UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

Curso de Graduação em Engenharia Civil

RODRIGO SPOHR

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURA DO CONCRETO RECICLADO COM AGREGADO GRAÚDO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Ijuí/RS

2014

RODRIGO SPOHR

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURA DO CONCRETO RECICLADO COM AGREGADO GRAÚDO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Eder Claro Pedrozo

Ijuí/RS

2014

RODRIGO SPOHR

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURA DO CONCRETO RECICLADO COM AGREGADO GRAÚDO EM CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo membro da banca examinadora.

Ijuí, 10 de dezembro de 2014

Prof. Eder Claro Pedrozo
Me. pela Universidade Federal de Santa Maria - Orientador
Prof. Cristina Eliza Pozzobon
Coordenadora do Curso de Engenharia Civil/UNIJUI

BANCA EXAMINADORA
Prof. Diorges Carlos Lopes
Me. pela Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Eder Claro Pedrozo
Me. pela Universidade Federal de Santa Maria - Orientador

A minha família, por sua capacidade de acreditar e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foram o que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela graça da vida, por ter saúde, por não perder a fé, por me guiar durante momentos e caminhos turbulentos e quando não parecia haver mais nada a ser feito, ele sempre me mostrava uma solução.

Aos meus pais Jauri e Tania, a minha irmã Debora e a todos os meus familiares que me transmitiram apoio, palavras de incentivo e ajuda em momentos de indecisões.

Aos Mestres e orientadores Bóris Casanova Sokolovicz, que iniciou a jornada e Eder Claro Pedrozo, que a concluiu, obrigado pela orientação, esclarecimentos e dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores que tive durante a vida acadêmica, obrigado por me transmitirem o seu conhecimento.

A todos os meus colegas e amigos que estiveram comigo durante o período da graduação, obrigado pelo companheirismo e amizade.

Aos laboratoristas Luiz e Tulio, que me ajudaram desde o primeiro ensaio até o ultimo.

A nossa secretária Cassiana, que tanto enchi a paciência pedindo informações.

A toda a equipe da Frizzo Engenharia, em especial ao seu Eugenio Frizzo por me dar a oportunidade de trabalhar e conhecer o “mundo” da engenharia civil, ao Tarcisio, por estar comigo desde o começo e que juntamente com seu Eugenio me transmitiram seu conhecimento e me ajudaram a dar os primeiros passos na arte de projetar.

Sem citar nomes, a todos os meus amigos de fora do mundo acadêmico, obrigado por existirem e por sua amizade.

A cada um, uma lembrança, uma saudade, vocês serão sempre lembrados, valeu galera!

Rodrigo Spohr

"As pessoas perdem a saúde para juntar dinheiro. Depois perdem o dinheiro para recuperar a saúde. E por pensarem ansiosamente no futuro, esquecem do presente de tal forma, que acabam por não viver nem o presente, nem o futuro. E vivem como se nunca fossem morrer. E morrem como se nunca tivessem vivido..."

RESUMO

SPOHR, Rodrigo. **Estudo das propriedades mecânicas e microestrutura do concreto reciclado com agregado graúdo em concreto de cimento Portland.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI. Ijuí, 2014.

Atualmente o tema sustentabilidade tem sido muito discutido por diversos pesquisadores em todas as áreas da engenharia. Neste contexto, o concreto de cimento Portland é abordado com muita intensidade. Sabe-se que o cimento é o segundo material mais utilizado pelo homem e que o processo de fabricação do mesmo promove um grande lançamento de CO_2 na atmosfera. Outro ponto relevante em relação ao concreto é que a exploração dos agregados também promove um considerado impacto ambiental. Assim, tem-se que partir para soluções sustentáveis na utilização do concreto de cimento Portland, onde os resíduos têm-se mostrado uma alternativa viável. Esses resíduos substituem parcialmente tanto o material aglomerante como os materiais inertes. O presente trabalho realiza o estudo das propriedades mecânicas e de microestrutura do concreto com agregado graúdo reciclado. Foram utilizados os corpos de prova provenientes do controle tecnológico que o Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUI realiza. Foram elaborados quatro traços com substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado, nos teores de 100%, 70%, 40% e 10% e foi comparado com o traço de referência contendo 100% de agregado graúdo natural, para as relações água/cimento 0,45 e 0,55. Foram realizados os ensaios de resistência a compressão axial, resistência a tração na compressão diametral e agua quimicamente combinada. Os resultados demonstram que se tratando de resistência, quanto maior for a porcentagem de mistura de agregado graúdo reciclado, menor é sua capacidade de resistir a esforços.

Palavras-chave: Concreto. Resistência. Agregados.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Faixas granulométricas 21
Figura 02 – Brita industrial 23
Figura 03 – Unidade recicladora de concreto fresco 26
Figura 04 – Dimensões gerais dos componentes microestruturais do concreto 36
Figura 05 – Estrutura provável dos silicatos hidratados 38
Figura 06 – Curva granulométrica do agregado miúdo 43
Figura 07 – Aspecto visual do agregado miúdo 43
Figura 08 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural 45
Figura 09 – Aspecto visual do agregado graúdo natural 45
Figura 10 – Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto 47
Figura 11 – Aspecto visual do agregado graúdo reciclado de concreto 48
Figura 12 – Slump test 51
Figura 13 – Corpos-de-prova moldados 52
Figura 14 – Ensaio de resistência a compressão axial 53
Figura 15 – Ensaio de resistência a tração na compressão diametral 54
Figura 16 – Amostra sendo misturada no agitador eletromagnético 55
Figura 17 – Amostra na mufla a temperatura de 550ºC 55
Figura 18 – Resistência a compressão vs idade; Relação a/c 0,45 57
Figura 19 – Resistência a compressão vs idade; Relação a/c 0,55 57
Figura 20 – Evolução da resistência vs idade; Relação a/c 0,45 58
Figura 21 – Evolução da resistência vs idade; Relação a/c 0,55 59
Figura 22 – Resistência a tração vs idade; Relação a/c 0,45 60
Figura 23 – Resistência a tração vs idade; Relação a/c 0,55 61
Figura 24 – AC vs idade; Relação a/c 0,45 62
Figura 25 – AC vs idade; Relação a/c 0,55 63

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Tipos de cimento e suas composições 18
Quadro 02 – Características físicas e químicas do cimento Portland pozolânico CP IV-32 ... 18
Quadro 03 – Classificação do agregado miúdo quanto a dimensão das partículas 20
Quadro 04 – Requisitos granulométricos para agregado miúdo..... 21
Quadro 05 – Porcentagens dos tamanhos dos grãos 21
Quadro 06 – Divisão das britas de acordo com o tamanho das partículas 22
Quadro 07 – Idades de rompimento dos corpos-de-prova 40
Quadro 08 – Composição granulométrica do agregado miúdo 42
Quadro 09 – Composição granulométrica do agregado graúdo natural..... 44
Quadro 10 – Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto 47
Quadro 11 – Desvio-padrão a ser adotado em função das condições de preparo do concreto 49
Quadro 12 – Tolerâncias admitidas para consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Eficiência da execução de um plano de gestão de resíduos de uma obra 24
Tabela 02 – Características físicas do cimento CP IV-32..... 41
Tabela 03 – Características físicas do agregado miúdo 42
Tabela 04 – Características físicas do agregado graúdo natural..... 44
Tabela 05 – Características físicas do agregado graúdo reciclado de concreto 46
Tabela 06 – Consumo de materiais; Relação a/c 0,45 49
Tabela 07 – Consumo de materiais; Relação a/c 0,55 50
Tabela 08 – Valores do abatimento do tronco de cone; Relação a/c 0,45 51
Tabela 09 – Valores do abatimento do tronco de cone; Relação a/c 0,55 51
Tabela 10 – Resultados da resistência a compressão axial e evolução das resistências; Relação a/c 0,45..... 56
Tabela 11 – Resultados da resistência a compressão axial e evolução das resistências; Relação a/c 0,55..... 56
Tabela 12 – Resultados da resistência a tração na compressão diametral; Relação a/c 0,45... 60
Tabela 13 – Resultados da resistência a tração na compressão diametral; Relação a/c 0,55... 60
Tabela 14 – Teor de AC e evolução do teor; Relação a/c 0,45 62
Tabela 15 – Teor de AC e evolução do teor; Relação a/c 0,55 62

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

a/c – Relação água/cimento

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABESC – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC – Água quimicamente combinada

AGN – Agregado graúdo natural

AGRC – Agregado graúdo reciclado de concreto

ARC – Agregado reciclado de concreto

ARM – Agregado reciclado misto

ASTM – American Society for Testing and Materials

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

C_2S – Silicato bicálcico

C_3S – Silicato tricálcico

$CA(OH)_2$ – Hidróxido de cálcio

CCP – Concreto de cimento Portland

CH – Hidróxido de cálcio

CP – Corpos-de-prova de concreto

Fcj – Resistencia prevista do concreto a “j” dias

Fck – Resistência característica do concreto

H_2O – Água

LEC – Laboratório de Engenharia Civil

RCD – Resíduos de construção e demolição

RSU – Resíduos sólidos urbanos

TAR 10 – Traço de agregado reciclado 10

TAR 40 – Traço de agregado reciclado 40

TAR 70 – Traço de agregado reciclado 70

TAR 100 – Traço de agregado reciclado 100

TR – Traço de referência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **14**
2. REVISÃO DA LITERATURA **16**
2.1 HISTÓRICO DO CONCRETO 16
2.2 CIMENTO POZOLÂNICO CP IV-32 17
2.2.1 Propriedades físicas **18**
2.2.2 Densidade **18**
2.2.3 Finura **19**
2.2.4 Exsudação **19**
2.2.5 Trabalhabilidade **20**
2.3 AGREGADO MIÚDO 20
2.4 AGREGADO GRAÚDO 22
2.5 AGREGADO GRAÚDO RECICLADO 23
2.5.1 Agregado reciclado de concreto **25**
2.5.2 Britagem do concreto **27**
2.5.3 Propriedades do agregado reciclado de concreto **28**
2.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO E ENDURECIDO 30
2.6.1 Estado fresco **30**
2.6.2 Estado endurecido **33**
2.7 MICROESTRUTURA DO CONCRETO 35
2.7.1 Estrutura dos poros **36**
2.7.2 Água quimicamente combinada **37**
3. METODOLOGIA **39**
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA 39
3.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA 39
3.3 MATERIAIS UTILIZADOS 40
3.3.1 Aglomerante **40**
3.3.1.1 Cimento Portland **40**
3.3.2 Agregados **41**
3.3.2.1 Agregado miúdo **42**
3.3.2.2 Agregado graúdo natural **44**
3.3.2.3 Agregado graúdo reciclado de concreto **46**

3.3.3 Água **48**
3.4 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS 48
3.4.1 Dosagem dos traços **48**
3.4.2 Ensaio de resistência a compressão axial **52**
3.4.3 Ensaio de resistência a tração através da compressão diametral **53**
3.4.4 Água quimicamente combinada **54**
4. RESULTADOS **56**
4.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL 56
4.1.1 Evolução das resistências **58**
4.2 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL 60
4.3 ÁGUA QUIMICAMENTE COMBINADA 62
CONCLUSÃO **64**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **67**

1. INTRODUÇÃO

O conceito de desenvolvimento sustentável, afirma que devemos ser capazes de suprirmos as necessidades de desenvolvimento atuais, sem comprometermos as demandas por recursos naturais das gerações futuras, ou seja, desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro. Portanto, para que isso seja possível devemos reduzir a exploração de matérias primas, reutilizar os recursos disponíveis e reduzir a emissão de poluentes, promovendo assim um menor impacto ambiental na produção de insumos.

Nesse contexto, Helene et al. (2010) afirma que o concreto é hoje o segundo material mais consumido pela humanidade, perdendo apenas para a água. Mehta (1994 apud JACQUES, 2013) estima que o consumo anual de concreto seja da ordem de 5,5 bilhões de toneladas/ano. Entre os principais fatores que justificam essa demanda por concreto estão: o alto desempenho do concreto, aliado com baixo custo de fabricação, a ampla gama de utilização do concreto principalmente quando utilizado em conjunto com o aço, a facilidade de emprego, entre outras. O concreto de cimento Portland, quando dosado de forma correta, permite a execução de estruturas nos mais variados ambientes agressivos, suportando as solicitações de projeto, com eficácia.

Durante a realização desta pesquisa, buscamos abordar o uso de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), em substituição do agregado graúdo natural (AGN). Valverde (2001 apud JACQUES, 2013) cita que no Brasil os agregados para a construção civil são provenientes de um segmento do setor mineral que produz matéria-prima bruta ou beneficiada de emprego imediato na indústria da construção civil, basicamente areia e rocha britada. Por se tratarem de produtos de baixo valor final e constituírem recursos minerais dos mais acessíveis à população, a possibilidade de substituição da areia e da brita por outros produtos naturais ou industrializados é quase nula. Ele afirma que nos últimos anos, a necessidade de reciclar os entulhos da construção civil criou a possibilidade de que parte dos produtos resultantes desse processo viessem a substituir o agregado natural.

De acordo com Angulo et al. (2011), os resíduos de construção e demolição (RCD), são de maneira geral uma preocupação relativamente recente no Brasil, diferente da realidade de outros países como EUA, Alemanha e Holanda, onde já existem políticas que privilegiam a compra de produtos ambientalmente sustentáveis. Portanto, sabedores que a construção civil é uma atividade geradora de grande quantidade de resíduos sólidos, devemos buscar alternativas

para o reaproveitamento dos mesmos, e a consequente diminuição dos impactos ambientais e econômicos das atividades de engenharia civil.

Buttler (2003) afirma que é inevitável a geração de resíduos em um processo de fabricação. Quando não há um conhecimento da tecnologia apropriada para a reciclagem de um resíduo, certamente será depositado na natureza, resultando em inúmeros problemas ambientais. Ele, afirma que entre os resíduos gerados pela construção civil, os de concreto tem alto potencial de utilização, devido ao conhecimento de suas propriedades básicas (fck, idade, etc) e, seu menor grau de contaminação por outros materiais quando comparado com outros resíduos da construção.

Geralmente os resíduos de concreto não tem destinação correta e não tem tratamento específico o que proporciona degradação do meio ambiente. Ao utilizarmos resíduos de concreto como agregado para execução de novas misturas resultará em redução dos custos envolvidos com a exploração e transporte dos agregados naturais e, além disso, reduzirá substancialmente o volume de resíduos despejados no meio ambiente (BUTTLER, 2003).

A presente pesquisa buscou responder se: “As propriedades mecânicas e de microestrutura do concreto com agregado graúdo reciclado se assemelham as propriedades do concreto com agregado graúdo natural?”. O trabalho tem como objetivo analisar através de dosagem experimental a influência da substituição do AGN, por AGRC, nas seguintes proporções 100%, 70%, 40% e 10%, com idades de 7, 28 e 91 dias, para relações água/cimento (a/c) 0,45 e 0,55. Para isso foram realizados para todos os traços, ensaios de resistência à compressão axial em todas as idades, resistência à tração na compressão diametral para as idades de 28 e 91 dias e água quimicamente combinada para as idades de 28 e 91 dias, com a finalidade de observar os desempenhos das variáveis relacionadas com a resistência mecânica e de microestrutura do concreto.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 HISTÓRICO DO CONCRETO

De acordo com Petrucci (1968), concreto é basicamente o resultado da mistura de cimento, água, agregado graúdo e agregado miúdo, de maneira que o cimento ao ser hidratado pela água, forma uma pasta que envolve e adere aos agregados, podendo ser moldado em diversas formas, sendo este de fundamental importância na construção civil.

Logo que misturado, deve proporcionar condições de plasticidade que permitam operações de manuseio que são fundamentais no lançamento nas fôrmas, adquirindo com o tempo, pelas reações que então se processarem entre aglomerante e água, coesão e resistência (PETRUCCI, 1968).

O mesmo autor Petrucci (1968), comenta que para obter um concreto durável, resistente, econômico e de bom aspecto, deve-se estudar, as propriedades de cada um dos materiais componentes. O proporcionamento dos materiais que envolvem o concreto é conhecido como dosagem ou traço, sendo um fator muito importante, pois através dele, pode-se obter concretos mais, ou menos resistentes.

