

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE RESÍDUO SÓLIDO DA CONSTRUÇÃO CIVIL COMO AGREGADO

ANALYSIS OF THE USE OF SOLID WASTE COMPOSITE FROM CIVIL CONSTRUCTION AS ADDED

Lana Eduarda Pereira Gomes¹

Rafael Alves de Sousa²

Fábio Braga da Fonseca³

RESUMO: O êxodo rural ocasionou modificações aos meios urbanos, gerando a necessidade de ampliações de ambientes, melhorias nas infraestruturas, demolições e construções, provocando um aumento no setor da construção civil e, conseqüentemente, no volume de resíduos gerados. O descarte adequado e a reutilização desses materiais, em forma de agregado no concreto, tornam-se uma medida fundamental para o meio ambiente. Por meio dos ensaios de compressão axial e, tração por compressão diametral, obtém-se algumas propriedades. De modo que a especificação do agregado, como a granulometria ou o tipo de resíduo presente, influencia diretamente na resistência. Concluindo-se que, se a relação água-cimento aumenta, a resistência diminui, e outras relações alteram-se e, também que o número de vazios influencia nos resultados.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos, Construção Civil, Agregado Reciclável, Propriedades Mecânicas, Resistência.

ABSTRACT: *The rural exodus caused modifications to the urban areas, generating the need for enlargement of environments, improvements in the infrastructures, demolitions and constructions, causing an increase in the construction sector, consequently in the volume of waste generated. The proper disposal and reuse of these solid wastes, as an aggregate in concrete, become two of the measures which are fundamental for the environment. Through the axial compression and diametral compression traction tests some properties are obtained. Therefore, the specification of the aggregate, such as grain size or type of residue present, directly influences the resistance. It is concluded that the relation between the water and the cement increases, that the resistance decreases and, in other relations, they both change and, also that the number of voids influences the results.*

Keywords: Solid Wastes, Civil Construction, Recycled Aggregate, Mechanical Properties, Resistance.

¹ Graduanda em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: lanaeduardapereira@hotmail.com.

² Graduando em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: rafa_sousa_2014@hotmail.com.

³ Docente em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: fabiof31@yahoo.com.br

1 INTRODUÇÃO

O processo de evolução humana ocasionou várias mudanças, afetando direta e indiretamente o meio ambiente. Uma dessas transformações se iniciou quando houve o êxodo rural, que gerou a necessidade de mais investimento em infraestrutura como mais moradias, escolas e a ampliação de hospitais (PHILLIPPI JR.; MALHEIROS, 2005).

A construção civil é o segundo índice da economia brasileira e o primeiro que indica a estabilidade econômica (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2007). É a causa de muitos impactos ambientais, como na intervenção de paisagem, no descarte incorreto dos resíduos gerados e na extração de recursos minerais (NAGALLI, 2014).

Os minerais são recursos finitos, provenientes de jazidas naturais, com alto índice de uso e desperdício pelos quais a construção civil é a principal responsável, pois resulta do setor elevados volumes de resíduos sólidos, cerca de 15 a 35% do volume de resíduos do Brasil. Deste modo, a sociedade começou a analisar o quão necessário tornou-se influente e que gera consequências no descarte inadequado aos entulhos remanescentes (KRUGER et al., 2013).

O descarte adequado é uma das soluções para o problema de excesso de resíduos sólidos. E, a princípio, a sustentabilidade ambiental é um dos parâmetros para reduzir o montante de material residual de forma não prejudicial ao meio ambiente, ou seja, o uso controlado dos recursos e bens, propondo atender ao que é necessário atualmente e futuramente para as novas gerações, diferenciando-se da preservação, na qual se adota limitações para manter o meio inalterado (VALLE, 2004).

A população brasileira tem dificuldade no descarte adequado comparada a outros países como os europeus, que conseguem reciclar até 90% de seus resíduos. Já no Brasil, há ações pouco eficazes, gerando alto volume de material residual. Isto resulta no atraso ao destinatário correto, por disfuncionalidades e oscilações econômicas como o receio de investir em políticas ambientais e sociais, as quais possuem raro e baixo incentivo (ÂNGULO, 2000).

A geração de resíduos em processos produtivos de construção é inevitável, com um constante aumento demográfico propiciando aumento de construções, reformas e demolições. No entanto, o resíduo produzido pela sociedade tende a ser

despejado na natureza. Se não houver conhecimento tecnológico adequado, como estudo de impacto ambiental acerca do material descartado, diversas problemáticas podem surgir ao descarte incorreto, como a contaminação do solo, agravando-se no decorrer do tempo (BUTTNER, 2003).

O armazenamento de resíduo da construção civil é complexo pelo seu elevado volume, peso e composição heterogênea de materiais, que pode vir a propiciar o surgimento de gases como o sulfídrico (H_2S) e, conseqüentemente, provocar o aumento de odor e alterar as características químicas do aterro. Dessa forma, há a contaminação do solo por decomposição de materiais como o gesso, utilizado geralmente para acabamentos ou vedações, estando presente em resíduos de construção civil em diversos percentuais (EUN et al., 2007).

O resíduo sólido da construção civil pode fazer parte de uma nova construção como agregado. O agregado é composto por: cerâmicas, tijolos, concretos, argamassas e há situações que o material orgânico faz parte da composição, tais como papéis, plásticos, madeiras e gesso. Os materiais são separados, moídos e classificados conforme a espessura (SANTOS, 2007).

Neste trabalho, objetiva-se analisar as propriedades mecânicas, a resistência à compressão axial e a tração por compressão diametral, em dois traços de concreto confeccionado com resíduos da construção e demolição civil (RCD), e compará-los ao traço referência.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Resíduos de construção e demolição

Resíduo sólido de construção civil é definido como todo resíduo gerado pelos reparos de demolições, construções, reformas e escavações de terrenos. Alguns resíduos sólidos, ou ainda entulhos de obra, são: tijolos, blocos cerâmicos, concretos em geral, tintas, rochas, metais, resinas, madeiras e compensados, argamassas, vidros, gessos, tubulações, solos, pavimentos asfálticos, cabos, telhas, fios e plásticos (CONAMA, 2002).

Com o aumento de infraestrutura urbana, houve aumento de resíduos, o que gerou dificuldades para as administrações públicas referente ao destino dos resíduos industriais, domésticos e, principalmente, os resíduos de demolições e obras de construção civil. Nos últimos anos, a construção civil tem demonstrado avanços na

redução de desperdícios, com a implantação de planos de gerenciamentos de gestão de qualidade e aproveitamento dos materiais quase que na sua totalidade, reduzindo assim o impacto ao meio ambiente e colaborando para a diminuição do uso de matéria-prima natural (JOHN,1996).

