

**REDE DOCTUM DE ENSINO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CARATINGA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE CONCRETO RECICLADO: COMPORTAMENTO
MECÂNICO E ASPECTOS DE DURABILIDADE.**

**RAFAEL DE PAULA PADERES
SAMYR VALE SATLER**

Trabalho de Conclusão de Curso

Caratinga/MG

2017

**RAFAEL DE PAULA PADERES
SAMYR VALE SATLER**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE CONCRETO RECICLADO: COMPORTAMENTO
MECÂNICO E ASPECTOS DE DURABILIDADE.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Tecnológico de Caratinga da DOCTUM Caratinga como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Professor Orientador: Camila Alves da Silva.

Caratinga/MG

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE CONCRETO RECICLADO: COMPORTAMENTO MECÂNICO E ASPECTOS DE DURABILIDADE**, elaborado pelos alunos **RAFAEL DE PAULA PADERES** e **SAMYR VALE SATLER** foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de Engenharia Civil das FACULDADES DOCTUM DE CARATINGA, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

Caratinga 10 de julho 2017


CAMILA ALVES DA SILVA


JOSE SALVADOR ALVES


LEONARDO DE AMORIM SATHLER

À Deus por todas as bençãos desta vida.....

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus pela oportunidade de podermos desenvolver nosso conhecimento e ajudar com a comunidade de pesquisadores do concreto, agradecemos a todos os cooperadores que ajudaram diretamente e indiretamente com o desenvolvimento desse trabalho, em especial ao Leandro e Lucas, monitores do laboratório, onde se dispuseram de uma grande paciência para nos ajudar no desenvolvimento de vários testes, desde já, nosso muito obrigado, nossos agradecimento abrange muito mais, a nossa professora orientadora Camila Alves da Silva, por toda paciência e todo o conhecimento que se dispôs a nos passar, a todos os amigos que passaram força no momento de desanimo e fraqueza, aos nossos familiares por acreditarem no nosso sucesso e nunca terem deixado de nos estender as mãos nos momentos difíceis, ao professor Douglas Borges Domingos, por ter nos ajudado com um importante tópico desse trabalho, a simulação computacional, se não fosse através de seus conhecimentos, isso não seria possível, também agradecemos a todos os professores que no decorrer desse curso tiveram uma cooperação para a formação do nosso conhecimento, enfim, de uma forma geral deixamos nosso muito obrigado a todos e se hoje podemos planejar um futuro é porque vocês sempre acreditaram em nós!!!

Rafael de Paula Paderes e Samyr Vale Satler

“Treine enquanto eles dorme, estude enquanto eles se divertem, persista enquanto eles descansam, e então, viva o que eles sonham.”

(Provérbio Japonês)

“Faça ou não faça. A tentativa não existe.”

(Mestre Yoda)

“Talvez o paraíso é só questão de perceber que a felicidade não tem lugar pra nascer.”

(Hungria Hip Hop)

“Hoje o mundo é dos espertos, posso ser o cara errado seguindo o caminho certo.”

(Hungria Hip Hop)

“Você não é derrotado quando perde. Você é derrotado quando desiste.”

(Dr. House)

“Se não puder voar, corra. Se não puder correr, ande. Se não puder andar, rasteje, Mas continue em frente de qualquer jeito!”

(Martin Luther King)

PADERES, Rafael; VALE, Samyr. **Contribuição ao estudo de concreto reciclado: comportamento mecânico e aspectos de durabilidade.** Caratinga, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Civil - Curso de Engenharia Civil. Faculdades Integradas de Caratinga, Rede DOCTUM, Caratinga, 2017.

RESUMO

O concreto reciclado é um material que permite o reaproveitamento de resíduos decorrentes das atividades de construção e demolição de estruturas. Atualmente seu uso é restrito a aplicações não estruturais.

O presente trabalho teve por objetivo contribuir com o estudo dos concretos reciclados, tendo como referência os parâmetros especificados pela ABNT NBR 6118: 2014 que se aplica à concretos estruturais, no que se refere às propriedades do concreto e também aspectos de durabilidade. A metodologia empregada pode ser dividida em três etapas: a) revisão bibliográfica; b) ensaios práticos e, c) simulação com *software* ANSYS. Posterior a essa coleta de dados e informações procedeu-se a análise dos resultados obtidos.

Os testes aos quais os concretos reciclado e convencional foram submetidos foram: Compressão Axial, Módulo de Elasticidade e Carbonatação. Foi realizado também uma projeção da deformação dos concretos por meio de modelação computacional com o *software* ANSYS.

Como resultados, teve-se que o concreto reciclado apresentou massa específica e resistência à compressão mínima para concretos que se destinam a fins estruturais. Quanto ao módulo de elasticidade do concreto reciclado, este apresentou diminuição, comparado com o módulo de elasticidade do concreto convencional ensaiado e também em relação ao calculado pelas expressões empíricas apresentadas na ABNT NBR 6118: 2014.

Com o módulo de elasticidade menor que um concreto convencional de resistência equivalente, as deformações estimadas na simulação foram maiores para o concreto reciclado. A profundidade de carbonatação se mostrou valores próximos para ambos concretos. Contudo, agregados reciclados na superfície do corpo de prova do concreto reciclado também sofreram carbonatação.

Pelo apresentado, entende-se que a grande dificuldade de se prever o comportamento mecânico e a durabilidade dos concretos reciclados vem da dificuldade de padronizar as características e propriedades do material, devido à grande variabilidade de tipos de agregados reciclados.

Palavras-chave: Resíduo de construção e demolição. Concreto. Estruturas. Carbonatação.

PADERES, Rafael; VALE, Samyr. **Contribuição ao estudo de concreto reciclado: comportamento mecânico e aspectos de durabilidade**. Caratinga, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Civil - Curso de Engenharia Civil. Faculdades Integradas de Caratinga, Rede DOCTUM, Caratinga, 2017.

ABSTRACT

The recycled concrete is a material that allows the reuse of waste resulting from the activities of construction and demolition of structures. Currently its use is restricted to non-structural applications.

The aim of this work was to contribute to the study of recycled concrete, with reference to the parameters specified by ABNT NBR 6118: 2014, which applies to structural concrete in terms of concrete properties as well as durability aspects. The methodology used can be divided into three stages: a) bibliographic review; b) practical tests and, c) simulation with ANSYS *software*. After this data and information collection, the results obtained were analyzed.

The tests to which the recycled and conventional concretes were submitted were: Axial Compression, Modulus of Elasticity and Carbonation. It was also realized a projection of the concrete deformation by means of computational modeling with the *software* ANSYS.

As a result, it was found that the recycled concrete had a specific mass and minimum compressive strength for concretes intended for structural purposes. As for the modulus of elasticity of the recycled concrete, it presented a decrease compared to the modulus of elasticity of the conventional concrete tested and also in relation to that calculated by the empirical expressions presented in ABNT NBR 6118: 2014.

With the modulus of elasticity less than a conventional concrete of equivalent strength, the estimated deformations in the simulation were higher for the recycled concrete. The carbonation depth showed close values for both concretes. However, recycled aggregates on the surface of the test specimen of recycled concrete also underwent carbonation.

For the presented, it is understood that the great difficulty of predicting the mechanical behavior and the durability of the recycled concrete comes from the difficulty of standardizing the characteristics and properties of the material, due to the great variability of types of recycled aggregates.

Key-words: Construction waste and demolition. Concrete. Structures. Carbonation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RCD	Resíduo de Construção e Demolição
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
IBRACON	Instituto Brasileiro de Concreto
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland

LISTA DE SÍMBOLOS

α_E	parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade
α_i	coeficiente de ponderação em função da resistência do concreto
f_k	resistência característica
f_d	resistência de cálculo
f_c	resistência à compressão do concreto
f_{cd}	resistência de calculo à compressão do concreto
f_{cj}	resistência à compressão do concreto aos “J” dias
f_{ck}	resistência característica à compressão do concreto
f_{cm}	resistência média à compressão do concreto
f_{ct}	resistência do concreto à tração direta
$f_{ct,m}$	resistência média á tração do concreto
$f_{ct,sp}$	resistencia do concreto a tração indireta
f_{st}	resistencia à tração do aço de armadura passiva
E_{ci}	módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto
E_{cs}	módulo de deformação secante do concreto
$E_{ci}(t_0)$	módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto no instante t_0
G_c	módulo de elasticidade transversal do concreto
ν	coeficiente de poisson
S_d	desvio padrão da dosagem
c	coeficiente de ponderação da resistencia do concreto
m	coeficiente de ponderação das resistencia
β_1	relação f_{ckj} / f_{ck}

S	coeficiente de ponderação em função do tipo de cimento
σ	tensão
$f_{cd, fad}$	resistencia de cálculo à compressão na fadiga
$\phi(t_{\infty}, t_0)$	coeficiente de fluência
$E_{cs}(t_{\infty}, t_0)$	deformação específica de retração do concreto
S_d	solicitação de cálculo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A maioria dos processos de fabricação de produtos geram resíduos. Quando não se dispõem de uma tecnologia para o seu reaproveitamento, certamente este material será depositado na natureza e poderá ocasionar inúmeros problemas ambientais.

A construção civil é um mercado que demanda matéria-prima e que produz entulhos, impactando negativamente o meio ambiente. Cabe ressaltar que o tipo de resíduo produzido por uma obra está condicionado à algumas características do sistema construtivo, que variam com a política das empreiteiras, além de quais materiais estão sendo usados. Os resíduos na construção civil não são gerados apenas em novas obras e empreendimentos, também existem as demolições totais e parciais de estruturas que em alguns casos geram uma quantidade enorme de material.

A tecnologia para o desenvolvimento e aplicação do concreto reciclável no Brasil, está relativamente no começo de suas pesquisas, e os principais estudos são relacionados à utilização do entulho de construção e demolição como agregados. Dos resíduos gerados, há um interesse maior pelo reaproveitamento do próprio concreto. As principais fontes geradoras de material de concreto, são as fábricas de pré-moldados, as demolições de construções, pavimentos rodoviários de concreto e as usinas de concreto pré-misturado.

É interessante notar que o concreto tem sido um material capaz de incorporar materiais que são rejeitos de outras indústrias, como a escória de alto forno. Portanto, enxerga-se nesse material um meio para reduzir o impacto gerado pela construção civil.

Sobre a substituição dos materiais convencionais pelos reciclados é preciso ter cuidado, e é importante conhecer o tipo de material usado, para possuir a noção básica de suas formas para o uso.

Buscando contribuir com os estudos dos concretos reciclados, este trabalho tem como objetivo analisar propriedades e características de um concreto reciclado produzido com agregados produzidos a partir de resíduos de construção e demolição. Para tanto, tem-se com referência os requisitos normativos aplicados aos concretos que se destinam ao emprego em estruturas.

Sabe-se que, por ser um material com características variáveis em função da variabilidade de sua composição, o concreto reciclado não é admitido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como elegível para fins estruturais.

O enfoque do estudo não é provar a aplicabilidade do concreto reciclado em estruturas, mas sim, estudar o comportamento mecânico e aspectos de durabilidade do material comparando-o com o desempenho esperado de concretos convencionais.

As estruturas precisam ter segurança, estabilidade e durabilidade. Neste estudo serão abordados os parâmetros relativos ao comportamento mecânico: resistência à compressão axial e módulo de elasticidade estático. E aspectos relacionados à durabilidade: deterioração e deformações ao longo da vida útil.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento mecânico e aspectos de durabilidade do concreto reciclado tendo como parâmetros de referência os requisitos normativos da ABNT NBR 6118: 2014 para concretos para fins estruturais.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Apontar as propriedades pertinentes aos concretos estruturais sob escopo da ABNT NBR 6118: 2014;
- Apontar os tipos de resíduos de construção e demolição (RCD) passíveis de serem empregados na produção de concreto reciclados;
- Produzir concreto convencional e concreto com agregado reciclado para realizar os ensaios necessários ao estudo do comportamento mecânico e da análise de durabilidade: resistência à compressão axial, módulo de elasticidade estático e carbonatação;
- Estimar o comportamento do concreto reciclado ao longo da vida útil, sob aspectos de deformação, com uso do *software* ANSYS.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os resíduos de construção e demolição possuem potencial para serem reutilizados para diferentes fins. Dar um destino útil à um resíduo contribui para a redução do impacto ambiental provocado pela indústria da construção civil.

Neste sentido, este trabalho justifica-se por contribuir com o estudo de um material que tem real potencial de incorporar os resíduos de construção e demolição como matéria-prima, o concreto, e assim diminuir a geração de entulho nos lixões e aterros sanitários.

Indo além do ganho ambiental, a destinação útil do RCD pode gerar fonte de renda com a implantação de usinas de beneficiamento e também amortização dos custos de produção do concreto.

Apesar de inúmeras pesquisas desenvolvidas no exterior atestarem o grande potencial do material, o Brasil ainda carece de pesquisas que sirvam como ferramenta para a utilização desse material, portanto, o presente estudo também se presta à divulgação da possibilidade de aplicação do concreto reciclado.

1.4 METODOLOGIA

Para desenvolvimento deste trabalho foram estabelecidas três frentes básicas de coleta de dados e informações: a) revisão bibliográfica; b) ensaios práticos e, c) simulação com software ANSYS.

Foram consultados teses, livros, dissertações, artigos e monografias, que a pesquisa se desenvolveu de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 1.

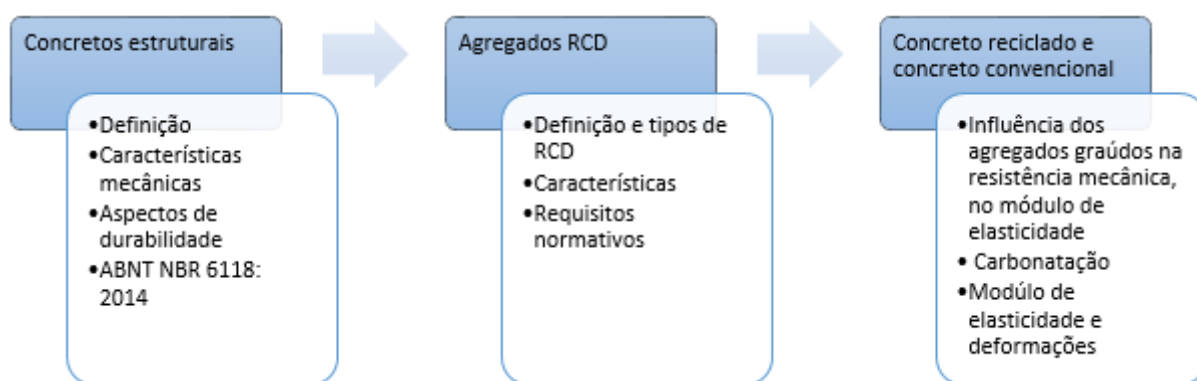


Figura 1: Procedimento de pesquisa

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para produção dos concretos convencional e concreto reciclado realizou-se a dosagem experimental, tendo por referência os métodos ABCP e IBRACON. No concreto reciclado utilizou-se substituição parcial da brita natural por brita produzida a partir de RCD, coletado e preparado na cidade de Ipanema- MG. Os materiais constituintes dos concretos também foram caracterizados mediante ensaios de granulometria e absorção de água.

