (\bar{y}_{Y..+} = \bar{y}_{Y.+} = \bar{y}_{Y+..} = \bar{y}_{Y+++}) &< (\bar{y}_{Y...} = \bar{y}_{Y.++} = \bar{y}_{Y++..} = \bar{y}_{Y+++})
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

Onde,

$\mu_{Y..}$ = média marginal de Y do tratamento a.b.;

$\mu_{Y.+}$ = média marginal de Y do tratamento a.b.;

$\mu_{Y+..}$ = média marginal de Y do tratamento a.b. e

μ_{Y+++} = média marginal de Y do tratamento a.b.;

Os efeitos de interesses no fatorial completo 2^3 são os efeitos principais (A, B e C) e os efeitos das interações de segunda (AxB, AxC e BxC) e terceira ordens (AxBxC), cujas estimativas são obtidas em função dos respectivos contrastes, com coeficientes iguais a -1 ou 1.

Desse modo, as estimativas dos efeitos A, B, C, AxB, BxC e AxBxC podem ser obtidas por:

$$\hat{e} = 2\beta_0 \tag{3.12}$$

Onde:

\hat{e} = estimativa do efeito principal;

β_0 = estimativa do coeficiente de regressão baseado nos valores observados de Y.

3.4.9 Análise de Microscopia Óptica

O microscópio óptico é um instrumento usado para ampliar e regular, com uma série de lentes multicoloridas e ultravioleta, capazes de enxergar através da luz estruturas pequenas e grandes, impossíveis de visualizar a olho nu, por isso e também conhecido como microscópio de luz (utilizando luz ou "fótons").

É constituído por uma parte mecânica, que suporta e permite controlar e por uma parte óptica que amplia as imagens.

O trabalho em lupa ou microscópio óptico permite a análise das amostras de concreto endurecido, com secções polidas e delgadas. Os minerais são identificados por cor, brilho, hábito, clivagens.

A análise em lupa ou microscópio estereoscópico é praticamente padrão numa análise preliminar de uma amostra, para identificação de minerais mais comuns, avaliação do tamanho dos cristais e estimativa visual o tipo de aderência entre os componentes do concreto. Esta caracterização, como por exemplo, aderência e fraturas, podem ser feitas exclusivamente por microscópio estereoscópico, uma vez que os agregados componentes da estrutura do concreto são grandes e conhecidos, tornando esta identificação segura.

capítulo 4

RESULTADOS E ANÁLISES

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme mencionado, elaborou-se um programa experimental para se avaliar as propriedades tecnológicas dos concretos obtidos com a substituição integral do agregado miúdo triturado proveniente do resíduo do beneficiamento do mármore em concretos de cimento Portland. Dentro desse contexto estudaram-se as propriedades físicas e mecânicas, tais como: trabalhabilidade, resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral, à tração na flexão, módulo de elasticidade, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, dentre outras.

Para uma análise mais consistente da influência dessas substituições nos concretos e da interação entre as variáveis (idade e tipo de adição), efetuou-se uma análise estatística por meio da ferramenta Anova e em todos os resultados encontrados referentes às propriedades do concreto no estado endurecido. Segundo Ribeiro (1995), a Anova permite verificar a influência das variáveis dentro de seu grupo e entre os grupos, por meio da média geral e dos erros envolvidos. A verificação da significância de uma determinada variável ou grupo de variáveis é comprovada com a comparação entre um valor calculado (F_0) e valores tabelados (F_α) (distribuição de probabilidades de Fischer), neste caso a influência será considerada significativa, quando o valor F_0 for maior que o F_α , sendo adotado um nível de significância igual a 5%. Esta análise foi

realizada por meio da planilha eletrônica Excel, utilizando-se a ferramenta ANOVA.

Cumprido esclarecer que, para facilitar a compreensão, adotou-se a seguinte nomenclatura apresentada na Tabela 4.1, para os traços executados.

Tabela 4.1 – Nomenclatura dos traços dos concretos confeccionados.

COMPOSIÇÃO DA MISTURA	NOMENCLATURA
Brita de gnaiss + areia natural de rio	Concreto 1 (C1)
Brita de gnaiss + areia natural de rio + fibra polipropileno	Concreto 2 (C2)
RCD + areia natural de rio	Concreto 3 (C3)
RCD + areia natural de rio + fibra polipropileno	Concreto 4 (C4)
Brita de gnaiss + rejeito de mármore triturado	Concreto 5 (C5)
RCD + rejeito de mármore triturado	Concreto 6 (C6)
Brita de gnaiss + rejeito de mármore triturado + fibra	Concreto 7 (C7)
RCD + rejeito de mármore triturado + fibra polipropileno	Concreto 8 (C8)

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados e as respectivas análises efetuadas por meio dos procedimentos estatísticos.

4.2 ENSAIO DE CONSISTÊNCIA

A consistência dos concretos foi avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone. A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.2 – Abatimento dos concretos nas diferentes misturas.

COMPOSIÇÃO DA MISTURA	SLUMP (mm)
Brita de gnaisse + areia natural de rio (C1)	80
Brita de gnaisse + areia natural de rio + fibra polipropileno (C2)	50
RCD + areia natural de rio (C3)	60
RCD + areia natural de rio + fibra polipropileno (C4)	50
Brita de gnaisse + rejeito de mármore triturado (C5)	140
RCD + rejeito de mármore triturado (C6)	85
Brita de gnaisse + rejeito de mármore triturado + fibra (C7)	120
RCD + rejeito de mármore triturado + fibra polipropileno (C8)	70

Analisando-se os dados da Tabela 4.2 constata-se que a adição de mármore triturado às misturas proporcionou um incremento na consistência das misturas, sem que houvesse desagregação ou exsudação excessiva do mesmo (Figura 4.1).



Figura 4.1 – Abatimento da mistura com RCD rejeito de mármore e fibra (S = 40 mm).

Os resultados do ensaio de consistência do concreto são apresentados no gráfico da Figura 4.2.

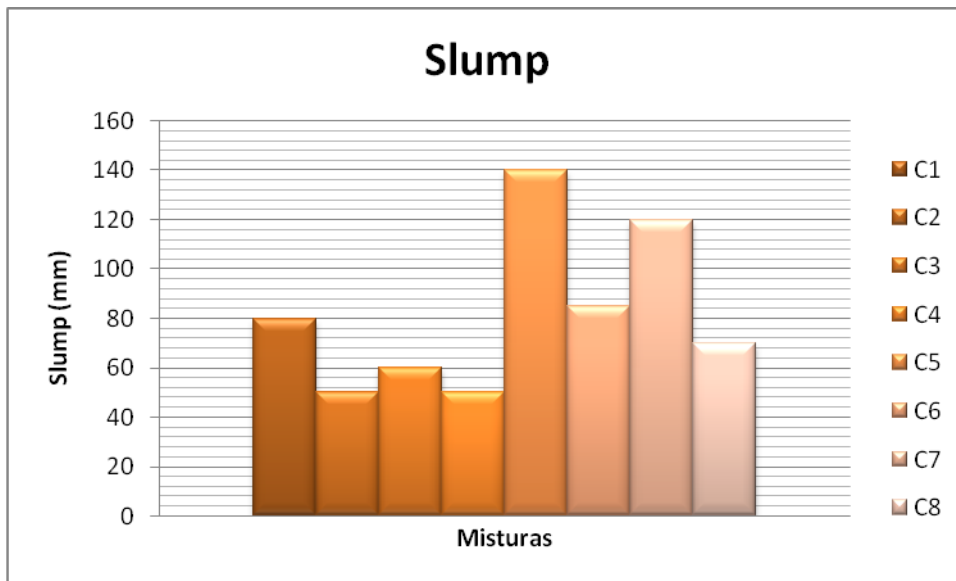


Figura 4.2 – Valores dos slumps das misturas

4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Para a verificação do efeito da adição do RCD, RMT e fibras na resistência à compressão axial, foram moldados seis corpos-de-prova para cada mistura e para cada idade (07, 14, 28 e 63 dias).

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores médios obtidos nos ensaios e o coeficiente de variação CV da série de ensaios, expressa em %.

Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão em MPa

MISTURAS	f_{c7} Média (MPa)	CV (%)	f_{c14} Média (MPa)	CV (%)	f_{c28} Média (MPa)	CV (%)	f_{c63} Média (MPa)	CV (%)
C1	15,91	2,40	21,64	6,16	25,83	5,83	29,67	4,34
C2	15,72	3,37	21,65	3,90	26,26	0,93	30,11	2,66
C3	13,50	3,90	14,71	3,27	15,57	6,75	21,01	1,98
C4	12,99	5,05	14,65	0,63	15,66	3,55	21,14	1,08
C5	17,33	2,17	23,26	2,26	29,52	0,35	33,17	1,33
C6	15,18	8,57	20,32	4,13	25,97	3,47	26,09	3,36
C7	22,54	3,11	25,14	8,32	31,51	2,32	33,08	7,54
C8	18,72	2,44	23,05	1,63	27,77	6,77	29,81	3,51

f_{c7} – resistência à compressão aos 7 dias de idade.

f_{c14} – resistência à compressão aos 14 dias de idade.

f_{c28} – resistência à compressão aos 28 dias de idade.

f_{c63} – resistência à compressão aos 63 dias de idade.

Salienta-se que o coeficiente de variação CV é uma análise estatística preliminar, com o qual se avalia a variação dos resultados de um experimento. Esse procedimento é empregado quando se deseja comparar a variabilidade de várias amostras com médias diferentes, ou quando as variáveis aleatórias têm dimensões diferentes. Em geral, quando o valor do CV é menor ou igual a 25% a amostra é considerada aceitável.

Analisando-se os dados da Tabela 4.3 verifica-se que todas as amostras têm um coeficiente de variação inferior a 25%, e conclui-se que os resultados obtidos são aceitáveis.

A Figura 4.3 apresenta de maneira concisa os resultados obtidos experimentalmente.

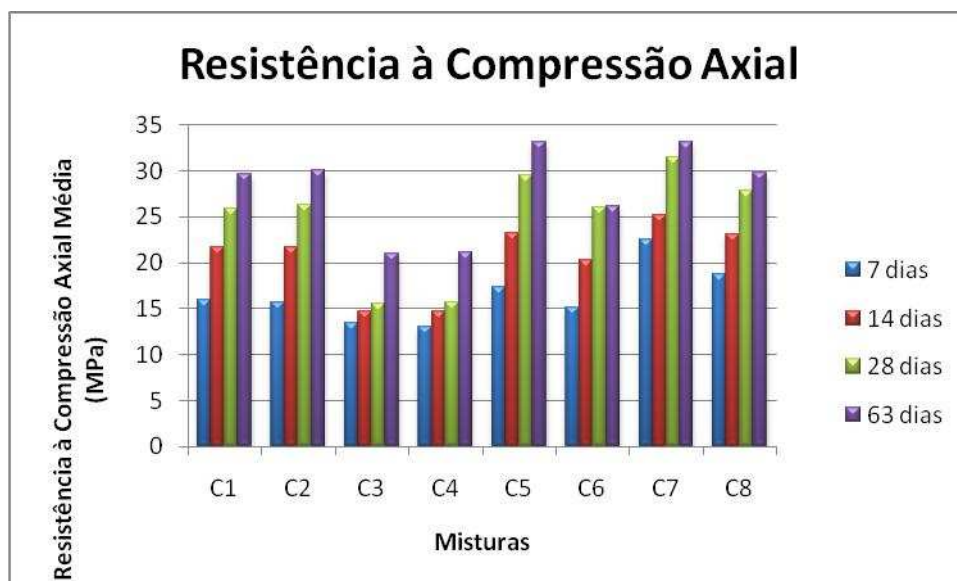


Figura 4.3 – Resistência média à compressão (MPa) x Tipos de misturas

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.3 e Figura 4.3, identificou-se que os traços contendo agregados miúdos triturados atingiram maiores resistências, destacando-se o concreto com RMT, com maiores resistências em relação aos demais. A causa para a obtenção destes resultados pode ser entendida devido à baixa porosidade do RMT (baixa absorção de água), pois de acordo com Buest Neto (2006), a porosidade do agregado pode afetar a resistência à compressão do concreto. Neville (2013) salienta que a influência do agregado na resistência do concreto é proveniente da resistência mecânica do agregado, e, também, da sua absorção e da sua aderência.

Cabe mencionar também que, em virtude do RMT melhorar a trabalhabilidade do concreto, é possível reduzir o fator água cimento.

No que se refere à variável tipo de mistura, analisada separadamente, constatou-se uma influência, em relação ao concreto de referência. As misturas confeccionadas com RMT e fibra obtiveram melhor desempenho do que o concreto de referência resultando num ganho de resistência na ordem de 22 %.

Em contrapartida, quando é inserido o RCD, a resistência à compressão axial simples sofre um decréscimo em menor escala, mas, na ordem de 0,5 %. Com a adição da fibra, há um incremento na resistência de 7,5 %.

Tal fato é proveniente da necessidade do aumento do fator água / cimento, pois o RCD apresentou como visto no Capítulo 4, um maior teor de material pulverulento e a fibra diminui o contato entre massa e agregado, consequentemente aumentando o número de vazios do conjunto analisado.

As misturas confeccionadas com o RMT obtiveram melhor desempenho que os outros concretos, devido ao fato de possuírem maior densidade de massa no estado endurecido e, conseqüentemente, menor teor de ar aprisionado.

Para se obter uma análise mais consistente dos resultados experimentais por meio da planilha eletrônica Excel, efetuou-se uma análise estatística do valor médio obtido para a resistência à compressão, para verificar o efeito da influência do fator tipo de mistura. Os resultados obtidos encontram-se resumidos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados obtidos na análise estatística da f_{cm} para resistência à compressão para CP com os diferentes tipos de misturas – valores de F.

Misturas	C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	F ₀	F _α	F ₀	F _α	F ₀	F _α	F ₀	F _α	F ₀	F _α	F ₀	F _α	F ₀	F _α
Valores de F	1,208	10,128	17,392	10,128	21,210	10,128	18,070	10,128	2,971	10,128	35,771	10,128	7,949	10,128

Os resultados da Tabela 4.4 mostram que como F₀ é maior do que F_α, para alguns dos casos, conclui-se que houve influência significativa nos resultados para alguns tipos de mistura, tais como:

- na mistura C3, devido à substituição da brita de gnaiss pela brita de RCD;

- na mistura C4, devido à substituição da brita de gnaiss pela brita de RCD, porém, a adição das fibras de polipropileno não influenciou na resistência à compressão, conforme concluído na análise realizada entre as misturas C1 e C2;
- na mistura C5, devido à substituição de areia natural pelo agregado miúdo de RMT;
- na mistura C7, devido à substituição simultânea de areia natural por agregado miúdo de RMT e adição de fibras.

Por outro lado, os resultados da Tabela 4.4 mostram que como F_o é menor do que F_α , para alguns dos casos, conclui-se que não houve influência significativa para alguns tipos de mistura, tais como:

- na mistura C2, a adição das fibras de polipropileno, não influenciou significativamente na resistência à compressão axial;
- na mistura C6, devido a substituição simultânea de areia natural por agregado miúdo de RMT e de brita de gnaiss por brita de RCD;
- na mistura C8, devido a substituição simultânea de areia natural de rio pelo agregado miúdo de RMT e da brita de gnaiss por brita de RCD e adição de fibras.