Existem variadas maneiras para se classificar os resíduos, por procedência ou separação visual. A classificação é de grande importância, pois a partir dela pode-se avaliar as medidas a serem adotadas para seu descarte ou reuso de forma a não vir a agredir o meio ambiente e, por consequência, a população (CABRAL, 2007).

2.1.1 Classificação

Para que os resíduos sólidos da construção civil tivessem o destino correto e causassem um menor impacto ao meio ambiente, houve a necessidade de classificá-los. Essa classificação foi realizada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), em 2002, separando assim os potenciais de reutilização, para construção ou destinação (RESENDE, 2016).

Há vários tipos de classificações de agregado devido a sua caracterização, como, por exemplo, o tamanho dos grãos e a seleção visual. O tamanho dos grãos é feito o ensaio de granulometria conforme a ABNT NBR NM 248 e a seleção visual é feita por separação manual (ABNT, 2003).

2.1.1.1 Classificação seletiva visual

As indústrias no Brasil se utilizam da classificação visual, *catação*, que consiste na separação do resíduo perante sua coloração e composição, com o intuito de refinar o resíduo proveniente de demolições e construções como forma de obter uma caracterização do material. Por serem encontrados em maiores volumes em duas fases (CARRIJO, 2005): (a) Cinza: material com coloração acinzentada, composto em maior quantidade de materiais de origens cimentícias (com alto teor de cimento) como restos ou sobras de vigas, pilares, lajes e elementos estruturais de concreto, geralmente reaproveitado em calçadas e blocos de concreto; (b) Vermelho: em sua composição a maior concentração é de material de natureza cerâmico de coloração mais avermelhada, o que é característico da argila (matéria-prima em maior proporção), proveniente em sua grande parte de alvenarias, com utilização mais recorrente em obras de pavimentação.

2.1.1.2 Agregado reciclado misto

O resíduo sólido proveniente de construção civil, antes de ser classificado como vermelho ou cinza, passa por uma breve separação para que sejam retirados os resíduos indesejáveis como plásticos, tubulações, vidros e madeiras (LIMA; CABRAL, 2012), este subproduto, separado, com a junção dos resíduos das duas colorações, é denominado agregado reciclado misto.

O agregado reciclado misto é composto por diferentes porcentagens de materiais inertes de cor cinza (derivados do cimento) e de cor vermelha (derivados da cerâmica), possuindo também variedades nos tamanhos dos grãos (TOFFOLI, 2016). Os formatos dos grãos podem servir como limite de controle de qualidade do agregado, como os resíduos naturais, mas no agregado reciclado esse é um fator a ser investigado, por ter maior tendência à ruptura (BEJA, 2014).

2.1.1.3 Granulometria

Mediante uma série de formatos e dimensões de partículas residuais, foi necessário estabelecer parâmetros. A análise granulométrica surge como forma de prescrição, método para definir a composição do tamanho dos agregados perante análise das características físicas do material, mediante uma série de procedimentos para mensurar o maior quantitativo de material particulado de determinadas dimensões, dando uma nomeação ao agregado como um todo, considerando o fato de que os materiais sólidos coletados não são homogêneos ABNT NBR 7217 (1987).

Conforme a ABNT NBR 7211 (2005):

“Agregado miúdo: Agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.

Agregado graúdo: Agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1”

Agregado Reciclado: resíduo proveniente da construção ou demolição denominado como resíduo de classe A segundo a resolução CONAMA nº 307/2002 e processado mecanicamente ou por britagem ABNT NBR 15115 (2004).

2.2 Água

Na construção, a água é empregada nos concretos e argamassas, no qual define o seu estado fresco e possui a finalidade de controlar a variação térmica e

fundamentalmente a hidratação (reação exotérmica). Altera também propriedades, dependendo de sua proporção, como: trabalhabilidade, consistência, tempo de pega, homogeneidade e adensamento (CARVALHO, 2014).

A literatura, de modo geral, transcreve uma absorção por meio dos agregados reciclados de concreto de 6 a 7%, e de 15 a 17% para argamassas com mesmo tipo de agregado (CHEN et al., 2003). A Tabela 1 demonstra uma variação de tamanhos e determinados percentuais de absorção de água entre agregados reciclados de fase cinza (cimentício) e agregados naturais, onde nota-se cerca de seis vezes mais absorção de água que reciclados naturais.

TABELA 1. Absorção de água dos agregados reciclados de concreto e natural

Tamanho das partículas (mm)	Agregados reciclados			Agregados naturais		
	10 a 20	5 a 10	0 a 5	12 a 20	5 a 12	0 a 5
Absorção de água (%)	5,828	6,806	8,16	0,876	1,134	1,49

Fonte: Adaptado Gómez-Saberón (2002).

2.3 Agregados

Segundo a ABNT NBR 9935 (2011), sem forma ou volume definidos, os agregados consistem em um material com atividade química quase nula, sendo considerado inerte, com dimensões e propriedades adequadas para uso em argamassas e concretos.

Os agregados consistem em particulado de grãos de minerais rijos, estáveis, limpos e sem alterações químicas que não possam vir a comprometer a reação de hidratação do cimento ABNT NBR 7217 (1987).

Os agregados podem ser classificados como naturais, ou seja, provenientes da natureza em dimensões e proporções a uso, como areia e cascalho. Há também os industrializados (artificiais), obtidos por meio de processos industriais ou mecânico (ALBUQUERQUE, 2013). No entanto, as características físicas, como a textura e a forma das partículas, variam formando diversas classificações, conforme apresentadas nos Quadros 1 e 2.

QUADRO 1. Classificação dos agregados segundo a textura superficial e exemplos

Grupo	Textura superficial	Características	Exemplo
1	Vítrea	Fratura conchoidal.	Flint negro, escória vitrificada
2	Lisa	Desgastado por água ou alisado devido à fratura de rochas laminadas ou de granulação fina.	Seixo, chert, ardósia, mármore e alguns riólitos.
3	Granular	Fratura mostrando grãos mais ou menos uniformes e arredondados.	Arenito, oólito
4	Áspera	Fratura áspera de rochas de granulação fina ou média contendo constituintes cristalinos de difícil visualização.	Basalto, felsito, pórfiro, calcário
5	Cristalina	Presença de constituintes cristalinos de fácil visualização.	Granito, gabro, calcário
6	Alveolar	Com poros e cavidades visíveis.	Tijolo, pedra-pome, escória expandida, clínquer, argila expandida

Fonte: Adaptado Neville A. M.; Brooks J. J. (2013).

QUADRO 2. Classificação dos agregados segundo a forma e exemplos

Forma	Descrição	Exemplo
Arredondado	Totalmente desgastado pela ação da água ou totalmente conformado por atrito.	Seixo de rio ou zonas litorâneas marítimas; areia de deserto, de origem eólica ou de litoral marítimo.
Irregular	Naturalmente irregular ou parcialmente conformado por atrito com arestas arredondadas.	Outros seixos, flint.
Lamelar	Material em que a espessura é menor que as outras duas dimensões.	Rochas lamelares.
Anguloso	Possuem arestas bem definidas na interseção de fases razoavelmente planas.	Pedras britadas de todos os tipos, talus e escória britada.
Alongado	Em geral, material anguloso, cujo comprimento é consideravelmente maior que as outras duas dimensões.	
Lamelar e Alongado	Material com comprimento muito maior que a largura e está bem maior que a espessura.	