A coleta de dados para análise do comportamento mecânico e aspectos de durabilidade ocorreu com a realização dos ensaios, em ambos concretos: de resistência à compressão axial, do módulo de elasticidade estático e de carbonatação

Objetivando-se ter uma estimativa do comportamento mecânico do concreto reciclado sob o ponto de vistas das deformações ao longo da vida útil, desenvolveu-se uma simulação no software ANSYS.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1. Trata-se do capítulo introdutório onde se apresenta de modo abreviado o tema e a problematização do estudo. Contém ainda os objetivos, justificativa, metodologia e a estrutura da monografia.

Capítulo 2. Aborda-se as propriedades ligadas ao comportamento mecânico dos concretos destinados a fins estruturais e os aspectos relacionados a durabilidade das estruturas de concreto armado contidos na ABNT NBR 6118:2014. Apresenta ainda os conceitos e requisitos aplicáveis aos agregados reciclados.

Capítulo 3. Neste capítulo apresenta-se todo desenvolvimento do processo experimental realizado e ainda a simulação computacional.

Capítulo 4. Tendo todos os resultados obtidos com o programa experimental e a simulação computacional, este capítulo apresenta uma análise dos resultados.

Capítulo 5. Destina-se a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONCRETO ESTRUTURAL

Concreto estrutural é o material que se destina ao uso em peças que tem função estrutural [1], ou seja, aquelas que se destinam receber e distribuir de modo seguro e estável os carregamentos até seu destino final, o solo de fundação. Sendo assim, devem apresentar características e propriedades conforme o estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, por meio da norma ABNT NBR 6118: 2014 “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento”.

Os concretos estruturais são classificados e divididos em grupos segundo critérios da ABNT NBR 8953: 2015 “Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência”. Tendo-se por base a resistência característica à compressão, há divisão dos concretos em dois grupos (Figura 2 - Quadro).

Classe de Resistência Grupo I	Resistência característica à compressão MPa	Classe de Resistência Grupo II	Resistência característica à compressão MPa
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Figura 2: Quadro – Divisão de grupos em função da classe de resistência característica à compressão do concreto

Fonte: adaptado da ANBT NBR 8953: 2015.

Neste trabalho considera-se os concretos do Grupo I como concretos convencionais, conforme a divisão da ABNT NBR 8953: 2015, e, portanto, restringe-se este estudo às exigências normativas relativas às classes de concreto integrantes deste grupo – C20 a C50.

2.2 REQUISITOS NORMATIVOS QUANTO AS PROPRIEDADES DO CONCRETO

A estrutura de concreto armado deve ser estável, segura e durável, para tanto, os materiais que compõem os elementos estruturais devem ter qualidade adequada. Objetivando estabelecer requisitos mínimos de qualidade e ao mesmo tempo garantir o domínio de aplicação da formulação de cálculo, a ABNT NBR 6118: 2014 apresenta exigências quanto as propriedades que concreto e armadura devem apresentar. Apresenta-se neste subitem requisitos aplicados ao concreto.

2.2.1 Resistência a compressão

A resistência à compressão do concreto está ligada ao conceito intuitivo que se tem de segurança, por ser na maioria dos projetos, parâmetros de cálculo [2]. Destaca-se, entretanto, que outras características, como durabilidade, impermeabilidade, deformabilidade sob carregamento ou demais solicitações são fundamentais também para o bom desempenho de uma estrutura em concreto armado [3].

Pode se definir resistência à compressão como a capacidade que o material tem de suportar esforços externos de compressão sem romper-se [4]. Para determinar essa propriedade, são ensaiados corpos de prova moldados em conformidade com a ABNT NBR 5738: 2015 “Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova”. Os procedimentos do ensaio estão estabelecidos na ABNT NBR 5739: 2007 “Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos”.

Ao executar o ensaio, procede-se o cálculo da resistência à compressão, que é obtida dividindo-se a carga máxima aplicada ao corpo de prova cilíndrico pela área da seção transversal do mesmo (Equação 2.1) [5].

$$F_c = \frac{4F}{\pi \cdot D^2} \quad (2.1)$$

Onde:

- F_c é a resistência à compressão, em MPa;
- F é a força máxima alcançada, em N;
- D é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros.

Os resultados da resistência do concreto, estabelecidas na unidade de mega Pascal (MPa), devem estar vinculados à idade do material. Quando não se especifica a idade, a resistência é tomada como referente a idade de 28 dias [1].

A padronização de todas operações que envolvem a obtenção da resistência à compressão, desde a moldagem dos corpos de prova até o rompimento destes, é fundamental para dar confiabilidade aos resultados obtidos [4].

Para o projeto das estruturas de concreto armado utiliza-se a resistência característica à compressão do concreto – f_{ck} , que é então, o valor representativo da resistência de uma amostra do material [2].

A ABNT NBR 12655: 2015 “Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento” estabelece os tipos de amostragem do concreto para que se possa ter resultados estatisticamente representativos, e assim, chegar-se à resistência característica à

compressão do concreto que é parâmetro tanto para o estudo de dosagem do concreto, quanto para o dimensionamento dos elementos estruturais.

Em conformidade com a ABNT NBR 6118: 2014, o f_{ck} deve ser especificado pelo projetista e deve ser registrado em todas as folhas do projeto estrutural. E para se obter o concreto com f_{ck} determinado em projeto, calcula-se a resistência de dosagem a uma dada idade – f_{cj} , por meio da Equação 2.2, onde inclui-se o desvio padrão – S_d , relacionado às condições de preparo do concreto [6].

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65S_d \quad (2.2)$$

Sendo:

- f_{cj} é a resistência média à compressão, para a idade de j dias, em MPa;
- f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão, em MPa;
- S_d é o desvio-padrão.

A Equação 2.2 é desenvolvida com base na distribuição gaussiana dos resultados para diversos corpos de prova, considerando-se a probabilidade de 95% do concreto, produzido e amostrado, apresentar resistência superior ao f_{ck} adotado [2].

O f_{ck} também é o valor de referência para a determinação da resistência de cálculo à compressão do concreto, f_{cd} , aos 28 dias, conforme a Equação 2.3 [1].

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.3)$$

Sendo:

- f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão, em MPa;
- f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão, em MPa;
- γ_c é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto.

Para os casos em que a resistência à compressão é importante a uma idade – j, inferior aos 28 dias, como em elementos de concreto armado pré-moldados, a ABNT NBR 6118: 2014 apresenta a Equação 2.4 e 2.5.

$$f_{cd} = \frac{f_{ckj}}{\gamma_c} \simeq \beta_1 = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.4)$$

Sendo:

- f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão, em MPa;
- f_{ckj} é a resistência característica do concreto à compressão aos j dias, em MPa;
- γ_c é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto;
- β_1 é a relação f_{ckj}/f_{ck} dada por

$$\beta_1 = \exp\{s[1 - (28/t)^{1/2}]\} \quad (2.5)$$

Sendo:

- $s = 0,38$ para concreto de cimento CPM e IV;
- $s = 0,25$ para concreto de cimento CPI e II;
- $s = 0,20$ para concreto de cimento CPV-ARI;
- t é a idade efetiva do concreto, expressa em dias.

Para o projeto de estruturas de concreto armado, sob o escopo da ABNT NBR 6118: 2014 e observando-se as classes de agressividade ambiental para cada projeto, são permitidos o uso de concretos com resistência característica à compressão de 20 a 90 MPa.

2.2.2 Resistência à tração

O concreto tem baixa resistência à tração e é por isso que os esforços de tração devem ser resistidos pelo aço nas peças de concreto armado. Contudo, há situações em que se faz necessário determinar esta resistência, principalmente para estudo da fissuração [7].

Os esforços de tração podem reduzir localmente a resistência do material ao provocarem microfissuras no interior do concreto. Com o aumento das tensões, as microfissuras internas se propagam e se unem, o que leva ao surgimento de fissuras nas faces externas e/ou ao colapso do elemento por tração [4]. Dos três ensaios para se determinar a resistência à tração do concreto, o ensaio de tração direta é o de menor emprego [8]. Sendo assim, são empregados os ensaios de tração indireta e o ensaio de tração na flexão.

O ensaio de tração indireta é normalizado pela ABNT NBR 7222: 2011 “Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos” e o ensaio de tração na flexão pela ABNT NBR 12142: 2010 “Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos”.

No ensaio da tração por compressão diametral utiliza-se corpos de prova cilíndricos e a resistência à tração indireta do concreto – $f_{ct,sp}$, deve ser calculada pela Equação 2.6 [9].

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (2.6)$$

Sendo:

- $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, em MPa;
- F é a força máxima obtida no ensaio, em N;
- d é o diâmetro do corpo de prova, em mm;
- l é o comprimento do corpo de prova, em mm.

Para o ensaio de resistência à tração submetido à flexão, utiliza-se corpos de prova prismáticos apoiados sobre dois apoios. Aplica-se a carga em duas seções simétricas, correspondentes aos terços dos corpos de prova até a ruptura (Figura 3) [10].

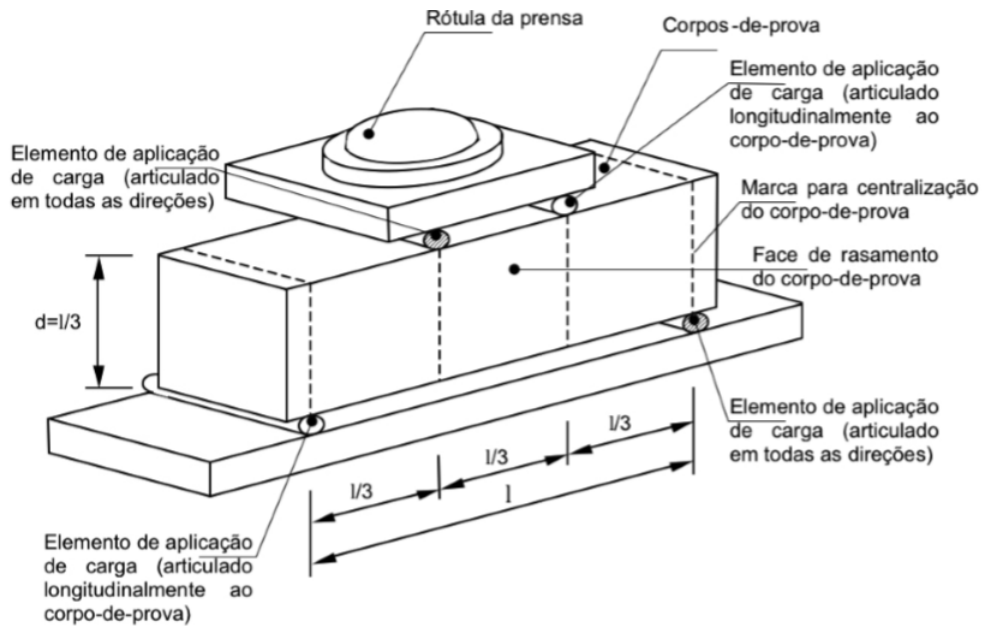


Figura 3: Perspectiva do equipamento de ensaio de tração na flexão.

Fonte: ABNT NBR 12142: 2010.

Calcula-se, pela Equação 2.7, a resistência à tração na flexão – $f_{ct,f}$, excetuando os casos em que a ruptura ocorre fora do terço médio em uma distância que não maior que 5% a dimensão do vão entre apoios. Nesses casos se usa a Equação 2.8 [10].

$$f_{ct,f} = \frac{Fl}{bd^2} \quad (2.7)$$

$$f_{ct,f} = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (2.8)$$

Sendo:

- $f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão, em MPa;
- F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, em N;
- l é a dimensão do vão entre apoios, em mm;
- b é a largura média do corpo de prova, em mm;
- d é a altura média do corpo de prova, em mm;
- a é a distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, em mm.

Não se dispondo dos resultados para resistência à tração direta, é possível estimar o valor de f_{ct} partindo dos resultados de resistência à tração indireta, adotando-se f_{ct} igual a $0,9f_{ct,sp}$ ou $0,7f_{ct,f}$ [1].

Na ausência dos ensaios de tração indireta e tração na flexão do concreto, pode-se, em conformidade com a ABNT NBR 6118: 2014, obter valores médios – $f_{ct,m}$, e característicos – $f_{ctk,inf}$ e $f_{ctk,sup}$, para a resistência à tração em função da resistência característica do concreto. Para concretos das classes de resistência até C50 estes valores são calculados pelas Equações 2.9, 2.10 e 2.11 [1].

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (2.9)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad (2.10)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m} \quad (2.11)$$

Sendo:

- $f_{ct,m}$ é a resistência média à tração, em MPa;
- $f_{ctk,inf}$ e $f_{ctk,sup}$ são as resistências características à tração, em seus limites inferior e superior, respectivamente, em MPa;
- f_{ck} é a resistência característica à compressão, em MPa.

As equações supracitadas são possíveis porque existe uma real relação entre resistência à compressão e resistência à tração, como pode ser visto na Figura 4 [8]. Há um crescimento da resistência à tração decorrente do aumento da resistência à compressão, mas não linearmente [11, 12].

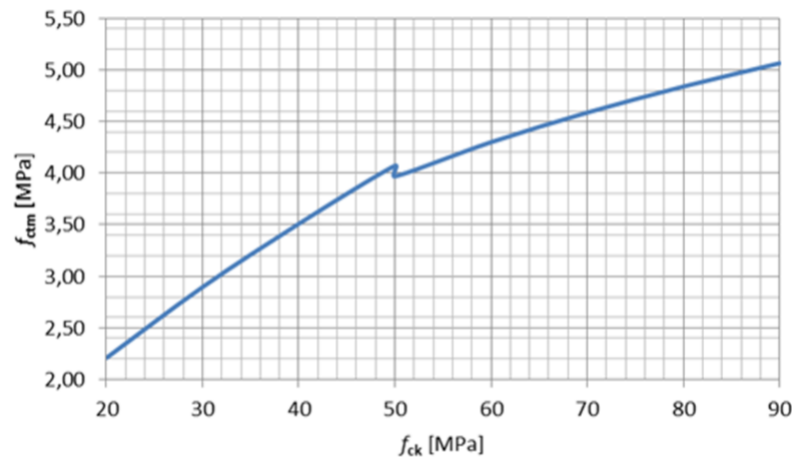


Figura 4: Relação entre a resistência média à tração e a resistência característica à compressão do concreto.

Fonte: BRUSCO, 2014.

Não há na ABNT NBR 6118, qualquer limitação para valores de resistência à tração do concreto a ser utilizado em estruturas de concreto armado.

2.2.3 Resistência no estado multiaxial de tensões

Os elementos estruturais em uso não estão submetidos a esforços simples. As tensões se distribuem ao longo da peça se combinando (Figura 5), tornando importante a análise da resistência do concreto do estado múltiplo de tensões [4].

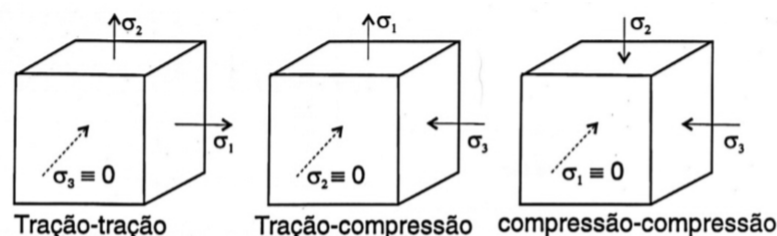


Figura 5: Estados de tensão multiaxial.