Na elaboração do concreto deve-se levar em consideração a qualidade e a quantidade da água a ser utilizada, pois ela está diretamente ligada a reação química que transforma o cimento em uma pasta aglomerante. Se sua quantidade e ou qualidade forem inadequadas, a reação poderá não ocorrer por completo, afetando a resistência e a permeabilidade do concreto. A relação entre o peso da água e do cimento utilizados na dosagem é chamada de relação água/cimento (PETRUCCI, 1968).

Para Neville (1997), a resistência é considerada como a propriedade mais importante do concreto, embora em muitos casos práticos, outras características como a durabilidade e a permeabilidade sejam, de fato, mais importantes.

Mehta & Monteiro (1994) definem a resistência de um material como a capacidade deste resistir à tensão sem ruptura. No concreto, portanto, a resistência é relacionada com a tensão requerida para causar a fratura e é sinônimo do grau de ruptura no qual a tensão aplicada alcança seu valor máximo.

Segundo Helene & Terzian (1992), a propriedade do concreto que melhor o qualifica é a resistência a compressão, desde que sua dosagem e preparação tenham sido levados em conta,

também os aspectos de trabalhabilidade e durabilidade. Qualquer modificação na uniformidade, natureza e proporcionamento dos materiais poderá ser indicada por uma variação na resistência.

A resistência do concreto é função do processo de hidratação do cimento, o qual é relativamente lento, tradicionalmente as especificações e ensaios de resistência do concreto são baseados em corpos de prova curados em condições específicas de temperatura e umidade por um período de 28 dias (HELENE & TERZIAN, 1992).

Os autores Mehta & Monteiro (1994) citam que, a resistência varia de acordo com os parâmetros do corpo de prova (dimensões, geometrias e estado de umidade), parâmetros de carregamento (tipo de tensão e velocidade de aplicação da tensão), e resistência das fases componentes, que depende da porosidade da matriz (relação a/c, aditivos minerais, grau de hidratação e teor de ar aprisionado e incorporado), porosidade do agregado, e porosidade da zona de transição (em função da relação a/c, aditivos minerais, características de exsudação, grau de compactação, grau de hidratação e a interação química entre agregado e pasta de cimento).

2.2 CIMENTO POZOLÂNICO CP IV-32

Segundo Wolenski et al. (2012), este tipo de cimento caracteriza-se pela presença de material pozolânico em sua composição. Os materiais pozolânicos não reagem com a água da forma como são obtidos. Entretanto, quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando origem a uma nova composição com propriedades aglomerantes. Por essa razão, os materiais pozolânicos são utilizados conjuntamente com o clínquer, pois o hidróxido de cálcio $CA(OH)_2$ é um produto normalmente resultante da hidratação deste.

Ainda de acordo com Wolenski et al. (2012), a adição desse tipo de material modifica a microestrutura do concreto, diminuindo a permeabilidade, a difusibilidade iônica e a porosidade capilar, aumentando a estabilidade e a durabilidade do concreto.

A quantidade de material pozolânico (escórias siderúrgicas ácidas, microssílica, rejeito silico aluminoso de craqueamento de petróleo, cinzas de resíduos vegetais, entre outros) fica condicionada à quantidade de materiais carbonáticos empregados, podendo responder por valores entre 15% e 50% da massa seca do cimento (WOLENSKI et al., 2012).

O quadro 01 apresenta dados com os tipos de cimento e suas composições.

Quadro 01 – Tipos de cimento e suas composições

Cimento	Tipo	Clínquer + Gesso (%)	Escoria Siderúrgica (%)	Material Pozolânico (%)	Calcário (%)
CP I	Comum	100	-	-	-
CPI – S	Comum	95-99	1–5	1-5	1-5
CP II – E	Composto	56-94	6–34	-	0-10
CP II – Z	Composto	76-94	-	6-14	0-10
CP II – F	Composto	90-94	-	-	6-10
CP III	Alto-forno	25-65	35-70	-	0-5
CP IV	Pozolânico	45-85	-	15-50	0-5
CP V – ARI	Alta resistência inicial	95-100	-	-	0-5

Fonte: Adaptado de Jacques (2013)

O quadro 02 apresenta dados com as características físicas e químicas do cimento Portland pozolânico CP IV-32.

Quadro 02 – Características físicas e químicas do cimento Portland pozolânico CP IV-32

DADOS TÉCNICOS DO FABRICANTE – CIMENTO PORTLAND CP IV-32	
Resíduo na peneira ABNT 200	< 8%
Tempo de início/fim de pega	1 hora / 12 horas
Resistência a compressão aos 7 dias de idade	20 MPa
Resistência a compressão aos 28 dias de idade	32 MPa
Característica principal	Baixo calor de hidratação

Fonte: Adaptado do boletim técnico do fabricante (2011)

2.2.1 Propriedades físicas

Bauer (2000) cita que as propriedades físicas do cimento Portland são consideradas sob três aspectos distintos; propriedades do produto em sua condição natural, em pó, da mistura de cimento e água e proporções convenientes de pasta e, finalmente, da mistura da pasta com agregado padronizado (as argamassas).

2.2.2 Densidade

O mesmo autor Bauer (2000) diz que a densidade absoluta do cimento Portland é usualmente considerada como 3,15 embora, na verdade, possa variar para valores ligeiramente

inferiores. A utilidade do conhecimento desse valor se encontra nos cálculos de consumo do produto nas misturas geralmente feitas com base nos volumes específicos dos constituintes. Nas compactações usuais de armazenamento e manuseio do produto, a densidade aparente do mesmo é da ordem de 1,5.

2.2.3 Finura

Ainda segundo Bauer (2000), a finura do cimento é uma noção relacionada com o tamanho dos grãos do produto. É usualmente definida de duas maneiras distintas: pelo tamanho máximo do grão, quando as especificações estabelecem uma proporção em peso do material retido na operação de peneiramento em malha de abertura definida, e pelo valor da superfície específica (soma das superfícies dos grãos contidos em um grama de cimento).

A finura, mais precisamente a superfície específica do produto, é o fator que governa a velocidade da reação de hidratação. O aumento da finura melhora a resistência, particularmente a resistência da primeira idade, diminui a exsudação e outros tipos de segregação, aumenta a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão dos concretos e diminui a expansão em autoclave (BAUER, 2000).

2.2.4 Exsudação

Fenômeno que consiste na separação espontânea da água de mistura, que naturalmente aflora pelo efeito conjunto da diferença de densidades entre o cimento e a água e o grau de permeabilidade que prevalece na pasta. É um tipo de segregação, fenômeno mais geral, entendido como separação dos diversos constituintes das argamassas e dos concretos por via de ação de diferentes causas, conduzindo, finalmente, a uma heterogeneidade indesejável. A coesão nos concretos e argamassas frescas é responsável pela estabilidade mecânica dos mesmos, antes do início da pega, e é medida pelo valor de resistência do cisalhamento (BAUER,2000).

2.2.5 Trabalhabilidade

Para Bauer (2000), é uma noção subjetiva, aproximadamente definida como o estado que oferece maior ou menor facilidade nas operações de manuseio com as argamassas e concretos frescos.

2.3 AGREGADO MIÚDO

Agregados são materiais que podem ser de origem natural ou artificial e que devido a sua rigidez, pode ser considerado o "esqueleto" do concreto, sua junção é formada através da pasta de cimento, sendo um maciço granular do qual não possui forma nem volume marcante, de regra inerte, com tamanhos variados, possuindo qualidades para o uso em obras de engenharia (TARTUCE; GIOVANETTI, 1990).

O termo areia, é segundo o Sumário Mineral (DNPM, 2012), usado para identificar um tipo de recurso mineral granular, com tamanho em um intervalo definido (2 a 0,06mm), de composição silicática, em geral com predominância do mineral quartzo. Atualmente, compreende, além dos materiais naturais, a chamada areia artificial, produto da britagem de rochas, normalmente subproduto da indústria de rochas britadas.

Na construção civil a areia é considerada como agregado miúdo, sendo a mesma um produto natural que tem origem da fragmentação das rochas devido a condicionantes ambientais, tais como erosão das rochas, ação dos ventos, ação da água. A norma NBR 7211 define areia ou agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT de 4,8mm e ficam retidos na peneira ABNT de 0,075mm.

O quadro 03 apresenta dados da classificação do agregado miúdo quanto a dimensão das partículas.

Quadro 03 – Classificação do agregado miúdo quanto a dimensão das partículas

Tipo de areia	Tamanho nominal (mm)		Módulo de finura (MF)
	Mínima	Máxima	
Muito fina	0,15	0,6	MF<2,0
Fina	0,6	1,2	2,0<MF<2,4
Média	1,2	2,4	2,4<MF<3,2
Grossa	2,4	4,8	MF>3,2

Fonte: Adaptado da NBR 7211 (2004)

O quadro 04 apresenta dados com os requisitos granulométricos para o agregado miúdo.

Quadro 04 – Requisitos granulométricos para agregado miúdo

Peneiras	Porcentagem passante
9,5mm	100
4,75mm	95-100
2,36mm	80-100
1,18mm	50-85
600µm	25-60
300µm	10-30
150µm	2-10

Fonte: Mehta (1994)

O quadro 05 apresenta dados de porcentagens dos tamanhos dos grãos para o agregado miúdo.

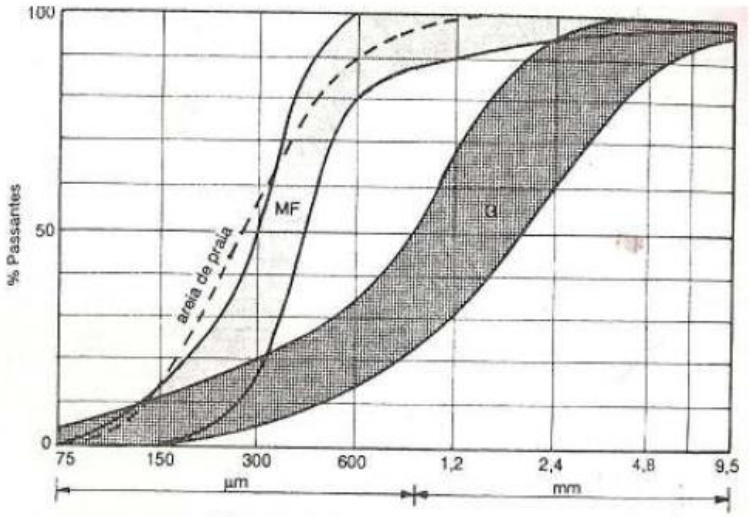
Quadro 05 – Porcentagens dos tamanhos de grãos

Muito fina	Faixa 1	De 1,35 a 2,25
Fina	Faixa 2	De 1,71 a 2,85
Média	Faixa 3	De 2,11 a 3,38
Grossa	Faixa 4	De 2,71 a 4,02
Areia de praia		1,39

Fonte: Bauer (2000)

Para uso em concreto, estabelece-se que a curva granulométrica se desenvolva entre os limites inferior e superior da tabela, que define os fusos granulométricos. A figura 01 mostra as faixas extremas; G-grossa; MF-muito fina (BAUER, 2000).

Figura 01 – Faixas granulométricas



Fonte: Bauer (2000)

2.4 AGREGADO GRAÚDO

A NBR 7211 define agregado graúdo como pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152mm e ficam retidos na peneira ABNT de 4,8mm. Pedra brita é o produto da extração de rochas em pedreiras e posterior britagem da mesma em equipamentos adequados que vão definir sua forma e dimensões. De acordo com Bauer (2000), a pedra brita é dividida em faixas granulométricas de graduação de 0 a 4 e é encontrada no comércio com a denominação de pedrisco e pedras de 1 a 4. Sendo que a maior demanda por pedra brita ocorre no processo de fabricação de concreto, onde são empregados principalmente o pedrisco e as britas 1 e 2, sendo que para a execução de concreto ciclópico usa-se brita 4 e rachão.

Segundo Valverde (apud JACQUES, 2013), a produção de brita no Brasil é dividida por tipos de rochas, na seguinte escala. 85% de rochas granitóides (granito, gnaisse, riolito e outras), 10% de rochas calcárias (calcário e dolomito) e 5% de basalto e diabásio. A produção de brita no Brasil ocorre em todos os estados da federação com exceção do Acre.

O quadro 06 apresenta dados da divisão das britas de acordo com o tamanho das partículas.

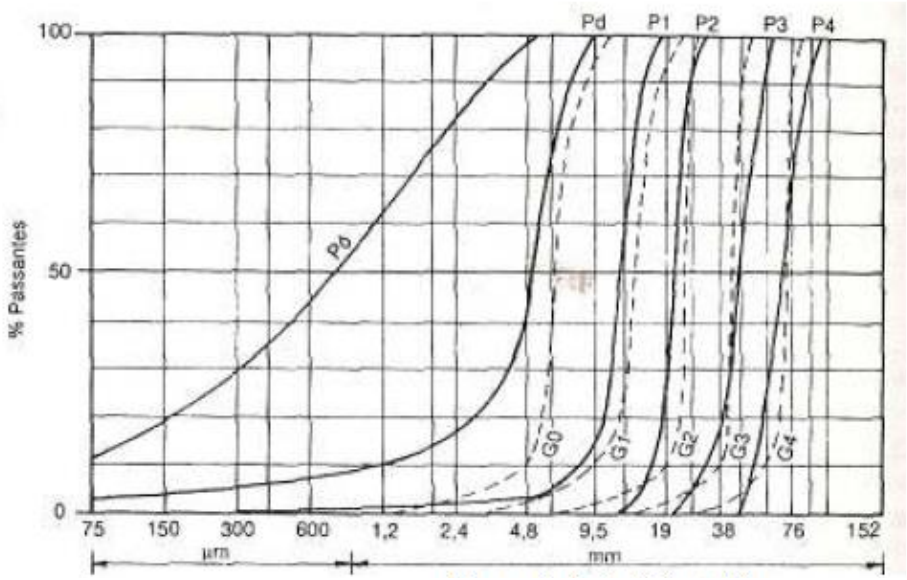
Quadro 06 – Divisão das britas de acordo com o tamanho das partículas

Pedra brita numerada	(NBR 7211 / NBR 7225)		COMERCIAL	
	TAMANHO NOMINAL			
Número	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Brita 0			4,8	9,5
Brita 1	4,8	12,5	9,5	19,0
Brita 2	12,5	25,0	19,0	38,0
Brita 3	25,0	50,0	38,0	50,0
Brita 4	50,0	76,0	50,0	76,0
Brita 5	76,0	100,0		
Obs: para efeito de dosagem pode-se utilizar dmax = 25mm para uma mistura brita 1 + brita 2.			> 76 mm considerado pedra de mão	

Fonte: Adaptado de Duart (2008)

Comercialmente, a pedra britada é produzida em cinco categorias, denominadas, pedrisco e pedras 1 a 4, conforme mostra a figura 02.

Figura 02 – Brita industrial



Fonte: Bauer (2000)

2.5 AGREGADO GRAÚDO RECICLADO

Segundo Ajdukiewicz & Kliszczewicz (apud BUTTLER, 2003), o setor da construção civil é um grande consumidor de recursos naturais não-renováveis. Os agregados naturais estão entre os minerais mais consumidos no Brasil e no mundo, sendo que no Brasil estima-se um consumo de 380,6 milhões de ton./ano, além de impactos ambientais relevantes como geração de áreas degradadas em volta do setor urbano.

Portanto, a reciclagem de RCD é uma forma de aproximar o setor da sustentabilidade, através da redução dos impactos negativos dos seus resíduos nas cidades e da geração de matéria-prima que pode ser substituída pela natural não-renovável (ÂNGULO et al. 2002 apud FONSECA, 2006).

Os RCD geralmente são constituídos em cerca de 90% por frações de natureza mineral (concretos, argamassas, rochas naturais, solos e cerâmicas), tanto no Brasil como na Europa (CARNEIRO et al. 2000 apud FONSECA, 2006).