O emprego do RMT aumenta a trabalhabilidade do concreto, possibilitando a redução do fator água/cimento, conduzindo a um aumento da resistência.

A variável, tipo de mistura, analisada separadamente, também mostrou influência, em relação ao concreto de referência (AMN e brita de gnaiss). As misturas confeccionadas com RMT e Slump = 140 mm obtiveram melhor desempenho que o concreto de referência, entretanto, com relação à mistura de RMT, RCD e mesma trabalhabilidade (C6 e C8) ocorreu um decréscimo da resistência. Este fato já era esperado por conta da necessidade de saturar a brita de RCD e também pelo fato do RCD apresentar como visto no Capítulo 3, a maior presença de material pulverulento.

As análises de regressão por efeitos controláveis, utilizando a ferramenta Minitab, são dadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Factorial Fit: Resistência à compressão axial aos 63 dias versus am; fibra; ag

Termos	Efeitos	Coefficiente	Se Coeficiente	T	P
Constante		24,554	0,1497	164,01	0,000
am	7,485	3,742	0,1497	25,00	0,000
fibra	1,525	0,762	0,1497	5,09	0,000
ag	-7,579	-3,789	0,1497	-25,31	0,000
am*fibra	1,338	0,669	0,1497	4,47	0,000
am*ag	2,843	1,421	0,1497	9,49	0,000
fibra*ag	0,191	0,096	0,1497	0,64	0,527
am*fibra*ag	0,386	0,193	0,1497	1,29	0,204

S = 1,03721 R-Sq = 97,23% R-Sq(adj) = 96,74%

Com base na Tabela 4.5 pode-se afirmar que o concreto que obteve maior incremento da resistência à compressão axial, foi o concreto de agregado miúdo de RMT, agregado graúdo de brita de gnaiss associado com a fibra (concreto C7). A permuta do agregado graúdo de brita de gnaiss pelo de RCD acarretou em uma diminuição dos valores dessa resistência.

Nos concretos que utilizaram o RMT com a fibra de polipropileno (C7 e C8), houve uma interação melhor e os concretos que utilizaram brita de gnaiss juntamente com a fibra (C2 e C7), ocorreu uma maior sinergia.

Tabela 4.6 – Análise de variância para a resistência à compressão axial aos 63 dias de am; fibra; ag

Termos	Grau de Liberdade GL	Soma dos Quadrados SQ	Quadrado Médio QM	Fc	Pr>Fc
am	1	319,71363	319,71363	236,8275	0
ag	1	624,96333	624,96333	462,9409	0
fibra	1	13,95363	13,95363	10,3361	0,0026
am*ag	1	29,10967	29,10967	21,563	0
am*fibra	1	8,31668	8,31668	6,1606	0,0174
ag*fibra	1	5,16141	5,16141	3,8233	0,0576
am*fibra*ag	1	6,42403	6,42403	4,7586	0,0351
Resíduo	40	53,99940	1,34998	–	–
Total	47	1061,64179	22,58812	–	–

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)

P – valor: 0,1101994

Com base na Tabela 4.6, pode-se afirmar que:

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 1% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variâncias (Bartlett)

P – valor: 0,000

De acordo com o teste de Bartlett a 1% de significância, as variâncias não podem ser consideradas homogêneas.

Os níveis a_1 e a_2 que aparecem a seguir são, respectivamente, os níveis 1 e -1 que aparecem no anexo do Minitab.

Os níveis b_1 e b_2 são, respectivamente, os níveis 1 e -1 que aparecem no anexo do Minitab.

Os níveis c_1 e c_2 são, respectivamente, os níveis 1 e -1 que aparecem no anexo do Minitab.

a) Fator C (fibra):

A partir da Análise de Variâncias demonstrada acima, segue que o fator C atua independente dos demais.

$$\hat{m}_{c_1} = 28,5588 \quad a \quad \leftarrow$$

$$\hat{m}_{c_2} = 27,4804 \quad b$$

b) Fatores A e B (agregado miúdo e agregado graúdo respectivamente).

A partir da Análise de Variâncias realizada, segue que existe interação entre os fatores A e B.

c) Fator A dentro de B (agregado miúdo e agregado graúdo respectivamente).

$\hat{m}_{a_1/b_1} = 27,7708 \quad a \quad \leftarrow$	$\hat{m}_{a_1/b_2} = 33,4300 \quad a \quad \leftarrow$
$\hat{m}_{a_2/b_1} = 21,0517 \quad b$	$\hat{m}_{a_2/b_2} = 29,8258 \quad b$

d) Fator B dentro de A

$\hat{m}_{b_1/a_1} = 27,7708 \quad A$	$\hat{m}_{b_1/a_2} = 21,0517 \quad A$
$\hat{m}_{b_2/a_1} = 33,4300 \quad B \quad \leftarrow$	$\hat{m}_{b_2/a_2} = 29,8258 \quad B \quad \leftarrow$

	b ₁	b ₂		
a ₁	27,7708aA	33,4300aB	c ₁	28,5588 a
a ₂	21,0517bA	29,8258bB	c ₂	27,4804 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, e pela mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste F ($p > 0,01$). CV = 4,15%.

De acordo com as Tabelas 4.5 e 4.6, pode-se concluir que:

- i. Fator C (fibra): recomenda-se o nível c₁, ou seja, com fibra.
- ii. Fator A (agregado miúdo): tanto dentro de b₁ (RCD) como dentro de b₂ (AGN), o nível a₁ (RMT) prevalece. Logo, recomenda-se a₁, pois proporciona maior valor na variável resposta Y.
- iii. Fator B (agregado graúdo): tanto dentro de a₁ (RMT) como dentro de a₂ (AGN), o nível b₂ (AGN) prevalece. Logo, recomenda-se b₂ (AGN).
- iv. Recomendação final: a₁b₂c₁, ou seja, concreto com RMT, AGN e fibra (concreto C7).

4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

É sabido que a resistência à compressão axial do concreto é uma das propriedades mais importantes quando se avalia o desempenho de uma estrutura. A resistência está ligada à capacidade dos materiais de resistir a tensões sem que haja ruptura. De uma forma ampla, a resistência está intimamente relacionada à porosidade dos materiais. Quanto mais porosos estes se apresentam, menor tende a ser sua resistência. No concreto, além da porosidade da matriz de cimento e do agregado graúdo, deve ser considerada a porosidade da zona de transição entre a matriz e o agregado. No estudo da resistência do concreto com agregados naturais, geralmente o uso de agregados densos e resistentes fazem com que esta propriedade seja

influenciada basicamente pela porosidade da matriz e da zona de transição. Contudo, quando se estuda a resistência de concretos com material reciclado, acredita-se que a porosidade do agregado passe a ter um papel importante na determinação da resistência do concreto.

Sendo assim, para a avaliação da influência da adição do RMT, RCD e fibra na resistência à tração por compressão diametral, foram rompidos seis corpos-de-prova cilíndricos, para cada mistura de concreto, nas idades de 07, 14, 28 e 63 dias. Todos os cilindros, com dimensões de 100 mm x 200 mm.

A seguir, na Tabela 4.7, são apresentados os valores de tensão média obtidas nos ensaios e o coeficiente de variação CV da série de ensaios, expressa em %.

Tabela 4.7 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (MPa)

MISTURAS	f_{c7}Média (MPa)	CV (%)	f_{c14}Média (MPa)	CV (%)	f_{c28}Média (MPa)	CV (%)	f_{c63}Média (MPa)	CV (%)
C1	1,90	4,94	2,70	4,00	3,56	6,21	3,91	4,09
C2	2,15	2,25	2,77	3,49	3,76	1,98	4,20	1,41
C3	1,88	4,99	2,10	3,25	2,11	4,28	2,14	2,31
C4	1,98	1,32	2,12	2,95	2,16	1,62	2,19	1,58
C5	2,23	2,44	3,26	2,34	4,02	2,99	4,06	1,61
C6	2,05	8,37	2,89	3,85	3,35	6,18	3,89	4,13
C7	2,66	6,42	3,41	10,22	4,22	6,23	4,22	3,30
C8	2,75	4,80	3,15	5,77	3,84	2,91	4,05	4,31

f_{c7} – resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias de idade.

f_{c14} – resistência à tração por compressão diametral aos 14 dias de idade.

f_{c28} – resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade.

f_{c63} – resistência à tração por compressão diametral aos 63 dias de idade.

Analisando-se os dados da Tabela 4.7 verifica-se que todas as amostras têm um coeficiente de variação inferior a 25%, e conclui-se que os resultados obtidos são aceitáveis.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.7 foi elaborado o gráfico de resistência à tração por compressão diametral, para 7, 14, 28 e 63 dias, conforme Figura 4.4.

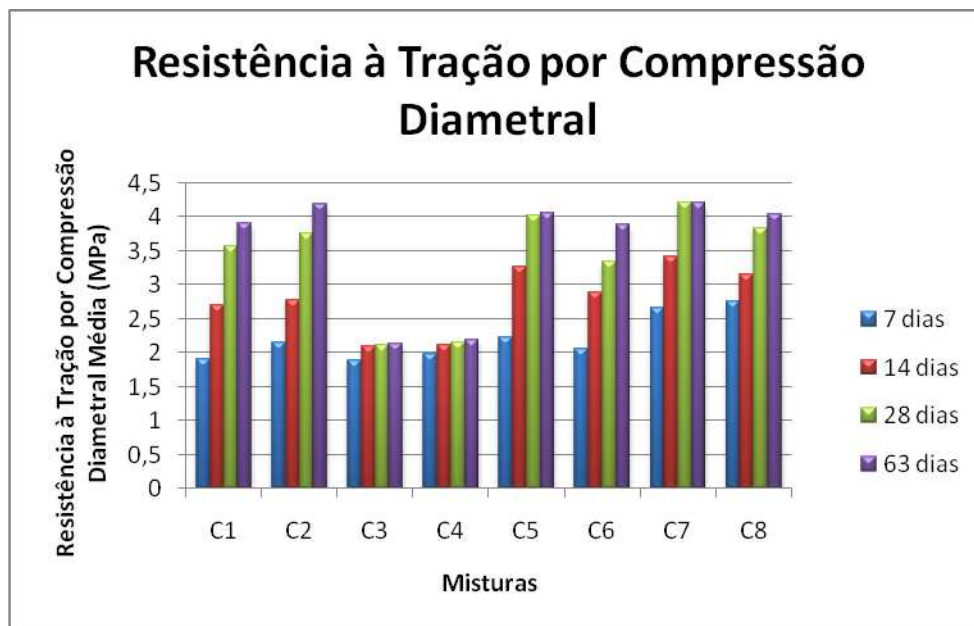


Figura 4.4 – Resistência média à tração por compressão diametral (MPa) x Tipos de misturas.

Para uma melhor análise dos resultados experimentais, foi utilizada a planilha eletrônica Excel, ferramenta Anova, para a verificação da existência da influência das variáveis já relacionadas e suas interações. Na Tabela 4.8 constam as análises estatísticas das interações destas variáveis.

Tabela 4.8 – Resultados obtidos na análise estatística da f_{tm} para resistência à tração por compressão diametral para CP com os diferentes tipos de misturas – valores de F.

Misturas	C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8	
	F_0	F_α	F_0	F_α	F_0	F_α	F_0	F_α	F_0	F_α	F_0	F_α	F_0	F_α
Valores de F	17,910	10,128	5,792	10,128	4,951	10,128	17,933	10,128	0,091	10,128	35,722	10,128	7,829	10,128

Os resultados da Tabela 4.8 mostram que como F_0 é maior do que F_α , para alguns dos casos, conclui-se que houve influência significativa para alguns tipos de mistura, tais como:

- na mistura C2, devido a adição de fibras;
- na mistura C5, devido a substituição da areia natural pelo agregado miúdo de RMT;
- na mistura C7, devido a substituição da areia natural pelo agregado miúdo de RMT e a adição de fibras;

Os resultados da Tabela 4.8 mostram que como F_0 é menor do que F_α , para alguns dos casos, conclui-se que não houve influência significativa para alguns tipos de mistura, tais como:

- na mistura C3, com a substituição da brita de gnaiss pela brita de RCD, não influenciou significativamente na resistência à tração por compressão diametral;
- na mistura C4, devido a substituição da brita de gnaiss pela brita de RCD;
- na mistura C6, devido a substituição simultânea de areia natural por agregado miúdo de RMT e de brita de gnaiss por brita de RCD;

- na mistura C8, devido a substituição simultânea de areia natural de rio pelo agregado miúdo de RMT e da brita de gnaiss por brita de RCD e adição de fibras.

Neville (2013) considera que, quando ocorre um aumento na resistência à compressão, também ocorre um aumento na resistência à tração, porém numa taxa menor. A relação entre a tração uniaxial e resistência à compressão gira em torno de 7 a 11% (Mehta & Monteiro, 2005). Para os concretos com RMT avaliados neste trabalho, a relação entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial variou de 11,8% a 15,9%, sendo o concreto com RMT, RCD e fibra com a maior relação, ou seja, 15,9%.

Não se observa aumento de resistência significativo nas misturas com RMT (C5, C7 e C8) nas idades de 63 dias, permitindo-se concluir a não existência de atividade pozolânica, já que o RMT apresenta uma estrutura bastante cristalina, não ocorrendo reação química, ou seja, os níveis de resistências dos concretos com RMT, a longas idades, sofrem pouca influência.

Segundo Mehta & Monteiro (1994), os agregados de textura rugosa ou triturados apresentam maior resistência que um concreto correspondente contendo agregado liso, principalmente à tração. Observa-se que os agregados provenientes de rejeito de mármore são mais rugosos do que os agregados convencionais. Esse fato pode justificar as melhores resistências obtidas para concretos fabricados com RMT.

Foi possível identificar que as misturas contendo agregados miúdos triturados, atingiram resistências maiores (C7 e C8) em relação às misturas de concreto de referência com brita de gnaiss (C1) e o de areia natural com brita de gnaiss e fibra (C2), contudo os concretos produzidos com RMT e RCD com fibra, objeto de estudo desta pesquisa, apresentaram maiores resistências à tração por compressão diametral aos 63 dias em relação ao de referência de sua categoria, ou seja, mistura com brita de gnaiss e RMT (C5).

A causa para a obtenção destes resultados pode ser entendida por meio da menor angulosidade do agregado miúdo natural, o que possibilita uma mobilidade relativa, afetando a micro-fissuração na interface entre a pasta hidratada e o agregado durante o ensaio. A fibra também possui a propriedade de resistir ao esforço de tração, contribuindo para o aumento dos valores da resistência. A mobilidade maior para os AMN se deve ao fato de serem mais arredondados, além de possuírem textura superficial mais lisa que os triturados,

O emprego do RMT aumenta a trabalhabilidade do concreto, podendo-se reduzir o fator água/cimento, conduzindo a um aumento da resistência à tração por compressão diametral.

Com base na Tabela 4.8, a variável, tipo de mistura, analisada separadamente, mostrou influência, em relação aos concretos de referência (C1-brita de gnaise e C5 - RMT). As misturas confeccionadas com RMT (C5, C7 e C8), obtiveram melhor desempenho que o concreto de referência C1, entretanto, com relação às misturas com RCD (C3, C4 e C6) ocorreu um decréscimo da resistência. Este fato já era esperado por conta da necessidade de aumento do fator água / cimento, pois o RCD apresentou como visto no Capítulo 4, a maior presença de material pulverulento. Na mistura de RCD com RMT e fibra (C8), seus valores de resistência mantiveram estáveis em relação ao de referência de sua categoria (C5).