Fonte: ANDRADE; TUTIKIAN, 2011.

Quando o concreto é submetido às tensões principais $\sigma_3 \geq \sigma_2 \geq \sigma_1$, as relações expressas nas Equações 2.12 e 2.13 devem ser observadas [1].

$$\sigma_1 \geq -f_{ctk} \quad (2.12)$$

$$\sigma_3 \leq f_{ck} + 4\sigma_1 \quad (2.13)$$

Sendo:

- σ_1 e σ_3 tensões principais sobre o concreto;
- f_{ctk} a resistência característica do concreto à tração direta;
- f_{ck} a resistência característica do concreto à compressão.

Não há indicação de ensaios padronizados na ABNT NBR 6118: 2014 para análise do concreto no estado múltiplo de tensões, o estado multiaxial de tensões dever ser verificado conforme visto na Figura 6 [1].

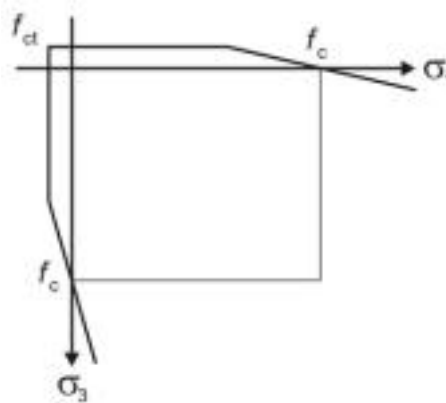


Figura 6: Resistência no estado multiaxial de tensões.

Fonte: ANBT NBR 6118: 2014.

Percebe-se que a peça estrutural, em situações normais de uso, tem a resistência influenciada pelo sistema de tensões nela atuando, mesmo sendo a resistência uma propriedade ligada diretamente ao material [4].

2.2.4 Resistência à fadiga

A fadiga está relacionada à solicitação de cargas dinâmicas repetitivas ao longo do tempo de vida útil da estrutura [1, 3]. A ruptura de um elemento por fadiga acontece para solicitações inferiores à resistência da peça [4].

Verifica-se a fadiga do concreto solicitado à compressão por meio da Equação 2.14. A resistência de cálculo à compressão na fadiga, $f_{cd,fad}$, é, como visto na Equação 2.15, equivalente

a 45% da resistência de cálculo à compressão. O fator η_c , que refere-se ao gradiente de tensões de compressão no concreto é obtido pela Equação 2.16 [1].

$$\eta_c \cdot \gamma_f \cdot \sigma_{c,max} \leq f_{cd,fad} \quad (2.14)$$

$$f_{cd,fad} = 0,45 f_{cd} \quad (2.15)$$

$$\eta_c = \frac{1}{1,5 - 0,5(|\sigma_{c1}|/|\sigma_{c2}|)} \quad (2.16)$$

Sendo:

- $|\sigma_{c1}|$ é o menor valor, em módulo, da tensão de compressão a uma distância não maior que 300 mm da face sob a combinação relevante de cargas (Figura 7);
- $|\sigma_{c2}|$ é o maior valor, em módulo, da tensão de compressão a uma distância não maior que 300 mm da face sob a mesma combinação de carga usada para cálculo de $|\sigma_{c1}|$ (Figura 7).

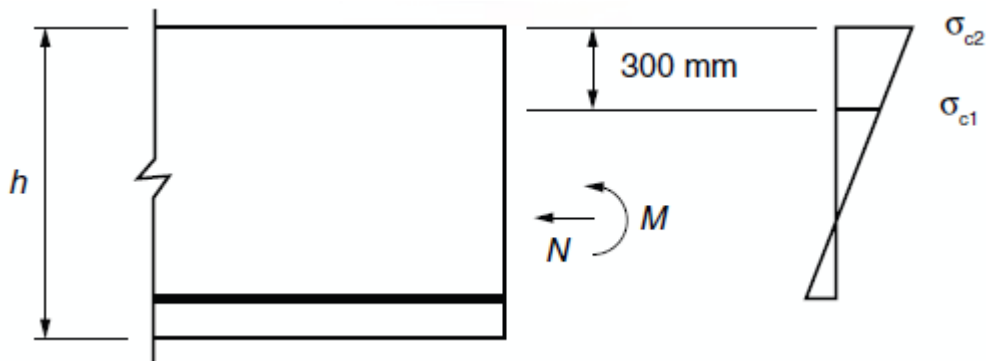


Figura 7: Definição da tensões σ_{c1} e σ_{c2} .

Fonte: ANBT NBR 6118: 2014.

Para concretos tracionados, a fadiga do concreto deve ser verificada observando a condição expressa pela Equação 2.17, sendo $f_{ctd,fad}$, calculado pela Equação 2.18 [1].

$$\gamma_f \cdot \sigma_{ct,max} \leq f_{ctd,fad} \quad (2.17)$$

$$f_{ctd,fad} = 0,3 f_{ctd,inf} \quad (2.18)$$

O equacionamento apresentado refere-se ao ensaio dinâmico de fadiga para ações de fadiga de média e baixa intensidade e número de repetições até 2 000 000 de ciclos [1].

2.2.5 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade está relacionado as deformações do concreto quando este está sob tensões de compressão. A ABNT 6118: 2014 considera o módulo de elasticidade tangente inicial, obtido aos 28 dias de idade, e na ausência de resultados do ensaio, este pode ser calculado pela Equação 2.19, para concretos da classe C20 a C50 [1].

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{F_{ck}} \quad (2.19)$$

O coeficiente α_E varia em função da natureza do agregado graúdo, ou seja, de acordo com o tipo de rocha. Os valores de α_E são: 1,2 para basalto e diabásio; 1,0 para granitos e gnaisses; 0,90 para calcários e 0,70 para arenitos [1].

A ABNT NBR 8522: 2008 “Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão” determina os procedimentos necessários à obtenção do módulo de elasticidade tangencial inicial, E_{ci} , e também o módulo secante, E_{cs} (Figura 8).

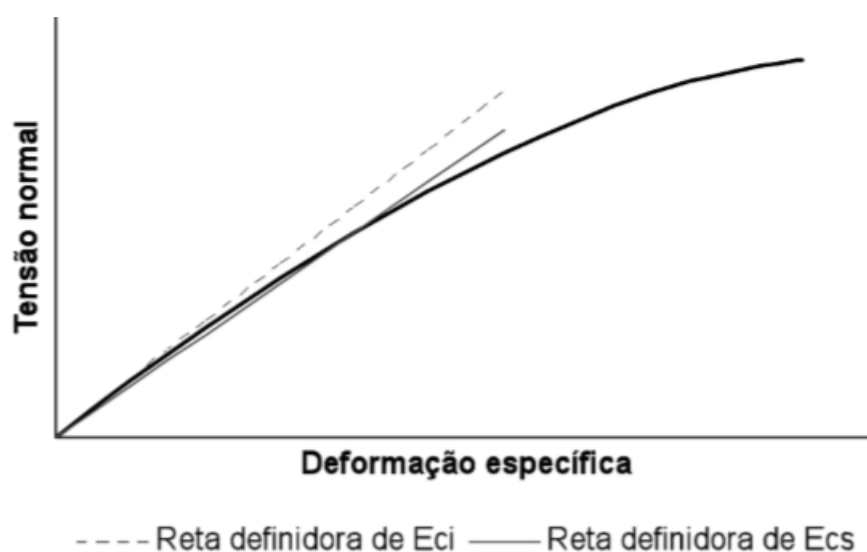


Figura 8: Definição do módulo de elasticidade.

Fonte: : SHEHATA, 2011.

2.2.6 Diagrama de tensão-deformação na compressão

O diagrama tensão-deformação para esforços de compressão são utilizados na ocasião do dimensionamento estrutural e também para análise não-linear das estruturas de concreto. A ABNT NBR 6118: 2014 admite sua simplificação para um diagrama retangular [13].

A Figura 9 apresenta o diagrama tensão-deformação idealizado utilizado para as análises de estado-limite último [1].

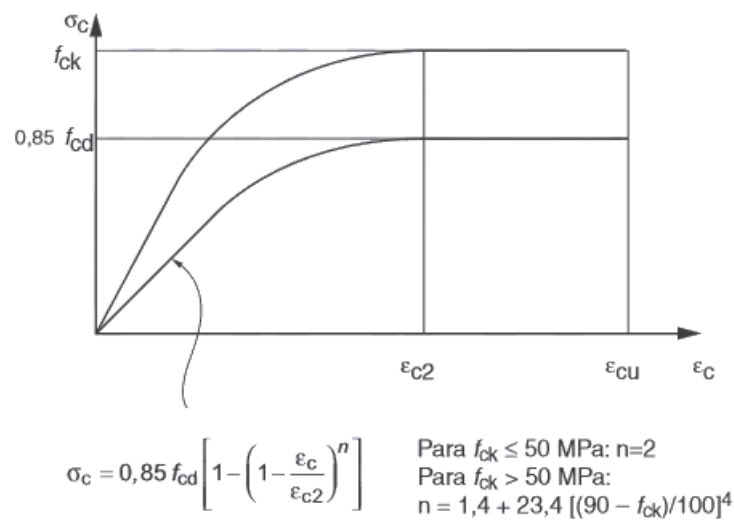


Figura 9: Diagrama tensão-deformação idealizado.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118: 2014.

2.2.7 Retração e fluência

Mesmo sem ação de carregamentos, os elementos de concreto estão sujeitos a deformações. Nos casos de deformações por retração, elas se manifestam pelo movimento da pasta de cimento, seja por perda da água ou por reações químicas [14].

Já a fluência, considerada a partir da deformação elástica inicial, é identificada como a deformação crescente ocasionada por atuação de carregamento constante ao longo do tempo [3]. Na figura 10 (Quadro) são apresentados os valores finais do coeficiente de fluência, $\phi(t\infty, t_0)$ e da deformação específica de retração do concreto, $E_{cs}(t\infty, t_0)$, sob tensões inferiores a $0,5 f_c$ quando do primeiro carregamento [1].

Umidade média ambiente %			40		55		75		90	
Espessura fictícia 2A _c /u cm			20	60	20	60	20	60	20	60
φ(t _∞ ,t ₀) Concreto das classes C20 a C45	t ₀ dias	5	4,6	3,8	3,9	3,3	2,8	2,4	2,0	1,9
		30	3,4	3,0	2,9	2,6	2,2	2,0	1,6	1,5
		60	2,9	2,7	2,5	2,3	1,9	1,8	1,4	1,4
φ(t _∞ ,t ₀) Concreto das classes C50 a C90		5	2,7	2,4	2,4	2,1	1,9	1,8	1,6	1,5
		30	2,0	1,8	1,7	1,6	1,4	1,3	1,1	1,1
		60	1,7	1,6	1,5	1,4	1,2	1,2	1,0	1,0
ε _{cs} (t _∞ ,t ₀)‰		5	-0,53	-0,47	-0,48	-0,43	-0,36	-0,32	-0,18	-0,15
		30	-0,44	-0,45	-0,41	-0,41	-0,33	-0,31	-0,17	-0,15
		60	-0,39	-0,43	-0,36	-0,40	-0,30	-0,31	-0,17	-0,15

Figura 10: Quadro - Valores característicos superiores da deformação específica de retração $E_{cs}(t_\infty, t_0)$ e do coeficiente de fluência $\phi(t_\infty, t_0)$.

Fonte: ABNT NBR 6118: 2014.

2.2.8 Coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade transversal

A relação entre a deformação longitudinal e deformação transversal do concreto é expressa pelo coeficiente de Poisson [1, 8]. Para tensões de compressão que não atinjam 50% da resistência à compressão e tensões de tração inferiores a f_{ct} , o coeficiente de Poisson, ν , pode ser admitido como igual a 0,2 e o módulo de elasticidade transversal, G_c , dado pela Equação 2.20 [1].

$$G_c = \frac{E_{cs}}{2,4} \quad (2.20)$$

2.2.9 Massa específica e dilatação térmica

Por uma questão de aplicabilidade da ABNT NBR 6118: 2014 e também sob o ponto de vista de durabilidade [13], a massa específica do concreto para estruturas de concreto armado deve estar entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³ [1].

O coeficiente de dilatação térmica pode ser admitido como sendo igual a $10^{-5}/^\circ\text{C}$ [1].

2.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO

Para entender como o uso de agregados reciclados pode afetar a resistência mecânica do concreto, é preciso conhecer quais fatores, ligados aos materiais, interferem no desenvolvimento

dessa propriedade.

A presença de vazios é responsável por limitar a resistência do concreto: quanto mais poroso, menor é a resistência alcançada [8]. Contudo, como não é fácil correlacionar quantidade de poros com a resistência, estuda-se os fatores que alteram a porosidade do concreto [3].

O fator mais relevante, por afetar a quantidade e o tamanho dos vazios na microestrutura do concreto, é a relação água/ cimento [8]. Para concretos plásticos é válida a Lei de Abrams, que indica a diminuição da resistência do concreto em função do aumento da relação água/ cimento [4], pois há aumento da porosidade.

O tipo de cimento utilizado afeta a velocidade e grau de hidratação da pasta de cimento, o que resulta em maiores ou menores valores de resistência à uma determinada idade [13]. E a variedade de cimentos fabricados tem por finalidade garantir variações benéficas no comportamento mecânico, físico e químico do concreto endurecido [14].

O silicato tricálcio e o silicato bicálcio são os principais compostos responsáveis pela hidratação do cimento e consequente ganho de resistência do concreto, sendo o primeiro mais ativo nas idades iniciais e o segundo em idades mais avançadas [3, 14]. Estes silicatos compõem juntos cerca de 75% do cimento Portland, o que comprova que são essenciais para o desenvolvimento da resistência [8].

A trabalhabilidade do concreto no estado fresco é influenciada pelas propriedades dos agregados. Entretanto, em se tratando de resistência mecânica de concretos convencionais, os agregados pouco afetam a resistência mecânica, vindo a se tornar relevantes para os concretos de alta resistência [3]. Destaca-se a importância do uso de agregados com curva granulométrica bem graduada para elevar a resistência, por favorecer a trabalhabilidade com um consumo menor de água e fechar vazios fisicamente [13].

Percebe-se que o determinante para se obter a resistência desejada para o concreto é controlar a relação água/cimento. A escolha e definição do adequado proporcionamento entre os demais materiais deve favorecer a trabalhabilidade ao menor consumo de água possível.

2.4 TENSÕES-DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

A resistência mecânica é sem dúvida um parâmetro importante para a segurança das estruturas de concreto armado, mas não é o único. Os elementos estruturais também devem apresentar rigidez adequada para que as deformações não prejudiquem o bom funcionamento da edificação.

Os materiais constituintes, a proporção e interação entre estes alteram o comportamento do concreto sob tensões, o que dá origem a diferentes diagramas de tensão-deformação de compressão [15].