Na União Europeia, são produzidos cerca de 180 milhões de toneladas de RCD por ano, cerca de 480kg/hab./ano (CARRIJO, 2005). A quantidade de RCD gerada é significativa em muitos países do mundo, com estimativas variando de 136 a 3359kg/hab./ano. Em diversos países, a geração de RCD, em relação ao total de resíduos sólidos urbanos (RSU) em massa é predominante, variando de 13 a 80%. Essas variações se devem às diferenças nos critérios de classificação, no controle de geração de resíduos, nas tecnologias disponíveis e nos materiais

empregados em cada país. Já no Brasil, estima-se, anualmente algo em torno de 68,5 milhões de toneladas de RCD e na cidade de São Paulo, uma das cidades mais populosas do Brasil, gera-se 4 mil toneladas de RCD/dia (ÂNGULO; JOHN, 2002).

De acordo com dados da Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem (ABESC), a região metropolitana de São Paulo produz um volume de resíduo de concreto mensal de cerca de 3500 a 7000m³ (BUTTLER, 2003).

Segundo Mariano (2008), a grande quantidade de perdas de materiais e, por conseguinte, geração de resíduos no processo construtivo é fruto da falta de eficiência da indústria da construção civil em preparar e aplicar nos canteiros de obras um plano de gestão de resíduos. Como forma de avaliar a eficiência do plano de gestão de resíduos, Mariano propõe fazermos a comparação entre a quantidade de material adquirido e a quantidade de resíduos produzidos no fim da obra.

A tabela 01 apresenta dados de eficiência da execução de um plano de gestão de resíduos de uma obra.

Tabela 01 – Eficiência da execução de um plano de gestão de resíduos de uma obra

Material	Quantidade Adquirida (t)	Quantidade Desperdiçada (t)	Eficiência (%)
Concreto	2175,38	40,54	98,14
Cerâmica	508,72	11,38	97,96
Argamassa	629,78	13,07	97,92
Fibrocimento	27,55	2,81	89,80
Madeira	88,34	75,10	14,98
Total	3429,77	142,90	95,83

Fonte: Mariano (2008)

Segundo Mehta & Monteiro (1994), existem várias características consideradas importantes e que devem ser estudadas para a utilização de agregados em concretos. Dentre elas, os autores citam a granulometria, a absorção de água, a forma e a textura, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes nos materiais. Quando se estuda a utilização de agregados para a produção de concretos, todas essas características devem ser levadas em consideração, principalmente quando se trata de novos materiais, como é o caso do agregado reciclado. Afinal, a viabilidade técnica de sua utilização dependerá do total conhecimento de seu comportamento na estrutura do concreto.

Assim sendo, o material a ser reciclado deverá ser trabalhado, levando-se em consideração os cuidados necessários, e obedecendo-se a uma sequência de procedimentos, tais como, britagem, peneiramento e descontaminação, quando necessário, só então, poderá ser utilizado em várias obras, tais como aterros, drenagens de grandes áreas, materiais para base ou sub-base de pavimentos rodoviários e produção de novos concretos (LEVY, 2002).

Em seu trabalho sobre o uso de agregado reciclado para a composição de concreto, (BARRA, 1996 apud FONSECA, 2006) afirmou que "a maior heterogeneidade, a menor resistência da matriz (concreto original) e a maior porosidade são consideradas as principais diferenças entre o agregado reciclado de concreto e o agregado natural". Sendo que essas características podem ser aplicadas para os diversos tipos de agregados reciclados de construção e demolição disponíveis.

A resolução do CONAMA nº 307/2002 classifica os resíduos em quatro categorias, que são:

Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como, argamassa, concreto, tijolos, telhas etc.

Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, tais como, plásticos, metais, papel/papelão, vidros, madeiras e outros;

Classe C: 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;

Classe D: resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

2.5.1 Agregado reciclado de concreto

Segundo Grubba (2009), os resíduos de concreto são classificados como classe A e basicamente encontram-se de duas formas: rejeitos de concreto no estado fresco e rejeitos de concreto no estado endurecido.

Ainda de acordo com Grubba (2009), o processo de reciclagem dos RCD de classe A, é feito basicamente através das operações de triagem, britagem e peneiramento. Logo após, os

RCD são classificados basicamente em dois grupos: agregados reciclados de concreto (ARC) e agregados reciclados mistos (ARM). Por sua natureza mais homogênea, os ARC podem ser usados na fabricação de argamassas, elementos pré-moldados, calçadas, bem como em pavimentação, como agregado para a massa asfáltica ou como base ou sub-base de pavimentos.

A NBR 15116 define os parâmetros para tipos de agregado proveniente de resíduos de classe A como:

ARC: é o agregado obtido do beneficiamento de resíduo de classe A, composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

ARM: é o agregado obtido do beneficiamento de resíduo de classe A, composto na sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

Para Rezende et al. (1996) um dos métodos existentes para a reciclagem de concreto no estado fresco, consiste na separação dos agregados da água de lavagem (partículas de cimento + finos em suspensão), isso pode ser feito com o uso de um separador mecânico. Os resíduos de concreto fresco são depositados num funil alimentador, que conduz os materiais para a primeira seção do equipamento, onde é introduzida água permanentemente auxiliando a decantação dos agregados, de modo que o aglomerante existente (cimento) permaneça em suspensão. Essa água é recolhida quando transborda pelo mesmo ponto de alimentação por onde são introduzidas as sobras de concreto, já os agregados são recolhidos na calha de descarga.

A figura 03 ilustra uma unidade recicladora de concreto fresco.

Figura 03 – Unidade recicladora de concreto fresco

Fonte: Jacques (2013)

Segundo Buttler (2003), os resíduos de concreto no estado endurecido geralmente são reciclados visando a sua reutilização como agregados em novas misturas ou para confecção de sub-bases e bases de rodovias. Conforme o referido autor, devido a algumas propriedades prejudiciais dos materiais reciclados, alguns pesquisadores propõem métodos alternativos para a reciclagem do concreto visando melhorar as propriedades desse material. Dentre alguns desses métodos destaca-se o proposto por Rashwan & Abourisk (apud BUTTLER, 2003) para utilização em uma central produtora de concreto pré-misturado. Este método baseia-se na passagem do concreto no estado plástico para o estado endurecido por um curto período de tempo, depois do qual o concreto poderia ser reciclado para ser utilizado como agregado em novas misturas. Esse processo apresenta algumas vantagens:

I) A quantidade de resíduos a serem reciclados é pequena, uma vez que a britagem é feita logo após o concreto ser desperdiçado. Com isso, o processo de reciclagem do concreto pode ser feito com a utilização de pequenos britadores móveis, eliminando os custos de transporte;

II) O material reciclado é produzido sob condições controladas. Isso inclui o conhecimento do nível de maturidade do concreto original que será reciclado;

III) Espera-se que as partículas de cimento não hidratadas, presentes nos agregados reciclados, contribuam para aumentar a quantidade de cimento nos concretos reciclados.

Outro processo, é a britagem de rejeitos de concreto com idades mais avançadas, esses rejeitos são oriundos da demolição de estruturas de concreto. A dificuldade encontrada nesse processo é o desconhecimento das propriedades do concreto a ser reciclado, tais como idade, resistência de projeto, entre outras (BUTTLER, 2003).

2.5.2 Britagem do concreto

A correta escolha do britador a ser utilizado otimizará os resultados e proporcionará agregados com a granulometria e forma de partículas desejadas. Dependendo do campo de aplicação do material reciclado haverá sempre um britador apropriado para tal (BUTTLER, 2003).

Segundo Hansen (1985 apud BUTTLER, 2003), a utilização do britador de mandíbula fornece uma melhor distribuição granulométrica do agregado reciclado para a produção de concreto. O britador de cones é adequado para ser utilizado como um britador secundário, já o britador de impacto fornece uma melhor distribuição granulométrica do agregado reciclado para

ser empregado em sub-bases e bases de rodovias e são menos suscetíveis a materiais que não podem ser britados como barras de aço presente nas estruturas de concreto armado, entretanto, seu custo de manutenção é maior e os agregados graúdos reciclados são de qualidade inferior se comparados com os agregados produzidos pelo britador de mandíbula.

2.5.3 Propriedades do agregado reciclado de concreto

De acordo com Buttler (2003), as pesquisas relacionadas ao estudo de ARC atestam que o material tem grande potencial de utilização. No Brasil, os estudos estão concentrados basicamente no tratamento das sobras de concreto em centrais dosadoras, e ao reaproveitamento de RCD. Segundo ele as principais diferenças apontadas na literatura entre agregados naturais e agregados reciclados de concreto, destacam-se para os agregados reciclados, a menor massa específica, maior absorção de água e principalmente a quantidade de argamassa aderida à superfície dos agregados que influencia desde as propriedades do agregado, até as do concreto confeccionado com ele, seja no estado fresco ou endurecido.

Hansen (apud BUTTLER, 2003) realizou um estudo onde analisou várias propriedades dos agregados reciclados e dos concretos que incorporam esses agregados, dentre as conclusões fundamentais podemos enumerar as seguintes:

I) Aproximadamente 30% de argamassa encontram-se aderida aos AGRC que apresentam dimensão máxima característica situada entre 16 e 32mm. Para agregados com dimensão situada entre 8 e 16mm, esse valor é de 40% e para agregados com dimensão entre 4 e 8mm chega-se ao índice de 60%.

II) Devido à grande quantidade de argamassa aderida ao material reciclado, a massa específica do AGRC é cerca de 5 a 10% menor que a massa específica do agregado original.

III) A resistência à compressão e a resistência à tração na flexão do concreto de agregados reciclados podem ser iguais ou até superiores aos valores obtidos para o concreto original desde que se utilize uma relação a/c menor. De maneira geral, a resistência à compressão de concretos com agregados reciclados é cerca de 5 a 10% menor que a resistência dos concretos originais.

IV) A utilização de agregados graúdos e miúdos reciclados pode acarretar numa redução de 15% na resistência de aderência e uma diminuição de cerca de 30% na resistência última de flexão quando comparado com o concreto original.

V) O módulo de deformação do concreto com agregados reciclados é menor que o módulo do concreto original, devido à grande quantidade de argamassa aderida à superfície do agregado. Essa redução situa-se entre 15 e 40%, sendo que os menores valores foram encontrados quando se utilizou a fração miúda e a graúda reciclada.

VI) Devido à grande quantidade de argamassa aderida à superfície do agregado, a retração por secagem do concreto com agregados reciclados apresentou-se sempre maior do que a do concreto original. Esse aumento situa-se entre 40 e 80%, sendo que os maiores valores foram encontrados quando se utilizou a fração miúda e a graúda reciclada.

VII) Nenhuma influência foi observada nas propriedades do concreto, quando esse concreto com AGRC foi produzido utilizando-se agentes retardadores, plastificantes e incorporadores de ar na mistura.

VIII) Os concretos com agregados reciclados apresentam maior probabilidade de corrosão nas armaduras devido à maior permeabilidade e à maior taxa de carbonatação quando comparado com os concretos com agregados naturais.

Já os pesquisadores Topçu & Gunçan (apud BUTTLER, 2003) realizaram o estudo de algumas propriedades físicas e mecânicas do concreto com AGRC.

Durante o estudo eles utilizaram AGRC proveniente de um concreto com resistência de 16 MPa aos 28 dias; e foi feita a substituição do AGN pelo AGRC em porcentagens iguais a 30%, 50%, 70% e 100% e a relação a/c utilizada nas dosagens foi 0,60.

As principais conclusões chegadas pelos pesquisadores Topçu & Gunçan (apud BUTTLER, 2003) com relação ao emprego de concretos com agregados reciclados foram:

I) A trabalhabilidade dos concretos com AGRC são menores que a trabalhabilidade do concreto natural e, isso pode ser explicado pela alta absorção do agregado reciclado;

II) O módulo de elasticidade do concreto reciclado é menor que do concreto natural; para substituição total do AGN pelo AGRC, esse valor fica em torno de 80% do encontrado para um concreto natural.

2.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO E ENDURECIDO

2.6.1 Estado fresco

a) Massa específica

Gunçan & Topçu (1995 apud GONÇALVES, 2011) estudaram algumas propriedades do concreto reciclado, em sua pesquisa usando resíduos de um concreto com resistência aos 28 dias de 16 MPa, que após triturado e peneirado gerou o AGRC. Eles realizaram uma variação do teor de substituição do AGN pelo AGRC de 30 a 100%. As suas principais conclusões foram: o valor da densidade do concreto reciclado diminui em relação ao do concreto natural no estado fresco de acordo com o aumento do grau de substituição, para os autores isto ocorre devido ao fato do AGRC possuir uma grande quantidade de argamassa aderida.

Sagoe-Crentsil; Brown & Taylor (2001 apud GONÇALVES, 2011) confirmaram que a camada de argamassa de cimento aderida as partículas de agregado determina o desempenho do concreto confeccionado com os agregados reciclados. Segundo os autores, a argamassa residual presente altera a massa especifica e pode ter efeito adverso no desempenho do concreto.

Para Gonçalves (2011), é possível inferir que as massas específicas dos concretos, que incorporaram ARC na sua confecção diminuem. Este comportamento pode ser decorrente da argamassa aderida ao agregado, portanto esta característica tende a decrescer com o aumento do teor de substituição, pois a quantidade de argamassa introduzida nestes concretos também aumenta.

Esta propriedade tem relação direta com a microestrutura do concreto, ou seja, com a zona de transição que apresenta características distintas do restante da pasta e que geralmente é mais fraca do que a pasta propriamente dita e que o agregado, exercendo, consequentemente, uma influência muito maior nas propriedades do material (GONÇALVES, 2011).

b) Trabalhabilidade

Dentre as propriedades do concreto no estado fresco, a trabalhabilidade pode ser considerada como uma das mais importantes, uma vez que a mesma exerce grande influência sobre as propriedades do concreto no estado endurecido (GONÇALVES, 2011).

Levy (1997 apud GONÇALVES, 2011) afirma que, os concretos preparados com agregados reciclados apresentam consistência mais seca do que os concretos convencionais, preparados com a mesma relação a/c. A justificativa apresentada para esta tendência é a maior

porosidade do agregado reciclado em relação ao agregado natural, o qual eleva a absorção de água da mistura.

Deve-se no entanto, atentar também para a forma dos agregados. Agregados britados em tipos diferentes de equipamentos apresentam formas diferentes, conduzindo a áreas superficiais diferentes, o que também influencia na quantidade de água de amassamento para uma mesma trabalhabilidade. Outro fato relevante é que, em geral, a massa especifica dos agregados reciclados é menor que a dos agregados naturais, a substituição em massa destes por agregados reciclados conduz a um maior volume de agregados na mistura, o que também pode aumentar a quantidade de água requerida para a mesma trabalhabilidade. Como resultado desta situação tem-se uma fricção interna alta nos concretos confeccionados com agregados reciclados, exigindo maior quantidade de pasta, para que se tenha a mesma trabalhabilidade dos concretos produzidos com agregados naturais (RAKSHVIR & BARAI, 2006 apud GONÇALVES, 2011).

Em trabalho desenvolvido por Padmini; Ramamurthy & Mathews (2009 apud GONÇALVES, 2011) sobre a influência do concreto que deu origem ao agregado nas propriedades do concreto confeccionado com este material, foi observado que o tamanho do agregado possui relação direta com a trabalhabilidade do mesmo no estado fresco, pois quanto maior o tamanho máximo do agregado menor é absorção de água e melhor a trabalhabilidade.

Em pesquisa sobre o comportamento dos agregados reciclados de concretos para a confecção de vigas, onde foi realizado teste de impacto, os autores Chakradhara Rao; Bhattacharyya & Barra (2011 apud GONÇALVES, 2011) realizaram medida de abatimento de tronco de cone, concluindo pela necessidade de maior utilização de aditivo super plastificante para manter o mesmo abatimento do concreto referência. Este comportamento foi atribuído a uma maior absorção de água e a textura rugosa dos ARC.

Para Gonçalves (2011), a característica de trabalhabilidade do concreto no estado fresco possui relação inversa a absorção de água do ARC e, portanto, a argamassa aderida ao material.

c) Tempo de pega e relação com a temperatura das reações de hidratação

Segundo Neville (1997 apud GONÇALVES, 2011), a pega se refere a mudança do estado plástico para um estado sólido. Embora durante a pega, a pasta adquira uma certa resistência, para efeitos práticos é importante distinguir pega de endurecimento, o qual se refere ao aumento da resistência de uma pasta de cimento depois da pega.