As análises de regressão por efeitos controláveis, utilizando a ferramenta Minitab, são dadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Factorial Fit: Resistência à tração por compressão diametral aos 63 dias versus am; ag; fibra

Termos	Efeitos	Coefficiente	Se Coeficiente	T	P
Constante		3,5871	0,01702	210,70	0,000
am	0,9558	0,4779	0,01702	28,07	0,000
ag	-1,0525	-0,5263	0,01702	-30,91	0,000
fibra	0,2008	0,1004	0,01702	5,90	0,000
am*ag	0,8558	0,4279	0,01702	25,14	0,000
am*fibra	0,0142	0,0071	0,01702	0,42	0,680
ag*fibra	-0,0492	-0,0246	0,01702	-1,44	0,157
am*ag*fibra	0,0642	0,0321	0,01702	1,88	0,067

S = 0,117948 R-Sq = 98,37% R-Sq(adj) = 98,09%

Tabela 4.10 – Análise de Variância da resistência à tração por compressão diametral aos 63 dias versus am; ag; fibra

Termos	Grau de Liberdade GL	Soma dos Quadrados SQ	Quadrado Médio QM	Fc	Pr>Fc
am	1	10,96341	10,96341	788,073	0
ag	1	13,29307	13,29307	955,5343	0
fibra	1	0,484010	0,484010	34,7915	0
am*ag	1	8,78941	8,78941	631,8012	0
am*fibra	1	0,00241	0,00241	0,1731	0,6796
ag*fibra	1	0,02901	0,02901	2,0852	0,1565
am*ag*fibra	1	0,04941	0,04941	3,5516	0,0668
Resíduo	40	0,55647	0,01391	–	–
Total	47	3416719	0,72696	–	–

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)

p-valor: 0.1065725

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 1% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variâncias (Bartlett)

p-valor: 0.017

De acordo com o teste de Bartlett a 1% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas (iguais).

Os níveis a_1 e a_2 que aparecem a seguir são, respectivamente, os níveis 1 e -1 que aparecem no anexo do Minitab.

Os níveis b_1 e b_2 são, respectivamente, os níveis 1 e -1 que aparecem no anexo do Minitab.

Os níveis c_1 e c_2 são, respectivamente, os níveis 1 e -1 que aparecem no anexo do Minitab.

a) Fator C (fibra)

A partir da Análise de Variâncias realizada acima, segue que o fator C atua independente dos demais.

$$\hat{m}_{c_1} = 3,6875 \quad a \quad \leftarrow$$

$$\hat{m}_{c_2} = 3,4867 \quad b$$

b) Fatores A e B (agregado miúdo e agregado graúdo respectivamente).

A partir da Análise de Variâncias realizada, segue que existe interação entre os fatores A e B.

c) Fator A dentro de B (agregado miúdo e agregado graúdo respectivamente)

$\hat{m}_{a_1/b_1} = 3,9667$ a \leftarrow	$\hat{m}_{a_1/b_2} = 4,1633$ a
$\hat{m}_{a_2/b_1} = 2,1550$ b	$\hat{m}_{a_2/b_2} = 4,0633$ a

d) Fator B dentro de A

$\hat{m}_{b_1/a_1} = 3,9667$ A	$\hat{m}_{b_1/a_2} = 2,1550$ A
$\hat{m}_{b_2/a_1} = 4,1633$ B \leftarrow	$\hat{m}_{b_2/a_2} = 4,0633$ B \leftarrow

	b ₁	b ₂		
a ₁	3,9667aA	4,1663aB	c ₁	3,6875 a
a ₂	2,1550bA	4,0633aB	c ₂	3,4867 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, e pela mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste F ($p > 0,01$). CV = 3,29%.

Com base nas tabelas 4.9 e 4.10, pode-se concluir que:

- i. Fator C (fibra): recomenda-se o nível c₁ (com fibra).
- ii. Fator B (agregado graúdo): tanto dentro de a₁ (RMT) como dentro de a₂ (AMN), o nível b₂ (AGN) prevalece, logo, recomenda-se b₂ (AGN), ou seja, proporciona maior valor na variável resposta Y.
- iii. Fator A (agregado miúdo): Dentro de b₂ (AGN), o nível a₁ (RMT) é tão bom como a₂ (AMN). Logo, pode-se recomendar ambos.
- iv. Recomendação final: a₁b₂c₁ ou a₂b₂c₁, ou seja, concretos com RMT, brita de gnaisse e fibra (concreto C7) ou concreto com areia natural, brita de gnaisse e fibra (concreto C2).

4.5 DETERMINAÇÃO DA TRAÇÃO NA FLEXÃO

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado na idade de 28 dias. Para cada mistura de concreto foram moldados quatro corpos-de-prova prismáticos, com dimensões de 150 mm x 150 mm x 500 mm. Na Tabela 4.11 e na Figura 4.5 são apresentados os resultados encontrados.

Tabela 4.11 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão (MPa)

MISTURAS	f_{tf28} Média (MPa)	CV (%)
C1	3,52	1,54
C2	3,89	3,30
C3	3,13	1,89
C4	3,52	2,50
C5	4,02	2,99
C6	3,77	4,17
C7	5,20	4,46
C8	3,89	10,85

f_{tf28} – resistência à tração na flexão aos 28 dias de idade.

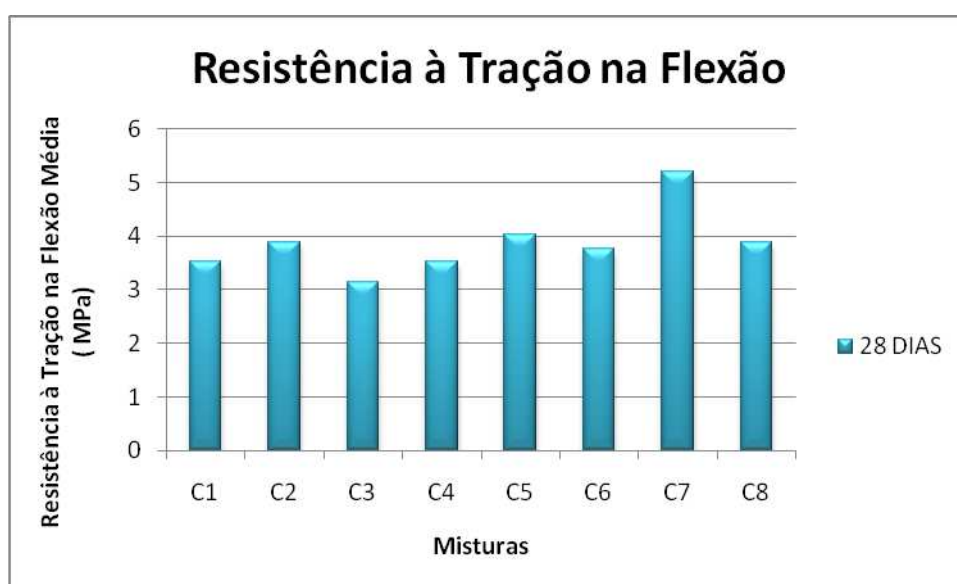


Figura 4.5 – Resistência média à tração na flexão (MPa) x Tipos de misturas.

Analisando os resultados, é possível observar que diante de todos os concretos produzidos, obtêm-se melhores resultados à tração na flexão nos concretos com agregado miúdo triturado, especialmente na mistura C7.

Considerando a adição de fibra, as misturas apresentaram pequeno aumento na resistência de 4,85% em relação aos concretos com a mesma

similaridade, porém sem a fibra. Sendo assim, pode-se afirmar que as resistências à tração na flexão foram maiores em C2 com relação a C1, em C4 com relação a C3, em C7 com relação a C5 e em C8 com relação a C6. Ainda, pode-se afirmar que na mistura C8, objeto desta pesquisa, obteve melhores resultados à tração na flexão em relação ao concreto de referência C1.

As resistências aos esforços de tração na flexão nos concretos com substituição de RMT se elevaram, porém a proporção do ganho promovido foi inferior ao ganho auferido na resistência à compressão.

A aderência entre o agregado e a pasta de cimento é uma propriedade significativa para a resistência do concreto, principalmente para a resistência à flexão. Em parte, a aderência é devida ao intertravamento do agregado e a pasta de cimento hidratada, em virtude da aspereza da superfície das partículas de agregado.

Normalmente, quando a aderência é satisfatória, um corpo-de-prova rompido deve ter algumas partículas de agregados rompidas, além de outras, mais numerosas, arrancadas de seus alojamentos na pasta (NEVILLE, 2013). Analisando-se um corpo-de-prova rompido que foi confeccionado com RMT (Figura 4.6) observa-se esta situação, e pode-se deduzir que o rejeito de mármore triturado apresenta boa aderência com a pasta de cimento.



Figura 4.6 – Corpo-de-prova com RMT

Salem e Burdette (1998) afirmam que a maior resistência à flexão nas idades iniciais e maior resistência à compressão do concreto reciclado encontradas em seu estudo podiam ser atribuídas à maior rugosidade dos agregados de concreto reciclado usados. Essa maior resistência à flexão somente nas idades iniciais está de acordo com Mehta e Monteiro (1994).

Khaloo (1994) atribui o ganho na resistência à tração e à flexão de concretos produzidos com 100% de agregados de tijolos cerâmicos reciclados de grande dureza à maior aderência entre a matriz e estes proporcionada por sua maior rugosidade.

Além disso, outra possível causa para os resultados de resistência à tração na flexão obtida está no formato dos grãos, pois os mesmos por serem angulosos podem provocar um travamento melhor das partículas nos concretos com RMT, melhorando as suas resistências à tração na flexão.

As análises de regressão por efeitos controláveis, utilizando a ferramenta Minitab, são dadas na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Factorial Fit: Resistência à tração na flexão aos 28 dias versus am; ag; fibra

Termos	Efeitos	Coefficiente	Se Coeficiente	T	P
Constante		3,9503	0,04168	94,78	0,000
am	0,8894	0,4447	0,04168	10,67	0,000
ag	-0,8331	-0,4166	0,04168	-9,99	0,000
fibra	0,2056	0,1028	0,04168	2,47	0,000
am*ag	-0,4569	-0,2284	0,04168	-5,48	0,000
am*fibra	-0,1656	-0,0828	0,04168	-1,99	0,058
ag*fibra	-0,0506	-0,0253	0,04168	-0,61	0,549
am*ag*fibra	-0,0744	-0,0372	0,04168	-0,89	0,381

S = 0,235768 R-Sq = 91,40% R-Sq(adj) = 88,89%

Tabela 4.13 – Análise de Variância da resistência à tração na flexão aos 28 dias versus am; ag; fibra

Termos	Grau de Liberdade (GL)	Soma dos Quadrados (SQ)	Quadrado Médio(QM)	Fc	Pr>Fc
am	1	6,32790	6,32790	113,8389	0
ag	1	5,55278	5,55278	99,8944	0
fibra	1	0,33825	0,33825	6,0852	0,0212
am*ag	1	1,66988	1,66988	30,0411	0
am*fibra	1	0,21945	0,21945	3,948	0,0585
ag*fibra	1	0,02050	0,02050	0,3689	0,5493
am*ag*fibra	1	0,04425	0,04425	0,7961	0,3811
Resíduo	24	1,33407	0,05559	–	–
Total	31	15,50710	0,50023	–	–

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)

p-valor: 0.005147096

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 1% de significância, os resíduos não podem ser considerados normais.

Teste de homogeneidade de variâncias (Bartlett)

p-valor: 0.010

De acordo com o teste de Bartlett a 1% de significância, as variâncias podem ser consideradas homogêneas (iguais).

Os níveis a_1 e a_2 que aparecem a seguir são, respectivamente, os níveis 1 e -1 que aparecem no anexo do Minitab.

Os níveis b_1 e b_2 são, respectivamente, os níveis 1 e -1 que aparecem no anexo do Minitab.

Os níveis c_1 e c_2 são, respectivamente, os níveis 1 e -1 que aparecem no anexo do Minitab.

a) Fator C (fibra)

A partir da Análise de Variâncias realizada acima, segue que o fator C atua independente dos demais.

$$\hat{m}_{c_1} = 4,0531 \quad a$$

$$\hat{m}_{c_2} = 3,8475 \quad a$$

b) Fatores A e B (agregado miúdo e agregado graúdo respectivamente).

A partir da Análise de Variâncias realizada, segue que existe interação entre os fatores A e B.

c) Fator A dentro de B (agregado miúdo e agregado graúdo respectivamente).

$\hat{m}_{a_1/b_1} = 3,7500$ a ←	$\hat{m}_{a_1/b_2} = 5,0400$ a ←
$\hat{m}_{a_2/b_1} = 3,3175$ b	$\hat{m}_{a_2/b_2} = 3,6938$ b

d) Fator B dentro de A

$\hat{m}_{b_1/a_1} = 3,7500$ A	$\hat{m}_{b_1/a_2} = 3,3175$ A
$\hat{m}_{b_2/a_1} = 5,0400$ B ←	$\hat{m}_{b_2/a_2} = 3,6938$ B ←

	b ₁	b ₂		
a ₁	3,7500aA	5,0400aB	c ₁	4,0531 a
a ₂	3,3175bA	3,6938bB	c ₂	3,8475a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, e pela mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste F ($p > 0,01$). CV = 5,97%.

Com base nas tabelas 4.12 e 4.13, pode-se concluir que:

- i. Fator C (fibra): os níveis c_1 (com fibra) e c_2 (sem fibra) são estatisticamente iguais. Logo, pode-se recomendar ambos.
- ii. Fator A (agregado miúdo): tanto dentro de b_1 (RCD) como dentro de b_2 (AGN), o nível a_1 (RMT) prevalece, logo, recomenda-se a_1 (RMT), pois proporciona maior valor na variável resposta Y .
- iii. Fator B (agregado graúdo): tanto dentro de a_1 (RMT) como dentro de a_2 (AMN), o nível b_2 (AGN) prevalece. Logo, recomenda-se b_2 (AGN).
- iv. Recomendação final: $a_1b_2c_1$ ou $a_1b_2c_2$, ou seja, concretos com RMT, brita de gnaisse e fibra (C7) e RMT e brita de gnaisse (C5).

4.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE DE POISSON

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado de acordo com a ABNT NBR 8522:2003, sendo que antes da realização do ensaio de três corpos-de-prova para a determinação do módulo de elasticidade, dois corpos-de-prova do mesmo concreto foram ensaiados para obter a resistência à compressão.

Foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 150 mm x 300 mm, num total de cinco exemplares por traço.

As Tabelas 4.14 e 4.15 e Figuras 4.7 e 4.8 apresentam os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson para cada traço, respectivamente.

Tabela 4.14 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias

MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)		
MISTURAS	E_{ci28} Média (GPa)	CV (%)
C1	27,89	1,11
C2	28,58	8,61
C3	21,24	7,52
C4	26,21	11,52
C5	47,81	0,9
C6	31,97	7,83
C7	50,37	12,45
C8	34,79	3,47

E_{ci28} = Módulo de elasticidade aos 28 dias.