Os fatores que influenciam a resistência mecânica, geralmente também exercem influência em maior ou menor grau sobre o diagrama-tensão deformação [15]. Destaca-se, entretanto, a influência exercida pelos agregados graúdos.

O módulo de elasticidade é dado pela inclinação do trecho inicial da curva tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial [13] e, como pode ser visto na Figura 11, dentre os vários fatores intervenientes, está o agregado graúdo.

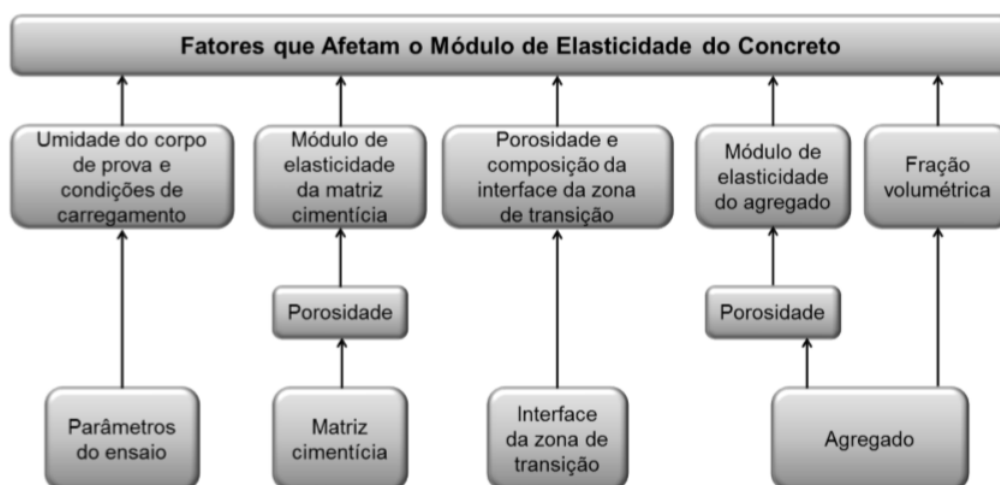


Figura 11: Fatores que afetam o módulo de elasticidade.

Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014

Características como composição mineralógica e porosidade afetam a rigidez dos agregados graúdos, como consequência, afetam também a rigidez do concreto endurecido [8]. Quanto maior o módulo de elasticidade, menos o concreto se deforma sob tensões de compressão, mas em contrapartida sua ruptura é mais frágil e, para módulos de elasticidade menores, tem-se maiores deformações antes de ocorrer a ruptura [13].

A ruptura frágil do concreto não é interessante para as estruturas na análise e dimensionamento das peças para os estados-limites últimos. Mas também não se pode ter deformações excessivas pois estas constituem estados-limites de serviço, ou seja, prejudicam o desempenho de parte ou toda edificação.

2.5 DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

As estruturas de concreto devem ser projetadas para se manterem seguras e duráveis e, para tanto devem estar de acordo com as condições ambientais previstas na fase de planejamento [1]. Para correlação entre potencial de deterioração e medidas para promover a durabilidade da estrutura, a ABNT NBR 6118: 2014 divide em quatro classes, segundo a agressividade ambiental, os meios em que as obras serão edificadas (Figura 12 - Quadro).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
II	Moderada	Submersa	Pequeno
III	Forte	Urbana ^{a,b}	Grande
IV	Muito forte	Marinha ^a	Elevado
		Industrial ^{a,b}	
		Industrial ^{a,c}	
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Figura 12: Quadro - Classe de agressividade ambiental (CAA).**Fonte:** ABNT NBR 6118: 2014.

Na Figura 13 apresenta-se o processo de deterioração das estruturas de concreto, evidenciando a importância de se avaliar o nível de classe de agressividade ambiental para assegurar a durabilidade da obra.

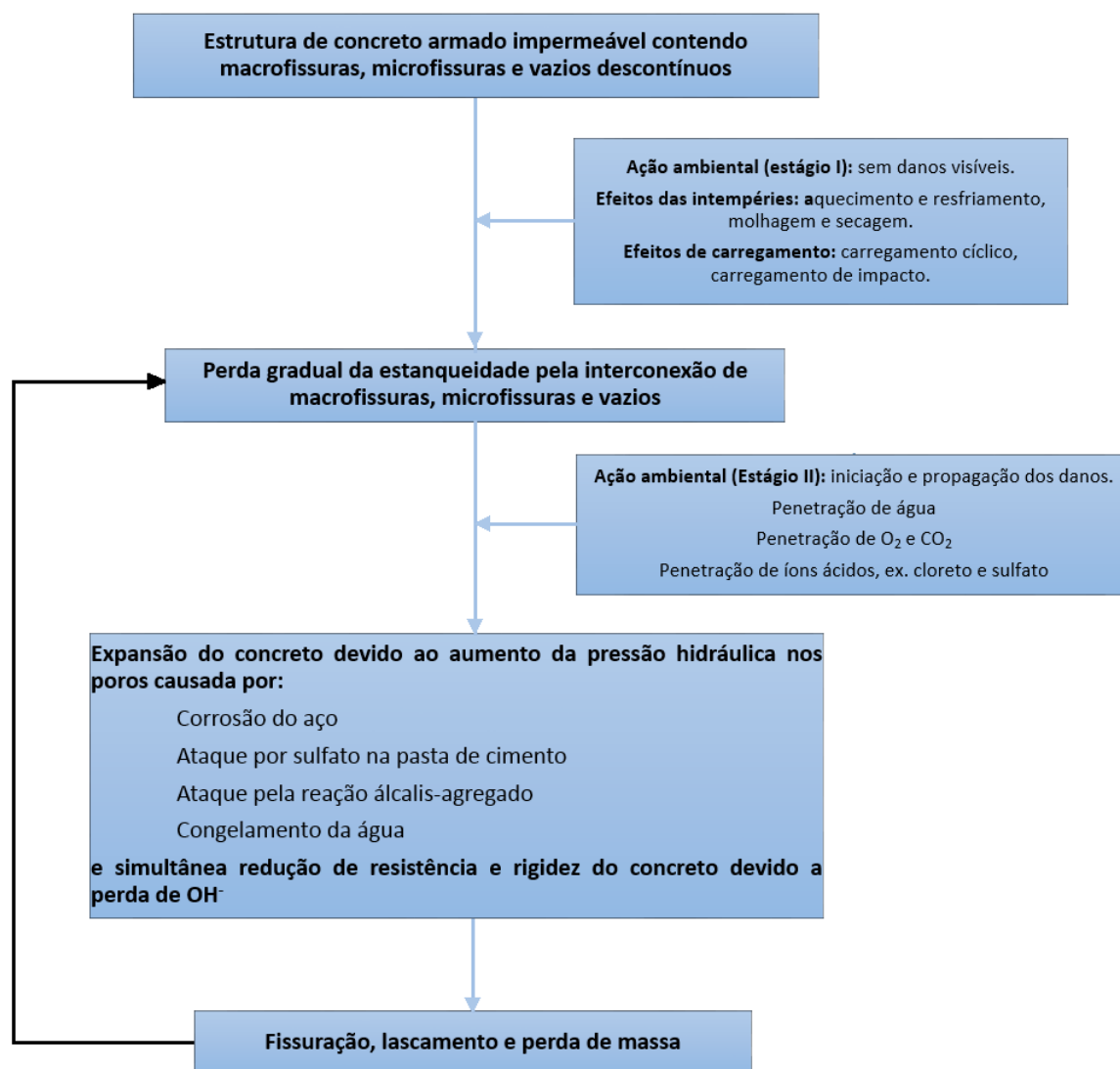


Figura 13: Um modelo holístico da deterioração do concreto a partir dos efeitos ambientais mais frequentes.

Fonte: SILVA, 2015.

A ABNT NBR 6118: 2014 lista como mecanismos de deterioração do concreto e das armaduras os processos de lixiviação, expansão por sulfatos, reação álcalis-agregado, carbonatação, ação de cloretos [1].

Quanto aos critérios de projeto, tem-se observações sobre drenagem, formas arquitetônicas e estruturais, inspeção e manutenção preventiva. A ABNT NBR 6118: 2014 também especifica o cobrimento e detalhamento das armaduras bem como a limitação das aberturas de fissuras.

O cobrimento da armadura é fundamental para a durabilidade da estrutura, a espessura deve ser compatível com a classe de agressividade e a execução não pode desqualificar esse detalhe tão importante [16].

A relação água/cimento e a classe de resistência do concreto correlacionadas a classe de agressividade também são estabelecidas, como pode se observar nas Figuras 14 e 15 (Quadros), respectivamente.

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.
^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Figura 14: Quadro - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118: 2014

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal > 45 mm.

Figura 15: Quadro - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta_c = 10$ mm.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118: 2014

2.6 AGREGADOS RECICLADOS

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são formados por diferentes materiais, uma vez que são gerados em diferentes momentos do processo construtivo, o que dificulta o aproveitamento destes como agregados para concreto ou mesmo para outros fins [17].

O RCD que se destina ao reaproveitamento na construção civil deve ser coletado e separado adequadamente para que não haja contaminação [17] e, além disso, devem atender

aos requisitos especificados pela ABNT NBR 15116: 2004 “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos”.

Como visto, o uso de agregado reciclado para concreto estrutural ainda não possui normatização nacional, o que reforça a necessidade de estudo de como as propriedades deste material influenciam as propriedades dos concretos utilizados nas estruturas.

Genericamente, têm-se que os agregados reciclados são compostos por grãos britados e descontaminados de concretos, argamassas, cerâmica e outros materiais secundários como madeira e aço [18].

Há ainda a possibilidade de se reutilizar o agregado convencional a partir do concreto fresco, após lavagem destes, na produção de novo concreto, como prevê a ABNT NBR 12655: 2006.

É importante estudar as características dos agregados de modo individual, pois são eles que ocupam geralmente 75% do volume do concreto [19] e como visto, eles interferem na resistência mecânica e no módulo de elasticidade do concreto.

A ABNT NBR 15116: 2004, em conformidade com a Resolução CONAMA 307, divide os resíduos de construção em quatro classes [20], sendo:

Classe A

- resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento e outros), argamassa e concreto;
- resíduos de processo de preparo e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios e outros) produzidos nos canteiros de obras.

Classe B

- São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros.

Classe C

- São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou sua recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.

Classe D

- São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção (tintas, solventes, óleos e outros) ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos (clínicas radiológicas, instalações industriais e outros) enquadrados como classe I da ABNT NBR 10004.

Pela norma ABNT NBR 15116: 2004, os agregados reciclados são produzidos de resíduos que se encaixam na Classe A. Destes, tem-se agregados de resíduos de concreto (ARC), (Figura 16) e agregados de resíduos mistos (ARM) (Figura 17) [18].



Figura 16: Agregados reciclados: agregado de concreto reciclado, ainda misturado com impurezas

Fonte: ÂNGULO e FIGUEIREDO, 2011.



Figura 17: Agregados reciclados: agregado de RCD misto.

Fonte: ÂNGULO e FIGUEIREDO, 2011.

Simplificadamente, são requisitos gerais para uso dos agregados reciclados em concretos: pertencerem a classe A e não infringir exigências de outras normas que regulamentam a aplicação específica deste material em cada caso particular [20].

O presente estudo tem por finalidade analisar o comportamento mecânico e aspectos de durabilidade de um concreto reciclado tendo por referência os requisitos normativos da ABNT NBR 6118: 2014. Para melhor discussão dos resultados, o agregado reciclado utilizado para produção do concreto estudado, toma-se por referência os requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem fins estruturais (Figura 18 - Quadro).

Propriedades		Agregado Reciclado Classe A				Normas de ensaios	
		ARC		ARM			
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
Teor de Fragmentos à base de Cimento e rochas (%)		≥90		<90		Anexo A	
Absorção de Água (%)		≤7	≤12	≤12	≤17	NBR NM 53	NBR NM30
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos	1				ABNT NBR 9917	
	Sulfatos	1				ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais	2				Anexo A	Anexo B
	Torrões de Argila	2				ABNT NBR 7218	
	Teor total máximo de contaminantes	3					
Teor de material passante na malha 75 µm (%)		≤10	≤15%	≤10%	≤20%	ABNT NBR NM 46	
Composição Granulométrica		A composição granulométrica do agregado final a ser utilizado no concreto sem função estrutural deve estar de acordo com a ABNT 7211. A composição granulométrica do agregado reciclado pode ser corrigida pela adição de agregados convencionais.					
Pré-molhagem		Para o preparo de concreto sem função estrutural com agregado reciclado que atenda é necessária a pré-molhagem dos agregados miúdo e graúdo. A prática tem mostrado que valores em torno de 80% do teor de absorção de água do agregado reciclado em uso são adequados.					

Figura 18: Quadro - Requisitos para Agregado Reciclado Destinado ao Preparo de Concreto Sem Função Estrutural.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15116: 2004

Para melhor compreensão de como os agregados reciclados podem interferir nas propriedades e no desempenho do concreto estrutural, aborda-se a seguir considerações sobre: massa específica e massa unitária, absorção de água e composição granulométrica.

2.6.1 Massa específica e massa unitária

Massa específica é a massa da unidade de volume de um material compactado, ou seja, sem vazios. E a massa unitária é aquela correspondente a massa da unidade de volume de um material considerando-se a presença de vazios, ou seja, em seu estado natural [21].

Agregados reciclados, em função de sua porosidade maior quando comparada com a de agregados naturais, apresentam geralmente menores valores de massa específica e massa unitária

[17]. Sendo a massa específica e a massa unitária menores devido um aumento da porosidade, que pode ser entendida como a propriedade que a matéria tem de se apresentar descontínua [22], há de se esperar, a princípio, interferências nas propriedades do concreto.

Em métodos de dosagem, como o Método ABCP, a massa específica dos agregados é um importante parâmetro de dosagem. E independentemente do método utilizado no estudo de dosagem, a massa específica é necessária para converter traços em massa para traços em volume [23].

2.6.2 Absorção de água

Pode-se definir absorção de água a capacidade de um material captar do meio externo a água e retê-la em si, sendo expressão comumente em termos de porcentagem da massa do material seco [21].

Relaciona-se, assim como a massa específica e a massa unitária, com a porosidade do material, e geralmente é a propriedade que marca uma diferença significativa entre agregados reciclados e agregados naturais [17].

É uma propriedade importante de ser observada nos agregados, pois interfere na quantidade de água a ser utilizada para produção do concreto, afetando tanto a trabalhabilidade quanto a resistência mecânica [13].

As correções da proporção de água do traço do concreto são feitas com os dados de absorção e umidade superficial dos agregados e é importante observar também a ocorrência do fenômeno de inchamento em agregados miúdos [24].

2.6.3 Composição granulométrica

Pela composição granulométrica obtém-se a distribuição dos grãos, quanto a tamanho e quantidade relativa, que constituem os agregados. Também, para caracterização granulométrica dos agregados é usual a identificação do módulo de finura e da dimensão máxima do agregado [24].

Estudos com agregados reciclados de concreto e também com agregados reciclados mistos, verificam que a composição granulométrica depende com o tipo do material processado bem como os equipamentos de britagem. Nota-se também uma maior presença de finos e maior uniformidade no tamanho dos grãos [17].