O começo da solidificação é chamado de início de pega e marca o ponto no tempo em que a pasta se torna não trabalhável. Consequentemente, o lançamento, compactação e acabamento do concreto, após este estágio, será muito difícil. A pasta não se solidifica repentinamente, necessita de um tempo considerável para se tornar totalmente rígida. O tempo necessário para se solidificar completamente marca o tempo de fim de pega. Uma pasta de cimento Portland fresca tem pouca ou nenhuma resistência porque ela representa apenas o início da hidratação do C_3S, o principal composto presente. Uma vez que a hidratação do C_3S tem início, a reação continua rapidamente por muitas semanas. O processo de preenchimento progressivo dos espaços vazios na pasta, com os produtos de reação resulta no decréscimo da porosidade e da permeabilidade, e um acréscimo na resistência. Em tecnologia de concreto o fenômeno de resistência com o tempo é chamado de endurecimento (MEHTA & MONTEIRO, 2008 apud GONÇALVES, 2011).

Ainda segundo Mehta & Monteiro (2008 apud GONÇALVES, 2011), desta forma a reação de hidratação do cimento Portland abrange um conjunto de reações interdependentes de suas diferentes fases, com cinéticas diferentes, ao curso das quais os grãos de cimento anidro iniciais vão sendo progressivamente dissolvidos, dando origem a uma estrutura que incorpora as moléculas de água. Os produtos formados, em sua maioria, são os C-S-H, que por sua vez começam a formar uma matriz porosa coesiva.

O desenvolvimento da reação de hidratação corresponde ao aumento progressivo do número de hidratos que formam o esqueleto poroso proporcionando o aumento da rigidez e da resistência do material. Devido a exotermia da reação de hidratação o calor total gerado fornece uma boa resposta macroscópica da evolução das reações químicas que envolvem a hidratação, apesar destas gerarem diferentes taxas de evolução de calor. Considera-se que o calor de hidratação gerado na hidratação completa de um cimento é aproximadamente uma função aditiva dos calores gerados na hidratação dos compostos individuais do cimento, ponderados pelos teores dos compostos (MEHTA & MONTEIRO, 2008 apud GONÇALVES, 2011).

O mesmo autor Mehta & Monteiro (2008 apud GONÇALVES, 2011) cita que, os concretos confeccionados com ARC podem possuir frações de cimento não hidratadas provenientes da argamassa que se encontra aderida ao agregado, podendo ocorrer uma alteração na hidratação da pasta de cimento do novo concreto. Em virtude do apresentado, considera-se importante o estudo do efeito do ARC sobre a evolução da temperatura das reações de hidratação, justamente por não existirem pesquisas que tenham realizado este tipo de avaliação.

É importante observar que o inicio de pega e o início do endurecimento da pasta, sendo que o aumento da taxa da evolução da temperatura (°C) indica o início da hidratação do cimento, portanto, alterações nesta taxa podem representar eventuais alterações na pega do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008 apud GONÇALVES, 2011).

2.6.2 Estado endurecido

a) Resistência à compressão

Para Montgomerry (1998 apud GONÇALVES, 2011), 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 merecem um estudo sistemático e isso também se aplica ao agregado reciclado, principalmente quando se pensa que eles correspondem a até 80% de toda a mistura.

Ao ser avaliado o efeito da quantidade de cimento e de argamassa aderida as partículas de agregado reciclado, nas propriedades dos concretos que incorporam esses agregados, concluiu-se que a qualidade do ARC influi significativamente na resistência a compressão. Pois, para concretos com AGRC com grande quantidade de argamassa aderida, a resistência a compressão aos 28 dias foi cerca de 15% menor se comparada ao concreto de referência. Já para agregados reciclados que foram submetidos a um processo de abrasão, visando diminuir a quantidade de argamassa aderida a sua superfície, essa diferença ficou em torno de 6% (MONTGOMERY, 1998 apud GONÇALVES, 2011).

Vários trabalhos (GOMEZ-SOBERON, 2002; KATZ, 2003; ZAHARIEVA et al., 2003; TOPÇU & SENGEL, 2004; XIAO et al., 2005; RAKSHVIR & BARAI, 2006; XIAO & FALKNER, 2007 apud GONÇALVES, 2011) obtiveram conclusões semelhantes, apontando que a resistência a compressão de concretos produzidos com agregados reciclados geralmente é menor que a dos concretos produzidos com agregados naturais, para um mesmo consumo de cimento. Segundo dados dos referidos autores, essas reduções podem atingir até a ordem de 45% da resistência dos concretos de referência.

Os autores Sami & Akmal (2009 apud GONÇALVES, 2011), em pesquisa sobre a influência dos ARC sobre a propriedade de resistência do concreto, verificaram que a substituição de AGN por AGRC de maior resistência, origina concretos de resistência mais elevada e a substituição de agregados de menor resistência, geram concretos de pequena

resistência. A pesquisa concluiu que o uso de agregado graúdo, oriundo de concreto reciclado com resistência igual a 50 MPa, resultará num concreto com resistência a compressão comparável ao confeccionado com AGN.

Ainda de acordo com Sami & Akmal (2009 apud GONÇALVES, 2011), quando a matriz do concreto produzido com agregados reciclados for menos resistente que o próprio agregado reciclado, este último não exercerá grande influência na resistência mecânica do concreto, uma vez que a matriz será o elo mais fraco do mesmo, portanto, muito possivelmente o concreto irá se romper na matriz. Entretanto, quando a matriz do concreto for mais resistente que o agregado reciclado, este último terá substancial influência na resistência do concreto, uma vez que possivelmente o concreto romperá no agregado.

Geralmente, o agregado reciclado é menos resistente que o agregado natural, em função de suas características físicas, apresentando alta porosidade, absorção de água e uma baixa massa unitária e específica. Então, para os concretos reciclados produzidos com matrizes resistentes é esperada uma resistência a compressão menor que a resistência a compressão dos concretos com agregados naturais (SAMI & AKMAL, 2009 apud GONÇALVES, 2011).

Segundo Cabral (2007), em pesquisa desenvolvida com RCD misto, concluiu que algumas técnicas podem ser utilizadas para se elevar a resistência dos concretos com agregados reciclados a níveis iguais ou superiores as resistências dos concretos convencionais, tais como, o uso de adições minerais (sílica ativa, metacaulim, escoria de aciaria, de alto-forno ou de cobre) e aditivos super plastificantes. Uma outra maneira de se compensar a perda na resistência é simplesmente forçar uma diminuição na relação a/c dos concretos com agregados reciclados implicando em um maior consumo de cimento.

Existe outra técnica para elevar a resistência que é o método de mistura dos constituintes do concreto chamado de double-mixing, onde a diferença para o método tradicional é que a água é adicionada em duas etapas. O objetivo deste método é fazer com que os agregados reciclados tenham contato primeiramente com uma argamassa de baixa relação a/c, sendo envolvidos por uma camada desta argamassa, obtendo assim melhores propriedades na zona de transição (CABRAL, 2007).

b) Resistência à tração

Segundo Gonçalves (2011), a resistência a tração dos concretos geralmente se apresenta como uma característica mecânica secundária, visto que o concreto não se apresenta como bom material para resistir aos esforços de tração das estruturas. Porém, quando se faz um estudo

criterioso das propriedades do concreto, principalmente quando são utilizados novos materiais, essa propriedade mecânica não pode ser desprezada.

Para a resistência a tração a substituição dos agregados naturais pelos reciclados provoca uma redução na mesma, embora esta pareça ser menos intensa que as reduções provocadas na resistência a compressão (GONÇALVES, 2011).

Coerente com isto, vários autores obtiveram reduções na resistência a tração em valores de 6 a 15%, para concretos confeccionados com ARC (GOMEZ-SOBERON, 2002; TOPÇU & SENGEL, 2004 apud GONÇALVES, 2011).

Ratificando as pesquisas anteriores, os autores Grdic et al. (2010 apud GONÇALVES, 2011) encontraram diminuição na propriedade de resistência a tração por compressão diametral, estas diminuições foram na ordem de 2,49 e 13,95% para a substituição de 50 e 100% de AGN por AGRC.

Já para Katz (2003 apud GONÇALVES, 2011), as perdas encontradas foram maiores, semelhantes as que ocorreram na resistência a compressão, na ordem de 23 a 41%.

Contudo, existem trabalhos que apresentam pequenos acréscimos em tal propriedade em concretos confeccionados com ARC, como no estudo desenvolvido pelos autores Etxeberria, Vazquez e Barra (2007 apud GONÇALVES, 2011).

A autora Leite (2001), a qual desenvolveu pesquisa com ARM, obteve conclusões sobre a propriedade de resistência a tração que também se aplicam ao ARC, observando que a mesma leva em consideração mecanismos de aderência física entre as partículas, sendo que o uso dos agregados reciclados promove uma boa aderência entre a pasta e o agregado em virtude de sua forma mais irregular e rugosa, portanto, a zona de transição do concreto confeccionado com agregados reciclados é muito boa.

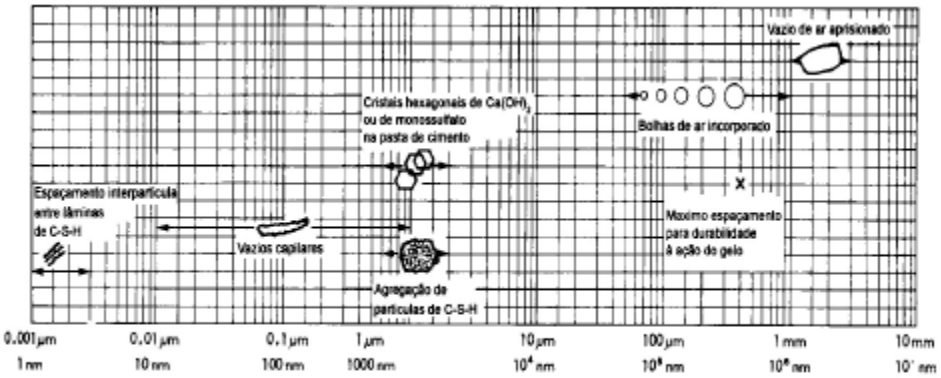
2.7 MICROESTRUTURA DO CONCRETO.

O estudo da microestrutura do concreto é muito importante, onde se consegue verificar a nível micrométrico os compostos de hidratação do cimento e os efeitos físico-químicos das adições minerais incorporadas ao concreto. Dessa maneira é possível avaliar de maneira mais efetiva a durabilidade das estruturas prevendo quais as manifestações patológicas que podem ocorrer no concreto, elaborando soluções para aumentar a sua vida útil, contribuindo com a segurança da estrutura, além de reduzir gastos com recuperação da mesma (SOKOLOVICZ, 2013).

2.7.1 Estrutura dos poros

As características do concreto são determinadas em função de elementos de dimensões em nível de micrômetro e nanômetro que compõem a pasta. A figura 04 apresenta os tamanhos característicos das fases sólidas e os vazios na pasta (SOKOLOVICZ, 2013).

Figura 04 – Dimensões gerais dos componentes microestruturais do concreto



Fonte: Sokolovicz (2013)

De acordo com Mehta & Monteiro (1994 apud SOKOLOVICZ, 2013), os espaços que compõem a microestrutura do concreto são os seguintes:

I) Espaço interlamelar de C-S-H: este tamanho de vazio é muito pequeno para ter um efeito desfavorável sobre a resistência da pasta, porém a água nesses pequenos vazios pode ser retida por pontes de hidrogênio, e a sua remoção sob determinadas condições pode contribuir para a retração por secagem e para a fluência;

II) Vazios capilares: representam os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta, sendo que quanto maior for o número de vazios capilares, maior é a porosidade da pasta. Possuem forma irregular;

III) Ar incorporado: são de forma esférica e muito maiores que os vazios capilares. Podem ser induzidos propositadamente ao concreto com a finalidade de incorporar poros muito pequenos na pasta de cimento. São de dimensões que variam de 50 a 200µm. Podem afetar negativamente a resistência e impermeabilidade da pasta;

IV) Vazios de ar aprisionado: são os vazios que se formam na pasta fresca de cimento durante a operação de mistura e podem afetar negativamente a resistência e impermeabilidade da pasta. As dimensões podem chegar a 3mm.

O comportamento do concreto endurecido varia ao longo do tempo pela continuação do processo de hidratação, que resulta em uma estrutura complexa composta de grãos de cimentos anidros, produtos da hidratação e poros (SOKOLOVICZ, 2013).

Segundo Jennings & Tennis (1994 apud SOKOLOVICZ, 2013), a estrutura dos poros é complexa em função do próprio produto de hidratação do cimento, o C-S-H, é poroso. Assim, são definidos dois tipos de porosidade:

I) Porosidade capilar: correspondente a grande porosidade remanescente entre as partículas de cimento hidratado, onde a mesma influencia na permeabilidade e resistência mecânica;

II) Porosidade do gel de C-S-H: é a porosidade mais fina geralmente menor que 10µm, sendo que essa porosidade geralmente influencia nos mecanismos de fissuração e fluência.

Segundo Mindess & Young (1981 apud SOKOLOVICZ, 2013), os poros se classificam baseados no diâmetro, em capilares e poros de gel.

Os capilares são divididos em:

I) Macroporos: diâmetros maiores que 50µm;

II) Mesoporos: diâmetros maiores que 10 e menores que 50µm;

Poros do gel: também conhecidos como microporos, onde os diâmetros são menores que 10µm.

As características de resistência mecânica e permeabilidade são relacionadas aos macroporos e mesoporos enquanto que parâmetros como fluência são mais atribuídos aos poros do gel.

Neville (1997 apud SOKOLOVICZ, 2013), afirma que além da porosidade total deve ser considerada a distribuição do tamanho dos poros. Geralmente, para uma mesma porosidade total, uma quantidade maior de poros menores resulta em uma maior resistência. Esse autor também afirma que os poros importantes para a permeabilidade são os de diâmetro no mínimo de 120µm a 160µm e contínuos. Poros descontínuos ou contendo água adsorvida não são importantes à permeabilidade.

2.7.2 Água quimicamente combinada

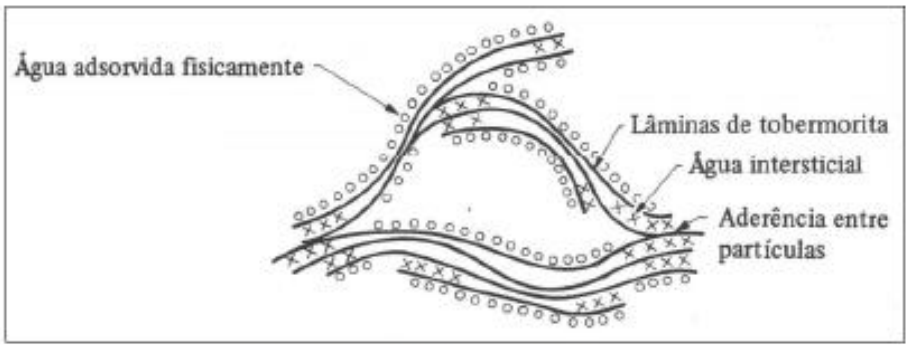
O ensaio de água quimicamente combinada é importante para verificações na microestrutura do concreto, visto que a H_2O combinada está presente na estrutura dos

compostos hidratados do cimento, sendo eles os C-S-H, o CH, e demais compostos endurecidos da pasta cimentícia provenientes das reações de hidratação (SOKOLOVICZ, 2013).

Mehta & Monteiro (2008 apud SOKOLOVICZ, 2013) definem a água quimicamente combinada como: água que é parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados do cimento. Esta água não é perdida na secagem; é liberada quando os produtos hidratados são decompostos por aquecimento.

Neville (1997 apud SOKOLOVICZ, 2013) afirma que a água fica retida com diferentes graus de intensidade no cimento hidratado. Em um extremo, se tem água livre; em outro, água combinada quimicamente formando uma parte definida de compostos hidratados. Entre essas duas categorias existe água de gel retida de diversos outros modos. A água retida pelas forças superficiais das partículas de gel é denominada água de adsorção, e a parte dessa água retida entre as superfícies de certos planos de um cristal é denominada água intersticial ou zeolítica. A água da estrutura é a parte da água de cristalização não quimicamente associada com os principais constituintes da estrutura. A figura 05 apresenta a representação esquemática dos tipos de água presente nos compostos hidratados do cimento.