Fonte: Adaptado Neville A. M.; Brooks J. J. (2013).

2.4 Propriedade

No agregado reciclado a massa específica e massa unitária é uma das principais características, pois apresenta valor menor comparado ao agregado natural. Essa redução é dada em função das matérias primas, pois são menos densas do que a do agregado natural. A massa unitária pode ser reduzida pela porosidade, por conta das irregularidades dos grãos que contribuem para o melhor acomodamento das partículas (CABRAL, 2007).

Na comparação das massas específicas dos agregados reciclados vermelho e cinza, nota-se uma diferença significativa de 4,4 a 6,6%, para um teor de 100% de substituição. Isso ocorre por conta do agregado reciclado vermelho possuir maior quantidade de porosidade e menor massa específica, portanto suas partículas são acomodadas e proporcionam uma melhor distribuição na matriz (KHATIB, 2005).

2.5 Resistência mecânica

Na literatura, observam-se divergências em relação à resistência à compressão do concreto com o agregado reciclado, porém, há divergências, pois em estudos realizados por diversos autores, encontra-se resistência menor de até 45%. Em contrapartida, houve autores que encontraram resistência maior com até 33%. Essa variação é dada pela forma como o agregado reciclado é produzido, sua composição, teor de vazios, tipo de cimento utilizado e a quantidade de água e cimento (CABRAL, 2007).

Observou-se que quanto maior a relação água-cimento, maior a resistência do concreto com o agregado reciclado, dado que as partículas de cimento ficam retidas nos grãos, aumentando a aderência e melhorando a interface pasta agregado (ÂNGULO, 2000).

2.5.1 Resistência à compressão axial

A determinação da resistência à compressão axial é, em geral, uma forma de verificar e padronizar os concretos, para que se tenha controle de qualidade nas construções. Essa padronização é necessária por conta das variáveis envolvidas, como a qualidade do agregado, que está diretamente ligada à qualidade do concreto. Por isso, a resistência à compressão tem sido parâmetro de controle e é empregada para qualificação do concreto (CASTRO, 2009).

A resistência à compressão do concreto tem conexão com a tensão necessária para ocasionar a ruptura. O fator de maior relevância é a relação água-cimento, que influencia nos resultados mecânicos nos concretos convencionais. Esta relação é ocasionada pelo teor de porosidade na pasta de cimento (ARRUDA, 2013).

2.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à compressão diametral representa um fator significativo na durabilidade do material em relação à fissuração do concreto, além de outros fatores, tais como: porosidade do material, estado de umidade, dimensões, resistências das fases e velocidade de aplicação da carga (QUADROS, 2014).

O método desenvolvido por Fernando Lobo Carneiro em 1943, Rio de Janeiro, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, conhecido como “ensaio brasileiro” no exterior, é o mais utilizado. Justamente por ser o método mais simples e com mais uniformidade nos resultados (LIBÂNIO et al., 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais empregados foram: areia média, pedrisco, cimento *Portland* – CII Z 32, agregado reciclado misto, água potável e óleo (desmoldante). Os equipamentos e ferramentas adotados nas experimentações foram: estufa digital *Sterilifer*, um agitador mecânico de peneiras e peneiras da marca *Fortest*, câmara úmida, moldes cilíndricos 100mm de diâmetro x 200mm de altura (conforme NBR 5738/94), betoneira, retificadora hidráulica, prensa hidráulica, medidor de carga, relógio comparador, cintas de fixação e recipientes.

3.1 Local

Os ensaios e experimentos foram realizados no Laboratório de Matérias de Construção Civil do Centro Universitário - UNIFAFIBE de Bebedouro/SP.

3.2 Determinação do teor de umidade

O ensaio, segundo a ABNT NBR 6457 (1986), tem início com a separação de 1,0 quilograma (kg) do agregado. Na balança de resolução $\leq 1,09$ e com capacidade mínima de 1,0 kg, pesou-se o agregado para encontrar a massa da amostra umidade

(M_u). Após a pesagem, colocada na estufa digital *Sterilifer* na temperatura de 105° C e aguardou-se 24 horas para assim determinar a massa do agregado seco (M_s).

Com os valores M_u e M_s , determinou-se, por meio da Equação (1), a porcentagem do teor de umidade (W) do agregado reciclado:

$$W = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (1)$$

O ensaio de umidade realizou-se, também, com os corpos de prova já rompidos, para que houvesse a análise do teor de vazios do concreto. Colocou-se 3 partes de corpos de prova, de cada traço, submersas durante 72 horas. No próximo passo, pesou-se na balança de precisão. As partes foram colocadas na estufa digital *Sterlifer*, durante 72 horas, na temperatura de 105° C. Para a determinação do peso dos corpos de prova secos.

3.3 Análise granulométrica do agregado reciclado

Realizou-se o ensaio granulométrico de peneiramento, inserindo-se 20 kg de resíduo em um agitador mecânico de peneiras da marca *Fortest*, agitando por cerca de 10 min, com peneiras de abertura de: 6,3; 4,75; 2,36; 1,18; milímetros e 600; 300 e 150 micronmetros.

Os procedimentos adotados para a obtenção da caracterização granulométrica do agregado reciclado foram segundo a ABNT NBR 7217 (1987). Os materiais retidos em cada peneira foram colocados em recipientes de plástico identificadas, para que fossem pesadas com maior exatidão na balança de precisão, para assim obtermos a massa retida de cada peneira.

Somou-se os pesos retidos obtidos das peneiras, e comparou-se com o peso original da amostra, para observar se não ocorreu uma perda maior que 2%, pois se o houvesse seria necessário refazer o ensaio. Em seguida determinou-se a porcentagem retida em cada peneira, dividindo o peso retido pelo peso original da amostra e pela porcentagem que passa, começando de 100% e subtraindo as porcentagens retidas em cada peneira em um processo acumulativo. Para a determinação do modulo de finura e caracterização do agregado, considerou-se (2) e (3), respectivamente:

$$M_f = \frac{\sum M_i}{100} \quad (2)$$

$$M_f < 5\% \quad (3)$$

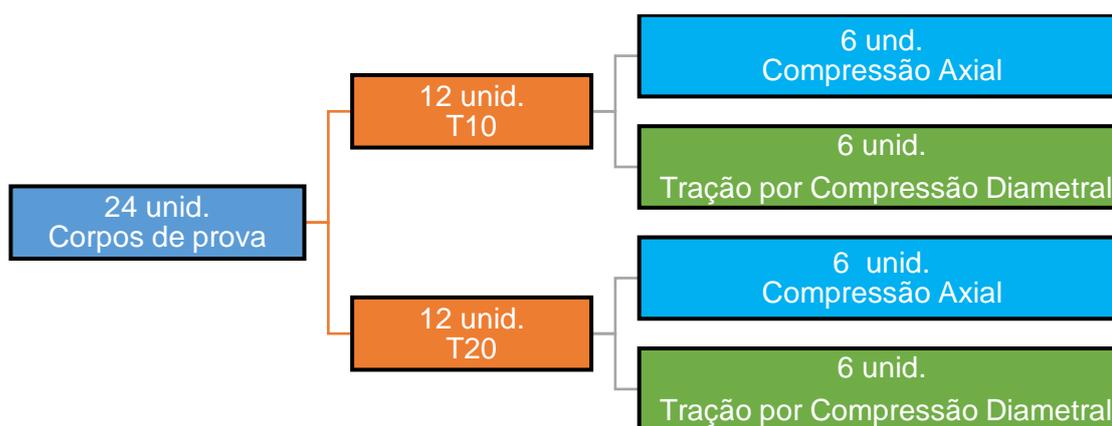
onde:

- M_i : massa do material acumulado retido (kg);
- M_f : módulo de finura (%).

3.4 Composição do concreto e moldagem dos corpos de prova (CP)

Os concretos produzidos têm por base um concreto padrão de traço (T0) em massa com proporção 1: 1,6: 2: 0,45 respectivamente cimento, areia, brita e água caracterizado como Traço de Concreto Padrão – T0, obtido de Fonseca 2018, concreto ausente de resíduos sólidos de construção e/ou demolição. Produzimos um total de 24 corpos de prova, distribuídos segundo Fluxograma 1, no qual foram dosados dois concretos nos quais substituímos parte do agregado graúdo por RCD em 10 e 20%, sendo respectivamente traço com 10% (T10) e traço com 20% (T20). O cimento adotado foi o cimento *Portland* – CII Z 32.

FLUXOGRAMA 1. Distribuição da moldagem por traço e número de corpos de prova por ensaio realizado.



Fonte: Autoria própria.

Os corpos de provas foram confeccionados segundo a ABNT NBR 5738/08, por meio de uma forma cilíndrica com dimensões 10 x 20 cm, empregando uma fina

camada de desmoldante, já o adensamento do concreto foi realizado manualmente, conforme Quadro 3:

QUADRO 3. Número de golpes e camadas

Molde	Tipo de adensamento	Nº de camadas	Nº de golpes por camada
Cilíndrico 10x20 cm	Manual	2	15
	Vibrado	1	-

Fonte: Adaptado Ambrozewicz (2012).

Os corpos de prova foram identificados conforme os traços adotados, T10 e T20, e a data de modelagem, posteriormente reservados por 24 horas para cura inicial, cobertos em um ambiente protegido de ações externas. Adiante, foi realizada a desforma, na qual ulteriormente iniciamos a cura final dos corpos, momento em que, em câmara úmida, a umidade relativa interna ultrapassava 95%, com uma temperatura de cerca de 23° C, \pm 2° C, por 28 dias.

A alta precisão dos dados a serem coletados provém da planicidade das superfícies dos corpos, portanto, antes de submetê-los aos ensaios de compressão, os corpos de prova foram retificados e planificado as bases, remetendo-se à tolerância de 0,05 mm na planicidade, segundo a ASTM C 192-06.

3.5 Ensaio de Abatimento

O método mais utilizado para o ensaio de abatimento é o *slump test*, no qual se determina a consistência do concreto. Segundo a NBR NM 67, e seus procedimentos de experimentação após serem rodados os concretos em na betoneira com os traços estabelecidos T10 e T20 obtivemos os slumps para a caracterização do concreto.

A medição foi realizada após retirar o excesso de concreto com a haste de socamento, logo, retira-se o molde em forma de cone e mede com a régua a diferença de altura do molde.

3.6 Ensaio de resistência à compressão axial

Após serem moldados e retificados, iniciamos os preparativos para o ensaio de compressão axial, posicionamos o relógio comparador no centro do corpo de prova, (Figura 1), zerou-se o marcador do relógio, posicionamos no centro da prensa

hidráulica o corpo de prova, ligou-se a prensa aumentando-se gradativamente a carga, até que ela se tornasse constante, em uma velocidade entre 0,05 e 0,02 MPa/s.

FIGURA 1. Corpo de prova com o relógio comparador segundo a ABNT NBR 5739/2018.



Fonte: Autoria própria.

Por meio de um aparelho *smartphone*, realizou-se o registro periódico da carga aplicada e variações do relógio comparador, registrou-se, em formato de vídeo, a adoção do acréscimo de carga e, por meio de áudio, as deformações que eram visualizadas no relógio comparador, simultaneamente até obter a carga máxima de ruptura. Realizamos o mesmo procedimento para 6 corpos de prova do concreto T10 e para 6 corpos de prova com concreto T20.

As resistências à compressão axial dos corpos de prova foram determinadas por meio da Equação 4, segundo a ABNT NBR 5738/2015:

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

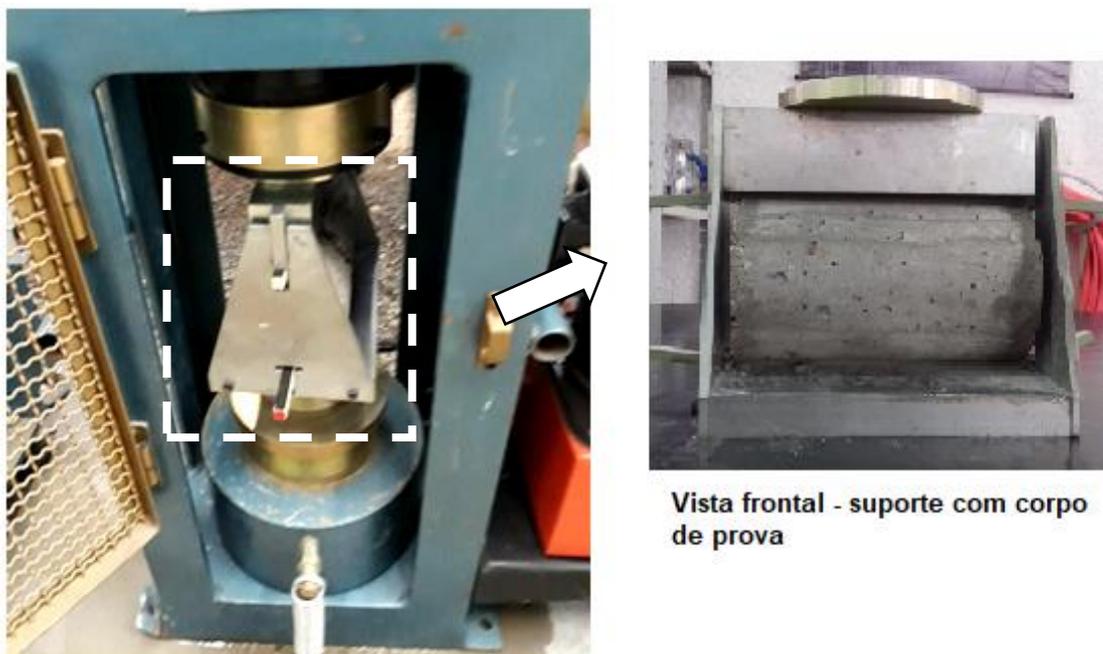
onde:

- f_{ck} : resistência à compressão (MPa);
- F : força máxima do ensaio (N);
- D : diâmetro do corpo cilíndrico (mm).