Destaca-se que a distribuição granulométrica altera a quantidade de água necessária à mistura de concreto para que se atinja a trabalhabilidade desejada e compatível com a aplicação do material [25].

2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

Para aplicação em estruturas, o concreto precisa atender aos requisitos especificados pela ABNT NBR 6118: 2014, portanto apresentou-se as propriedades que se espera de um concreto dito estrutural. Estes parâmetros servirão de referência para analisar os resultados obtidos com o programa experimental deste trabalho.

Discorreu-se nesse capítulo também sobre os requisitos que os agregados reciclados devem satisfazer para serem utilizados na produção de concretos sem fins estruturais. E, de maneira análoga aos parâmetros normativos do concreto, as especificações da ABNT NBR 15116: 2004 servem de referência para analisar os resultados dos ensaios de caracterização aplicados aos agregados reciclados e naturais utilizados na produção do concreto reciclado e do concreto convencional.

No capítulo seguinte, estão expostos os procedimentos experimentais desenvolvidos e os resultados obtidos.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresenta-se os procedimentos experimentais e seus respectivos resultados, realizados para caracterização dos materiais e também aqueles aplicados ao concreto convencional e ao concreto com agregado reciclado. Apresenta ainda, desenvolvimento e resultados obtidos na simulação computacional.

Todos os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção das Faculdades DOCTUM, campus de Caratinga- MG. Também neste laboratório foram realizados a produção dos dois tipos de concretos estudados, os ensaios de abatimento do tronco de cone, os ensaios de resistência à compressão axial de parte dos corpos de prova moldados e o teste de carbonatação com fenolftaleína.

Dos corpos de prova moldados, tanto para o concreto convencional quanto para o concreto com agregado RCD, foram separados cinco corpos de prova, de cada concreto, para serem submetidos aos ensaios de determinação do módulo de elasticidade estático e resistência a compressão axial. Estes ensaios foram realizados pelo Laboratório Solução Engenharia na cidade de Ipatinga- MG. Os laudos emitidos pelo laboratório supracitado estão em anexo neste trabalho.

Os materiais utilizados na produção do concreto convencional foram: cimento Portland CP-IV-32 RS da marca Campeão, brita natural de gnaiss, areia natural, aditivo super-plastificante polifuncional Bautech e água potável.

Para produção do concreto com agregado reciclado foram utilizados os mesmos materiais utilizados na produção do concreto convencional, com a substituição parcial da brita natural de gnaiss por agregado RCD.

A produção do agregado reciclado, teve seu início a partir de um contrapiso demolido (Figura 19), adquirido de uma obra em reforma na cidade de Ipanema- MG. Transportou-se o material até o britador, Pedreira José Pedro (Figura 20), localizado na mesma cidade, com equipamentos adequados para este fim.



Figura 19: Contrapiso demolido.

Fonte: acervo dos autores.



Figura 20: Britador Pedreira José Pedro – Ipanema-MG.

Fonte: acervo dos autores.

Antes da execução do processo de britagem do contrapiso coletado, fez-se uma limpeza manual para separar qualquer outro material que não fosse argamassa. O britador foi limpo, para evitar a mistura de agregado natural com RCD, assim sendo executado o processo de britagem da matéria prima reciclada (Figura 21).



Figura 21: Processo de britagem – à esquerda contrapiso no britador e à direita o agregado reciclado.

Fonte: acervo dos autores.

Após a etapa de britagem, os resíduos foram separados em duas frações, gráúdo tipo 1 e 0, e armazenados para uso, posteriormente para a produção do concreto, utilizou somente o agregado gráúdo tipo 1.

A areia natural e a brita natural de gnaiss foram adquiridos na cidade Caratinga-MG, assim como o cimento utilizado, o CP IV 32-RS da marca Campeão. Para melhores resultados quanto a trabalhabilidade, optou-se pelo uso do aditivo superplastificante polifuncional da marca Bautech. Nas Figuras 22 e 23 podem ser vistos os materiais utilizados.



Figura 22: Brita natural de gnaiss (esquerda) e areia natural (direita).

Fonte: acervo dos autores.



Figura 23: Aditivo (esquerda) e cimento Portland (direita).

Fonte: acervo dos autores.

Nos itens seguintes, descreve-se os procedimentos dos ensaios realizados e seus respectivos resultados. Organizou-se os ensaios em: caracterização dos materiais constituintes, produção do concreto e ensaios com concreto endurecido. Inclui-se também a modulação computacional para comparação de desempenho dos dois tipos de concreto quanto a deformabilidade/durabilidade.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

3.2.1 Absorção de água dos agregados graúdos

O teste de absorção de água em agregados, é normatizado pela ABNT NBR NM 53: 2003 “Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água”. Este ensaio é necessário para o estudo de dosagem do concreto, pois a quantidade de água absorvida pelos agregados interfere na quantidade de água utilizada na produção do concreto.

Os procedimentos adotados para determinação da absorção de água dos agregados graúdos, foram os determinados pela ABNT NBR NM 35: 2003 e foram igualmente aplicados para a brita natural de gnaiss e para o agregado reciclado. Resumidamente tem-se:

- pesagem da amostra em estado natural;
- submersão da amostra em água em temperatura ambiente por um período de 24 ± 4 h;
- após período de imersão, retirada da mostra;

- secagem da água visível da amostra com pano absorvente – amostra saturada com superfície seca;
- pesagem da amostra saturada com superfície seca;
- secagem da amostra a $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ até massa constante;
- resfriamento da amostra até a temperatura ambiente durante 1h a 3h ou até que o agregado esteja a uma temperatura que permita sua manipulação (aproximadamente 50°C);
- pesagem da amostra seca.

A absorção de umidade é dada pela Equação 3.1 [26] e os resultados para a brita natural de gnaiss e para a brita RCD são apresentados na Figura 24 (Quadro).

$$A = \frac{m_s - m}{m} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Sendo:

- A é a absorção de água, em porcentagem;
- m_s é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;
- m é a massa ao ar da amostra seca, em gramas.

Brita natural de gnaiss			
Amostra 1		Amostra 2	
Massa saturada com superfície seca – m_s	2049 g	Massa saturada com superfície seca – m_s	2050 g
Massa seca – m	2000 g	Massa seca – m	2000 g
Absorção de água	2,45 %	Absorção de água	2,50 %
Agregado reciclado			
Amostra 1		Amostra 2	
Massa saturada com superfície seca – m_s	2089 g	Massa saturada com superfície seca – m_s	2092 g
Massa seca – m	2000 g	Massa seca – m	2000 g
Absorção de água	4,45 %	Absorção de água	4,60 %

Figura 24: Quadro - Resultados do ensaio de absorção de água dos agregados graúdos.

Fonte: elaborado pelos autores.

Somente os agregados graúdos foram submetidos ao ensaio de absorção de água pois a areia utilizada na produção dos concretos estava seca e os traços apresentados em massa. Logo não foi necessário considerar o inchamento da areia em função da absorção de água.

3.2.2 Distribuição granulométrica dos agregados

A determinação da composição granulométrica dos agregados é normatizada pela ABNT NBR NM 248: 2001. O ensaio foi realizado com a brita natural de gnaiss, o agregado reciclado e com a areia.

Foram utilizados os seguintes equipamentos e utensílios: balança, estufa, peneiras, agitador mecânico, bandejas, escova e fundo avulso de peneira. Os procedimentos executados, para cada amostra dos agregados, são apresentados no fluxograma da Figura 25.

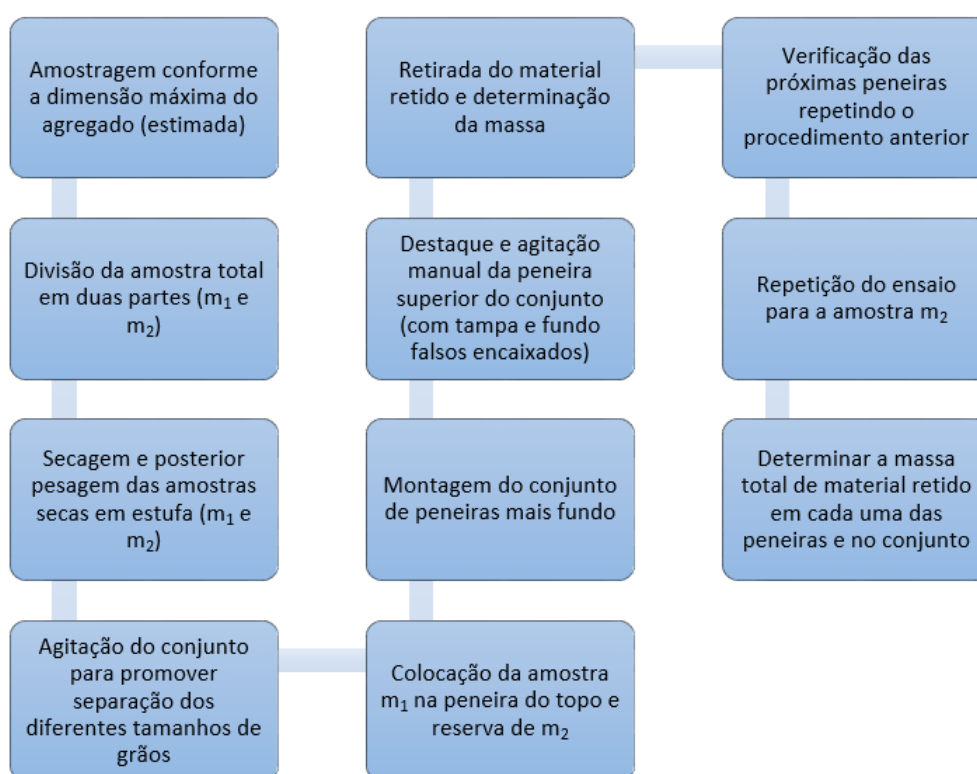


Figura 25: Procedimento de ensaio de determinação granulométrica, segundo ABNT NBR NM 248: 2001.

Fonte: elaborado pelos autores.

Os grãos de agregado miúdo e graúdos que ficaram presos nas malhas das peneiras foram retirados através da passagem da escova de aço, de modo que nenhuma partícula fosse perdida. Nas Figuras 26, 27 e 28 (Quadros) são apresentados os resultados para areia, brita natural e agregado reciclado, respectivamente.

Peneiras (mm)	Primeira Determinação		Segunda Determinação		% retida média	% retida acumulada
	Peso retido (g)	% retida	Peso retido (g)	% retida		
1,180	213,14	10,7	204,18	10,2	10	10
0,600	508,57	25,4	515,78	25,8	26	36
0,425	533,10	26,7	491,27	24,6	26	62
0,300	234,01	11,7	254,53	12,7	12	74
0,150	436,30	21,8	463,01	23,2	23	97
0,075	61,15	3,1	55,25	2,8	3	100
Fundo	12,66	0,6	14,86	0,7	1	101
Total	1998,93	100,0	1998,88	100,0	101	-

Figura 26: Quadro - Distribuição granulométrica da areia.**Fonte:** elaborado pelos autores.

Peneiras (mm)	Primeira Determinação		Segunda Determinação		% retida média	% retida acumulada
	Peso retido (g)	% retida	Peso retido (g)	% retida		
25,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0	0
19,0	67,41	3,4	92,70	4,6	4	4
9,50	1771,61	88,6	1721,85	86,1	87	91
4,75	152,24	7,6	175,74	8,8	8	99
2,36	1,48	0,1	0,56	0,0	0	99
1,18	0,38	0,0	0,30	0,0	0	99
0,15	1,17	0,1	0,73	0,0	0	99
Fundo	5,60	0,3	8,30	0,4	0	99
Total	1999,99	100,1	1999,98	99,9	99	-

Figura 27: Quadro - Distribuição granulométrica da brita de gnaiss.**Fonte:** elaborado pelos autores.

Peneiras (mm)	Primeira Determinação		Segunda Determinação		% retida média	% retida acumulada
	Peso retido (g)	% retida	Peso retido (g)	% retida		
25,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0	0
19,0	87,36	4,4	47,66	2,4	3	3
9,50	1741,41	87,2	1761,29	88,1	88	91
4,75	145,90	7,3	160,99	8,1	8	99
2,36	2,51	0,1	2,29	0,1	0	99
1,18	1,72	0,1	1,94	0,1	0	99
0,15	9,96	0,5	13,36	0,7	1	100
Fundo	8,25	0,4	11,62	0,6	0	100
Total	1997,11	100,0	1999,15	100,1	100	-

Figura 28: Quadro - Distribuição granulométrica do agregado reciclado.**Fonte:** elaborado pelos autores.

Sendo o módulo de finura (MF) o valor correspondente a soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal dividido por 100 [27], a areia ensaiada apresenta MF igual a 2,17. E ambos agregados graúdos possuem dimensão máxima de 19 mm.

3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS CONVENCIONAL E RECICLADO

Trabalhabilidade e resistência mecânica geralmente são os principais parâmetros para o estudo de dosagem dos concretos. Aliados a eles deve-se ter em pauta o custo do produto. Como o objetivo não é a comercialização, mas sim um estudo de diferentes propriedades, este trabalho deu prioridade à trabalhabilidade, observada visualmente e pelo ensaio do abatimento do tronco de cone, e à resistência à compressão axial aos 28 dias.

Para determinação dos traços dos concretos estudados foram usados como referência o Método ABCP e o Método IBRACON. Algumas adaptações foram feitas para atender as demandas deste estudo. Tendo visto na literatura revisada que a porosidade do concreto afeta a resistência mecânica e que a relação água/ cimento é o principal fator que influi na porosidade [3, 8], dividiu-se os ensaios em dois estudos, com concretos distintos (Figura 29).

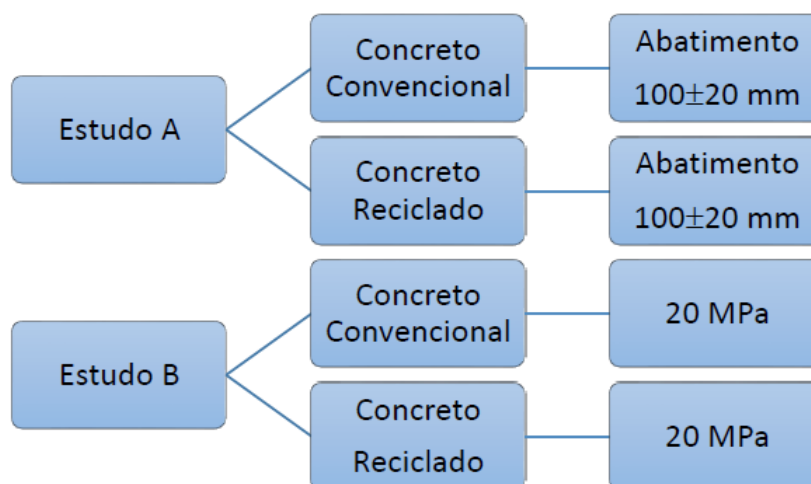


Figura 29: Divisão do estudo dos concretos.

Fonte: elaborado pelos autores.

Para o Estudo A, os traços iniciais foram definidos para atenderem simultaneamente à resistência à compressão de 20 MPa e abatimento de tronco de cone de 100 ± 20 mm, para ambos concretos.