Figura 05 – Estrutura provável dos silicatos hidratados



Fonte: Sokolovicz (2013)

3. METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa pode ser classificada como descritiva, pois descreve procedimentos e métodos aplicados na sua realização.

Quanto aos procedimentos é uma pesquisa bibliográfica e experimental, devido ao fato de que a pesquisa foi baseada em experiências já existentes, embasadas em ensaios laboratoriais.

3.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica para suporte de informações necessárias para o entendimento da pesquisa.

Após foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, importante para o processo de dosagem do concreto, tais como: ensaio de granulometria, massa especifica, massa unitária, modulo de finura, etc.

Como forma de avaliar as propriedades mecânicas e de microestrutura do concreto com agregado graúdo natural (AGN) e com agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), em concreto de cimento Portland (CCP), foram feitas dosagens de oito traços de concreto com AGRC e AGN, que foram comparados com dois traços de referência, sendo:

Traço de referência (TR): Composto de 100% de agregado graúdo natural;

Traço agregado reciclado 10 (TAR 10): Composto de 10% de AGRC e 90% de AGN;

Traço agregado reciclado 40 (TAR 40): Composto de 40% de AGRC e 60% de AGN;

Traço agregado reciclado 70 (TAR 70): Composto de 70% de AGRC e 30% de AGN;

Traço agregado reciclado 100 (TAR 100): Composto de 100% de AGRC;

Para cada traço foram moldados 9 corpos de prova (CP) com dimensões 10x20cm, que foram rompidos com as idades de 7, 28 e 91 dias, conforme quadro 07.

Quadro 07 – Idades de rompimento dos corpos de prova

Idade CP	Nº de CP rompidos por traço	Nº total de rompimentos	Tipo de ensaio a ser realizado
7 dias	2	20	Resistência a compressão simples
28 dias	3	30	Resistência a compressão simples
28 dias	1	10	Resistência a tração na compressão diametral
91 dias	2	20	Resistência a compressão simples
91 dias	1	10	Resistência a tração na compressão diametral

Fonte: Própria autoria (2014)

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS

3.3.1 Aglomerante

Podemos definir aglomerante como sendo o material ativo, ligante, em geral pulverulento, que tem por finalidade promover a união entre os grãos dos agregados na fabricação de argamassas e concretos (JACQUES, 2013).

O aglomerante utilizado para a realização desta pesquisa foi o cimento Portland, sendo que o mesmo é classificado como um aglomerante hidráulico devido á ser reagente a ação da água.

3.3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um material de origem mineral, constituído basicamente de silicatos hidráulicos de cálcio, com certa proporção de sulfato de cálcio natural proveniente da moagem e mistura de rochas calcárias, que em contato com água tem propriedades aglomerantes (JACQUES, 2013).

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP IV 32, da marca Votoran, que tem por característica a adição de pozolana no teor que varia de 15% a 50% em massa. Este cimento foi utilizado em função de ser o cimento mais comum no mercado. Como o estudo é realizado para verificar o aproveitamento de concreto como agregado graúdo, a pozolana presente no referido cimento não irá mascarar os resultados. O alto teor de pozolana do CP IV confere a este cimento uma alta impermeabilidade e consequentemente maior durabilidade. Segundo a ABCP, o concreto fabricado com o cimento CP IV se torna mais impermeável, apresenta resistência mecânica à compressão superior ao concreto com cimento Portland comum, à longo prazo. Devido ao seu baixo calor de hidratação o cimento CP IV é indicado para aplicações em obras que necessitem grande volume de concreto.

Durante a realização da pesquisa foi feita a caracterização física do cimento (tabela 02), para isso, foram realizados ensaios no LEC da UNIJUÍ, na qual foram utilizadas as seguintes normas:

Finura # 0,075m – NBR MB 3432

Massa específica – NBR NM 23

Tabela 02: Características físicas do cimento CP IV 32

Propriedade	Resultado
Massa Específica	2,889 g/cm³
Finura # 0,075	1,00%

Fonte: Própria autoria (2014)

3.3.2 Agregados

Segundo La Serna e Rezende (2009 apud JACQUES, 2013), os agregados utilizados em aplicações de engenharia civil, são materiais granulares que não possuem forma e volume definidos, tais como, a pedra britada, o cascalho e as areias naturais ou obtidas por moagem de rocha.

3.3.2.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado durante a realização da pesquisa é a areia média, proveniente da região de Santa Maria – RS, que foi submetida nas dependências do LEC, aos seguintes ensaios de caracterização:

Composição granulométrica – NBR NM 248

Massa específica do agregado miúdo – NBR NM 52

Massa unitária solta – NBR NM 45

Os resultados são apresentados na tabela 03, no quadro 08 e na figura 06.

Tabela 03: Características físicas do agregado miúdo

Propriedade	Resultado
Massa especifica	2,58 g/cm³
Massa unitária solta	1,486 kg/dm³
Dmáx. característico	1,2 mm
Módulo de finura	1,56

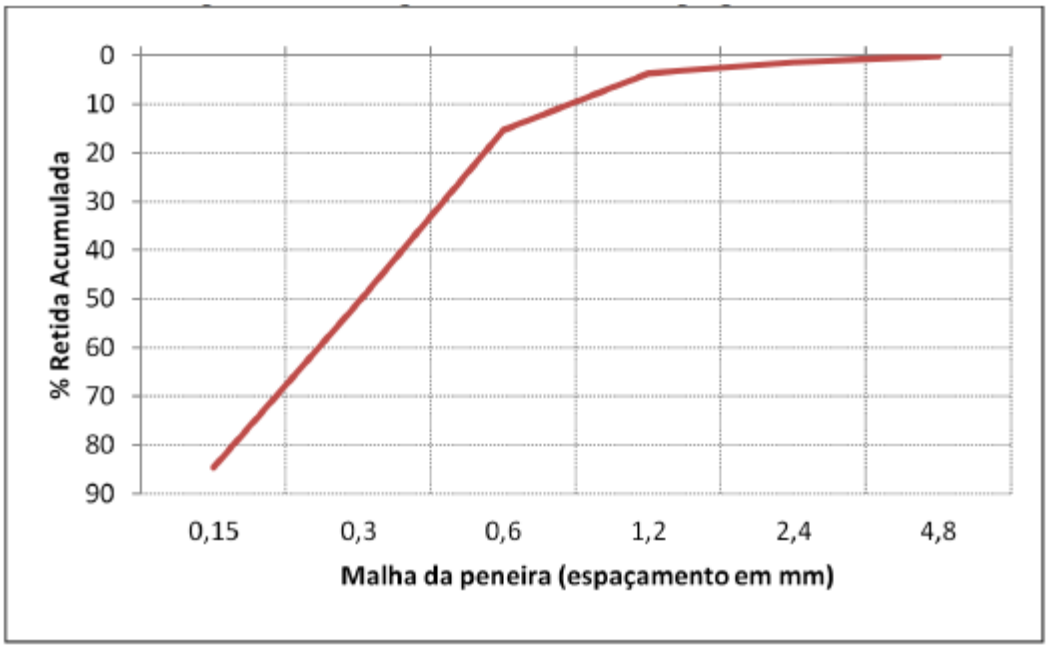
Fonte: Própria autoria (2014)

Quadro 08: Composição granulométrica do agregado miúdo

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – NBR NM 248								
PENEIRAS		1ª determinação		2ª determinação		% retida média	% retida acumulada	
nº	mm	Peso retido g	% retida	Peso retido g	% retida			
3/8”	9,5							
1/4"	6,3							
4	4,8	10,58	0,727748	9,48	0,6364	0,6820	0,6820	
8	2,4	11,09	0,762828	11,37	0,7632	0,7630	1,4451	
16	1,2	27,31	1,878525	35,63	2,3919	2,1352	3,5803	
30	0,6	170,21	11,70794	175,57	11,786	11,7471	15,3275	
50	0,3	514,63	35,39895	527,79	35,4316	35,4153	50,7428	
100	0,15	523,30	35,99532	469,82	31,5400	33,7676	84,5105	
Fundo	< 0,15	196,68	13,52868	259,94	17,4503	15,4895		
Total		1453,8	100	1489,6	100	100	100	
Diâmetro Máximo: 1,2mm # 16				Módulo de Finura: 1,56				

Fonte: Própria autoria (2014)

Figura 06: Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Própria autoria (2014)

Figura 07: Aspecto visual do agregado miúdo

Fonte: Própria autoria (2014)

3.3.2.2 Agregado graúdo natural

O AGN utilizado na pesquisa foi a brita 1, proveniente da pedreira Tabille, que foi submetida nas dependências do LEC, aos seguintes ensaios de caracterização:

Composição granulométrica – NBR NM 248

Massa específica e absorção do agregado graúdo – NBR NM 53

Massa unitária solta – NBR NM 45

Os resultados são apresentados na tabela 04, no quadro 09 e na figura 08.

Tabela 04: Características físicas do agregado graúdo natural

Propriedade	Resultado
Massa especifica	2,795 g/cm³
Massa unitária solta	1,60 kg/dm³
Absorção	1,12 %
Dmáx. característico	19 mm
Módulo de finura	6,84

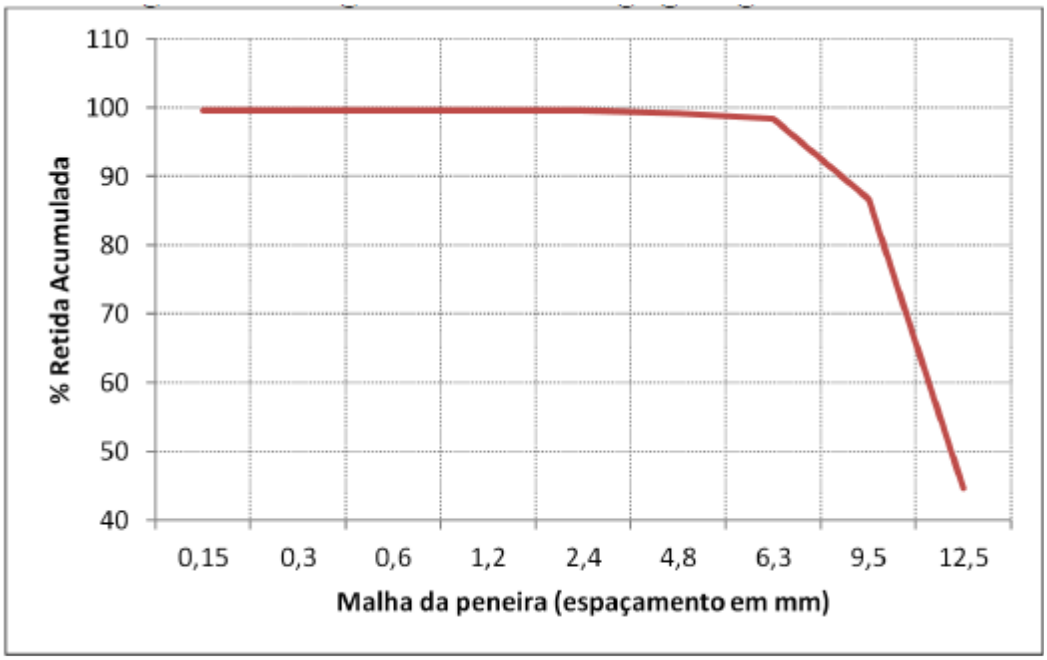
Fonte: Própria autoria (2014)

Quadro 09: Composição granulométrica do agregado graúdo natural

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – NBR NM 248								
PENEIRAS		1ª determinação		2ª determinação		% retida média	% retida acumulada	
nº	mm	Peso retido g	% retida	Peso retido g	% retida			
3”	76							
2 1/2"	54							
2”	50							
1 1/2"	38							
1 1/4"	32							
1”	25							
3/4"	19							
1/2"	12,5	1331	44,2597	1352	44,9560	44,6078		44,6078
3/8”	9,5	1248,35	41,5113	1284	42,6949	42,1031	86,7110	
1/4"	6,3	384,22	12,7764	317	10,5407	11,6585		98,3696
4	4,8	25,78	0,8572	26,25	0,87285	0,8650	99,2347	
8	2,4	6	0,1995	15,89	0,52836	0,36394	99,5986	
16	1,2	0,39	0,01296	0,78	0,02593	0,01945	99,6181	
30	0,6	0,20	0,00665	0,27	0,00897	0,00781	99,6259	
50	0,3	0,32	0,01064	0,28	0,00931	0,00997	99,6358	
100	0,15	0,67	0,02227	0,49	0,01629	0,01928	99,6551	
Fundo	< 0,15	10,32	0,34317	10,42	0,34648	0,34482		
Total		3007,25	100	3007,38	100	100	100	
Diâmetro Máximo: 19 mm				Módulo de Finura: 6,84				

Fonte: Própria autoria (2014)

Figura 08: Curva granulométrica do agregado graúdo natural



Fonte: Própria autoria (2014)

Figura 09: Aspecto visual do agregado graúdo natural

Fonte: Própria autoria (2014)

3.3.2.3 Agregado graúdo reciclado de concreto

O AGRC utilizado na pesquisa foi proveniente do processo de britagem de CP já submetidos a ensaios, e que se encontravam de posse do LEC. Esse processo foi realizado nas dependências da Pedreira Tabille, o processo de britagem deu-se primeiramente através da passagem dos CP por um britador de mandíbula e posteriormente por um britador tipo cone, sendo que de um total de 10.260kg de material original, foi separado para ser utilizado durante a realização da pesquisa aproximadamente 1.500kg de AGRC referente à parcela com características granulométricas semelhantes à brita 1, como forma de diferenciação visual, pode-se ver pela figura 11, que o AGRC é praticamente branco, isso deve-se a resquícios de pasta de concreto que encontram-se aderidos ao AGN do concreto que foi reciclado. O AGRC foi submetido nas dependências do LEC aos seguintes ensaios de caracterização:

Composição granulométrica – NBR NM 248

Massa específica e absorção do agregado graúdo – NBR NM 53

Massa unitária solta – NBR NM 45

Os resultados são apresentados na tabela 05, no quadro 10 e na figura 10.

Tabela 05: Características físicas do agregado graúdo reciclado de concreto

Propriedade	Resultado
Massa especifica	2,44 g/cm³
Massa unitária solta	1,475 kg/dm³
Absorção	4,30 %
Dmáx. característico	19 mm
Módulo de finura	6,87

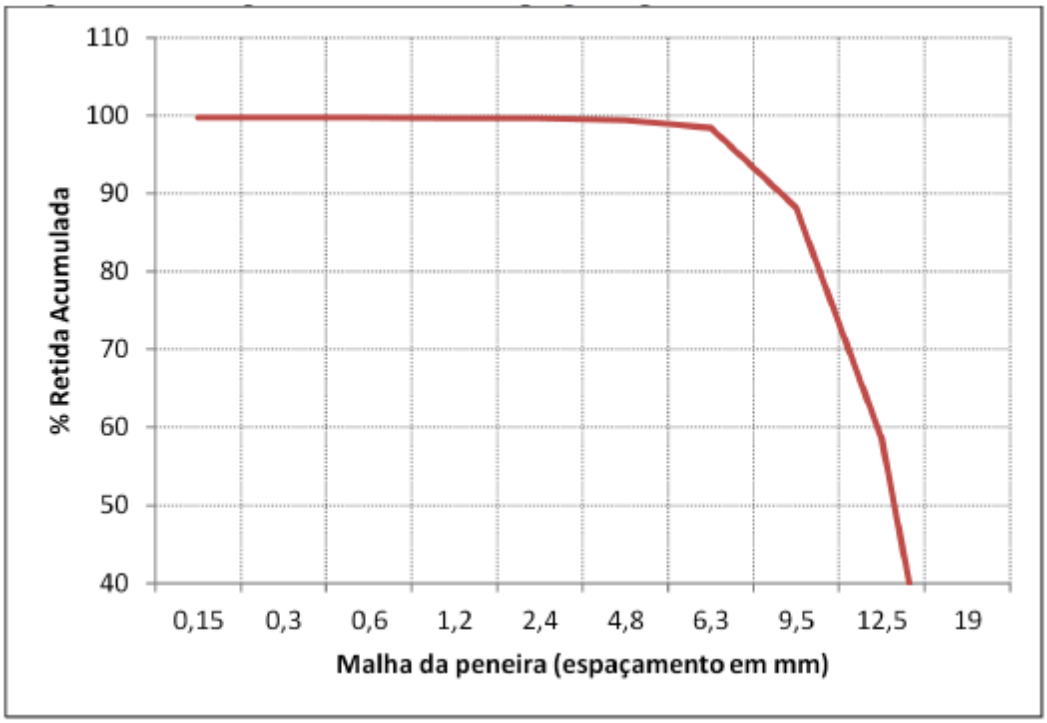
Fonte: Própria autoria (2014)

Quadro 10: Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – NBR NM 248								
PENEIRAS		1ª determinação		2ª determinação		% retida média	% retida acumulada	
nº	Mm	Peso retido g	% retida	Peso retido g	% retida			
3”	76							
2 1/2"	54							
2”	50							
1 1/2"	38							
1 1/4"	32							
1”	25							
3/4"	19			62,77	2,1015	1,0507	1,0507	
1/2"	12,5	1618	53,95	1826	61,1342	57,5421		58,5929
3/8”	9,5	931	31,0429	841	29,5997	29,5997	88,1926	
1/4"	6,3	378	12,6039	236	7,9012	10,2525		98,4452
4	4,8	45,89	1,5301	10,40	0,34819	0,9391	99,3844	
8	2,4	15,65	0,5218	1,79	0,05992	0,29087	99,6752	
16	1,2	1,02	0,0340	0,66	0,022097	0,02805	99,7033	
30	0,6	0,73	0,0243	0,71	0,023771	0,02405	99,7274	
50	0,3	1,22	0,0406	1,37	0,045867	0,04327	99,7706	
100	0,15	1,24	0,0413	1,31	0,043859	0,042602	99,8132	
Fundo	< 0,15	6,32	0,2107	4,86	0,162712	0,18672		
Total		2999,07	100	2986,87	100	100	100	
Diâmetro Máximo: 19 mm				Módulo de Finura: 6,87				

Fonte: Própria autoria (2014)

Figura 10: Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto



Fonte: Própria autoria (2014)

Figura 11: Aspecto visual do agregado graúdo reciclado de concreto

Fonte: Própria autoria (2014)

3.3.3 Água

Para a produção dos traços foi utilizada água proveniente de poço artesiano que abastece o LEC.