3.6 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de tração, por compressão diametral, diferencia-se do ensaio por compressão axial ao posicionamento e distribuição da carga em seções distintas do corpo de prova. O ensaio consiste na aplicação de carga na seção transversal do corpo de prova cilíndrico (Figura 2), posicionado em um suporte metálico com duas tiras de madeira entre as interfaces superior e inferior do suporte com o testemunho, convergindo em um esforço de tração no eixo lateral do corpo, aplicando-se uma carga contínua, na prensa hidráulica, com uma velocidade de carregamento de $0,45\text{MPa}, \pm 0,15$, até atingir seu máximo de resistência à tração do concreto ensaiado.

FIGURA 2. Posicionamento dos corpos de prova na prensa hidráulica para o ensaio de tração por compressão diametral - ABNT NBR 7222 (2010)



Fonte: Autoria própria.

As resistências dos corpos ensaiados à tração por compressão diametral foram obtidas por meio da Equação 5, segundo a ABNT NBR 7222 (2010):

$$f_{ctk} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (5)$$

onde:

- f_{ctk} : resistência à tração por compressão diametral (MPa);

- F : força máxima de ruptura (N);
- D : diâmetro do corpo cilíndrico (mm);
- L : Comprimento do corpo de prova (mm).

3.7 Análise de dados

A análise dos dados foi realizada por meio da comparação dos esforços axiais e diametrais dos concretos com T10 e T20 com o T0 fornecido, em função de representações gráficas obtidas pelos dados coletados.

A partir das resistências calculadas dos corpos de prova ensaiados à tração por compressão diametral e compressão axial, para os traços T10 e T20, calculou-se pela amostragem parcial com a Equação 6, conforme a ABNT NBR 12.655 (2015), a resistência característica estimada dos concretos produzidos.

$$f_{ck,est} \text{ e } f_{ctk,est} = 2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m - 1} - f_m \quad (6)$$

onde:

- $f_{ck,est}$: resistência característica à compressão (MPa);
- $f_{ctk,est}$: resistência característica à tração (MPa);
- $m = n/2$: sendo n o número de exemplares amostrados em cada traço, e m descarta-se o valor mais alto de n , se for ímpar;
- f_1, f_2, \dots, f_n : resistência dos corpos amostrados em ordem crescente.

4 RESULTADOS

4.1 Determinação da umidade

Na estufa digital *Sterlifer*, foi colocada uma amostra de 1,00 kg de RCD, em um período de 24 horas, conforme a ABNT NBR 6457 (1986), posteriormente, pesou-se novamente a amostra, e obtivemos uma massa de 0,97kg. O ensaio de umidade do agregado reciclado resultou em uma variação de umidade de 3%.

Obteve-se as umidades médias dos fragmentos de corpos de provas ensaiados, por meio da pesagem dos corpos saturados por submersão em água, e secos na estufa. Na Tabela 2, pode-se notar que a umidade média (W_m) dos fragmentos com 10% de resíduo sólido gerou uma média de 7,01% de umidade,

porém, para o traço que consiste em 20% de resíduo, obteve-se 8,17% de umidade (W). A diferença entre as massas úmidas e secas foram mais dispersas entre os fragmentos com traço T20.

TABELA 2. Aferição dos fragmentos de corpos de prova, secos e úmidos, e seus respectivas umidades calculadas

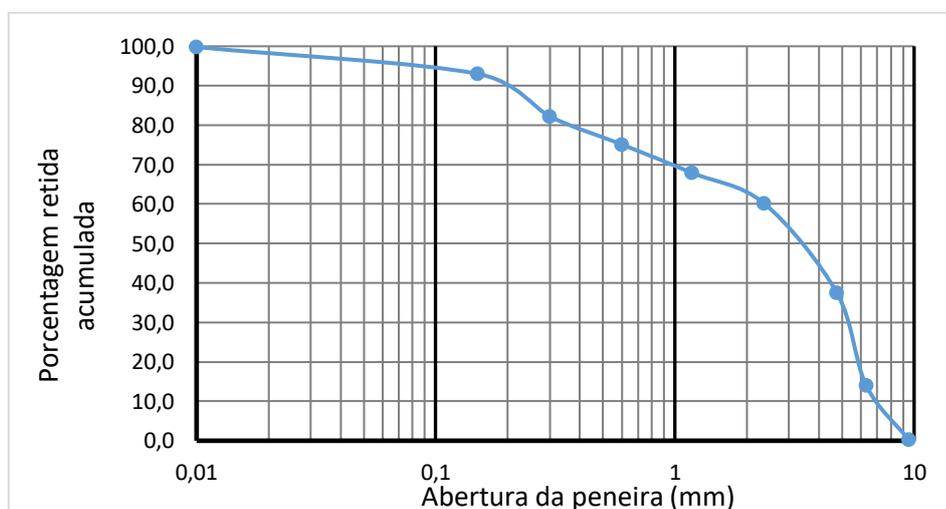
Traço	Amostra (kg)	Mu (kg)	Ms (kg)	Diferença (kg)	W (%)	Wm (%)	Desvio padrão (%)
T10	1 ^a	1,82	1,71	0,11	6,43		
T10	2 ^a	1,61	1,50	0,11	7,33	7,01	0,34
T10	3 ^a	1,77	1,65	0,12	7,27		
T20	1 ^a	1,67	1,63	0,04	2,45		
T20	2 ^a	1,76	1,54	0,22	14,29	8,17	3,30
T20	3 ^a	1,80	1,67	0,13	7,78		

Fonte: Autoria própria.

4.2 Granulometria

No ensaio de granulometria, obteve-se um resíduo com características e proporções granulométricas similares a de um agregado misto, com módulo de finura equivalente a 1,996%, a partir da amostra de 20kg de resíduo (GRÁFICO 1).

GRÁFICO 1. Granulometria de 20 kg do agregado reciclado ensaiado



Fonte: Autoria própria.