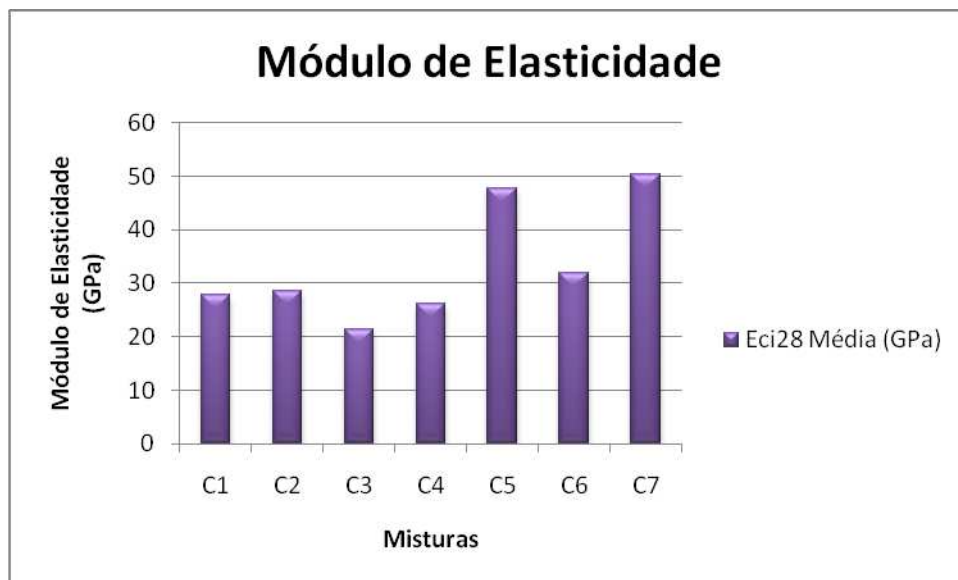


Figura 4.7 – Módulo de elasticidade (GPa)

Tabela 4.15 – Resultados do ensaio de coeficiente de Poisson aos 28 dias

COEFICIENTE DE POISSON		
MISTURA	μ_{28} Média	CV (%)
C1	0,28	11,04
C2	0,21	17,75
C3	0,23	3,62
C4	0,27	18,87
C5	0,43	8,1
C6	0,43	9,76
C7	0,41	18,46
C8	0,43	5,26

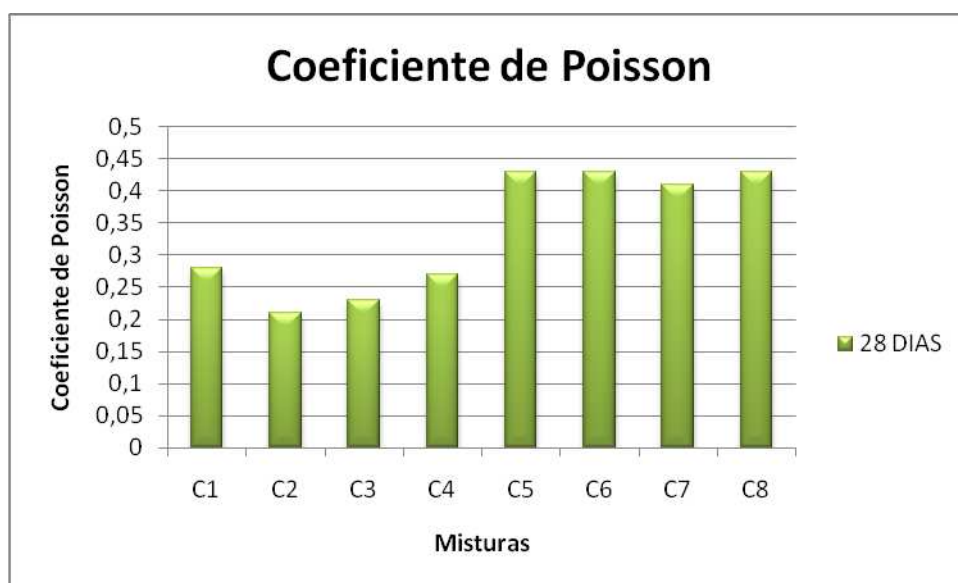


Figura 4.8 – Coeficiente de Poisson

O módulo de elasticidade é uma expressão da rigidez do concreto no estado endurecido que é proporcionado pela hidratação do cimento presente,

pelo travamento entre as partículas dos agregados devido à forma e às rugosidades dos grãos e pelo teor de material pulverulento (SILVA, 2006).

Analisando os resultados observa-se que os concretos com RMT apresentaram maior módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson que os concretos com AMN. À medida que foi substituída a brita de gnaiss por agregado de RCD nos concretos que utilizaram o RMT como agregado miúdo, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson diminuíram. Em suma, os concretos com RMT, brita de gnaiss e fibra (C7), apresentaram um ganho médio no módulo de elasticidade de 80,60% e no coeficiente de Poisson de 46,43%.

Os AMN apresentam partículas com formas visualmente mais arredondadas e também com textura mais lisa que os RMT. Isso tende a proporcionar maior formação de microfissuras entre agregado e pasta do que os RMT durante o ensaio, reduzindo os valores do módulo de elasticidade.

Nos concretos que tiveram em sua composição RCD, não ocorreu como nos concretos confeccionados com RMT e brita de gnaiss (seja o concreto com/sem fibras). Em virtude dos agregados graúdos artificiais propiciarem maior volume de pasta devido à maior presença de material pulverulento, o qual favorece o aumento da porosidade na zona de transição, ocasionando um maior índice de vazios e, aumentando assim a ocorrência de microfissuras na interface pasta-agregado e desta forma, reduzindo o módulo de elasticidade.

4.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

O ensaio de absorção por imersão avalia a absorção de um determinado concreto num tempo e também seu índice de vazios, por meio da relação entre a massa seca e saturada da amostra, sem considerar a velocidade de absorção. Este ensaio é realizado a frio, conforme a ABNT NBR 9778:2009, com o tempo de permanência de imersão de 96 horas. Ensaíram-se três corpos-de-prova na idade de 28 dias.

A Tabela 4.16 e a Figura 4.9 apresentam resultados do ensaio realizado com concretos sem adição (referência) e com adição de RCD e RMT.

Tabela 4.16 – Resultados do ensaio de absorção por imersão dos concretos

MISTURA	ABSORÇÃO (%)	CV (%)
C1	6,40	8,66
C2	8,76	0,30
C3	13,13	4,76
C4	14,19	3,09
C5	5,4	2,08
C6	11,92	10,02
C7	8,31	6,68
C8	12,58	1,20

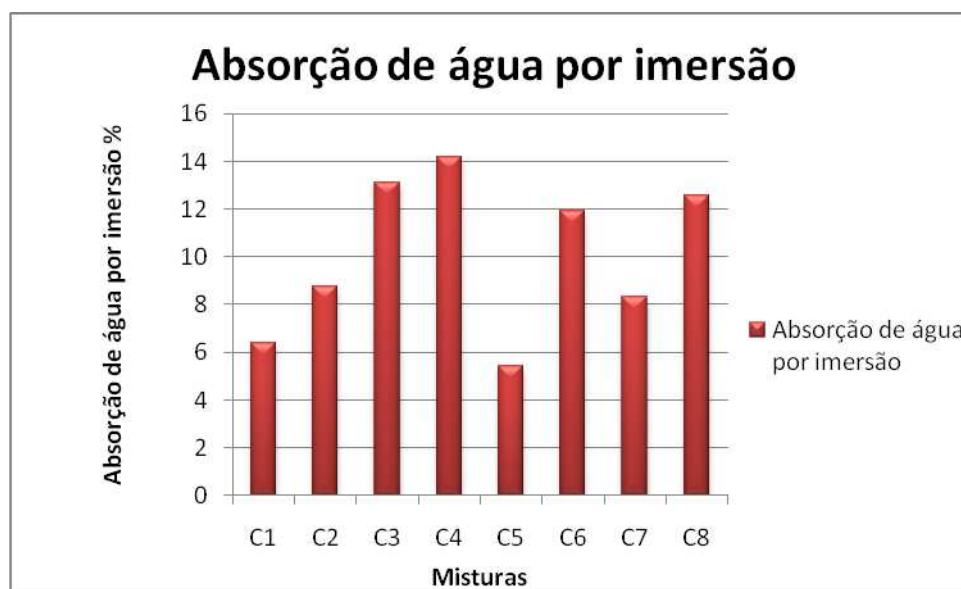


Figura 4.9 – Absorção de água por imersão

Nos concretos de RMT em substituição ao agregado miúdo natural, ficou constatado que os dados obtidos tanto no ensaio de absorção por imersão apresentou uma tendência de decréscimo da massa de água absorvida, tendo

como consequência uma redução da absorção por imersão e do índice de vazios, em todas as misturas analisadas, reduzindo-se a absorção em 15,63%.

Todavia ocorreu o oposto nos concretos com substituição de RCD que apresentou aumento de até 121,72% na absorção em relação ao concreto de referência.

4.8 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Este fenômeno pode ser compreendido pela movimentação da água pelos capilares do concreto. Os resultados para os diferentes tipos de mistura estão apresentados na Tabela 4.17 e na Figura 4.10.

Tabela 4.17 – Absorção de água por capilaridade.

MISTURA	ABSORÇÃO (g/cm²)	CV (%)
C1	0,73	2,93
C2	0,89	4,12
C3	1,25	5,40
C4	1,72	3,70
C5	0,84	3,15
C6	4,58	11,82
C7	3,69	5,27
C8	4,97	1,96



Figura 4.10 – Absorção de água por capilaridade (g/cm²)

Com relação à substituição do agregado de gnaiss pelo de RCD, relacionando-se os valores obtidos, há um aumento significativo da absorção, oriundo provavelmente, do preenchimento e da distribuição dos vazios no concreto com a adição de RMT. Entretanto o emprego do RCD ocasionou um incremento bem maior de finos, causando um maior refinamento da estrutura de poros, formando caminhos preferenciais, favorecendo a absorção capilaridade (Gonçalves, 2000). Segundo Coutinho (1973), uma elevada percentagem de finos, sem atividade química, favorece o aumento da absorção capilar.

4.9 ANÁLISE DE MICROESTRUTURAS POR MICROSCÓPIO ÓPTICO

As Figuras 4.11 e 4.12 ilustram as imagens, obtidas por microscópio óptico, do concreto com areia natural de rio (AMN).

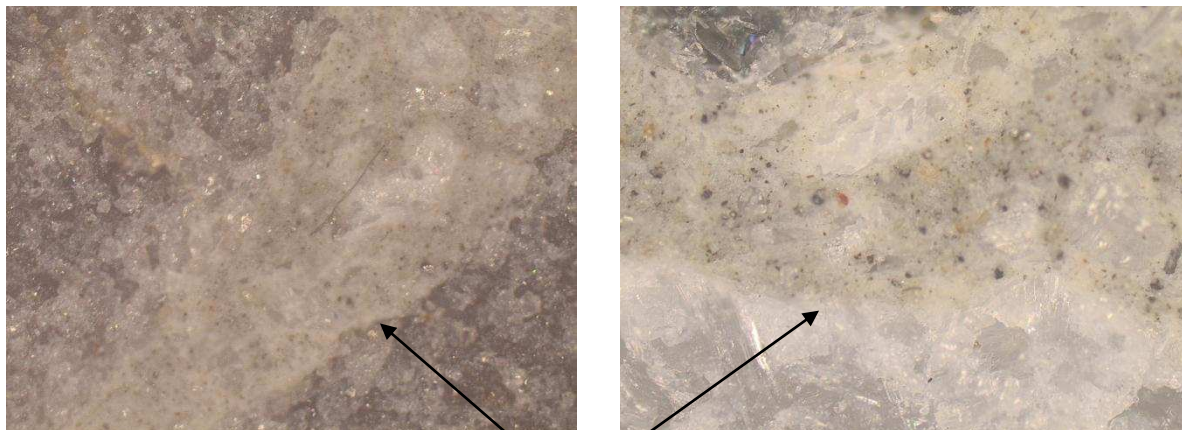


Figura 4.11 - Concreto com AMN – 50x (C1)

Figura 4.12 - Concreto com AMN – 100x (C1)

Interface pasta cimentícia/agregado

As Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 ilustram as imagens, obtidas por microscópio óptico, do concreto com areia natural de rio (AMN) e concreto com areia artificial de mármore (RMT), ou seja, concretos C1 e C5.

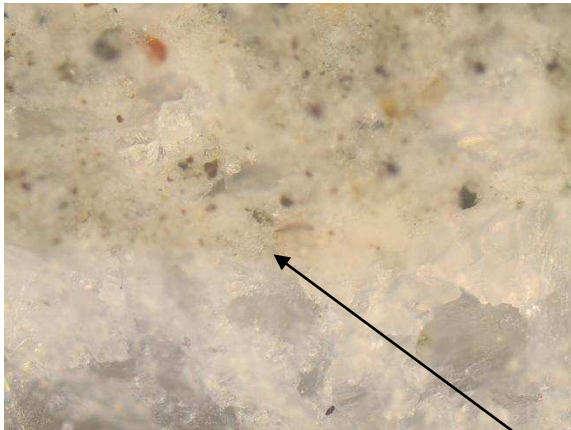


Figura 4.13 - Concreto com AMN – 200x (C1)

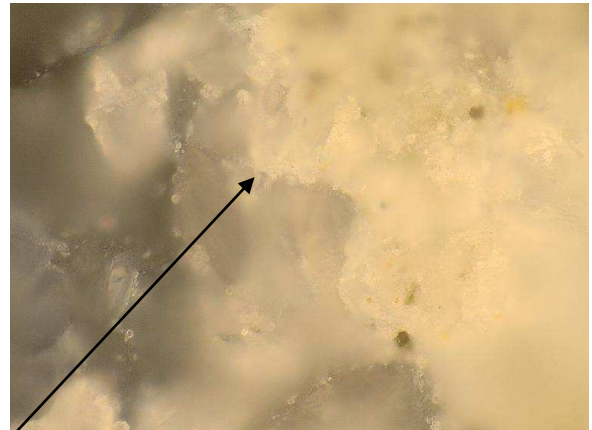


Figura 4.14 - Concreto com RMT – 500x (C5)

Interface pasta cimentícia e agregado

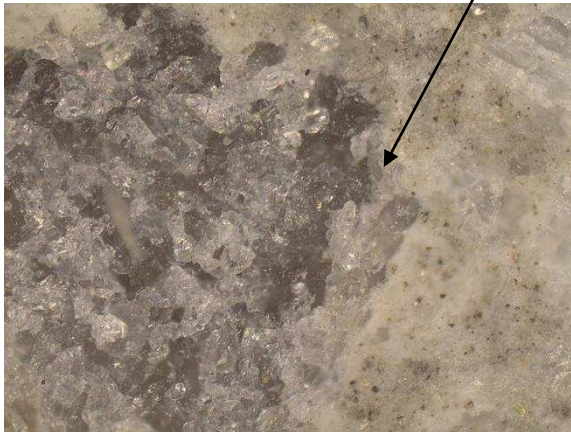


Figura 4.15 - Concreto com RMT – 100x (C5)



Figura 4.16 - Concreto com RMT – 200x (C5)

As Figuras 4.17 a 4.21 ilustram as imagens, obtidas por microscópio óptico, do concreto com areia natural de rio (AMN) e resíduo de construção e demolição (RCD), ou seja, concreto C3.