Para o concreto convencional utilizou-se o Método ABCP para obter o traço inicial, em massa, 1: 1,960: 2,280: 0,490 para as proporções de cimento, areia, brita e água. Corrigiu-se a quantidade de água utilizada em função da absorção de água apresentada pela brita.

Na produção deste concreto foram realizados ajustes para que a trabalhabilidade desejada fosse atendida. Houve necessidade de alterar o teor de argamassa e a relação água/ materiais secos. Desta forma, a produção do concreto convencional finalizou quando se obteve um abatimento de 95 mm. O traço final, em massa, obtido foi 1: 2,144: 2,096: 0,576.

Destaca-se que com a alteração da relação água/cimento de 0,49 para 0,576, esperava-se que o material não apresentasse a resistência à compressão de 20 MPa, o que foi confirmado posteriormente com o ensaio.

O traço inicial, em massa, para o concreto reciclado foi definido com a metodologia do Método IBRACON. Para produção deste concreto, substituiu-se parcialmente a brita natural de gnaíse pelo contrapiso britado, na proporção de 50%.

Deste modo, 1: 2,030: 1,240: 1,240: 0,550 foi o traço padrão inicial, em massa das proporções de cimento, areia, brita natural, agregado reciclado e água. A quantidade de água foi corrigida em função a absorção de água da brita natural e do agregado reciclado.

De modo semelhante ao executado para o concreto convencional, na produção do concreto reciclado ajustes foram feitos para se obter a trabalhabilidade. Entretanto, somente foi alterada gradativamente a relação água/ materiais secos, pois o teor de argamassa foi considerado suficiente. Finalizou-se a produção ao se obter o abatimento de 90 mm como o traço padrão final 1: 2,030: 1,240: 1,240: 0,640.

Como o método de dosagem utilizado de referência foi o Método IBRACON, não se teve expectativa de resistência à compressão a ser alcançada. Também foram produzidos concretos reciclados para os traços auxiliares, rico e pobre, conforme o método supracitado.

O propósito de desenvolver a dosagem do Estudo A é de produzir concretos mais porosos do que o usual e recomendado. Isso porque os corpos de prova destes concretos foram os utilizados para a análise da carbonatação.

No Estudo B, o enfoque foram as características mecânicas, portanto, a dosagem dos concretos convencional e reciclado deveriam proporcionar uma resistência à compressão de no mínimo 20 MPa, pois esta é a resistência limite para concretos estruturais. Mas a trabalhabilidade também tinha que ser mantida, optou-se então pelo uso do aditivo superplastificante polifuncional da Bautech para ambos concretos. O concreto convencional foi produzido a partir do traço 1: 2,144: 2,096: 0,490 e com uso de aditivo no teor de 0,6% da massa do cimento. A escolha do traço inicial foi em virtude dos resultados obtidos no Estudo A e a quantidade de aditivo foi ajustada na produção. O abatimento obtido para este concreto foi de 140 mm (Figura 30).



Figura 30: Abatimento de 140 mm do concreto convencional.

Fonte: acervo dos autores.

O concreto reciclado, com 50% de brita natural de gnaiss e 50% de agregado reciclado, foi produzido a partir do traço 1: 1,200: 0,900: 0,900: 0,380 e com uso de aditivo no teor de 0,3% da massa do cimento. A escolha do traço inicial foi em virtude dos resultados obtidos no Estudo A, incluindo os resultados de resistência à compressão. A quantidade de aditivo foi ajustada na produção. O abatimento obtido para este concreto foi de 120 mm (Figura 31).



Figura 31: Abatimento de 120 mm do concreto reciclado.

Fonte: acervo dos autores.

O ensaio de abatimento de tronco de cone é normatizado pela ABNT NBR NM 67:1998 “Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone” e a moldagem e cura dos corpos de prova, por sua vez é orientada pela ABNT NBR 5738:2015 “Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova”.

Os corpos de prova moldados com os concretos produzidos no Estudo B foram destinados aos ensaios voltados para análise do comportamento mecânico do material.

3.4 ENSAIOS COM CONCRETO CONVENCIONAL E RECICLADO

Em virtude de se ter dividido o programa experimental em Estudo A e Estudo B, apresenta-se na Figura 32 um organograma dos ensaios realizados com os concretos produzidos em cada etapa da pesquisa.

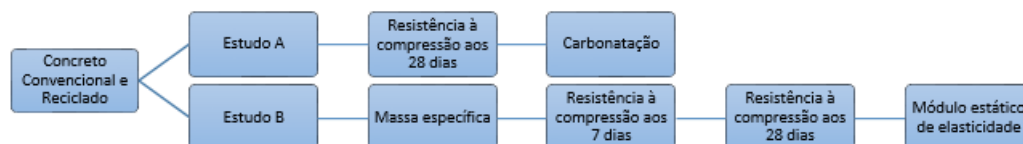


Figura 32: Ensaios realizados nos Estudos A e B.

Fonte: elaborado pelos autores.

3.4.1 Massa específica

A massa específica para o concreto convencional, tem seus valores definidos por norma, depois de secos em estufa, de 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³, se a massa especifica real não for concedida, para efeito de cálculo adota-se 2400 kg/m³ para concreto simples e 2500 kg/m³ para concreto armado[1].

A massa específica foi determinada para ambos concretos no estado fresco e foi calculada conforme definição da propriedade [21], expressa pela Equação 3.2.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.2)$$

Sendo:

- ρ é a massa específica do concreto fresco
- M é a massa da amostra
- V é o volume da amostra

O volume da amostra corresponde ao volume do molde cilíndrico utilizado para moldagem dos corpos de prova – $V = 1,57 \text{ dm}^3$. E as massas do concreto convencional e reciclado, respectivamente, foram: 3,881 kg e 3,710 kg.

O valor da massa especifica do concreto convencional foi de 2471,97 kg/m³ e a massa especifica média do concreto com RCD foi de 2363,06 kg/m³. Estes valores, portanto, atendem a norma ABNT NBR 6118: 2014.

3.4.2 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão do concreto foi realizado em conformidade com os procedimentos especificados pela ABNT NBR 5739: 2007. A cura aplicada aos corpos de prova foi a cura por imersão [28].

A resistência à compressão do concreto foi calculada pela divisão da carga máxima aplicada pela área da seção transversal do corpo de prova cilíndrico [5], sendo estes cilindros de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro.

O procedimento executado para ensaio de resistência à compressão, no Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade DOCTUM- Caratinga, foi:

- Retirada do corpo de prova do tanque de cura;
- Posicionamento do corpo de prova na prensa, modelo hidráulico de acionamento manual;
- Aplicação gradativa da carga até a ruptura do corpo de prova;
- Repetição dos procedimentos com todos os corpos de prova.

Na primeira etapa do programa experimental, o Estudo A, foram ensaiados oito corpos de prova, dois para cada concreto produzido. Os resultados apresentados na Figura 33 (Quadro) correspondem ao valor médio obtido para a resistência à compressão aos 28 dias.

Concreto		Traço final – unitário em massa Cimento: areia: brita: RCD: a/c	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)
Convencional		1: 2,144: 2,096: 0,000: 0,576	14,65
Reciclado*	<i>Padrão</i>	1: 2,030: 1,240: 1,240: 0,640	16,39
	<i>Rico</i>	1: 1,200: 0,900: 0,900: 0,380	25,10
	<i>Pobre</i>	1: 2,850: 1,580: 1,580: 0,700	10,43
* Uso de aditivo superplastificante, 0,5% da massa de cimento.			

Figura 33: Quadro - Resultados do ensaio de resistência à compressão – Estudo A.

Fonte: elaborado pelos autores.

No desenvolvimento do Estudo B, moldou-se seis corpos de prova do concreto convencional e seis corpos de prova do concreto reciclado. Para acompanhamento do ganho de resistência dos concretos produzidos, submeteu-se um corpo de prova de cada concreto ao ensaio de resistência a compressão na idade de 7 dias. Posteriormente, para cada concreto, dois corpos de prova foram ensaiados à compressão aos 28 dias. Os resultados são apresentados na Figura 34 (Quadro).

Concreto	Resistencia média a compressão aos 7 dias* (MPa)	Resistencia media à compressão aos 28 dias** (MPa)
Convencional	20,64	31,70
Reciclado	14,33	23,58
*Laboratório de Materiais de Construção – Faculdades DOCTUM/Caratinga-MG		
**Laboratório Solução Engenharia – Ipatinga-MG		

Figura 34: Quadro - Resultados do ensaio de resistência à compressão – Estudo B.

Fonte: elaborado pelos autores.

3.4.3 Módulo estático de elasticidade à compressão

O módulo de elasticidade deve ser obtido pelo ensaio normatizado pela ABNT NBR 8522: 2008, sendo este o módulo tangente inicial – E_{ci} [1]. Os ensaios para determinação dos módulos estáticos do concreto convencional e do reciclado (Figura 35), foi realizado pelo laboratório Solução Engenharia, localizado na cidade de Ipatinga-MG.



Figura 35: Preparação do corpo de prova para execução do ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade.

Fonte: cortesia de Laboratório Solução Engenharia.

Os testes foram aplicados aos 28 dias de idade do concreto, obtendo-se os resultados apresentados na Figura 36 (Quadro). A metodologia aplicada no ensaio foi a Tensão β_a fixa, na qual se carrega o corpo de prova até a força correspondente à tensão do limite superior (β_b), adotada como $0,3 f_c$, a mantendo por 60 segundos [29].

	Concreto Convencional			Concreto Reciclado		
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3
$f_{c,ef}$ (MPa)	31,5	32,6	31,2	23,7	23,4	23,8
E_c (GPa)	18,9	19,7	19,7	17,5	17,9	19,3
Média (GPa)	19,4			18,2		
Tipo do ensaio: Eci – Módulo de Elasticidade Tangente inicial (30% f_c)						

Figura 36: Quadro - Resultados do ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade do concreto convencional e reciclado aos 28 dias – Estudo B.

Fonte: adaptado de Laboratório Solução Engenharia.

O resultado obtido para o concreto convencional não foi o esperado pelo comportamento que se prevê pela ABNT NBR 6118: 2014; esperava-se $E_{ci} = 31,5 \text{ GPa}$ [1]. Para o concreto reciclado, o valor obtido em ensaio se encaixa nas expectativas: queda do módulo de elasticidade em função do uso de agregado mais poroso [8, 15].

3.4.4 Carbonatação com indicador fenolftaleína

A carbonatação é fenômeno que leva a deterioração do concreto e também pode gerar a despassivação da armadura [1]. Com a penetração de dióxido de carbono no concreto, há uma redução do pH do material cimentício devido à formação de carbonato de cálcio e água a partir da reação do CO_2 com o hidróxido de cálcio [30].

Para fazer os ensaios de carbonatação com uso da fenolftaleína como indicador, dois corpos de prova foram expostos a ambiente agressivo, uma oficina mecânica, por 30 dias. Os corpos de prova ensaiados foram: dois para concreto convencional e o outros dois com concreto reciclado, traço padrão, todos moldados no desenvolvimento do Estudo A.

Após esse período, utilizou-se uma solução de fenolftaleína para identificar a espessura do concreto carbonatado (Figuras 37 e 38). As medidas da profundidade de carbonatação nos corpos de prova, foram aferidas com paquímetros e os resultados estão na Figura 39 (Quadro).



Figura 37: Verificação da carbonatação no concreto convencional.

Fonte: acervo dos autores.



Figura 38: Verificação da carbonatação no concreto com RCD.

Fonte: acervo dos autores.

Concreto	Corpo de prova	Profundidade média de carbonatação (mm)	
		<i>Longitudinal</i>	<i>Transversal</i>
Concreto convencional	1	0,27	0,31
	2	0,26	0,30
Concreto reciclado	3	0,30	0,25
	4	0,28	0,22

Figura 39: Quadro - Profundidade média de carbonatação dos concretos.**Fonte:** elaborado pelos autores.

Na ausência de equipamento adequado para laminação dos corpos de prova, os mesmos foram rompidos na prensa, aplicando-se carga de compressão. Posteriormente, aspergiu-se a solução de fenolftaleína sobre as frações dos corpos de prova, tendo-se o cuidado de selecionar aquelas que conservavam pelo menos uma borda correspondente à superfície e outra interna.

3.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Diversos problemas de engenharia podem ser analisados pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) [31], e para o presente estudo, utilizou-se este método para estimar as deformações do concreto convencional e do reciclado. Para tanto, a ferramenta utilizada foi software *ANSYS*.

A simulação computacional teve por objetivo expor, por uma perspectiva de 50 anos, o concreto a uma ação constante de trabalho de 20 MPa e avaliar a deformação total. A formulação adotada pertence aos estudos de Hibbeler, seguindo a equação (3.3), quanto as propriedades dos materiais [32].

$$\epsilon_{med} = \frac{\Delta'_s - \Delta_s}{\Delta_s} \quad (3.3)$$

Sendo:

- Δ_s comprimento original;
- Δ'_s curva de comprimento;
- ϵ_{med} deformação normal média.

Sendo assim, as variáveis utilizadas foram:

- Coeficiente de Poisson, admitido igual a 0,2 [1] para ambos concretos;
- Módulo de elasticidade tangente inicial, admitido igual a 25 GPa para o concreto convencional e igual a 18,2 GPa para o concreto reciclado;
- Dimensões do corpo de prova cilíndrico – 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

O concreto convencional, para referência de comparação, não se trata do concreto produzido neste trabalho, mas sim um concreto padronizado a partir dos parâmetros da norma ABNT NBR 6118: 2014. Trata-se de um concreto genérico de resistência à compressão de 20MPa e, portanto, $E_{ci}=25$ GPa calculado pela expressão apresentada na norma supracitada.

As deformações totais obtidas para o concreto reciclado, cuja resistência à compressão é de 23,58 MPa, e para o concreto da classe de resistência C20 podem ser vistas nas Figuras 40 e 41, respectivamente.

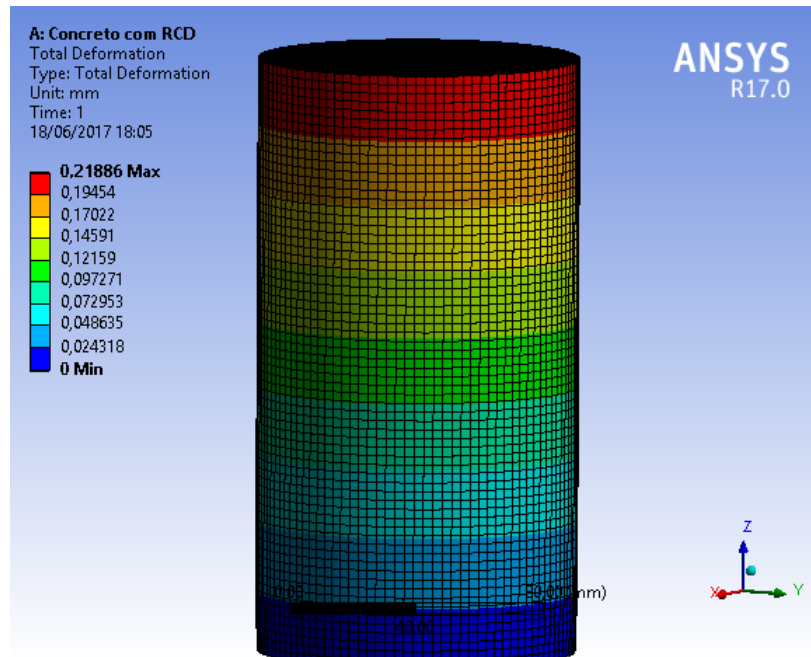


Figura 40: Deformação total no concreto reciclado.