3.4 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

3.4.1 Dosagem dos traços

Durante a realização da pesquisa foi adotado o método de dosagem da ABCP, onde de acordo com as características físicas dos materiais chegamos a determinação do traço para resistência desejada. Para isso, primeiramente foi determinado como padrão para a pesquisa que a resistência característica do concreto a compressão (Fck) deveria ser de 25MPa aos 28 dias de fabricação, e de acordo com a norma NBR 12655 a resistência média do concreto a compressão (Fcj), foi obtida através da equação 01:

$$Fcj = Fck + 1{,}65\ x\ Sd \qquad \text{(Equação 01)}$$

$$Fcj = 25 + 1{,}65\ x\ 4$$

$$Fcj = 31{,}6\ MPa$$

Onde:

Fcj: resistência a compressão do concreto prevista para a idade de “j” dias, em MPa;

Fck: resistência característica do concreto a compressão, em MPa;

Sd: desvio-padrão de dosagem, em MPa.

O quadro 11 apresenta os valores do desvio-padrão a ser adotado em função das condições de preparo do concreto, de acordo com a NBR 12655.

Quadro 11: Desvio-padrão a ser adotado em função das condições de preparo do concreto

Condição	**Sd (MPa)**	**Materiais**
A aplicável as classes C10 a C80	4,0	Todos os componentes do concreto medidos em massa, corrigindo as quantidades de água e de agregado miúdo, em função da umidade do agregado miúdo.
B aplicáveis as classes C10 a C25	5,5	Cimento medido em massa e agregados em volume, com correção do volume de agregado miúdo e da quantidade de água em função da umidade do agregado miúdo.
C aplicável as classes C10 a C15	7,0	Cimento medido em massa e agregados em volume, corrigindo a quantidade de água por simples estimativa.

Fonte: Adaptado da NBR 12655 (1996)

Então de posse do valor do Fcj e dos resultados dos ensaios de caracterização dos materiais foram calculados os TR, sendo que os traços TAR 10, TAR 40, TAR 70 e TAR 100 foram executados fazendo a substituição em massa dos agregados graúdos em relação aos TR. Depois de calculada a quantidade de material necessária para a produção de cada traço, os materiais foram pesados e separados (tabelas 06 e 07).

Tabela 06: Consumo de materiais; Relação a/c 0,45

Traço	Consumo cimento	Consumo areia	Consumo brita natural	Consumo brita reciclada	Consumo água	Fator a/c inicial
TR	9,10 Kg	10,32 Kg	24,64 Kg	-	4,10 Kg	0,45
TAR 10	9,10 Kg	10,32 Kg	22,18 Kg	2,46 Kg	4,10 Kg	0,45
TAR 40	9,10 Kg	10,32 Kg	14,78 Kg	9,86 Kg	4,10 Kg	0,45
TAR 70	9,10 Kg	10,32 Kg	7,39 Kg	17,25 Kg	4,10 Kg	0,45
TAR 100	9,10 Kg	10,32 Kg	-	24,64 Kg	4,10 Kg	0,45

Fonte: Própria autoria (2014)

Tabela 07: Consumo de materiais; Relação a/c 0,55

Traço	Consumo cimento	Consumo areia	Consumo brita natural	Consumo brita reciclada	Consumo água	Fator a/c inicial
TR	6,84 Kg	12,38 Kg	24,64 Kg	-	4,10 Kg	0,60
TAR 10	6,84 Kg	12,38 Kg	22,18 Kg	2,46 Kg	4,10 Kg	0,60
TAR 40	6,84 Kg	12,38 Kg	14,78 Kg	9,86 Kg	4,10 Kg	0,60
TAR 70	6,84 Kg	12,38 Kg	7,39 Kg	17,25 Kg	4,10 Kg	0,60
TAR 100	6,84 Kg	12,38 Kg	-	24,64 Kg	4,10 Kg	0,60

Fonte: Própria autoria (2014)

Em seguida, partiu-se para a mistura dos traços em betoneira, na seguinte ordem: no primeiro dia de moldagem TR; no segundo dia de moldagem TAR 100; no terceiro dia TAR 70; no quarto dia TAR 40 e no quinto dia TAR 10. O teor de argamassa ideal foi determinado através da NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, método de ensaio também conhecido como Slump Test, na qual se estabelece que o concreto tenha uma consistência plástica, adotou-se então o abatimento do tronco de cone de 90±10mm (quadro 12 e figura 12), os valores do abatimento, fator a/c e massa especifica do concreto são mostrados nas tabelas 08 e 09.

Ao atingir a trabalhabilidade desejada para cada traço, moldaram-se os CP para ensaios do concreto endurecido, os CP nas dimensões 10x20cm foram moldados de acordo com a NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, e após desmoldagem foram acondicionados na câmara úmida do LEC para cura e posterior rompimento.

Quadro 12: Tolerâncias admitidas para consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone

Consistência	Abatimento (mm)	Tolerâncias (mm)
Seca	0 a 20	± 5
Medianamente plástica	30 a 50	± 10
Plástica	60 a 90	± 10
Fluida	100 a 150	± 20
Líquida	≥ 160	± 30

Fonte: NBR NM 67 (1998)

Figura 12: Slump Test

Fonte: Própria autoria (2014)

Tabela 08: Valores do abatimento do tronco de cone; Relação a/c 0,45

Traço	Abatimento (mm)	Consumo real de água (Kg)	Fator a/c corrigido	Peso específico do concreto
TR	90	4,10	0,45	2781 Kg/m³
TAR 10	97	4,41	0,48	2823 Kg/m³
TAR 40	95	4,53	0,50	2779 Kg/m³
TAR 70	92	4,64	0,51	2750 Kg/m³
TAR 100	87	4,60	0,51	2659 Kg/m³

Fonte: Própria autoria (2014)

Tabela 09: Valores do abatimento do tronco de cone; Relação a/c 0,55

Traço	Abatimento (mm)	Consumo real de água (Kg)	Fator a/c corrigido	Peso específico do concreto
TR	90	3,60	0,53	2845 Kg/m³
TAR 10	92	3,72	0,54	2840 Kg/m³
TAR 40	93	3,98	0,58	2814 Kg/m³
TAR 70	90	4,00	0,58	2773 Kg/m³
TAR 100	88	3,90	0,57	2704 Kg/m³

Fonte: Própria autoria (2014)

A figura 13 ilustra os CP de dois traços moldados e em processo inicial de cura.

Figura 13: Corpos de prova moldados

Fonte: Própria autoria

3.4.2 Ensaio de resistência a compressão axial

A resistência à compressão axial dos concretos foi avaliada por meio do rompimento de CP cilíndricos com dimensões de 10cm de diâmetro com 20cm de altura. O ensaio para a determinação da resistência foi feito no LEC da Unijuí, em prensa normatizada, para as idades de 7, 28 e 91 dias a partir da moldagem, conforme a NBR 5739, onde segundo a referida norma, do seu item 3.1.1.4 “o corpo-de-prova cilíndrico deve ser posicionado de modo que, quando estiver centrado seu eixo coincida com o da máquina, fazendo que a resultante das forças passe pelo centro”. A figura 14 ilustra o ensaio sendo realizado.

Segundo a NBR 5739, a resistência à compressão deve ser calculada pela equação 02:

$$fc = \frac{4F}{\pi \, x \, D^2} \qquad \text{(Equação 02)}$$

Onde:

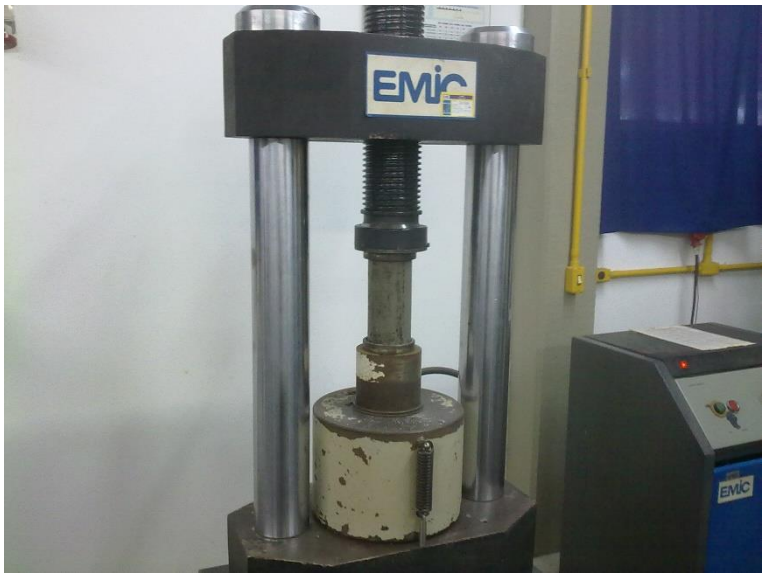
fc: é a resistência a compressão, em MPa;

F: é a força máxima alcançada, em Newtons;

π: pi;

D: é o diâmetro do CP, em mm.

Figura 14: Ensaio de resistência a compressão axial



Fonte: Própria autoria (2014)

3.4.3 Ensaio de resistência a tração através da compressão diametral

A resistência à tração dos concretos foi avaliada através da compressão diametral, por meio de CP cilíndricos com dimensões de 10cm de diâmetro com 20cm de altura. O ensaio para a determinação da resistência foi feito no LEC da UNIJUÍ, em prensa normatizada, nas idades de 28 e 91 dias a partir da moldagem, conforme a NBR 7222. A montagem do ensaio está mostrada na figura 15, onde entre os pratos (chapas de aço) foram colocadas ripas de madeira, de comprimento igual ao do CP. Após o ajuste do CP e as demais peças na prensa, aplicou-se uma carga com velocidade constante de aproximadamente 0,05 MPa/s até a ruptura do CP.

A resistência à tração por compressão diametral é dada pela equação 03:

$$ft,D = \frac{2\ x\ F\ x\ g}{\pi\ x\ d\ x\ L} \qquad \text{(Equação 03)}$$

Onde:

ft,D: é a resistência a tração por compressão diametral, expressa em MPa;

F: é a carga máxima obtida no ensaio, em Kgf;

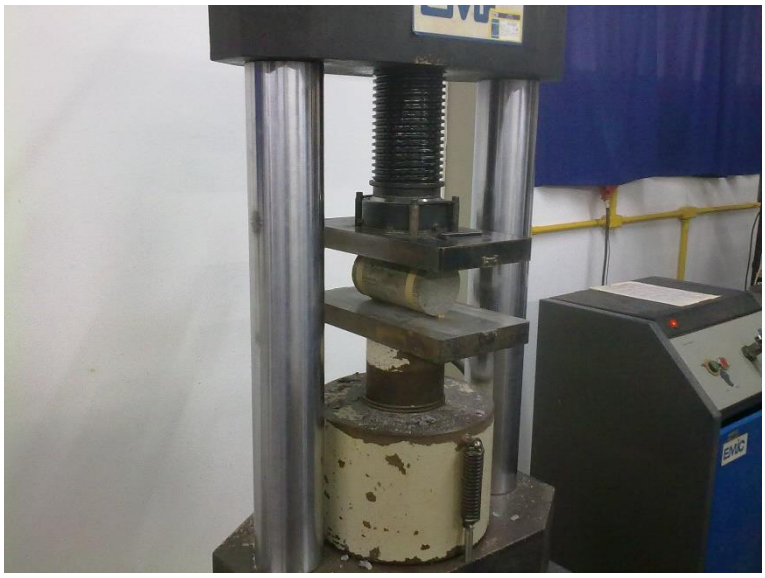
g: é a força da gravidade;

π: pi;

d: é o diâmetro do corpo de prova, em mm;

L: é a altura do corpo de prova, em mm.

Figura 15: Ensaio de resistência a tração na compressão diametral



Fonte: Própria autoria (2014)

3.4.4 Água quimicamente combinada

O ensaio de água quimicamente combinada foi realizado nas idades de 28 e 91 dias após a moldagem, primeiramente foi feita a coleta de material e a preparação da amostra, que ocorreu da seguinte forma: Após o rompimento dos CP foi retirado com o uso de furadeira, aproximadamente 70 gramas de pó de concreto passante na peneira #200, logo após, esse pó foi misturado em partes iguais com álcool isopropílico com o uso de um agitador eletromagnético por 20 minutos (figura 16), essa mistura tem por objetivo parar as reações de hidratação dos compostos do concreto. Em seguida, a mistura foi colocada por 24 horas em estufa com temperatura aproximada de 105 °C. Feito isso para a realização do ensaio de AC, foi separada uma amostra de material com 20 gramas, a referida amostra foi colocada em estufa com temperatura de 105 °C por 20 minutos, e foi novamente pesada até atingirmos uma diferença de peso da ordem de 0,01 gramas que chamamos de P105, então a amostra foi levada a uma mufla na temperatura de 550 °C (figura 17) por 1 hora, após ser retirada da mufla a amostra é pesada novamente e levada para o dessecador à vácuo por 20 minutos, novamente pesada até atingir uma diferença de peso da ordem de 0,01 gramas que chamamos de P550.

O teor de AC é dado pela expressão:

$$AC = \frac{P105 - P550}{P105} \qquad \text{(Equação 04)}$$

Onde:

AC: teor de água quimicamente combinada;

P105: peso da amostra a temperatura de 105ºC, em gramas;

P550: peso da amostra a temperatura ambiente, após 1 hora a 550ºC, em gramas.

Figura 16: Amostra sendo misturada no agitador eletromagnético

Fonte: Própria autoria (2014)

Figura 17: Amostra na mufla a temperatura de 550ºC

Fonte: Própria autoria (2014)

4. RESULTADOS

4.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL

Os valores obtidos para o ensaio de resistência a compressão axial estão apresentados nas tabelas 10 e 11 e figuras 18 e 19.