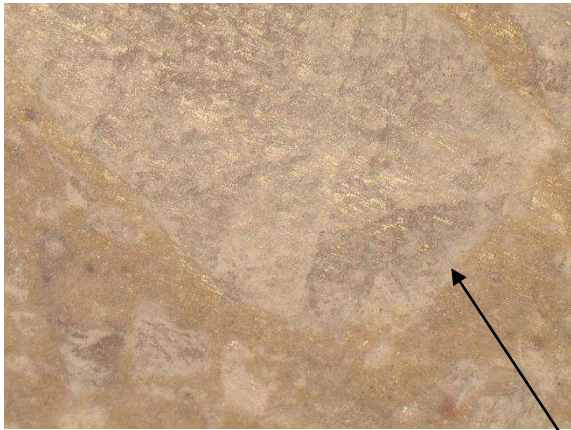


Figura 4.17 - Concreto com AMN e RCD – 50x



Figura 4.18 - Concreto com AMN e RCD – 100x

Interface pasta cimentícia e agregado

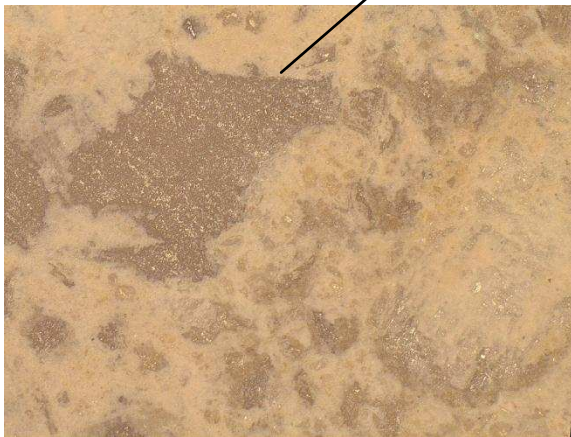


Figura 4.19 - Concreto com AMN e RCD – 50x



Figura 4.20 - Concreto com AMN e RCD – 100x

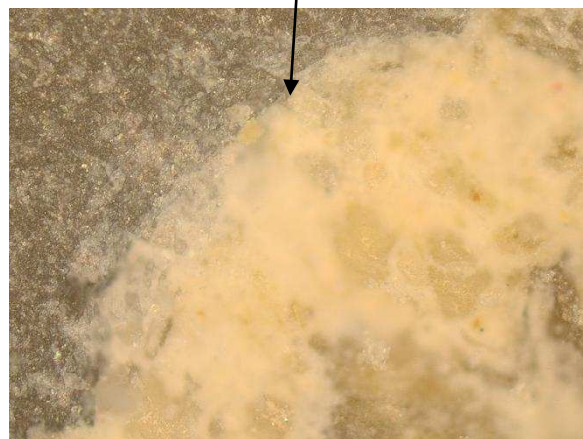
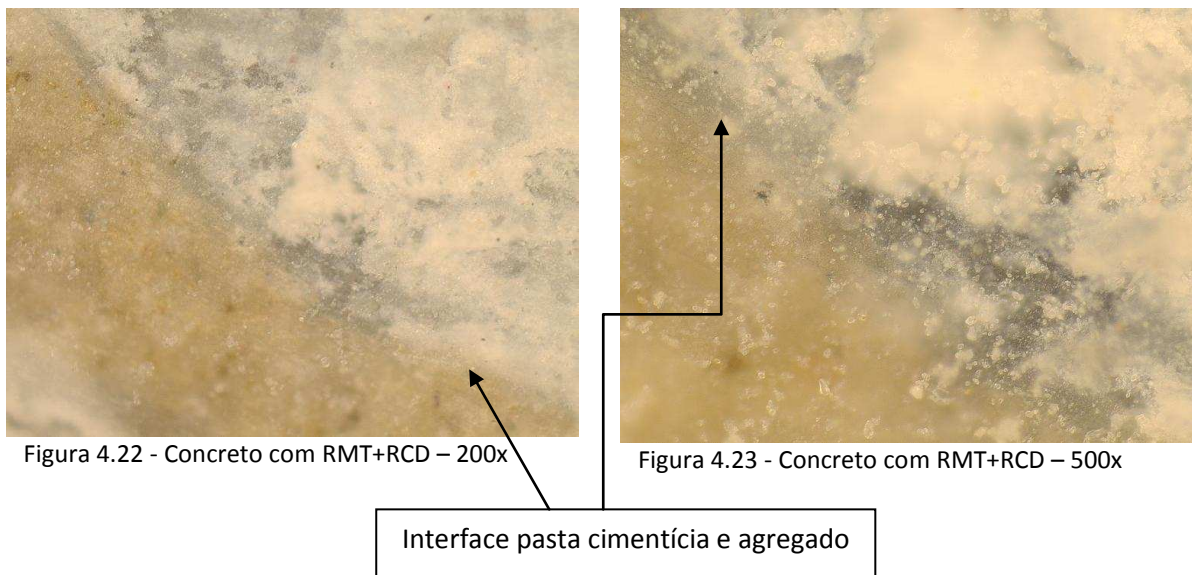
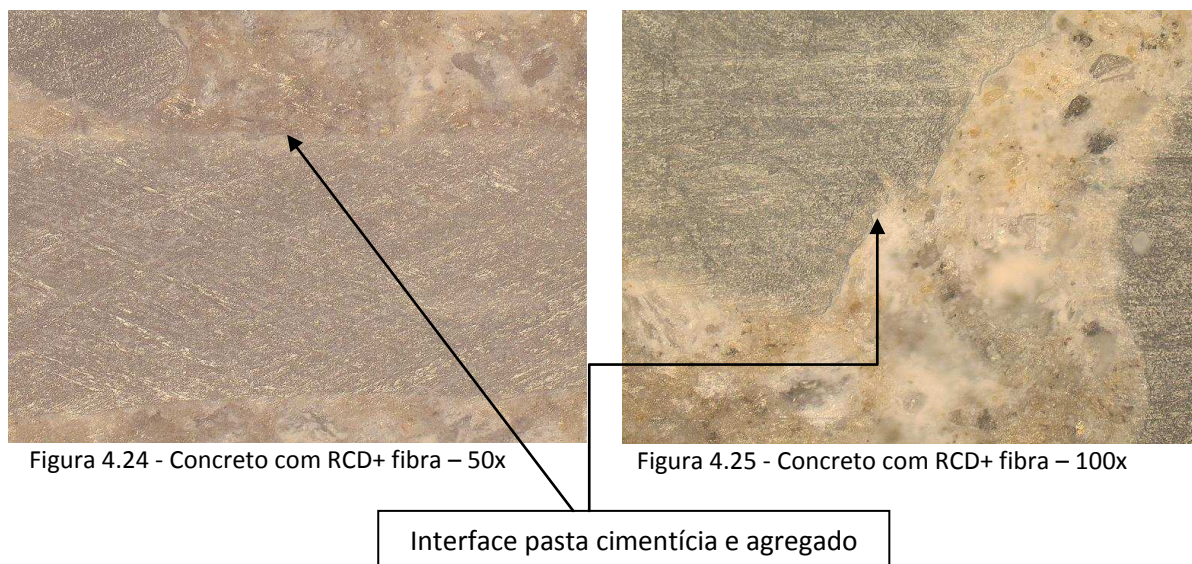


Figura 4.21 - Concreto com AMN e RCD – 500x

As Figuras 4.22 e 4.23 ilustram as imagens, obtidas por microscópio óptico, do concreto com areia de rejeito de mármore triturado (RMT) e resíduo de construção e demolição (RCD), ou seja, concreto C6.



As Figuras 4.24 e 4.25 ilustram as imagens, obtidas por microscópio óptico, do concreto com areia natural de rio e resíduo de construção e demolição (RCD) e fibra, ou seja, concreto C4.



As Figuras 4.26 a 4.30 ilustram as imagens, obtidas por microscópio óptico, do concreto com areia natural de rio e brita de gnaiss e fibra, ou seja,

concreto C2 e do concreto com areia de rejeito de mármore triturado, brita de gnaiss e fibra, ou seja, concreto C7 respectivamente.

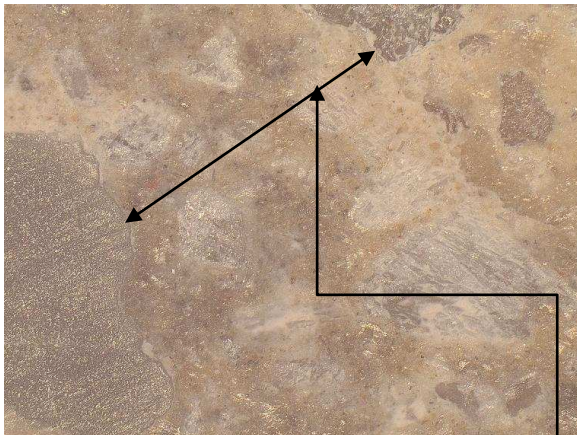


Figura 4.26 - Concreto com AMN, AGN e fibra –

50x

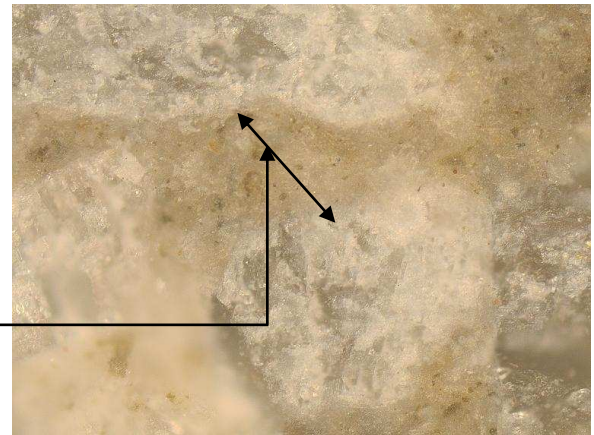


Figura 4.27 - Concreto de AMN, AGN e fibra –

200x

Interface pasta cimentícia e agregado

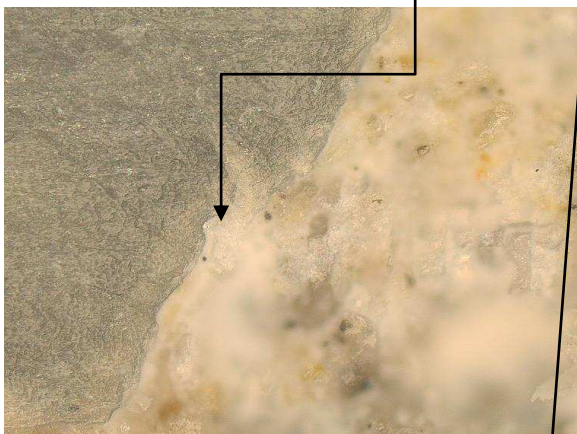


Figura 4.28-Concreto com RMT, AGN e fibra-200x

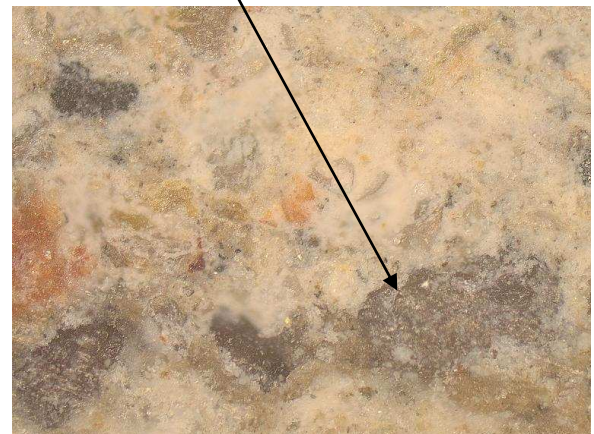


Figura 4.29 - Concreto com RMT, AGN e fibra -100x



Figura 4.30 - Concreto com RMT, AGN e fibra -200x

As Figuras 4.31 e 4.34 ilustram as imagens, obtidas por microscópio óptico, do concreto com areia de rejeito de mármore, resíduo de construção e demolição e fibra, ou seja, concreto C8.



Figura 4.31 - Concreto com RMT, RCD e fibra -50x

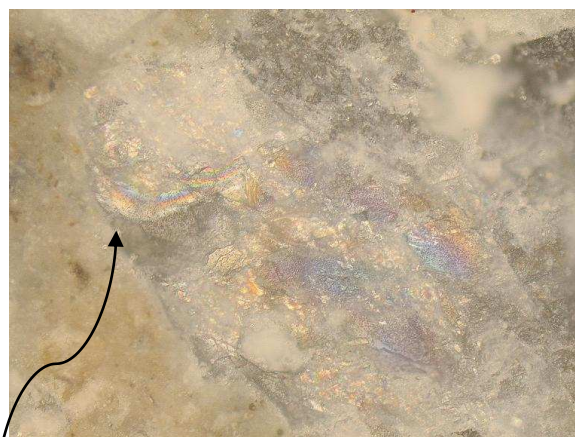


Figura 4.32 - Concreto com RMT, RCD e fibra -100x

Interface pasta cimentícia e agregado

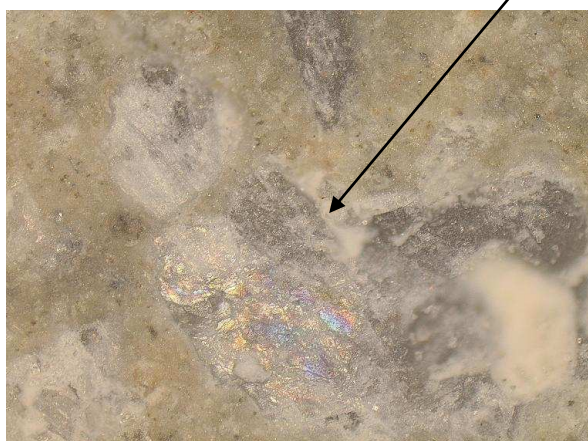


Figura 4.33-Concreto c/ RMT, RCD e fibra 200x

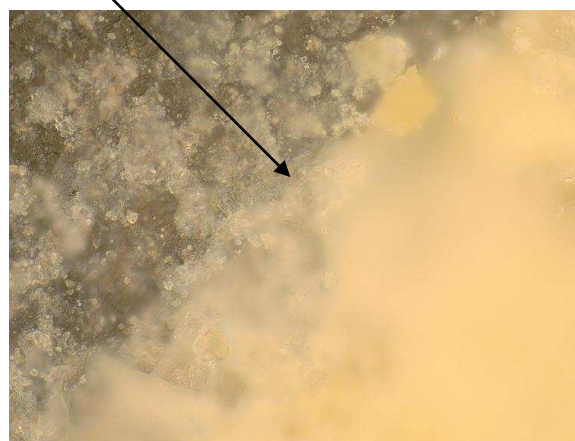


Figura 4.34-Concreto c/ RMT, RCD e fibra -500x

Analisando as Figuras 4.11 a 4.34, obtidas com as imagens por microscópio óptico dos concretos pesquisados, constata-se que a adesividade entre a pasta cimentícia e o agregado graúdo são satisfatórios, não ocorrendo deslocamento ou fissuras. Isto ocorreu devido ao formato dos grãos serem arredondados e homogêneos, proporcionando assim, uma boa colmatação para todos os traços, corroborando com a confiabilidade dos resultados conseguidos no trabalho, visto que não existe descontinuidade que poderiam afetar negativamente os resultados.