Fonte: elaborado pelos autores.

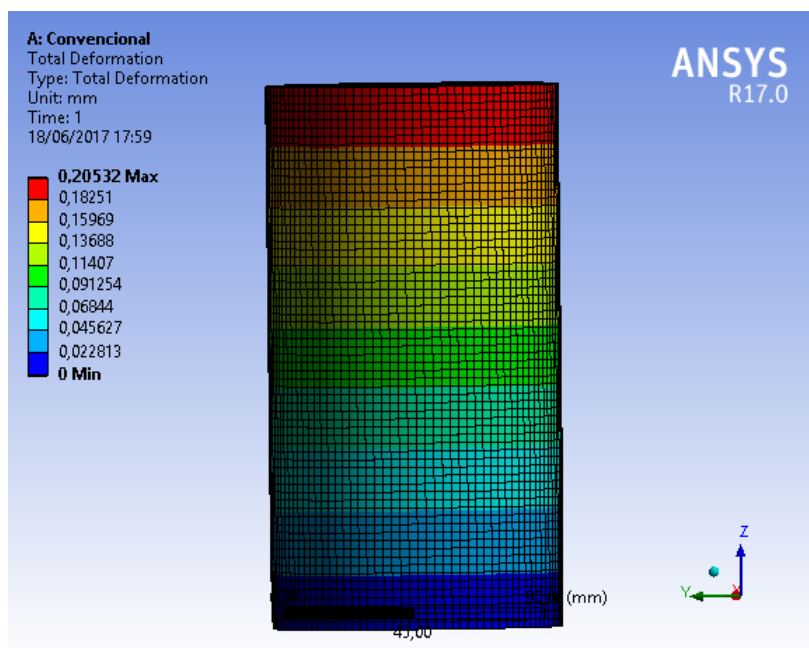


Figura 41: Deformação total no concreto classe C20.

Fonte: elaborado pelos autores.

A deformação total de 0,21886 mm do concreto reciclado é maior que a deformação total para o concreto convencional da classe C20 que é de 0,20532 mm, ainda que a resistência do concreto com agregado RCD seja maior. Tais resultados corroboram a influência do agregado no comportamento mecânico do concreto.

3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

O programa experimental desenvolvido teve por objetivo a coleta de dados que possibilitassem a análise do comportamento mecânico e também aspectos de durabilidade do concreto reciclado.

Para estudo do comportamento mecânico tem-se: resistência à compressão, módulo de elasticidade estático, massa específica e as deformações estimadas com a simulação computacional. E para análise de durabilidade, os resultados da carbonatação, resistência à compressão e absorção de água são os parâmetros base.

Além disso, os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais e a pesquisa bibliográfica também fomentaram as considerações que serão apresentadas no próximo capítulo deste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MATERIAIS E CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS

Diferentes concretos foram produzidos para analisar parâmetros ligados ao comportamento mecânico e aspectos de durabilidade do concreto reciclado. As propriedades do concreto são afetadas, em maior ou menor grau, pelos materiais empregados e a proporção entre eles, portanto, a análise dos resultados inicia-se do ponto de vista dos materiais e da dosagem dos concretos.

4.1.1 Estudo A

Na Figura 42(Quadro) apresenta-se de forma resumida as características dos concretos produzidos para o Estudo A, ou seja, aqueles que se destinaram à avaliação da durabilidade pelo ensaio de carbonatação do concreto.

Concreto	Traço final – unitário em massa Cimento: areia: brita: RCD: a/c	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Profundidade média de carbonatação (mm)	
			<i>Longitudinal</i>	<i>Transversal</i>
Convencional	1: 2,144: 2,096: 0,000: 0,576	14,65	0,27	0,31
Reciclado*	<i>Padrão</i>	1: 2,030: 1,240: 1,240: 0,640	16,39	0,30
	<i>Rico</i>	1: 1,200: 0,900: 0,900: 0,380	25,10	-
	<i>Pobre</i>	1: 2,850: 1,580: 1,580: 0,700	10,43	-

* Uso de aditivo superplastificante, 0,5% da massa de cimento.

Figura 42: Quadro - Caracterização dos concretos – Estudo A.

Fonte: elaborado pelos autores.

A baixa resistência à compressão do concreto, convencional e reciclado produzido com os traços padrão e pobre, pode ser associada à elevada relação água/ cimento e, conseqüentemente, maior teor de vazios.

E ainda sobre a relação água/ cimento, para o concreto reciclado padrão, ela resultou alta mesmo com uso do aditivo superplastificante. Isso ocorreu, porque no processo de produção, os ajustes para garantir um teor de argamassa adequado demandaram muito tempo, fazendo com que o aditivo perdesse seu efeito.

O aditivo superplastificante tem por finalidade reduzir o consumo de água para alcançar uma determinada consistência. Esse aditivo promove a dispersão do cimento fazendo com que a mistura se torne mais fluida sem a necessidade de acrescentar água. Contudo, o efeito é de curta duração, e então a trabalhabilidade volta ao normal [3].

O concreto convencional, ainda que com uma relação a/c inferior à relação a/c do concreto reciclado padrão, apresentou resistência à compressão inferior ao concreto reciclado padrão. Resultado inicialmente, inesperado. A resposta também pode estar no uso do aditivo superplastificante utilizado no concreto reciclado.

Um dos benefícios do uso desse aditivo, é que ao dispersarem os grãos de cimento ocorre uma diminuição da tensão superficial, o que leva a um teor menor de ar incorporado [3]. Sendo assim, ainda que não tenha beneficiado a trabalhabilidade, por demora na produção do concreto, o aditivo agiu favoravelmente para o ganho de resistência.

Em concretos de baixa e média resistência, a resistência do agregado, em geral, não afeta diretamente a resistência mecânica do concreto, mas características como absorção de água, distribuição granulométricas, forma e textura dos grãos afetam a demanda de água e, por conseguinte, a trabalhabilidade [4].

Dentre essas características dos agregados, destaca-se que, pelo ensaio de granulometria, tanto a brita natural e o agregado reciclado, percebeu-se uniformidade na distribuição dos tamanhos dos grãos. Ou seja, ambos agregados graúdos dispõem de curva granulométrica uniforme, o que não é particularmente favorável a trabalhabilidade e ao ganho de resistência [8].

Como esperado, em função da revisão literária realizada, o agregado reciclado, produzido a partir do contrapiso britado, apresentou maior absorção de água que a brita natural de gnaíse. A consideração da absorção foi fundamental para corrigir a água utilizada na produção do concreto.

Cimento e areia natural foram utilizados igualmente utilizados para o concreto convencional e para o concreto reciclado, apenas com ligeira diferenças nas proporções, o que não implica interferência significativa quando comparados os resultados de resistência à compressão e carbonatação.

Quanto ao nível de carbonatação apresentado por ambos concretos ensaiados, os resultados não são conclusivos e definitivos. As espessuras carbonatadas apresentam valores muito semelhantes entre concreto convencional e reciclado, assim como próxima é a resistência à compressão alcançado por estes concretos.

4.1.2 Estudo B

A produção dos concretos do Estudo B destinaram-se à análise do comportamento mecânico do concreto reciclado, portanto, determinou-se: massa específica, resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e estimativa de deformação aos 50 anos (Figura 43 - Quadro).

Características	Concreto Convencional	Concreto Reciclado
Traço final – unitário em massa Cimento: areia: brita: RCD: a/c	1: 2,144: 2,096: 0,000: 0,490	1: 1,200: 0,900: 0,900: 0,380
Massa específica (kg/m ³)	2471,97	2363,06
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	20,64	14,33
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	31,70	23,58
Módulo de elasticidade tangente inicial aos 28 dias (GPa)	19,4	18,2
Deformação estimada para 50 anos (mm)	-	0,21886

Figura 43: Quadro - Caracterização dos concretos – Estudo B.**Fonte:** elaborado pelos autores.

A resistência à compressão do concreto convencional alcançou a resistência de dosagem, da qual partiu-se da exigência de 20 MPa e considerou o desvio padrão de 5,5 MPa, pois os materiais foram medidos em massa e a água em volume [6].

O traço adotado para o concreto reciclado neste estudo foi o traço rico definido no Estudo A, pelo fato deste traço ter sido o único a superar os 20 MPa, a resistência mínima à compressão necessária para aplicação estrutural, segundo a ABNT NBR 6118: 2014. Com apenas uma redução na porcentagem do aditivo, o traço foi reproduzido e o concreto reciclado, do Estudo B, alcançou $f_{c,28} = 23,58$ MPa.

A resistência dos agregados graúdos naturais supera a resistência da pasta de cimento hidratada, por isso, não é errado afirmar que a resistência do agregado não interfere significativamente na resistência do concreto, uma vez que a ruptura ocorrerá na pasta e não no agregado [4].

No caso do agregado reciclado, por ele ser produzido a partir da britagem de um contrapiso (argamassa), entende-se, pelo resultado obtido para a resistência à compressão aos 28 dias, que a resistência da pasta e do agregado reciclado são próximas, o que limitou o ganho de resistência do concreto reciclado.

Comparando o traço do concreto convencional com o traço do concreto reciclado é possível ver que o uso do agregado reciclado interferiu na resistência do material. Há notadamente um consumo maior de cimento no concreto reciclado e uma relação água/cimento baixa [8], fatores que em concretos com agregados naturais elevariam a resistência à compressão.

O agregado reciclado, com absorção de água média de 4,5%, é mais poroso que a brita natural. Portanto, um menor valor para o módulo de elasticidade do concreto reciclado, era um resultado esperado, assim como deformações maiores sob carregamento prolongado ao longo do tempo.

4.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade são os parâmetros principais ligados ao comportamento mecânico do concreto. O primeiro se associa à capacidade de carga e ao segundo à estabilidade volumétrica. Ambos importantes para o dimensionamento e análise das estruturas em concreto armado.

Enquanto limitação para aplicação estrutural a ABNT NBR 6118: 2014, a resistência característica mínima é de 20 MPa. Ao se ter obtido $f_c=23,58\text{MPa}$ para o concreto com RCD, entende-se que a resistência à compressão não é um impedimento para aplicação do concreto reciclado em estruturas, ou seja, é um material com um potencial para aplicação estrutural, quando se analisa a resistência à compressão isoladamente.

Outros estudos também produziram concretos reciclados que alcançaram resistência à compressão superior aos 20 MPa, como Werle (2010), que produziu concretos com agregado reciclado de concreto em substituição ao agregado graúdo em diferentes teores (Figura 44 - Tabela).

Tipo de ARC	Teor de substituição (TAG)	Resistência (MPa)				
		Teor de pré-molhagem (TPM)				
		0%	25%	50%	75%	100%
18MPa (a/c 0,85)	25%		33,3		27,2	
	50%	29,9		30,4		28,5
	75%		27,9		26,6	
	100%	26,8		25,5		25,6
37MPa (a/c 0,56)	25%	29,5		35,4		32,7
	50%		31,6		33,7	
	75%	30,8		29,3		27,1
	100%		26,7		30,7	
50MPa (a/c 0,43)	25%		32,7		25,8	
	50%	33,5		34,3		33,8
	75%		28,2		25,7	
	100%	31,1		32,6		28,8

Figura 44: Tabela – Média dos resultados de compressão axial aos 28 dias.

Fonte: adaptado WERLE, 2010.

A estabilidade dimensional diz respeito às deformações e estas dependem do comportamento do concreto quando submetido a tensões, geradas pelo carregamento ou decorrentes da exposição ao meio [8].

O concreto é um material que não apresenta um comportamento linear e nem elástico quando submetido a tensões, ou seja, há uma deformação permanente mesmo quando descarregado [3].

Mas para tensões muito baixas, pode-se admitir uma linearidade entre o crescimento da deformação e o aumento do carregamento, assim como também se admite que ao se descarregar

o concreto a deformação seja reversível [3]. Deste modo, da curva tensão-deformação tem-se o módulo de elasticidade do concreto.

O concreto reciclado apresentou módulo de elasticidade tangente inicial igual a 18,2GPa. E o concreto convencional, E_{ci} = 19,4 GPa. Dentre os fatores que interferem no módulo de elasticidade do concreto está a rigidez e a fração volumétrica do agregado graúdo [3, 8, 15].

Sendo o agregado reciclado mais poroso que a brita natural e ao mesmo tempo a proporção total de agregados graúdos do traço do concreto reciclado ser inferior à do concreto convencional, a redução do módulo de elasticidade corresponde ao comportamento esperado.

Diferente da resistência à compressão, não módulo de elasticidade mínimo ou máximo na normatização brasileira, mas sim expressões empíricas para estimar, a partir da resistência característica à compressão, o módulo de elasticidade.

A norma britânica BS 8110-02: 1985, apresenta uma tabela com valores típicos do módulo de elasticidade estático e de sua variação típica para concreto de densidade normal na idade de 28 dias (Figura 45 - Quadro) [3].

Outras normas internacionais também correlacionam empiricamente o módulo de elasticidade estático com a resistência à compressão e com a densidade do concreto [3, 8, 15].

Resistência aos 28 dias, em cubos (MPa)	Módulo de elasticidade estático médio, aos 28 dias (GPa)	Variação típica do módulo de elasticidade estático aos 28 dias (GPa)
20	24	18 a 30
25	25	19 a 31
30	26	20 a 32
40	28	22 a 34
50	30	24 a 36
60	32	26 a 38

Figura 45: Quadro - Valores típicos de módulo de elasticidade estático aos 28 dias para concretos normais, segundo a BS 8110-02: 1995.

Fonte: adaptado de NEVILLE e BROOKS, 2013.

A forma geométrica do corpo de prova também influência no módulo de elasticidade [15], mas os valores apresentados na norma britânica mostram que o módulo de elasticidade do concreto reciclado está dentro do intervalo de variação, próximo ao limite inferior, o que pode estar ligado de fato a porosidade do agregado reciclado.

O módulo de elasticidade do concreto é empregado na avaliação do comportamento global da estrutura, na determinação de esforços solicitantes e verificação dos estados-limites de serviço [15], portanto a sua determinação é importante para as estruturas.

A expressão empírica adotada pela ABNT NBR 6118: 2014, aplicada à resistência obtida para o concreto reciclado, estima o módulo de elasticidade tangente inicial em 27,2GPa. Resultado bem diferentes dos obtido no ensaio.

Sendo assim, antes de adotar correlações empíricas simplificadas para o módulo de elasticidade do concreto reciclado é preciso expressões mais específicas para que os resultados se aproximem mais dos reais.

A simulação computacional gerou a deformação estimada para o concreto reciclado, com $f_c = 23,58$ MPa e $E_{ci} = 18,2$ GPa, estando submetido a uma tensão constante de 20 MPa durante 50 anos. Para comparação, também foi modelado um concreto $f_{ck} = 20$ MPa e $E_{ci} = 25$ GPa.