Tabela 10: Resultados da resistência a compressão axial e evolução das resistências; Relação a/c 0,45

Traço	a/c	Resistência a compressão (MPa)			Evolução 7-28 dias	Evolução 28-91 dias	Evolução 7-91 dias
		7 dias	28 dias	91 dias			
TR	0,45	30,32	41,65	53,99	37,37%	29,63%	78,07%
TAR 10	0,48	19,44	29,72	41,47	52,88%	39,54%	113,32%
TAR 40	0,50	18,79	27,47	37,07	46,19%	34,95%	97,29%
TAR 70	0,51	18,45	23,67	36,96	28,29%	56,15%	100,33%
TAR 100	0,51	17,93	21,84	33,42	21,81%	53,02%	86,39%

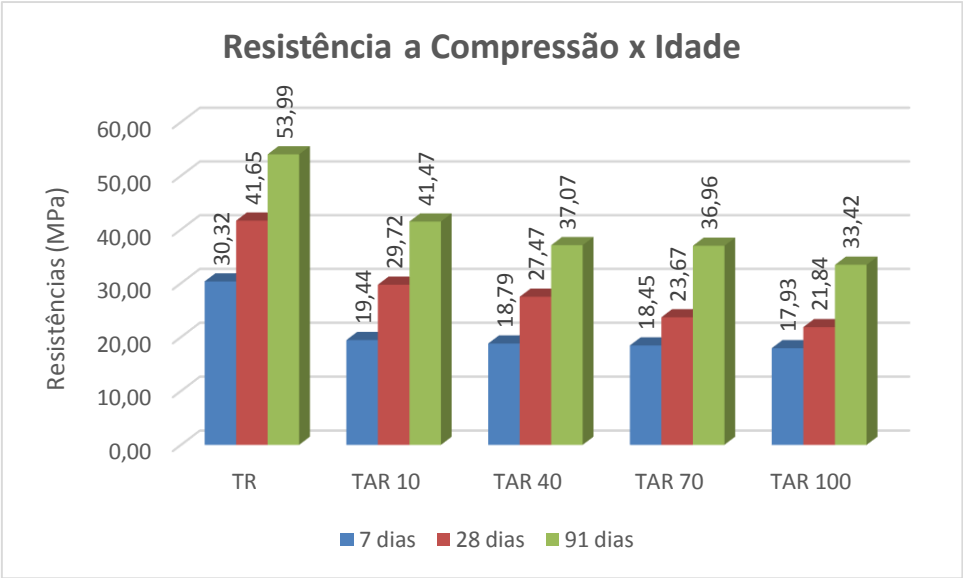
Fonte: Própria autoria

Tabela 11: Resultados da resistência a compressão axial e evolução das resistências; Relação a/c 0,55

Traço	a/c	Resistência a compressão (MPa)			Evolução 7-28 dias	Evolução 28-91 dias	Evolução 7-91 dias
		7 dias	28 dias	91 dias			
TR	0,53	19,90	28,76	40,45	44,52%	40,65%	103,27%
TAR 10	0,54	15,52	26,16	33,41	68,56%	27,71%	115,27%
TAR 40	0,58	15,02	23,28	32,11	54,99%	37,93%	113,78%
TAR 70	0,58	13,67	21,38	30,73	56,40%	43,73%	124,80%
TAR 100	0,57	12,28	20,45	29,18	66,53%	42,69%	137,62%

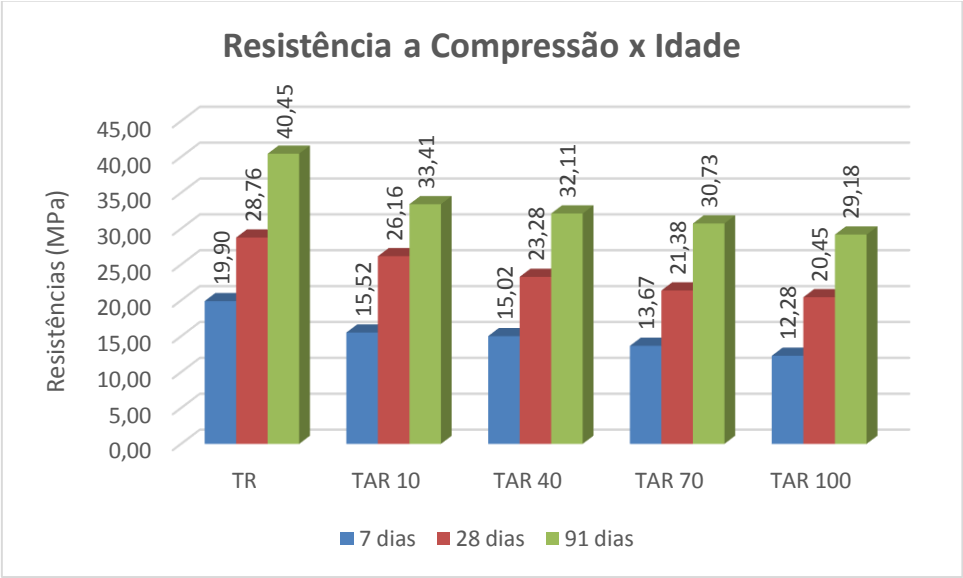
Fonte: Própria autoria

Figura 18: Resistência a compressão vs idade; Relação a/c 0,45



Fonte: Própria autoria (2014)

Figura 19: Resistência a compressão vs idade; Relação a/c 0,55



Fonte: Própria autoria (2014)

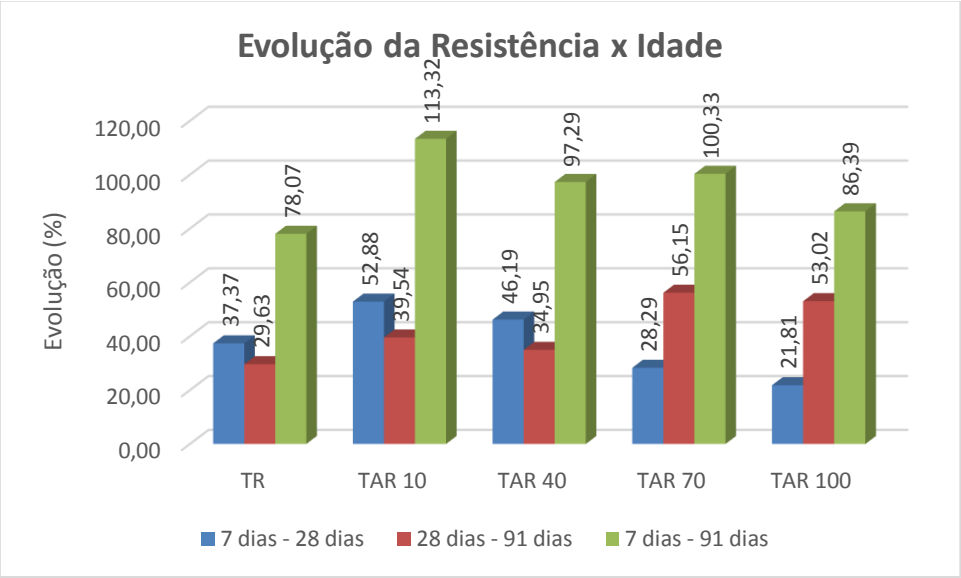
Analisando as tabelas 10 e 11 e as figuras 18 e 19, observa-se que há equilíbrio nos níveis de resistência a compressão axial quando as relações a/c se assemelham, embora os concretos tenham sofrido defasagem nestes níveis à medida que os teores de AGRC foram aumentados. O fato dos concretos com a utilização de AGRC terem atingido resistências à compressão entre 23% a 38% menores do que a mistura com 100% de AGN, no caso da relação a/c 0,45, e de 17% a 28%, no caso das misturas com relação a/c 0,55, que está em desacordo ao encontrado por FRONDISTOU-YANNAS (apud BUTTLER, 2003) que sugere que o

decréscimo deveria ser de 7% e 14%, pode ser explicado pela diferença na relação a/c atribuída ao método de dosagem utilizado no estudo, haja vista que no primeiro caso de estudo, as relações a/c dos concretos com AGRC foram 0,48, 0,50 e 0,51, respectivamente, enquanto que para o concreto com 100% de AGN foi de 0,45. No segundo caso estudado as relações a/c foram respectivamente, 0,54, 0,58 e 0,57, enquanto que no concreto TR foi de 0,54, ou seja, em ambos os estudos houveram pequenas distorções que influenciaram nos resultados. Entretanto isto não prejudica a análise, somente reforça o relatado por Buttler (2003) que segundo estudos realizados na área, em igualdade de condições, atestou o potencial de utilização dos agregados reciclados, que podem inclusive igualar ou sobrepujar os níveis de resistência à compressão o que foi demonstrado por Jacques (2013).

4.1.1 Evolução das resistências

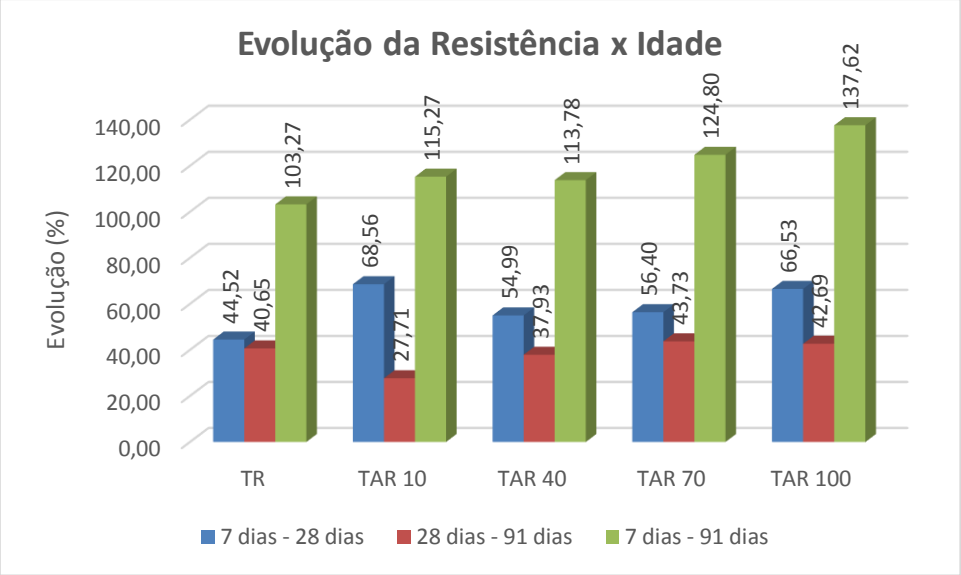
Nas figuras 20 e 21 estão expostos os valores percentuais de evolução da resistência a compressão axial para as idades de 7, 28 e 91 dias, para todos os traços ensaiados.

Figura 20: Evolução da resistência vs idade; Relação a/c 0,45



Fonte: Própria autoria (2014)

Figura 21: Evolução da resistência vs idade; Relação a/c 0,55



Fonte: Própria autoria (2014)

Analisando as figuras 20 e 21, outro fato relevante que se observa na análise dos dados está relacionado à evolução da resistência. Todas as misturas nas quais houve a utilização de AGRC apresentaram maiores acréscimos de resistência à compressão axial quando comparadas ao traço TR. No primeiro estudo (relação a/c 0,45) destaque para a mistura TAR 10 que apresentou um incremento de 113,32% dos 7dias para os 91 dias. No segundo caso (relação a/c 0,55) o destaque foi a mistura TAR 100 que apresentou um incremento de 137, 62% dos 7 dias para os 91 dias. De um modo geral as misturas também apresentaram maiores incrementos de resistência nas misturas com relações a/c iguais a 0,55. Em suma, uma possível explicação para esse resultado reside no efeito da hidratação avançada dos compostos cimentícios presentes no AGRC. Como foi adicionado um teor maior de água para essa mistura, possivelmente houve um complemento de hidratação para esse AGRC. (JACQUES 2013).

4.2 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os valores obtidos para o ensaio de resistência a tração na compressão diametral estão representados nas tabelas 12 e 13 e figuras 22 e 23.

Tabela 12: Resultados da resistência a tração na compressão diametral; Relação a/c 0,45

Traço	a/c	Resistência a tração (MPa)	
		28 dias	91 dias
TR	0,45	3,91	5,57
TAR 10	0,48	3,61	4,63
TAR 40	0,50	3,48	4,20
TAR 70	0,51	3,41	3,86
TAR 100	0,51	3,03	3,71

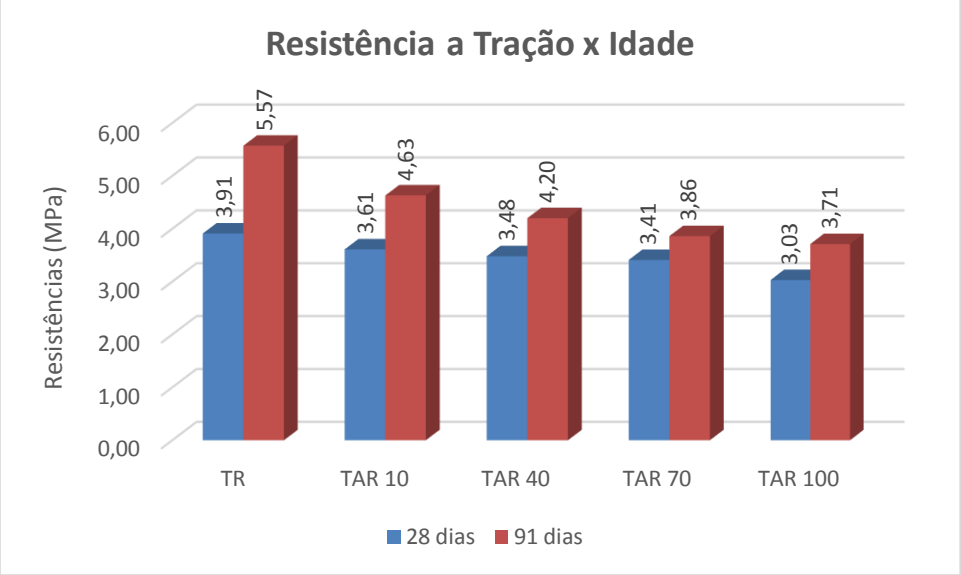
Fonte: Própria autoria

Tabela 13: Resultados da resistência a tração na compressão diametral; Relação a/c 0,55

Traço	a/c	Resistência a tração (MPa)	
		28 dias	91 dias
TR	0,53	3,16	4,81
TAR 10	0,54	3,07	4,21
TAR 40	0,58	3,05	3,73
TAR 70	0,58	3,03	3,40
TAR 100	0,57	2,62	3,23

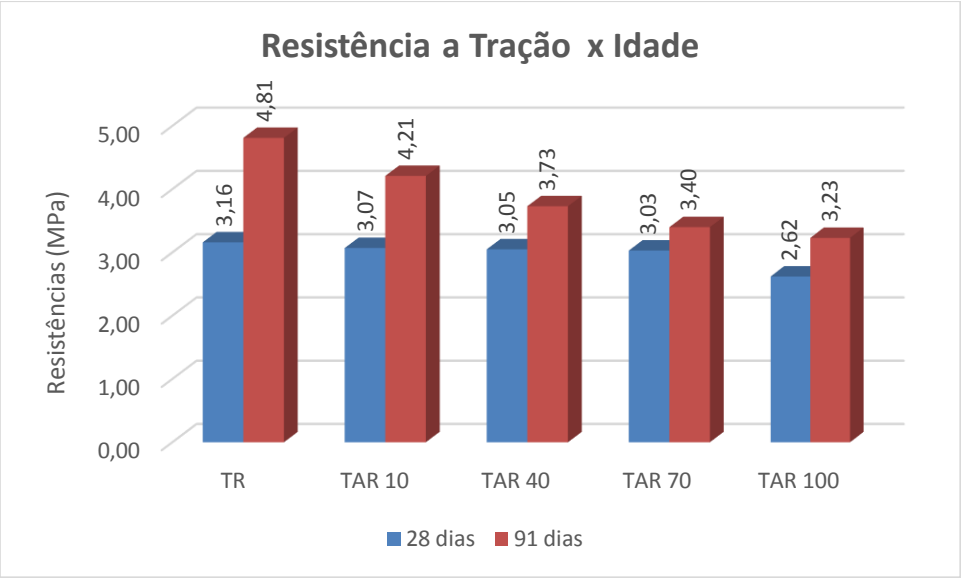
Fonte: Própria autoria

Figura 22: Resistência a tração vs idade; Relação a/c 0,45



Fonte: Própria autoria (2014)

Figura 23: Resistência a tração vs idade; Relação a/c 0,55



Fonte: Própria autoria (2014)

Analisando as tabelas 12 e 13 e as figuras 22 e 23, embora a resistência à tração não seja o principal parâmetro mecânico a se observar no concreto, dado que o material geralmente resiste menos aos esforços de tração do que aos de compressão, quando se trata do estudo de novos materiais é importante estudar também esta propriedade. Tanto para os traços de relação a/c 0,45, bem como para os traços de relação a/c 0,55, os níveis de resistência à tração obtidos no ensaio por compressão diametral seguiram tendências semelhantes aos do ensaio de resistência à compressão axial o que já era esperado. Observa-se novamente que a mistura TR apresentou os maiores níveis de resistência à tração nas duas relações a/c estudadas, tanto aos 28 dias como aos 91 dias, seguida pelas misturas TAR 10, TAR 40, TAR 70 e TAR 100, respectivamente. Comparando-se, aos 91 dias, os níveis de resistência a tração dos concretos, infere-se que no caso dos traços com relação a/c 0,45, as misturas com utilização de agregado reciclado atingiram níveis que variaram de 83% a 67% daqueles atingidos pela mistura sem agregado reciclado. No caso da relação a/c 0,55 os níveis variaram de 87% a 67%, fazendo-se a mesma análise. Assim de um modo geral pôde-se integralizar a análise da resistência mecânica e comprovar os índices de resistência a compressão ao compará-los com os de resistência a tração.