Apesar dos valores serem próximos, percebe-se que as imagens corroboram com os resultados encontrados para absorção por capilaridade e por imersão. A porosidade e absorção por imersão, que dependem da presença de poros na superfície do corpo de prova e da permeabilidade destes no interior do compósito, apresentaram valores menores para os concretos com areia de rejeito de mármore. Quando se avalia a absorção por capilaridade, tem-se resultado contrário, o que é justificado pela redução dos diâmetros dos poros, o que permite a maior ascensão da água pelos capilares.

As imagens do microscópio óptico permitem verificar uma boa solidarização entre a matriz cimentícia e o agregado, não sendo visualizados poros nesta interface. Destaca-se também, a visualização de um compósito formado por poucos grãos de maior diâmetro, envoltos pela pasta hidratada e os agregados mais finos, funcionando como filler.

capítulo 5

CONCLUSÕES

5 CONCLUSÕES:

Ao longo da última década, a área de gerenciamento de resíduos sólidos vem ganhando cada vez mais notoriedade e atenção, tanto no Brasil como no exterior. Instituições de pesquisa e grandes setores, tais como o setor da construção civil, produzem volumosas quantidades de estudos com a finalidade de preencher lacunas técnicas sobre esse assunto.

Especificamente no caso da construção civil, o acúmulo de resíduos de construção e demolição em áreas impróprias ou escassas e a demanda crescente por materiais configuram, no contexto econômico atual, um problema também social. E, por esse motivo, o desenvolvimento de técnicas e produtos verdadeiramente sustentáveis e ecológicos é tão importante nas pesquisas acadêmicas quanto propriamente no mercado.

O concreto ecológico, objeto da presente pesquisa, apresenta-se como uma tecnologia inovadora, cujos fatores ambientais e sociais que integram o conceito de desenvolvimento sustentável são suficientemente explorados e atendidos. Os resultados desta pesquisa, que teve como finalidade a avaliação das propriedades físicas e mecânicas do concreto ecológico, foram satisfatórios, corroborando com a revisão bibliográfica.

E, como parte conclusiva desse estudo de pesquisa, dentro da área de materiais não convencionais, realizado com o objetivo de tornar comum o uso de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição

e os agregados provenientes dos resíduos de mármore em concretos estruturais, pode-se tirar de cada parte analisada as considerações a seguir.

Constatou-se que a perda de consistência dos concretos confeccionados com RCD foi maior quando comparada com a do concreto de agregados naturais, pois o agregado reciclado continuou absorvendo água mesmo depois de finalizado a homogeneização da mistura.

Entretanto, nas misturas contendo mármore triturado, houve um incremento na fluidez, sem que houvesse desagregação ou exsudação excessiva do mesmo. Isto se deve a uma compensação ocorrida entre a baixa absorção de água do resíduo de mármore em relação ao agregado de RCD.

Após análise dos resultados de resistências à compressão axial simples identificou-se que os traços contendo agregados miúdos triturados atingiram maiores resistências em relação aos demais. A causa para a obtenção destes resultados pode ser entendida devido à baixa porosidade do RMT (baixa absorção de água), pois de acordo com Buest Neto (2006), a porosidade do agregado pode afetar a resistência à compressão do concreto. Neville (2013) salienta que a influência do agregado na resistência do concreto é proveniente da resistência mecânica do agregado e, também, da sua absorção e da sua aderência.

Cabe mencionar também que, em virtude do RMT melhorar a fluidez do concreto, é possível reduzir o fator água/cimento, o que poderá acarretar em um acréscimo das resistências. No que se refere à mistura C7, quando analisada separadamente, constata-se uma influência positiva, em relação ao concreto de referência. Esta mistura obteve melhor desempenho do que o concreto de referência, resultando num aumento da resistência à compressão axial na ordem de 22 %.

Em contrapartida, quando é inserido o RCD, a resistência à compressão axial simples sofre um acréscimo em menor escala, mas, na ordem de 0,5 %. Com a adição da fibra, há um incremento na resistência de 7,5 %.

Tal fato é proveniente da necessidade do aumento do fator água/cimento, pois o RCD apresentou, como visto no Capítulo 4, um maior teor de material pulverulento. E mais, a fibra diminui o contato entre massa e agregado, conseqüentemente aumentando o número de vazios do conjunto analisado. Além disso, esta propriedade foi diretamente influenciada pelas características da argamassa aderida e da nova zona de transição formada.

Outra causa para as misturas confeccionadas com o RMT obterem melhor desempenho à resistência à compressão axial que os outros concretos, é devido ao fato de possuírem maior densidade de massa no estado endurecido e, conseqüentemente, menor teor de ar aprisionado.

Para os concretos com RMT avaliados neste trabalho, a relação entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial variou de 11% a 13%. Observa-se que os agregados provenientes de rejeito de mármore são mais rugosos do que os agregados convencionais. Esse fato pode justificar as melhores resistências obtidas para concretos fabricados com RMT.

Foi possível identificar que os traços não contendo RCD, atingiram maiores resistências à tração por compressão diametral, contudo os concretos produzidos com RMT apresentaram resistências superiores, sendo que se destaca o concreto confeccionado com o RMT e brita de gnaiss, com valores de resistências maiores em relação aos outros concretos. Todavia, o concreto contendo RMT, brita de RCD e fibra (C8), objeto de estudo desta pesquisa, obteve valores de resistência à compressão diametral superior ao do concreto convencional, que é confeccionado com areia de rio e brita de gnaiss.

A causa para a obtenção destes resultados pode ser entendida por meio da menor angulosidade do agregado miúdo natural, o que possibilita uma mobilidade relativa, afetando a micro-fissuração na interface entre a pasta hidratada e o agregado durante o ensaio. A mobilidade maior para os AMN se deve ao fato de serem mais arredondados, além de possuírem textura superficial mais lisa que os triturados.

O emprego do RMT aumenta a trabalhabilidade do concreto, possibilitando a redução do fator água/cimento, conduzindo a um aumento da resistência à tração.

A variável, tipo de mistura, analisada separadamente, também mostrou influência, em relação ao concreto de referência (AMN e brita de gnaiss). A mistura confeccionada com RMT e Slump = 140 mm obteve melhor desempenho que o concreto de referência, entretanto, com relação à mistura de RMT, RCD e mesma consistência (C6 e C8) ocorreu um decréscimo da resistência à compressão diametral. Este fato já era esperado por conta da necessidade de saturar a brita de RCD e também pelo fato do RCD apresentar como visto no Capítulo 3, a maior presença de material pulverulento.

Para os ensaios de tração na flexão, ao analisar os resultados foi possível observar que diante de todos os concretos produzidos, obtiveram-se melhores resultados nos concretos com agregado miúdo triturado, especialmente os da mistura C7.

Considerando a adição de fibra, as misturas apresentaram pequeno aumento na resistência de 4,85% em relação aos concretos com a mesma similaridade, porém sem a fibra. Sendo assim, pode-se afirmar que as resistências à tração na flexão foram maiores em C2 com relação a C1, em C4 com relação a C3, em C7 com relação a C5 e em C8 com relação a C6. Ainda, pode-se afirmar que na mistura C8, objeto desta pesquisa, foram obtidos melhores resultados à tração na flexão em relação ao concreto de referência C1.

As resistências aos esforços de tração na flexão nos concretos com substituição de RMT se elevaram, porém em proporção inferior ao ganho promovido na resistência à compressão.

Nas análises de regressão das quais foram resultadas da ferramenta Minitab, o tipo de mistura que obtiveram melhores resultados nos ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral e tração na flexão foram os concretos com areia natural de rio, brita de gnaiss e fibra (C2), RMT e brita

(C5) e o RMT, brita de gnaiss e fibra (C7), sendo o C7 que apresentou melhor sinergia entre os insumos.

A aderência entre o agregado e a pasta de cimento é uma propriedade significativa para a resistência do concreto, principalmente para a resistência à flexão. Em parte, a aderência é devida ao intertravamento do agregado e a pasta de cimento hidratada, em virtude da aspereza da superfície das partículas de agregado.

Normalmente, quando a aderência é satisfatória, um corpo-de-prova rompido deve ter algumas partículas de agregados rompidas, além de outras, mais numerosas, arrancadas de seus alojamentos na pasta (NEVILLE, 2013) este fato foi observado nas amostras ensaiadas, e pode-se deduzir que o rejeito de mármore triturado apresenta boa aderência com a pasta de cimento.

Nas imagens analisadas por microscópio óptico dos concretos pesquisados, constatou-se que a adesividade entre a pasta cimentícia e o agregado gráudo são satisfatórios, não ocorrendo deslocamento ou fissuras. Isto ocorreu devido ao formato dos grãos serem arredondados e homogêneos, proporcionando assim, uma boa colmatação para todos os traços, corroborando com a confiabilidade dos resultados conseguidos no trabalho, visto que não existe descontinuidade que poderiam afetar negativamente os resultados.

Estas imagens permitiram verificar uma boa solidarização entre a matriz cimentícia e o agregado, não sendo visualizados poros nesta interface. Destaca-se, também, a visualização de um compósito formado por poucos grãos de maior diâmetro, envoltos pela pasta hidratada e os agregados mais finos, funcionando como filler.

Apesar dos valores serem próximos, percebe-se que as imagens corroboraram com os resultados encontrados para porosidade e absorção por capilaridade e por imersão. A porosidade e absorção por imersão, que dependem da presença de poros na superfície do corpo de prova e da permeabilidade destes no interior do compósito, apresentaram valores menores

para os concretos com areia de rejeito de mármore. Quando se avalia a absorção por capilaridade, tem-se resultado contrário, o que é justificado pela redução dos diâmetros dos poros, o que permite a maior ascensão da água pelos capilares.

Além disso, outra possível causa para os resultados de resistência à tração na flexão obtida está no formato dos grãos, pois os mesmos por serem angulosos podem provocar um travamento melhor das partículas nos concretos com RMT, melhorando as suas resistências à tração na flexão.

No item módulo de elasticidade, ao analisar os resultados observou-se que os concretos com RMT apresentaram maior módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson que os concretos com AMN. À medida que foi substituída a brita de gnaiss por agregado de RCD nos concretos que utilizaram o RMT como agregado miúdo, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson diminuíram. Em suma, os concretos com RMT, brita de gnaiss e fibra (C7), apresentaram um ganho médio no módulo de elasticidade de 80,60% e no coeficiente de Poisson de 46,43%.

Nos concretos que tiveram em sua composição RCD, não ocorreu como nos concretos confeccionados com RMT e brita de gnaiss (seja o concreto com/sem fibras). Em virtude dos RCD propiciarem maior volume de pasta devido à maior presença de material pulverulento, o qual favorece o aumento da porosidade na zona de transição, ocasionando um maior índice de vazios e, aumentando assim a ocorrência de microfissuras na interface pasta-agregado e desta forma, reduzindo o módulo de elasticidade.

Maiores módulos de elasticidade implicam em concretos menos deformáveis, tendo como consequência, uma maior rigidez das estruturas. Além disso, os RMT apresentam partículas com formas visualmente mais angulares e também com textura mais rugosa que os AMN. Isso tende a proporcionar uma menor formação de microfissuras entre agregado e pasta do que os AMN durante o ensaio, aumentando os valores do módulo de elasticidade.

Como consequência ainda da relação acima, nos concretos de RMT em substituição ao agregado miúdo natural, ficou constatado que os dados obtidos para o ensaio de absorção por imersão apresentaram uma tendência de decréscimo da massa de água absorvida, tendo como consequência uma redução da absorção por imersão em todas as misturas analisadas, reduzindo-se a absorção em 15,63%.

Todavia ocorreu o oposto nos concretos com adição de RCD que apresentaram aumento de até 121,72% na absorção em relação ao concreto de referência. Estes concretos mostraram-se mais porosos e permeáveis que os concretos convencionais, o que pode ser um fator limitante para sua utilização, devendo-se evitar sua utilização em locais com grande incidência de umidade, tais como: regiões com índice pluviométrico elevado, concretagens submersas, etc.

Concretos mais porosos e permeáveis tendem a serem menos duráveis por proporcionarem, no caso de aplicações estruturais, menor proteção à armadura contra agentes agressivos externos que podem adentrar no compósito.

Entretanto, isto só virá a ser um fator extremamente limitante do uso desses concretos quando os mesmos forem usados em estruturas aparentes. A própria norma brasileira de cálculo de estruturas de concreto armado menciona que os revestimentos podem ser aplicados ao concreto no intuito de proteger o material das condições ambientais nocivas.

Nos índices de absorção por capilaridade, a substituição do agregado de gnaiss pelo de RCD, percebeu-se um aumento significativo da absorção, oriundo, provavelmente, do preenchimento e da distribuição dos vazios no concreto com a adição de RMT.

Entretanto o emprego do RCD ocasionou um incremento bem maior de finos, causando um maior refinamento da estrutura de poros, formando caminhos preferenciais, favorecendo a absorção por capilaridade. Uma elevada percentagem de finos, sem atividade química, favorece o aumento da absorção capilar.

As propriedades dos concretos revelaram-se sensíveis ao aumento da porosidade dos agregados graúdos de RCD, de forma que os valores destas tenderam, em alguns casos, a ser bem próximos ou até superar os valores das propriedades dos concretos convencionais, conforme já se comentou.

Para a introdução do RCD e RMT como materiais alternativos para confecção de concretos sustentáveis, a preocupação com o nível de resistência destes agregados reciclados demonstra ser um caminho promissor na busca de um maior entendimento da influência destes sobre as propriedades dos concretos com eles confeccionados, ao mesmo tempo em que permite serem determinadas aplicações mais adequadas para os concretos com agregados reciclados, inclusive dentro das opções de uso estrutural. Para alcance desses objetivos, mais pesquisas precisarão ser feitas com o concreto com materiais reciclados estudando ainda suas propriedades e, indo mais além, o seu desempenho em estruturas.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. *NBR 5733* – Cimento Portland de alta resistência inicial, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 10004* – Resíduos sólidos – Classificação, Rio de Janeiro, 2004.

_____. *NBR 10006* – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

_____. *NBR 10024* – Chapa dura de fibras de madeira, especificação Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 11578* – Cimento Portland composto, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 12142* – Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 5735* – Cimento Portland de alto-forno, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 5738* – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR 5739* – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2007.

_____. *NBR 6118* – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR 7211* – Agregados para concreto – Especificação, Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 7215*, Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, método de ensaio, Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NBR 7218* – Teor de argila em torrões e materiais friáveis, Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 7219* – Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos, Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 7222* – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 1994.

_____. *NBR 8522* – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR 9776* – Agregados – Determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Chapman, Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 9778* – Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão, Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 9779* – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por capilaridade, Rio de Janeiro, 1995.

_____. *NBR 9935* – Agregados – Terminologia, Rio de Janeiro, 2005.

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

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

_____. *NBR NM 49* – Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas, Rio de Janeiro, 2001.

_____. *NBR NM 52* – Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR NM 53* – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro, 2002.

_____. *NBR NM 66* – Agregados – Constituintes mineralógicos dos agregados naturais, Rio de Janeiro, 1996.

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

_____. *NM 102* – Concreto – Determinação da exsudação, Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NM 131* – Agregados – Determinação da retração hidráulica ou higrométrica do concreto, Rio de Janeiro, 1997.