4.3 Slump test

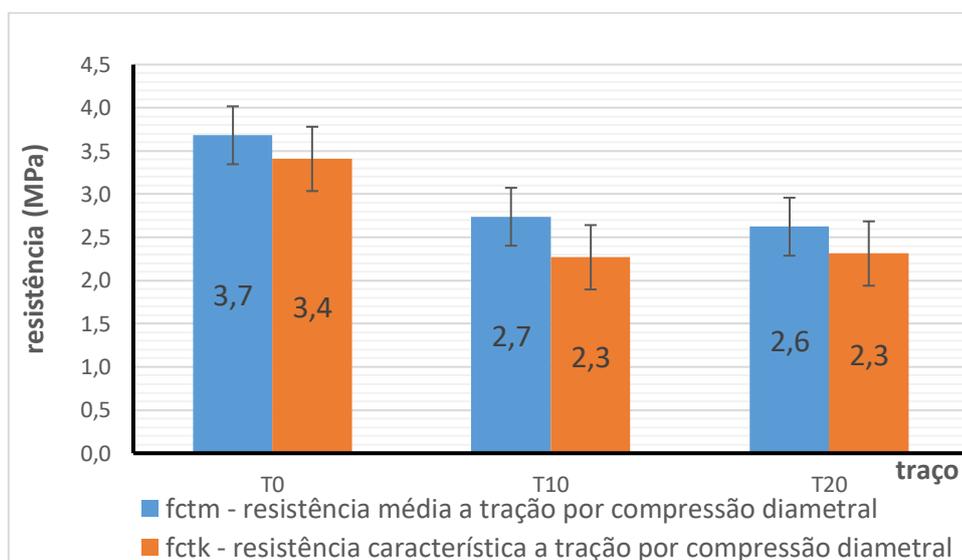
Determinou-se o abatimento do concreto fresco, a massa específica, o teor umidade e, conseqüentemente, o teor de vazios. Ambas as consistências dos T10 e o T20 foram de 9,5, para efeito de caracterização do concreto.

4.4 Ensaio de Resistência

4.4.1 Tração por compressão diametral

O $f_{ctk,est}$ para tração por compressão diametral foi de 2,27 MPa, para a dosagem de 10kg de cimento, 16kg de areia, 18kg de pedrisco, 2kg de resíduo e 4,8kg de água, e de 2,31 MPa, para a dosagem de 10kg, 16kg, 16kg, 4kg e 4,8kg, com uma substituição de 10% e 20% respectivamente do pedrisco, por RCD sobre o T0 - 1: 1,6: 2: 0,45.

GRÁFICO 2. Resistência à tração por compressão diametral

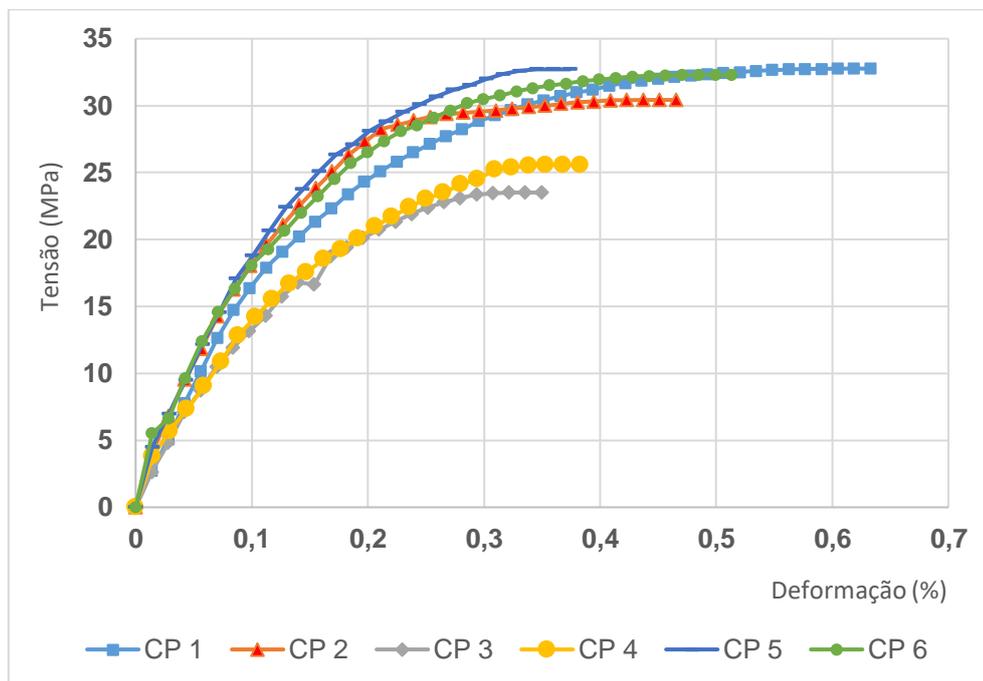


Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Compressão axial e deformação

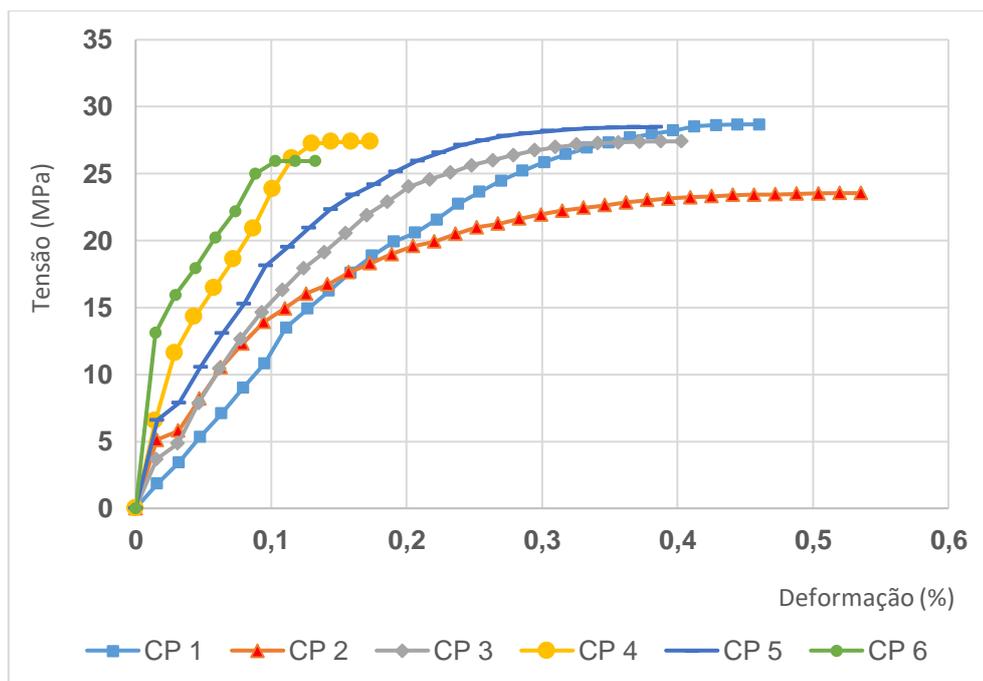
Nos Gráficos 3 e 4, ilustra-se os dados obtidos por meio do ensaio de compressão axial, em cada tensão aplicada até a ruptura dos corpos ensaiados, com os percentuais de agregado reciclado.