4.3 ÁGUA QUIMICAMENTE COMBINADA

Os valores obtidos para o ensaio de água quimicamente combinada estão representados nas tabelas 14 e 15 e figuras 24 e 25.

Tabela 14: Teor de AC e evolução do teor; Relação a/c 0,45

Traço	a/c	AC		Evolução
		28 dias	91 dias	28-91 dias
TR	0,45	2,07%	2,17%	4,83%
TAR 10	0,48	2,16%	2,25%	4,17%
TAR 40	0,50	2,37%	2,69%	13,50%
TAR 70	0,51	3,26%	3,36%	3,07%
TAR 100	0,51	3,41%	3,43%	0,59%

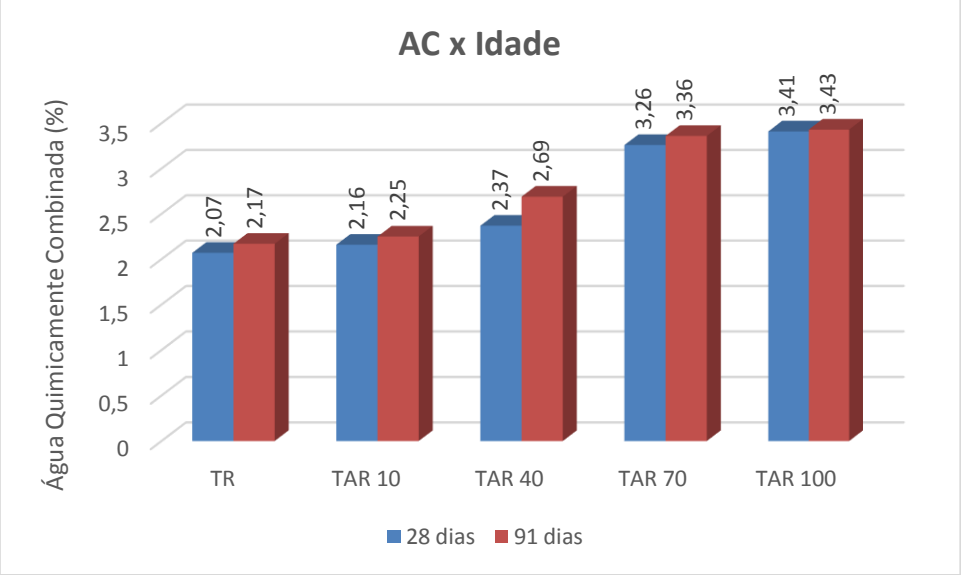
Fonte: Própria autoria (2014)

Tabela 15: Teor de AC e evolução do teor; Relação a/c 0,55

Traço	a/c	AC		Evolução
		28 dias	91 dias	28-91 dias
TR	0,53	1,93%	2,04%	5,70%
TAR 10	0,54	1,94%	2,09%	7,73%
TAR 40	0,58	2,11%	2,59%	22,75%
TAR 70	0,58	3,25%	3,30%	1,54%
TAR 100	0,57	3,33%	3,39%	1,80%

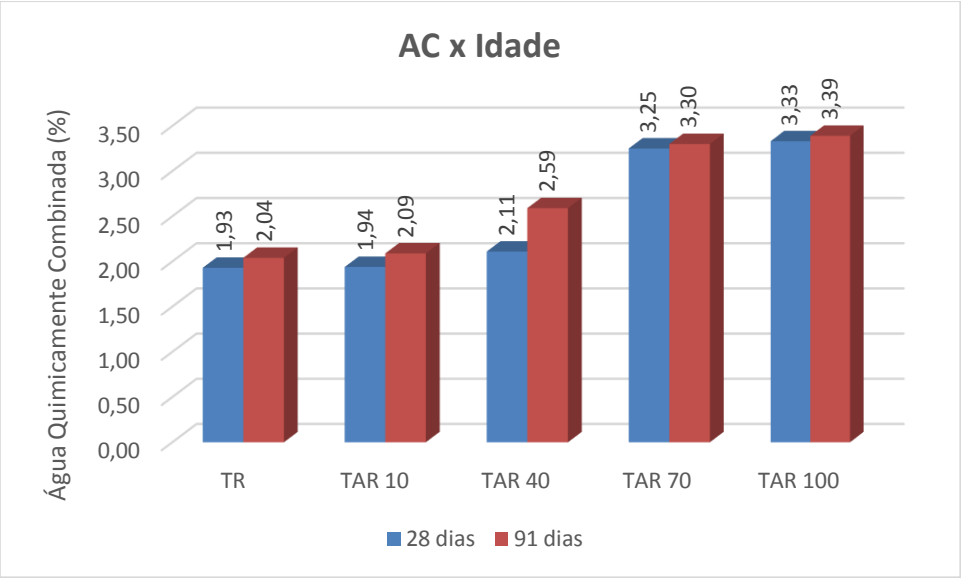
Fonte: Própria autoria (2014)

Figura 24: AC vs idade; Relação a/c 0,45



Fonte: Própria autoria (2014)

Figura 25: AC vs idade; Relação a/c 0,55



Fonte: Própria autoria (2014)

De acordo com as tabelas 14 e 15 e as figuras 24 e 25, observa-se que todas as misturas estudadas apresentaram acréscimo no teor de água combinada com a evolução da idade de ensaio. Segundo Duart (2008), o acréscimo com a evolução da idade se explica pelo aumento da atividade química causada pela hidratação dos silicatos, em especial a do C_2S, que se hidrata mais lentamente.

Individualmente, à medida que o percentual de AGRC aumentou, houve um aumento no teor de água combinada. A mistura que apresentou maior teor foi a TAR 100, seguida das misturas TAR 70, TAR 40, TAR 10 e TR, respectivamente, com teores de 3,43%, 3,36%, 2,69%, 2,25%, 2,17% aos 91 dias. Uma explicação para isto está no fato de que as misturas com maiores teores de AGRC apresentaram maiores relações a/c o que resultou num maior espaço livre entre as partículas, numa maior porosidade e, consequentemente, em mais espaços para a formação de produtos hidratados de maiores dimensões. (DUART, 2008).

CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou avaliar a substituição total e parcial do AGN por AGRC, nos teores de 10%, 40%, 70% e 100%, mantendo a trabalhabilidade em 90±10mm através do método de abatimento do tronco de cone, o que ocasionou diferentes relações a/c, analisando a resistência e a água quimicamente combinada em comparação ao concreto referência, moldado somente com AGN.

Partindo-se do questionamento proposto para a realização da pesquisa, pode-se concluir através dos dados obtidos, que a influência da substituição do AGN por AGRC, dá-se da seguinte maneira:

Quanto a resistência a compressão axial

Mediante os resultados constatou-se que aos 7 dias de idade, os TR com 100% de AGN apresentaram resistência maior que os traços com substituição de agregado graúdo, TAR 10, TAR 40, TAR 70 e TAR 100, em ambas as relações a/c estudadas. Nota-se que para a relação a/c 0,45 o TR teve uma diferença maior para as suas substituições, já na relação a/c 0,55 os TAR se aproximaram mais do TR. Em ambas as relações a/c, quanto maior foi o teor de mistura de AGN e AGRC, menor foram as resistências encontradas.

Para os 28 dias, manteve-se a mesma relação de resistência apresentada na idade de 7 dias, os TR novamente apresentaram maiores resistências que os traços com substituição de agregado graúdo, em ambas as relações a/c. Nota-se que na relação a/c 0,45 o TR aumentou ainda mais a sua diferença em relação aos seus TAR, já na relação a/c 0,55 os TAR se aproximaram um pouco mais do TR. E em ambas as relações a/c, quanto maior foi o teor de mistura de AGN e AGRC, menor foram as resistências encontradas.

Para os 91 dias, a relação de resistência apresentada nas idades anteriores se manteve, com os TR apresentando resistências maiores que os TAR, em ambas as relações a/c. Nota-se que na relação a/c 0,45 o TR manteve sua diferença da idade anterior para seus TAR, já na relação a/c 0,55 o TR aumentou sua diferença para seus TAR. E em ambas as relações a/c, quanto maior foi o teor de mistura de AGN e AGRC, menor foram as resistências encontradas.

Analisando os resultados individualmente, pode-se afirmar que com exceção do TR da relação a/c 0,45, todos os outros traços apresentaram resistência a compressão axial inferior a

resistência a compressão do concreto prevista para a idade de 28 dias, que foi determinada com sendo igual ou superior a 31,6 MPa.

Quanto a resistência a tração na compressão diametral

Para a idade de 28 dias, as resistências a tração na compressão diametral maiores foram dos TR, em ambas as relações a/c, mas muito próximas das resistências dos seus TAR, estes que, quanto maior o teor da mistura de AGN com AGRC menor foram suas resistências.

O mesmo vale para a idade de 91 dias, as resistências encontradas foram maiores para os TR, em ambas as relações a/c, porém, estas ficaram ligeiramente mais distantes das resistências dos seus respectivos TAR, também mantendo a proporção de que quanto maior o teor de mistura de AGN com AGRC menor foram as resistências.

Quanto a água quimicamente combinada

Os resultados para o ensaio de água quimicamente combinada indicaram que a substituição de AGN por AGRC nas quantidades de 10%, 40%, 70% e 100% obtiveram os teores de AC aos 28 dias, em 2,16%, 2,37%, 3,26% e 3,41%, respectivamente, enquanto que a mistura referência obteve teor de 2,07%, para a relação a/c 0,45. Para a relação a/c 0,55 os teores de AC foram 1,94%, 2,11%, 3,25% e 3,33%, respectivamente, enquanto que a mistura referência obteve teor de 1,93%.

Para a idade de 91 dias, o TR apresentou teor de 2,17%, já os traços TAR 10, 40, 70 e 100 apresentaram teores de AC de 2,25%, 2,69%, 3,36% e 3,43%, respectivamente, para a relação a/c 0,45. Para a relação a/c 0,55 os teores de AC foram 2,09%, 2,59%, 3,30% e 3,39%, respectivamente, enquanto que a mistura referência obteve teor de 2,04%.

Esses valores vêm de acordo com experimentos de outros autores, que comprovam que quanto maior for a porcentagem de substituição de AGN por AGRC, maior será o teor de AC, devido ao maior espaçamento entre as partículas do concreto e possivelmente devido a maior taxa de absorção de água apresentada pelo AGRC. Também se conclui uma interdependência das variáveis estudadas, onde se verificou que a medida que a resistência a compressão axial aumenta, aumenta o teor de AC.

Portanto, ao analisar os ensaios propostos, conclui-se que as propriedades mecânicas e de microestrutura do concreto com AGRC podem ser consideradas semelhantes as propriedades

do concreto com AGN, pois as diferenças encontradas nos resultados dos ensaios podem ser consideradas aceitáveis. Sendo assim, este tipo de concreto pode ser utilizável em algumas situações, tomando as devidas precauções, como por exemplo, realizar a dosagem de um traço de concreto com um fck superior ao fck necessário, para compensar as perdas de resistências que o concreto com AGRC apresentou, perdas estas que seriam compensadas pelo ganho no ponto de vista ambiental.

Sugestões para trabalhos futuros

Dar continuidade a este trabalho analisando as propriedades de resistência e microestrutura para outras idades.

Analisar o comportamento de concretos com as mesmas substituições já realizadas, porém, com outro tipo de cimento no estudo.

Analisar o comportamento de concretos com proporções diferentes de substituição do AGN por AGRC.

Analisar o comportamento de concretos com as mesmas substituições já realizadas, porém, com o uso de aditivos.

Verificar a microestrutura do concreto com a realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com diafractograma.

Analisar a permeabilidade do concreto com substituição total e parcial de AGN por AGRC.

Realizar o mesmo estudo desta pesquisa com outras relações a/c.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição, reciclados para concretos e a variabilidade. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ANTAC, 2002.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação** - Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: **Argamassa e concreto – Determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos** – Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: **Concreto – Preparo, controle e recebimento** – Rio de Janeiro, 1996.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR MB 3432: **Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)** – Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica** – Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios** – Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: **Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente** – Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: **Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água** – Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: **Agregados – Determinação da composição granulométrica** – Rio de Janeiro, 2003.

BAUER, Falcão L. A. **Materiais de construção**: 5ª ed. Rio de Janeiro: ABDR Afiliada, 1994.

BAUER, Falcão L. A. **Materiais de construção.** Volume 1, Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2000.

BUTTLER, Alexandre M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** Dissertação (Mestrado em engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2003.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedade mecânica e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2007.

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

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução 307 (2002). Gestão dos resíduos da construção civil**.

DUART, Marcelo A. **Materias de construção I - Notas de aula,** 2008.

FOGUESATTO, André F. **Estudo da utilização de areia residual do processo de fundição como agregado graúdo para concreto.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijui, 2007.

FONSECA, Adriana P. **Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural**. Dissertação (Mestrado em engenharia) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais, 2006.

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

GRUBBA, David C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado graúdo reciclado para a utilização na construção rodoviária.** Dissertação (Mestrado em engenharia) Escola de Engenharia de São Carlos. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo, 2003.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo. Pini, 1992.

HELENE, Paulo; TIBÉRIO, Andrade. **Concreto de cimento Portland**. In: Geraldo Cechella Isaia (Org.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo. Ibracon, 2010.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Controle de qualidade das estruturas de concreto armado**. Universidade Federal de Santa Maria, 1988.

JACQUES, Jeovani R. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de concreto reciclado como agregado graúdo em concreto de cimento Portland**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2013.

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

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, 2002.

MARIANO, Leila S. **Gerenciamento de resíduos da construção civil com reaproveitamento estrutural: Estudo de caso de uma obra com 4.000m² Curitiba.** Dissertação (Mestrado em engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

METHA, Kumar P.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto - Estrutura, propriedades e materiais**, Ed. Pini, São Paulo, 1994.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1997.

PETRUCCI, Eládio G. **Concreto de cimento Portland.** São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1968.

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

REZENDE, L.; LEVY, S. M.; DJANIKIAN, J. G. **Tratamento e disposição de concreto residual em centrais dosadoras**. IN: Reunião do Ibracon, 38, Ribeirão Preto. Anais, São Paulo, 1996.

SOKOLOVICZ, Boris C. **Microestrutura e durabilidade a cloretos de protótipos de concreto com cinza de casca de arroz com e sem moagem previa**. Dissertação (Mestrado em engenharia). Centro de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

TARTUCE, Ronaldo; GIOVANNETTI, Edio. **Princípios básicos sobre o concreto de cimento Portland.** São Paulo: Ibracon/Pini, 1990.

WOLENSKI, Anderson R. V.; MONTEIRO, Anelize B.; CHRISTOFORO, André L.; DOS SANTOS, Francisco L.; PITANGUEIRA, Roque L. da S. **Artigo avaliação experimental do uso de cimento CP IV e adição de metacaulim em concretos auto adensáveis.** 2012.