Os valores obtidos para as deformações totais, $\epsilon = 0,21886$ mm para o concreto reciclado e $\epsilon = 0,20532$ mm para o concreto de classe C20, refletem o comportamento esperado: menor módulo de elasticidade leva a maiores deformações [3].

Cabe ressaltar que essa simulação matemática não apresenta resultados reais, somente uma estimativa. Isto porque as deformações elásticas não correspondem as deformações totais do concreto. Sob carregamentos constantes prolongados o concreto experimenta um acréscimo na deformação, denominado fluência e esta é dada pelo módulo de elasticidade secante [3]. O utilizado na modulação é o tangente inicial obtido por ensaio para o concreto reciclado.

Ainda assim, é um resultado interessante, pois junto aos demais resultados e ao revisado na literatura, entende-se que a grande dificuldade de se prever o comportamento mecânico dos concretos reciclados vem da dificuldade de padronizar as características e propriedades do material, devido à grande variabilidade de tipos de agregados reciclados.

4.3 ASPECTOS DE DURABILIDADE

Diversos são os fatores que interferem na durabilidade das estruturas de concreto. Neste estudo analisa-se o fenômeno de carbonatação do concreto que é um dos mecanismos de deterioração apontados pela ABNT NBR 6118: 2014.

A porosidade do concreto é o que possibilita a penetração de agentes agressivos que podem deteriorar concreto e armadura, sendo assim, a durabilidade de uma estrutura será menor com concretos mais porosos [33].

O concreto possui pH variando de 12 a 13, o que corresponde à um meio básico [30], devido aos álcalis presentes no cimento e aos produtos hidratados do cimento, hidróxido de cálcio e gel C-S-H [8, 33].

A penetração de CO_2 no concreto, através de seus poros, compromete a estabilidade química dos álcalis e do hidróxido de cálcio presentes na pasta de cimento hidratado [33]. O gás carbônico ao se combinar com o hidróxido de cálcio faz o pH do concreto reduzir, o que pode provocar a despassivação das barras de aço, desencadeando o processo de corrosão [30, 33].

A presença de água nos poros do concreto é vista como um mecanismo de transporte para agentes deterioradores, que levam substâncias nocivas do meio para dentro do concreto

[34].

Entendendo-se absorção de água como a capacidade de capturar e manter água nos poros [21], percebe-se que quanto maior for essa propriedade, mais fácil se torna a penetração de agentes deterioradores, como o CO_2 , no concreto [33].

O fenômeno da carbonatação é o processo de reação química entre o CO_2 , que penetrou no concreto, e o hidróxido de cálcio, presente na pasta de cimento hidratado. Essa reação ocorre na presença de água e a velocidade em que se propaga depende da facilidade de penetração e dispersão do CO_2 no interior do concreto [35].

A profundidade de carbonatação depende da composição do cimento, concentração de CO_2 , idade do concreto, relação água/cimento, presença de fissuras, entre outros [35]. Dentre estes, discute-se os resultados obtidos no teste de carbonatação em função da relação/água cimento, pois como abordado anteriormente, este é um fator correlacionado à porosidade, e também porque o concreto convencional e o reciclado foram produzidos com o mesmo cimento Portland CP-IV e ensaiados à mesma idade. Além disso, foram expostos ao mesmo ambiente agressivo.

Os concretos ensaiados, convencional e reciclados produzidos no Estudo A, possuem, respectivamente, relação água/cimento igual a 0,574 e 0,640. A resistência à compressão, que é uma propriedade que depende da relação a/c, para os concretos ensaiados apresentou valores próximos, o que sugere um mesmo nível de porosidade dos concretos. De modo concordante, a profundidade de carbonatação verificada também foi semelhante para ambos concretos.

Mais é importante destacar é que nos corpos de prova do concreto reciclado, pode-se perceber que a carbonatação atingiu grãos de agregado reciclado, como pode ser identificado na Figura 46.



Figura 46: Profundidade de carbonatação no concreto reciclado.

Fonte: acervo dos autores.

O agregado reciclado foi produzido a partir da britagem de um contrapiso demolido, portanto, é um material com a base cimentícia semelhante ao concreto. A diferença é a ausência de agregado graúdo na argamassa.

Percebe-se então, que quanto a durabilidade, tendo em vista o fenômeno de carbonatação do concreto, é necessário ainda mais controle da porosidade dos concretos reciclados. Além disso é preciso reavaliar medidas como cobrimento mínimo das armaduras, relação água/cimento máxima, consumo mínimo de cimento e mesmo a classe de resistência mínima para concretos reciclados.

5 CONCLUSÃO

Tendo por objetivo apontar as propriedades pertinentes aos concretos estruturais sob escopo da ABNT NBR 6118: 2014, verificou-se que estas são: massa específica, resistência à compressão, resistência à tração, resistência no estado multiaxial de tensões, resistência à fadiga, módulo de elasticidade, diagrama tensão-deformação, retração e fluência, coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade transversal e coeficiente de dilatação térmica.

Destas propriedades, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade são afetados pelo agregado graúdo, mas de maneiras distintas. Consequentemente, as curvas padronizadas para tensão-deformação à compressão, não representam o comportamento do concreto com agregado reciclado estudado neste trabalho.

Seguindo a linha de pesquisa proposta anteriormente, os estudos referente ao agregado de RCD, obtiveram resultados positivos quanto a seu reuso na construção. Mas não para a produção de concreto para fins estruturais. Isto porque, mesmo que o concreto produzido com o agregado reciclado não tenha sido impedimento para o ganho de resistência, a carbonatação apontou para um problema de durabilidade.

Lembrando que, as características dos agregados, mesmo o natural, variam de região para região, ressalta-se que para agregados reciclados se torna mais clara a necessidade de se estudar as propriedades do material utilizado.

O RCD, utilizado na produção dos concretos reciclados, foi coletado na região leste de Minas Gerais, na cidade de Ipanema. Pelos testes para a caracterização do mesmo, granulometria e absorção de água, o agregado que resultou da britagem do contrapiso demolido está em conformidade, para estas características, com a ABNT 15116: 2004.

Após os ensaios de caracterização dos materiais constituintes e os concretos já produzidos, estes foram submetidos aos ensaios de: resistência à compressão axial, módulo de elasticidade estático e carbonatação.

Quanto ao objetivo de se analisar o comportamento mecânico do concreto reciclado, percebeu-se que a grande dificuldade de se prever o comportamento mecânico dos concretos reciclados vem da dificuldade de padronizar as características e propriedades do material, devido à grande variabilidade de tipos de agregados reciclados.

Mas ao mesmo tempo, os resultados obtidos com os ensaios e a simulação computacional convergem para a previsão inicial de que haveria reduções no módulo de elasticidade e consequente aumento nas deformações e, que por isso, os modelos de diagrama tensão-deformação da ABNT NBR 6118: 2014, bem como as formulas empíricas, não seriam aplicáveis aos concretos reciclados.

Para a verificação da durabilidade de concretos reciclados, uma atenção maior foi dada ao teste de carbonatação. Ambos concretos apresentaram uma relação água/cimento e resistência mecânica semelhantes, sendo assim, a carbonatação agiu de forma similar no concreto convencional e no reciclado. Porém no concreto com agregado RCD a carbonatação atingiu grãos de agregado reciclado que estavam na superfície do corpo de prova, o que levou a penetração de CO₂ ser mais profunda, sendo assim, a carbonatação é um fenômeno que precisa ser estudado mais detalhadamente para procurar um meio de evitar essa propagação grande que ocorreu no concreto reciclado.

Além disso é preciso reavaliar medidas como cobrimento mínimo das armaduras, relação água/cimento máxima, consumo mínimo de cimento e mesmo a classe de resistência mínima para concretos reciclados.

Com todos esses testes e análises, comprovou que o concreto com agregado reciclado apresenta comportamento mecânico parecido ao comportamento mecânico do concreto convencional, mas que, precisa de maior parametrização entre agregados reciclados e também para os concretos reciclados para que se possa adequar e normatizar seu uso para fins estruturais. Além disso, é preciso estudos criteriosos para garantir a durabilidade das estruturas.

Neste estudo, se reconhece o potencial de reaproveitamento dos resíduos de demolição e construção como agregados para concreto, mas também reconhece as falhas e dificuldades de se trabalhar e adequar a variabilidade do material aos requisitos fundamentais das estruturas de concreto: segurança, estabilidade e durabilidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto de estruturas de concreto – Procedimento: NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.
- [2] PACHECO, J.; HELENE, P. Controle da resistência do concreto. 2013. 18 f. Boletim Técnico 9. Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de La Construcción (ALCONPAT). Mérida, 2013. Disponível em: <<http://alconpat.org.br/publicacoes/>>. Acesso em: 20 jun. 2017, 13:39:02.
- [3] NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. Tecnologia do Concreto. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- [4] ANDRADE, J. J. O.; TUTIKIAN, B. F. Resistência mecânica do concreto. In: ISAIA, G. C. (Editor). Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Vol. 1.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento: NBR 12655. Rio de Janeiro, 2015.
- [7] CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. de. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado. 3. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2013.
- [8] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. Edição de Nicole Pagan Hasparyk. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: NBR 7222. Rio de Janeiro, 2011.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos: NBR 12142. Rio de Janeiro, 2010.
- [11] VANDERLEI, R. D. Análise experimental de pilares de concreto armado de alta resistência sob flexo compressão reta. 1999. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/.../1999MERomelDVanderlei.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2017, 16:00:10.
- [12] BRUSCO, G. L. Concreto de alta resistência: estudo comparativo entre a nova norma NBR 6116 e a norma americana quanto às suas propriedades mecânicas e ou dimensiona-

mento de vigas. 2014. 168 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/107535>>. Acesso em: 20 jun. 2017, 9:32:05.

[13] SILVA, C.A. da. Comportamento mecânico dos concretos de alta resistência sob a luz da ABNT NBR 6118:2014. 2015. 90 f. Monografia (Pós-graduação em Cálculo Estrutural e Fundações). Departamento de Engenharia da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2015.

[14] SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.

[15] SHEHATA, L. C. D. Propriedades elasto-plásticas do concreto. In: ISAIA, G. C. (Editor). Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Vol. 1.

[16] MEDEIROS, M. H. F. de; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (Editor). Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Vol. 1.

[17] WERLE, A. P. Determinação de propriedades de concreto com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação. 2010. Dissertação. 162 f. Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2010.

[18] ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. de. Concreto com agregados reciclados. In: ISAIA, G. C. (Editor). Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Vol. 2.

[19] LEVY, S. M. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. 2001. Tese. 208 f. Doutorado em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

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

[21] AMBROZEWICZ, P. H. L. Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. 1 ed. São Paulo: Pini, 2012.

[22] VERÇOSA, E. J. Capítulo 1: Introdução. In: BAUER, L. A. F. (Coordenador). Materiais de construção. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. Vol. 1.

[23] BAUER, L. A. F.; NORONHA, M. A. A. Capítulo 7: Estudo de dosagem. In: BAUER, L. A. F. (Coordenador). Materiais de construção. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. Vol. 1.

[24] SBRIGHI NETO, C. Agregados naturais, britados e artificiais para concreto. In: ISAIA, G. C. (Editor). Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Vol. 1.

[25] RAEDER FILHO, M. Caracterização do cimento aluminoso e sua aplicação em concretos de alta resistência (CAR). 2005. 174 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Programa

de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005. Disponível em: <<http://www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes/d0065.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2017, 13:40:08.

[26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água: NBR NM 53. Rio de Janeiro, 2003.

[27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Agregados – determinação da composição granulométrica: NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

[28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova: NBR 5738. Rio de Janeiro, 2015.

[29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão: NBR 8522. Rio de Janeiro, 2008.

[30] PAULETTI, C; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estudo da arte das pesquisas no Brasil. Ambiente construído. Vol. 7, n. 4, p 7-20. Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/31661/000638380.pdf?sequence=1>>. Acessado em: 22 jun. 2017, 23:27:05.

[31] MARTHA, L. F. Método dos elementos finitos: notas de aula do curso CIV 2118. Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1994. Disponível em: <<http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/ftppub/lfm/ApostilaMEF-cap1-LFMartha.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2017, 14:30:45.

[32] HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. Tradução: MARQUES, A. S. Revisão técnica: CUNHA JR, S.S. da. 7 ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2010.

[33] SATO, N. M. N.; AGOPYAN, V. Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos. Boletim técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, s/d. Disponível em: <<http://www.pcc.poli.usp.br/files/text/publications/BT00216.pdf>>. Acessado em: 22 jun. 2017, 20:34:45.

[34] LIMA, M. G. de. Ações do meio ambiente sobre as estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (Editor). Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Vol. 1.

[35] POSSAN, E. Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado. 2004. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8524/000578523.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 22 jun. 2017, 22:45:32.

**ANEXO A RESULTADO DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE E
RESULTADO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**



Determinação do Módulo Estático de Elasticidade do Concreto

NBR 8522

Interessado	Samyr Satler	Aplicação / Estrutura	TCC
Data do Relatório	09/06/2017	Código do Relatório	Rel - Amostra 01

fck (MPa)	Dmax (mm)	Abat. (mm)	Moldagem		Dimensão dos CPs		Código da série
			Data	Hora	D (mm)	H (mm)	
-	B1	-	11/05/2017	16:00	100	200	Amostra 01

Tipo de Ensaio	Eci - Módulo de Elasticidade Tangente Inicial (30% fc)
----------------	--

RESULTADOS

Idade	IDADE 1: 28 Dias								
fc (MPa)	31,6								
Corpo-de-prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3
L (real, mm)	100,00	100,00	100,00						
σ_a (MPa)	0,5	0,5	0,5						
σ_b (MPa)	9,5	9,5	9,5						
ϵ_a	0,0000000	0,0000000	0,0000000						
ϵ_b	0,0004750	0,0004550	0,0004550						
fcef (MPa)	31,5	32,6	31,2						
E _c (GPa)	18,9	19,7	19,7						
MÉDIA (GPa)	19,4								

Observações:



Determinação do Módulo Estático de Elasticidade do Concreto

NBR 8522

Interessado	Samyr Satler	Aplicação / Estrutura	TCC
Data do Relatório	09/06/2017	Código do Relatório	Rel - Amostra 02

fck (MPa)	Dmax (mm)	Abat. (mm)	Moldagem		Dimensão dos CPs		Código da série
			Data	Hora	D (mm)	H (mm)	
-	B1	-	11/05/2017	17:00	100	200	Amostra 01

Tipo de Ensaio	Eci - Módulo de Elasticidade Tangente Inicial (30% fc)
----------------	--

RESULTADOS

Idade	IDADE 1: 28 Dias								
fc (MPa)	23,5								
Corpo-de-prova	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1	CP 2	CP 3
L (real, mm)	100,00	100,00	100,00						
σ_a (MPa)	0,5	0,5	0,5						
σ_b (MPa)	7,1	7,1	7,1						
ϵ_a	0,0000000	0,0000000	0,0000000						
ϵ_b	0,0003750	0,0003650	0,0003400						
fcef (MPa)	23,7	23,4	23,8						
E _c (GPa)	17,5	17,9	19,3						
MÉDIA (GPa)	18,2								

Observações:

F 29 v01