GRÁFICO 3. Tensão x deformação, concreto com 10% de resíduo sólido com traço 1: 1,6: 1,8: 0,48



Fonte: Autoria própria.

GRÁFICO 4. Tensão x deformação, concreto com 20% de resíduo sólido com traço 1: 1,6: 1,6: 0,48



Fonte: Autoria própria.

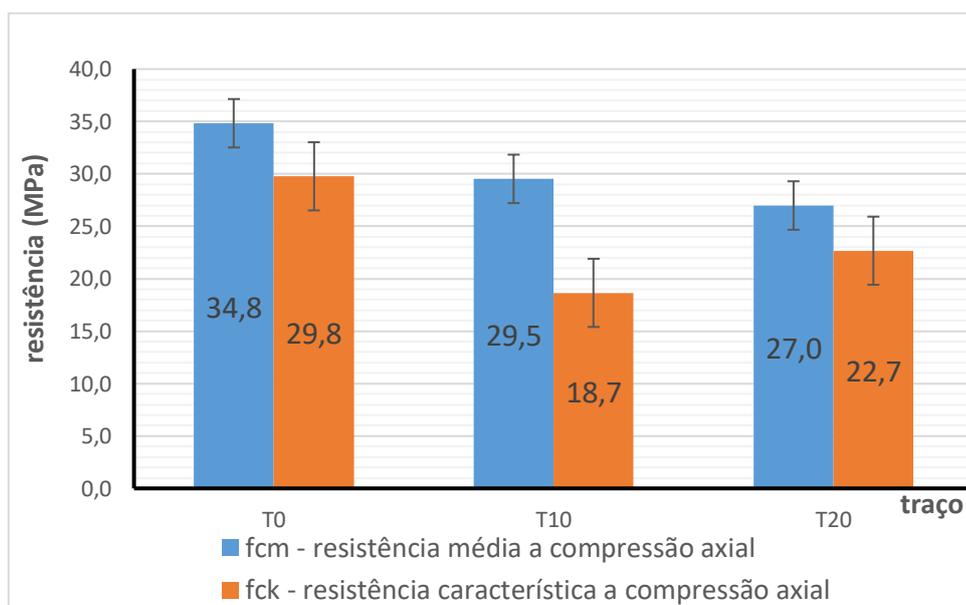
Por meio dos dados representados nos gráficos 3 e 4, apresentados anteriormente, obtive os módulos de elasticidade dos corpos de prova, tanto para T10, quanto para T20, indicados na Tabela 3, obtidos segundo a NBR 8522 (ABNT, 2003).

TABELA 3. Módulos de elasticidade dos corpos de prova, pelo método da secante, ensaiados à compressão axial (em GPa)

Traço	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Média	Desvio padrão
T0	-	8,09	12,38	9,57	17,98	-	12,00	3,18
T10	5,42	6,96	7,31	7,23	9,47	6,66	7,17	0,83
T20	6,45	4,53	7,07	18,90	7,74	25,12	11,64	6,92

Fonte: Autoria própria.

GRÁFICO 5. Resistência à compressão axial



Fonte: Autoria própria.

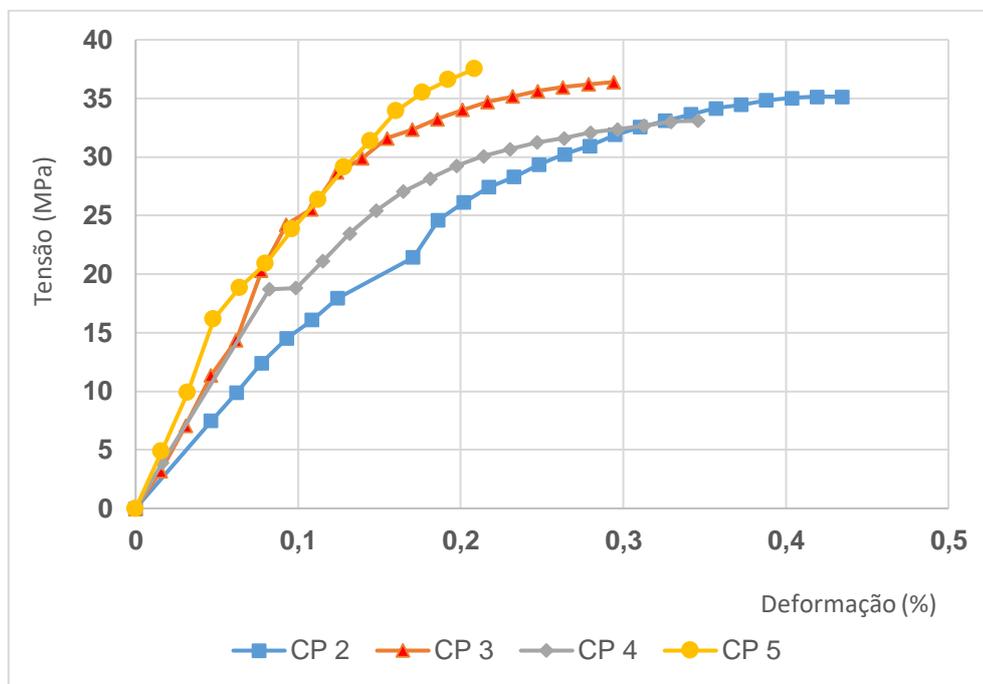
5 DISCUSSÃO

Os traços com T10 e T20 com RDC, ilustrados pelos gráficos 3 e 4, demonstram uma distinção nítida entre os comportamentos dos corpos de prova isolados. Faz-se necessário ressaltar a elevada dispersão entre os corpos amostrados com 20% sendo estes bem maiores que os 10%, isso deve-se ao agregado misto possuir elevada heterogeneidade.

Comparando os gráficos 3 e 4, que elucidam o comportamento do concreto com as amostras de T10 e T20 respectivamente (concretos esses com substituição

de pedrisco por RDC misto), com o Gráfico 6, que ilustra o comportamento do T0, traço, ausente de resíduo sólido reciclado.

GRÁFICO 6. Ensaio de compressão axial do traço padrão - traço 1: 1,6: 2: 0,45



Fonte: Fonseca (2018).

Nota-se que os gráficos 3, 4 e 6 resultaram em módulos de elasticidade com valores médios de 7,18; 11,64 e 12,00 GPa, respectivamente. Pode notar que o concreto T0 possui maior módulo médio de elasticidade, uma menor inclinação nas curvas de tensões, ao qual ao compararmos com os gráficos com RCD misto, seja em 10 ou 20%, pode-se notar uma maior inclinação das curvas, onde elucida maior fragilidade dos concretos produzidos.