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

_____. *NM 31* – Agregados – Determinação do teor de partículas leves, Rio de Janeiro, 1994.

_____. *NM 44* – Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis, Rio de Janeiro, 1995.

_____. *NM 51* – Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”, Rio de Janeiro, 2000.

_____. *NM 53* – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro, 2002.

_____. *NM 66* – Agregados – Constituintes mineralógicos dos agregados naturais, Rio de Janeiro, 1996.

AITCIN, P. C.; NEVILLE, A. M.; ACKER, P. (1997). Integrated View of Shrinkage Deformation. *Concrete International*, p.35-41, September.

ALMEIDA, DIAS & ARROJA Declaração Ambiental de Produto para Cerâmicos de Alvenaria. Seminário Paredes, Porto, 2011.

ALTHEMAN, Dener. Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil. Campinas: FAPESP, 2002. Relatório de Pesquisa.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1992). Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures. Designation ACI 209- R92.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1993). Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. Designation C 157-93.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1996). Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. Designation C 490-96.

ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas Aplicações, IV Seminário. IBRACON – Comitê Técnico 206 Meio Ambiente. São Paulo, 2001. p.43-56.

ANGULO, Sérgio Cirelli. Características de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos. São Paulo: USP, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em <<http://www.teses.usp.br>> Acesso em: 2013.

ANGULO, Sérgio Cirelli. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. São Paulo: USP, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2000.

ANGULO, Sérgio Cirelli; JOHN, Vanderley Moacyr. Determinação dos teores de concreto e argamassa em agregados graúdos de RCD reciclados. In:

Congresso Brasileiro do Concreto, 2001, Foz do Iguaçu. Anais. Paraná: Ibracon. 1 CD-ROM.

ANGULO, Sérgio Cirelli; JOHN, Vanderley Moacyr; ULSEN, Carina; KAHN, Henrique. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo. Anais. São Paulo: Antac. 1 CD-ROM.

ANGULO, Sérgio Cirelli; KAHN, Henrique; JOHN, Vanderley Moacyr; ULSEN, Carina. Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 2003, São Paulo. Anais. São Paulo: Ibracon. 1 CD-ROM.

ARAÚJO, Regina Célia Coura; (2007). Estudo sobre Aproveitamento do resíduo de Raspas de Borracha e Fibra de Bambu na Construção Civil – Um Estudo de Caso. Dissertação de Mestrado – UFF.

ASSIS, C. S.; OLIVEIRA, M. E. (2001). Resíduo de Concreto: Uma Contribuição para a Revisão da Norma NBR 10004 [CD-ROM]. *IN: 430 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, Foz do Iguaçu, Paraná, IBRACON.

BALAGURU, P.N.; SHAH, S.P. Fiber reinforced cement composites. USA. McGraw-Hill. 1992.

BALLISTA, L. P. (2003). Microconcretos Leves Estruturais com Agregados Graúdos Reciclados Modificados com Látex Estireno-Butadieno – Estudo das Propriedades Físicas, Mecânicas e de Durabilidade. São Carlos, 126p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BANTHIA, N.; TROTTIER, J-F. Concrete reinforced with deformed steel fibers - Part II: Toughness characterization. *ACI Materials Journal*, v.92, n.2, Detroit, USA, mar - abr., 1995b. p146-54.

BARBOSA, M. T. G. B.; SANTOS, W. J.; SATHLER, L. M.; TEIXEIRA, K. M. O Emprego do Rejeito de Mármore Triturado na Confecção de Concreto Auto-Adensável - RCC: 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2012 – Maceió, 2012.

BARRA, M.; VÁZQUEZ, E. (1996). The Influence of Retained Moisture in Aggregates from Recycling on the Properties of New Hardened Concrete. *Waste Management*, v.16, n.3, p. 113-117.

BARRA, M.; VÁZQUEZ, E. (1998). Properties of Concrete with Recycled Aggregates: Influence of Properties of the Aggregates and their Interpretation. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate"*, Thomas Telford, London, p. 19-30.

BASTOS, P. K. X.; CINCOTTO, M. A. (2000). Retração de Compósitos à Base de Cimento. São Paulo – PCC/USP.

BENTUR, A.; AND AKERSM, SAS. The Microestrutura and Ageing of Cellulose Fibre Reinforced Cement Composites Cured in Normal Environment. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* Vol 2(11) 1989. Pp 99-109.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fiber reinforced cementitious composites. United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.

BERALDO, A.L. Tecnologias e materiais alternativos de construção. 1. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003.

BLOK, R.; EGMOND, E.V.; GLAUMANN, M.; GERVASIO, H. General Framework for Sustainability Evaluation of the Built Environment, 2011, v. 1, p. 3-29, University of Malta, Malta.

BOEGH, E.; HANSEN, T. (1985). Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled-Aggregate Concrete. *Journal of American Concrete Institute Proceedings*, v.82, n.5, p.648-652, September-October.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. Introdução à Engenharia Ambiental – O Desafio do Desenvolvimento Sustentável, Pearson Prentice Hall – 2ª Edição, 2007, parte-1.

BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. Avaliação do Ciclo de Vida dos Edifícios – Impacte Ambiental de Soluções Construtivas, 1ª Edição, 2011, Portugal.

BRANDÃO, Ana Maria da Silva; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. Construção e Meio Ambiente. Porto Alegre: Habitare, 2006.

BUEST NETO, G. T. Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento portland (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal do Paraná, 2006.

BUTTNER, A. M.; Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2003.

BUTTNER, A. M.; FREITAS, A. A.; SALES, A.; CORDEIRO, J. S. (2000). Gerenciamento de Lodo de ETAs – Remoção de Água Através de Leitões de Secagem e Codisposição da Fase da Sólida em Matrizes de Cimento e Resíduos da Construção Civil. *Relatório de Iniciação Científica PROSAB 2 – Tema 4*, 85p., Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

BUTTNER, Alexandre Marques. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. São Carlos: USP, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2003.

Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2014.

CAFANGE, D. M. P. J; Estudo de métodos e medidas auxiliares para o controle da resistência à carbonatação de concretos estruturais de cimento Portland. (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2010.

CAMPOS, Antônio Rodrigues de; LUZ, Adão Benvindo da; CARVALHO, Eduardo Augusto de. Separação em meio denso. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. Tratamento de Minérios. 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

CÁNOVAS, M. F.. Patologia e Terapia do Concreto Armado. São Paulo, Pini, 1998.

CARNEIRO, Alex Pires. et al. Características do entulho e do agregado reciclado. In: CASSA, José Clodoaldo Silva; CARNEIRO, Alex Pires; BRUM, Irineu Antônio Schadach de. Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção - Projeto Entulho Bom. Salvador: Edufba, 2001.

CARNEIRO, Fabiana Padilha. et al. Resíduos de construção e demolição na região metropolitana do Recife - RMR: um estudo de caso. In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo. Anais. São Paulo: Antac. 1 CD-ROM.

CARRIJO, Priscila Meireles. Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto. São Paulo: USP, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2005.

CARRISSO, Regina Coeli C.; CORREIA, Júlio César G. Classificação e peneiramento. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. Tratamento de Minérios. 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

CECCATO, M. R.; NUNES, N. L.; e FIGUEIREDO, A. D. Estudo do controle da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço. In. IV Congresso Ibero americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle da Qualidade - CONPAT 97. Porto Alegre, Brasil. 21 a 24 de Outubro de 1997. Volume II. Anais. p.539-46.

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

CECCATTO, D. M.. Avaliação da utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concreto – propriedades mecânicas. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Porto Alegre, 2003. 285p.

CHAVES, A. P., *et al.* Tecnologia mineral e suas aplicações na reciclagem de resíduos de construção e demolição. *In*: 61 Congresso Annual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Anais... Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.

CHEN, How-Ji; YEN, Tsong, CHEN, Kuan-Hung. Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, [S.l.], n. 33, p. 125-132, 2003.

CHEN, L.; MINDESS, S.; MORGAN, D.R. Specimen geometry and toughness of steel-fiber-reinforced concrete. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*. American Society of Civil Engineers, v.6, Nº 4, Nov., 1994. p. 529-41.

COELHO, P. E. (2001). Reciclagem de Entulho – O Melhor ainda está por vir. <http://www.unilivre.org.br/centro/experiencias/experiencias/> (abr/ 2012).

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. *Evaluation of the Time Dependent Behavior of Concrete*. Bulletin D'Information, Nº 199.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA (2002). *Resolução CONAMA 307 de 05 de julho de 2002*. <http://www.conama.org.br> (dez/2014).

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, Resolução. 307. 2002. Brasília. Disponível em: <http://www.mma.gov.br> Acesso em: 2013.

COSPER, Stephen D.; HALLENBECK, William H.; BRENNIMAN, Gary R. Construction and Demolition Waste - Generation, Regulation, Practices, Processing, and Policies. Chicago: University of Illinois, 1993.

COURA, C.V.G. *Análise Experimental Sobre A Substituição Do Agregado Miúdo Por Mármore Triturado Na Confecção De Concreto*. 2009. 189f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2009.

COURA, C.V.G. *Estudo da influência da dimensão do agregado e do corpo-de-prova na resistência à compressão axial do concreto*. 2006. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói.

DAFICO, J. A. Materiais de Construção, 8ª edição, 256p., 2006.

DAMINELI, B.,L. Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. São Paulo: USP, 2007, 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

DAVE, U.; DESAI, Y.M. Interaction between temperature and sulfates: effects on polypropylene. In: DHIR, R.K; et al. Harnessing fibres for concrete construction. 1. Scotland: IHS BRE, 2008b. 353-364.

DAVE, U.V.; DESAI, Y.M. Effects of polypropylene, polyester and glass fibres on strength of concrete. In: DHIR, R.K; et al. Harnessing fibres for concrete construction. 1. Scotland: IHS BRE , 2008a. 45-54.

DE PAUW, C., apud SOUSA, J. G. G. Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto – aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. Dissertação de mestrado em estruturas e construção civil da UNB, Brasília/DF, julho de 2001.

Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2014.

DIEUDONNÉ, Vincent; HEWITT, Sam; WYK, Danie Van. Jigging the South-African coals - a new challenge. 2001. Disponível em: <<http://www.batemanjigging.com>> Acesso em: 2015.

DOLAN, Patrick J.; LAMPO, Richard G.; DEARBORN, Jacqueline C. Concepts for reuse and recycling of construction and demolition waste. [S.I.]: US Army Corps of Engineers, 1999. Relatório Técnico. Disponível em <http://www.cecer.army.mil> Acesso em: 2015.

DOLARA, E.; CAIRNS, R.; DI NIRO, G. (1998). RAC Prestressed Beams. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate"*, Thomas Telford, London, p. 255-262.

FERREIRA, S. R. M.; PEREIRA, H. R. O.P.; VERAS, L. M. Avaliação das Características e Propriedades do Concreto com Uso de Agregados Reciclados de Construção Civil – RCC: 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2012 – Maceió, 2012.

FIGUEIRA; Hedda Vargas de O.; ALMEIDA, Salvador L. M de; LUZ, Adão Benvindo da. Cominuição. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. Tratamento de Minérios. 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras de aço. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/260 - São Paulo : EPUSP, 2000. 68 p.

FIGUEIREDO, A. D. Rheological Behavior of Dry-Mix Shotcrete. In: II International Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures. ACI/CANMET and UFRGS/UFSC/USP. Proceedings. Gramado, Brazil, June 1-4, 1999.

FIGUEIREDO, A.D. Concreto Projetado: Fatores Intervenientes no Controle da Qualidade do Processo. São Paulo, 1992. 284p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FIGUEIREDO, A.D. Parâmetros de Controle e Dosagem do Concreto Projetado com Fibras de Aço. São Paulo, 1997. 342p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FIGUEIREDO, A.D.; CECCATO, M.R. e TORNERI, P. Influência do comprimento da fibra no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço. 39a REIBRAC. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo. 1997. 10p.

FIGUEIREDO, A.D.; HELENE, P.R.L. O ensaio de punção de placas para o controle da tenacidade no concreto com fibras de aço. In. IV Congresso Ibero americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle da Qualidade - CONPAT 97. Porto Alegre, Brasil. 21 a 24 de Outubro de 1997. Volume II. Anais. p.469-76.

FIGUEIREDO, C. R. Contribuição ao estudo da capacidade de proteção de argamassas com sílica ativa para reparos estruturais. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM 009A/98, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1998. 157p.

FIGUEIREDO, C. R. Estudo da Retração de Argamassa com adição de Sílica Ativa para Reparos Estruturais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41, 1999. Anais. Salvador – BA: IBRACON, 1999.

FREIRE, W.J. Materiais Alternativos de Construção. In: FREIRE, W.J.; (<http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/noticias-da-engenharia/6060>, em 29/08/2013).

FURNAS (1997). Concretos (massa, estrutural, projetado e compactado com rolo) – Ensaio e Propriedades. Editora Pini, São Paulo.

GOMES, Paulo César Correia et al. Projeto desentulho para a cidade de Maceió. Maceió: Sebrae, Fundepes, Ufal, 2005. Relatório Técnico.

GÓMEZ-SOBERÓN, José M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - An experimental study. Cement and Concrete Research, [S.l.], n. 32, p. 1301-1311, 2002.

GONÇALVES, R. D. (2000). Agregados Reciclados de Resíduos de Concreto – Um novo Material para Dosagens Estruturais. São Carlos, p.130-148 Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

GONZALEZ, M.A.S.; RAMIRES, M.V.V. Análise de gestão dos resíduos gerados dentro dos canteiros de obras. In: IV SIBRAGEC, I ELAGEC, 2005, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, 2005. CD-ROM.

GUIMARÃES, André Tavares da Cunha. Propriedades do concreto fresco. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. 2v.

HABITARE – PROGRAMA DE TECNOLOGIA EM HABITAÇÃO. Alternativas para Redução do Desperdício de Materiais nos Canteiros de Obras, 2002. <http://habitare.infohab.org.br> (abril/2014).

HADI, M. N. S. An Investigation of the Behaviour of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete Slabs. In: DHIR, R.K; et al. Harnessing fibres for concrete construction. 1. Scotland: IHS BRE, 2008. 233-244.

HADJIEVA-ZAHARIEVA, R.; DIMITROVA, E.; BUYLE-BODIN, François. Building waste management in Bulgaria: challenges and opportunities. Waste Management, [S.l.], n. 23, p. 749-761, 2003.

HANSEN, T.; NARUD, H. (1983). Strength of Recycled Concrete made from Crushed Concrete Coarse Aggregate. *Concrete International – Design and Construction*, v.5, n.1, p.79-83, January.

HELENE, P. R. L; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. Ed. PINI, São Paulo, 1993.

HELENE, P.R.L. Corrosão em armaduras para concreto armado. PINI Editora. São Paulo, 1986.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. Manual de dosagem e controle de concreto, São Paulo: Pini, 1993.

HIL, A. K. Y.; AL-MAHAIDI, R. Torsion Capacity of CFRP Strengthened Reinforced Concrete Beams. *Journal of Composites for Construction*, v. 11, n.1, p 71-80, jan.2007.

IBRACON, Propiedades Básicas [CD-ROM]. *IN: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, Foz do Iguaçu, Paraná, IBRACON.