O resíduo adotado na composição dos traços possui uma textura superficial áspera e fôrma angulosa, por ter sido conformado por atrito no processo de britagem do RCD, levando em consideração as classificações de Neville A. M. e Brooks J. J. (2013). Os fragmentos de corpos de prova submetidos aos ensaios de umidade demonstraram um percentual entre 7 e 8,20% em T10 e T20 de absorção de água, respectivamente. Segundo Gómez-Saberon (2002) estes percentuais similares aos agregados naturais de mesmo tamanho com percentual de 1,49%, indicando que o uso de resíduos aumenta em cerca de ± 5 vezes mais o percentual de absorção de água ao concreto, conseqüentemente há um aumento dos vazios no concreto, causando redução na resistência do concreto à compressão.

A resistência à tração do concreto obtido por meio do ensaio de tração por compressão diametral é irrisória, comparada aos valores de compressão axial, no entanto, é outro parâmetro a ser analisado no comportamento do material e possibilita verificações, como origem do material.

Segundo Cabral (2007), a resistência do concreto está diretamente ligada à relação água-cimento, e conseqüentemente ao tipo de RDC utilizado para o traço de concreto.

6 CONCLUSÃO

É de importância aos seres humanos buscar possíveis medidas sustentáveis, capazes de minimizar todo impacto gerado ao planeta, reforçando, assim, a necessidade de buscar o equilíbrio entre o homem e a natureza.

Diante dos dados expostos e discutidos, acerca das resistências dos concretos produzidos, tanto a resistência à tração por compressão diametral quanto na compressão axial, notam-se algumas variações de resultados. Tais divergências são provenientes do adensamento incorreto dos concretos T10 e T20, em alguns corpos de prova ao serem moldados, conseqüentemente, gerando vazios em partes destes corpos.

Efetuada a comparação entre as resistências, observou-se que T10 tem 38,13% e o T20 tem 23,42% menor resistência à compressão axial, quando comparado ao T0. Já na resistência à tração por compressão diametral, T10 tem 37,15% e T20 possui 28,57%, porcentagem menor que T0. Essa variação, segundo Cabral (2007), é correspondente a variáveis como: tipo de agregado reciclado, sua produção e composição.

O concreto com agregado reciclado é um concreto de possível uso, entretanto verificações acerca de propriedades deste material, suas origens e procedências devem ser verificadas.

Sugere-se uma futura análise amostral mais ampla, com maior número de corpos de provas confeccionados e maior controle em suas confecções, com uma composição de resíduo com a mesma granulometria média, e que possua uma menor relação água-cimento, reduzindo, então, parte dos vazios na composição do concreto, conseqüentemente melhorando assim suas características de resistência.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. S. Agregados. In: FALCAO BAUER, L. A. (Ed.). **Materiais de construção: classificação**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2013. Cap. 4, p.63-120.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**. São Paulo: ed PINI, 2012.

ÂNGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. São Paulo, 2000.155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

ARRUDA, A. M. **Modulo de elasticidade de concretos produzidos com formações rochosas do triângulo mineiro**. Uberlândia, 2013.166p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 5738: **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 6457: **Amostra de solo – preparação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7211: **Agregados para concreto - especificações**. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7222: **Concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 8522: **Concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão deformação**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 9935: **Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 12655: **Concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 15115: **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – execução de camadas de pavimentação - procedimentos**. Rio de Janeiro, 2004.

BEJA, I. A. **Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentação**. 2014. 221p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

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

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concreto produzido com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 280 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências de Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CARVALHO, R.C.; FILHO, J. R. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos: Edufscar, 2014. 415 p.

CHEN,H.; YEN, TSONG; CHEN K. Use of building rubbles as recycled aggregates. **Cement and concrete research**. V. 33, pp.125-132, 2003.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA: Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002.

EUN, S.; REINHART, D. R.; COOPER, C. D.; TOWNSEND, T. G.; FAOUR, A. Hydrogen sulfide flux measurements from construction and demolition debris (C&D) landfills. **Waste Managment**, v. 27, p. 220-227, 2007.

FONSECA, F. B. **Práticas Integradoras**. 07 de março de 2018. Notas de aula

GÓMEZ-SABERÓN, J. M. Porosity of recycled concrete with susatitution of recycled concrete aggregate. Na experimental study. **Cement and concrete rederarch**. V.32, 2002, pp.1301-1311.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema nacional de pesquisas de custos e índices da construção civil**. Cidade: IBGE, 2007.

Disponível em:

<<https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/sinapi/default.shtm>>.

Acesso em: 26 fev. 2018.

KHATIB, J. M. **Properties of concrete incorporating fine recycle aggregate.** Cement and concrete research, Vol. 35, p.763-769, 2005.

KRUGER, P.; SOUZA, A. B.; KONOFAL W. U. **Estudo da trabalhabilidade em argamassas e concreto com utilização de RCD.** In: ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS, 8., 2013.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos e tratamento de água.** 3. ed. São Paulo: Átomo, 2008

LIMA, A.S; CABRAL, A. E. B. **Caracterização e classificação de resíduos sólidos de construção civil da cidade de Fortaleza.** Eng Sanit Ambient. Fortaleza, CE, 2012.

NEVILLE A. M.; BROOKS J. J. **Tecnologia do concreto.** 2. ed. Porto Alegre: Brookman, 2013.

NAGALLI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil.** São Paulo: Oficina de textos, 2004.

PHILLIPPI JR, A.; MALHEIROS, T.F. Saneamento e saúde pública: integrando o homem e ambiente. In: PHILLIPPI JR, A. (Ed.). **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável.** Barueri, SP: Manole, 2005. cap. 1, p. 3-31.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Estruturas de Concreto.** 2 cap. São Carlos, 2004.

QUADROS, P. A. **Estudos das correlações entre propriedades mecânicas do concreto.** 2014. 105p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

RESENDE, Luiz Henrique Siqueira. **Análise da gestão de resíduo sólidos da construção de Belo Horizonte (MG) a partir da percepção dos autores envolvidos.** 2016. 124 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

SANTOS, E. C. G. dos. **Aplicação de resíduos sólidos de construção e demolição reciclado (RCD-R) em estruturas de solo reforçado.** 2007. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

TELLES, D. D. A.; COSTA, R. P. **Reuso da água: Conceitos, Teorias e práticas.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

TOFFOLI, T. **Desempenho do agregado reciclado: um estudo comparativo entre Brasil e Portugal, baseado na especificação E471: 2009.** 2016. 89f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2016.

VALLE, C. E. **Qualidade ambiental: ISSO 14000**. 5. ed. São Paulo: Editora Senac, 2004.