IZQUIERDO, I.S. Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na Construção Civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo: EPUSP, 2000. 113p (Tese de Livre Docência).

JOHN, V. M.. Cimento de escória ativada com silicatos de sódio. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995. 200p.

JOHN, V. M.. Cimento de escória ativada com silicatos de sódio. Tese (Livre docência). Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 102p.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/cetesb> Acesso em : 02.11.2012.

JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. *Coletânea HABITARE:Utilização de resíduos na construção habitacional*. Porto Alegre: Ed. Rocha e John, 2003, Vol. 4, Cap. 2, p.8-71.

JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/> Acesso em : 07.11.2012.

JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/> Acesso em: 12.03.2013.

JOHN, V. M.; ZORDAN, S. E.. Research & development methodology for recycling residues as building materials. *Waste Management* 21, 2001. p.213-219.

JOHN, Vanderley Moacyr; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de resíduos de construção. 2000. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2014.

JOHN, Vanderley Moacyr; ANGULO, Sérgio Cirelli; KAHN, Henrique. Controle da qualidade dos agregados de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos a partir de uma ferramenta de caracterização. In: SATTLER, JUNGAMNN, A. *Building Rubble Treatment Using the alljig in Europe and USA*. 1997. Disponível em: <<http://www.b-i-m.de>> Acesso em: 2014.

KAMRATH, P.; HECHLER, O. Demolition and recycling of Demolition Rubble After Deconstruction, *Integrated Approach to Life-time Structural Engineering*, 2011, v. 2, p. 364, Germany.

KHALOO, Ali R. Properties of concrete using crushed clinker brick as coarse aggregate. *ACI Materials Journal*, [S.l.], v. 91, n. 2, p. 401-409, 1994.

KITAMURA, S. Estudo Experimental da Influência do Teor de Fibras e das Dimensões dos Corpos-de-prova na Resistência por Compressão Diametral e sua Relação com a Tração na Flexão. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal Fluminense – Niterói, 2006.

KITAMURA, S. (2011). Estudo Experimental Sobre a Influência da Substituição do Agregado Miúdo Natural por Granito Triturado, nas Propriedades do Cimento Portland, 208 f. Tese de doutorado – Universidade Federal Fluminense – Niterói.

KOHLER, G.; KURKOWSKI, H. (1998). Optimising the Use of RCA. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: "Sustainable*

Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate”, Thomas Telford, London, p. 69-82.

KOHLER, G.; KURKOWSKI, H. Optimising the use of RCA. 1998. Disponível em: <<http://www.b-i-m.de>> Acesso em: 2014.

LARANJEIRAS, A. C. R. Estruturas de concreto duráveis – Uma chave para o sucesso do desenvolvimento sustentável. Revista IBRACON, São Paulo , p. 68-76, jul/set, 2002.

LATTERZA, L. M. - Concreto com Agregado Graúdo Proveniente da Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição. Um Novo Material para Fabricação de Painéis Leves de Vedação. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 1998.

LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001. 290 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – UFRGS, Porto Alegre.

LEITE, M. B.; PEDROZO, P. H.; DAL MOLIN, D. C. (2000). Agregado Reciclado para Concreto: Proposta de Desenvolvimento de um Método para Determinação da Taxa de Absorção do Material [CD-ROM]. *IN: 420 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, Fortaleza, Ceará,

LEITE, Mônica Batista. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre: UFRGS, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. (2001). Influência dos Agregados Reciclados no Módulo de Elasticidade de Concretos com Agregados Convencionais e Agregados Reciclados, - da Teoria à Prática [CD-ROM]. *IN: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, Foz do Iguaçu, Paraná, IBRACON.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Durabilidade de concretos produzidos com resíduos minerais de Construção Civil. *In: III Seminário “Desenvolvimento*

Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil: Práticas Recomendadas. São Paulo, 06/junho, 2000, p.3-14.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. *Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção*. São Paulo: EPUSP, 2005. 12p (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP).

LEVY, Salomon Mony. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. São Paulo: USP, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2001. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2014.

LEVY, Salomon Mony; HELENE, Paulo. Mitos e verdades sobre o efeito pozolânico dos resíduos cerâmicos e argamassas de cimento, produzidas em São Paulo. In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo. Anais. São Paulo: Antac. 1 CDROM.

LI, V. C.; MATSUMOTO, T. Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effect of interfacial bond degradation. *Cement & Concrete Composites*, v.20, 1998., p339-51.

LI, V.C. Performance driven design of fiber reinforced cementitious composites. In: SWAMY, R. N. Fourth Rilem International Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete. RILEM Symposium FRC 92. Proceedings. 1992.

LIMA, José Antônio Ribeiro de. Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos. São Paulo: USP, 1999. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 1999. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br> Acesso em: 2014.

LIMA, P. R. L.; et al. Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal. *Revista Brasileira de Engenharia*

Agrícola e Ambiental, Campina Grande, 11, 6, nov. / dez. 2007. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-4366200700060001>>. Acesso em: fev. 2012.

LINS, Fernando Antonio Freitas. Concentração gravítica. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. Tratamento de Minérios. 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

LISBÔA, E.M. Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas. 2004. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFAL, Maceió.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Freitas. Introdução ao tratamento de minérios. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. Tratamento de Minérios. 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

MACHADO, A. T.. Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 135p.

MACIEL, T. B. Cerâmica vermelha produzida com resíduos da construção, 2008, Escola SENAI Mário Amato, SBC/SP

MAIA, M. P. F. - ECODOR: PROPOSTA DE MISTURA SUSTENTÁVEL DESTINADA À FABRICAÇÃO DE DORMENTES DE CONCRETO. Dissertação de Mestrado em Ambiente Construído da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.

MAIDL, B. R.; Steel Fibre Reinforced Concrete. Ernest & Sohn, 1995.

MAIDL, B. Stahlfaserbeton. Berlin. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1991.

MARINKOVIC, S.; MALÊSEV, M.; RADONJAMIN, V.; Concreto Reciclado Como Agregado para Produção de Estruturas de Concreto. Sérvia, 2010.

MASUERO, A.B.; VILELA, A.F.; DAL MOLIN, D.C.C. Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS, 2000, São Paulo. Anais... São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2000. 19p. (cd-rom).

MATEUS, R. Avaliação da Sustentabilidade de Construção – Proposta para o Desenvolvimento de Edifícios mais Sustentáveis, 2009. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade do Minho, Guimarães.

MATTOS, G.; WAGNER, L.; Consumption of Materials in the United States 1900-1995. *US Geological Survey*, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (1994). Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo, Pini.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: microstructure, properties and materials*. Third edition. United States of America, 2005.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo J. Melaragno. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

MESTERS, K; KURKOWSKI, H. Density separation of recycling building materials by means of jig technology, 1997. Disponível em: <<http://www.b-i-m.de>> Acesso em: 2014.

MOHAMAD, G.; NAKANISHI, E., Y., B.; BARBOSA, N., L. Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Resíduo de Construção em Substituição do Agregado Natural em Concretos - RCC: 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2012 – Maceió, 2012.

MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, F. J. N. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, 49, 262-267, 2003.

MOURA, W. A.. Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em

Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000. 207p.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso, *Sitientibus*, jan/jun 2002, n. 26, p.49-61.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J.P. Utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (mármore e granito) na Construção Civil. *In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. Foz do Iguaçu, 7-10 maio, 2002, p.1653-1659.

NASCIMENTO, J. F. F. ET AL. Estudo Comparativo entre as Propriedades do Concreto Convencional e Concreto Compactado com Rolo, 36, 1984. Anais. Porto Alegre – RS: IBRACON, 1997.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. (Tradução: Salvador Giammusso). 2. ed. São Paulo: PINI, 2013.

NEVILLE, Adam M. *Propriedades do Concreto*. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

NUNES, R. L. S.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L.; FERREIRA, H. C. Reciclagem de rejeitos de mármore e granito utilizados em substituição a matérias primas convencionais para produção de revestimentos cerâmicos. *In: 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica*. Proceedings... João Pessoa, 15-18/junho, 2003, p.25-33.

OIKONOMOU, Nik. D. Recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, [S.l.], n. 27, p. 315-318, 2005.

OLIVEIRA, D. F.; SANTOS, V. S.; JUNIOR, F. O. Q.; FARIAS, C. A. S.; MELO, A. B.; CARVALHO, B. Q.; LIRA, H. L.; NEVES, G. A. Avaliação da durabilidade de compósitos de concreto de cimento Portland produzidos com resíduos da construção civil. *In: 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica*. Proceedings... João Pessoa, 15-18/junho, 2011, p.170-182.

OLIVEIRA, M. Barra de; VAZQUEZ, E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Mangement*, [S.I.], v. 16, n. 1-3, p. 113-117, 1996.

OLIVEIRA, Márcio Joaquim Estefano de. Materiais descartados pelas obras de construção civil: Estudo dos resíduos de concreto para reciclagem. Rio Claro: Unesp, 2002. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 2002.

OLIVEIRA, T.M.; *Potencialidade da Utilização de Misturas de Escórias como Material Cimentício*. 2007. 108f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2007.

ONU Agenda 21, 1992. Disponível na THE FLETCHER SCHOOL Library Resources – Multilateral Projects. Disponível em: <http://www.tufts.edu/fletcher/multi/chrono.html> Acesso em: 12.03.2013.

PENNSYLVANIA CRUSHER. Handbook of crushing. Broomall: Pennsylvania Crusher, 2003. Crushed Concrete Coarse Aggregate. *Concrete International*, [S.I.], p. 79-83, 1983. Disponível em: <<http://www.penncrusher.com>> Acesso em: 2015.

PENTTALA, V. Concrete and sustainable development. *ACI Materials Journal*, Sep.-Oct., p. 409-416, 1997.

PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de cimento Portland*. 10. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1983.

PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de cimento portland*. 6 ed. Atual. e revisada. Por Vladimir Antônio Paulon. Porto Alegre: Globo, 1978.

PINTO, T. P. Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SindusCon-SP 1. ed. São Paulo: SINDUSCON-SP, 2005, Introdução, p. 6-8.

PINTO, T. P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. 1999. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – POLI-USP, São Paulo.

PINTO, Tarcísio de Paula. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo: USP, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 2014.

POLISSENI, A. E.. Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. 220p.

PONTES, I. F.; STELLIN JÚNIOR, A. Aproveitamento de resíduos de serrarias reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 143p.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. (2006). Use of Recycled Aggregates in Moulded Concrete Bricks and Blocks. *Construction and Building Materials*, v.16, n.5, p.281-289, July.

POON, Chi S. et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*. [S.I.], n. 34, 31-36, 2004.

POON, Chi S. Management and recycling of demolition waste in Hong Kong. *Waste Management*, [S.I.], n. 15, p. 561-572, 1997.

POON, Chi S.; CHAN, Dixon. Feasible use of recycled concrete aggregate sand crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and Building Materials*. [S.I.], n. 20, 578-585, 2006.

QUEBAUD, Mirian Ramos. et al. Influência do teor em agregados provenientes da reciclagem de materiais de demolição (agregados reciclados) na permeabilidade do concreto. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 1999, Salvador. Anais. Bahia: Ibracon. 1 CD-ROM.

RIBEIRO JÚNIOR, J. I Métodos Estatísticos Aplicados à Melhoria da Qualidade. Editora UFV, Viçosa, 2012.

RILEM RECOMMENDATION (1994). Specifications for Concrete with Recycled Aggregates. *Materials and Structures*, vol. 27, 557-559.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Aproveitamento de resíduos na construção. *Coletânea HABITARE:Utilização de resíduos na construção habitacional*. Porto Alegre: Ed. Rocha e John, 2003, Vol. 4, Cap. 3, p.72-93.

ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. Introdução. *Coletânea HABITARE:Utilização de resíduos na construção habitacional*. Porto Alegre: Ed. Rocha e John, 2003, Vol. 4, Cap. 1, p.4-7.

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

SAMPAIO, João Alves; LUZ, Adão Benvindo da. Separação magnética e eletrostática. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M de. *Tratamento de Minérios*. 4.ed. rev. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

SERNA, H.A., REZENDE, M.M. *Agregados para Construção Civil*, DNPM/SP, 2009.

SHAH, S. P. Fiber Reinforced Concrete. In: *HANDBOOK OF STRUCTURAL CONCRETE*. New York: McGraw – Hill Book Company, 1983.

SHI, C.; KRIVENKO, P. V.; ROY, D. *Alkali-Activated Cements and Concretes*, Taylor and Francis Group, London, NY, 2006, 376 pp.

SHI-CONG, K; BAO-JIAN, Z; CHI-SUN, P. Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete Construction and Building Materials, *Edinburgh*, 28, 2012. 549-556. Disponível em: < www.elsevier.com/locate/conbuildmat>. fev. 2012.

SILVA, I. J. (2000). *Contribuição ao Estudo dos Concretos de Elevado Desempenho: Propriedades Mecânicas, Durabilidade e Microestrutura*. São

Carlos, 279p., Tese (Doutorado), Área Interunidades – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo.

SILVA, P. F. Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana. Ed. PINI, São Paulo, 1995

SILVA, P. F.; PITTA, A. C. (2000). A Importância da Retração Hidráulica na Durabilidade das Estruturas de Concreto [CD-ROM]. *IN: 420 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, Fortaleza, Ceará, IBRACON.

SÜSSEKIND, J. C.. Curso de concreto. v.1, 4ed. Rio de Janeiro: GLOBO, 1985.

SYMONDS Group Ltd.. Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts. 1999. Relatório de Pesquisa. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_report.htm> Acesso em: 2014.

TAM, Vivian W.Y.; TAM, C. M. Crushed aggregate production from centralized

TAVAKOLI M., Tensile and Compressive Strengths of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. ACI SP – 142-4, 1994. Pp 61-72.

THYSSENKRUPP. Disponível em: <<http://www.thyssenkrupp.com>> Acesso em: 2015.

TRÄNKLER, Josef O. V.; WALKER, Isa; DOHMANN, Max. Environmental impact of demolition waste - an overview on 10 years of research and experience. Waste Management, [S.l.], v.16 n. 1-3, p. 21-26, 1996.

TRIO ENGINEERED PRODUCTS. Disponível em: <http://www.trioproducts.com> Acesso em: 2015.

TROXELL, G. E.; RAPHAEL, J. M.; DAVIS, R. E. (1958). Proceedings ASTM, v.58, p.1101-1120 apud MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. (1994). Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. Editora Pini, São Paulo.

VÀZQUEZ, E. Utilización de resíduos em la C.E.E.: Aspectos políticos e ambientais. Estado del arte y normalización. In: RECICLAGEM DE

RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL. ANAIS. Abril, 1997. São Paulo. p.64-66.

VIER, S. Brasileiro produz por ano meia tonelada de resíduos de construção civil. Revista Rede Brasil Atual. Disponível em: <
[http://www.redebrasilatual.com.br /temas/cidades/2011/10/brasil-perde-r-8-bi-por-ano-por-nao-reciclar-residuos-da-construcao-civil/](http://www.redebrasilatual.com.br/temas/cidades/2011/10/brasil-perde-r-8-bi-por-ano-por-nao-reciclar-residuos-da-construcao-civil/)>. Acesso em: ago. 2013.

ZORDAN, Sérgio Eduardo. A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto. Campinas: Unicamp, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 1997. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br> Acesso em: 2014.