

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO USO DE AGREGADOS RECICLADOS DA REGIÃO DE CRICIUMA/SC NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS ESTRUTURAIS

Nathália Figueiredo (1), Alexandre Vargas (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)nathaliafigueiredo_@hotmail.com, (2)avargas@unesc.net

RESUMO

Devido ao grande volume de resíduos produzidos pelo setor da construção civil e a crescente exploração dos recursos naturais para produção de agregados utilizados na fabricação de concretos, torna-se importante a conscientização sobre a destinação correta, bem como o reaproveitamento destes para outras funções. Este trabalho avaliará a influência dos agregados reciclados de resíduos da construção civil, provenientes da região de Criciúma/SC, nas propriedades do concreto visando à aplicação estrutural. Foram utilizados agregados reciclados das duas classes determinadas pela NBR 15116:2004 – ARM (agregado reciclado misto) e ARC (agregado reciclado de concreto) –, e em três diferentes percentuais de substituição dos agregados naturais (miúdo e gráudo), 30, 60 e 100 %. Para cada mistura foram moldados doze corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura), e curados durante 28 dias submersos em água a temperatura ambiente. Após as amostras foram ensaiadas à compressão axial simples (NBR 5739:2007), à compressão diametral (NBR 7222:2011) para obtenção da resistência à tração, e finalmente ao módulo de elasticidade (NBR 8522:2008). Os resultados obtidos demonstram que o concreto com 30 % de substituição sofreu uma queda em suas resistências em relação à referência, entorno de 7 % e 8 %, para compressão e tração, respectivamente, porém manteve-se dentro da classe pré-estabelecida. Já os concretos fabricados com 60 % de substituição apresentaram bons resultados no que tange as propriedades de resistência à compressão e tração, obtendo um ganho de resistência de 2 % e 1,5 %, respectivamente, quando comparados à composição de referência, o mesmo não se confirmou para o módulo de elasticidade, e, finalmente para o concreto com 100 % de substituição há uma queda de cerca de 50 %, em todas as propriedades, quando comparado à composição de referência.

Palavras-Chave: Concreto reciclado. Agregado reciclado. Resíduo de construção.

1. INTRODUÇÃO

A busca por soluções para a destinação adequada e reuso de resíduos sólidos urbanos, objetivando reduzir os problemas ambientais causados por eles, é crescente em todos os setores da economia. Na construção civil, onde a necessidade de suprir o déficit habitacional através de novas construções e reformas, a geração desses resíduos tem se dado em grandes volumes. De acordo

com Pinto (1999) a participação dos resíduos de construção civil nos resíduos sólidos urbanos está entre 41 a 70% em algumas cidades do Brasil, valores considerados bastante expressivos.

Fora isso, em função da produção exacerbada de resíduos, a construção civil necessita de áreas especiais para a destinação dos mesmos, uma vez que segundo o 1º parágrafo do artigo 4º da resolução CONAMA nº 307 (2002, p.2) “Os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de “bota fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei [...]”. Este setor ainda é responsável pela extração de recursos naturais para produção dos agregados usados no concreto, gerando um impacto ambiental de grande amplitude.

Assim, segundo Cordeiro (2013, p.17) “A reciclagem de materiais de construção desempenha um papel importante para a sustentabilidade visto que se tem a conservação dos recursos naturais e a redução de áreas para aterro.” Souza (2014, p.5) evidencia ainda que,

Em grandes centros, os resíduos podem se tornar uma excelente alternativa, devido à falta de recurso natural, com isso a introdução dos agregados em algumas construções podem se tornar atraente, tanto economicamente, além de fatores ambientais que dependendo do uso pode qualificar o empreendimento em parâmetros ambientais, concedendo a mesma alguns certificados.

Por conseguinte a resolução CONAMA nº 307 em seu art 2º, inciso I (2002, p.1), define os resíduos da construção civil como sendo “[...] provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos [...]”. E a NBR 15116 (2004, p.2) define agregado reciclado como um “Material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura.”.

Enquanto que os agregados naturais utilizados em larga escala pela construção civil são provenientes da extração de diversos recursos naturais – os agregados graúdos são obtidos através da extração e/ ou britagem de rochas como granito, gnaisse e calcário, e os agregados miúdos são, geralmente, adquiridos por meio da dragagem da areia do fundo do mar ou rio –, e para serem utilizados no concreto devem seguir as especificações da NBR 7211:2009.

Assim os resíduos de construção civil utilizados na pesquisa são classificados como classe A, e são subdivididos em duas classes segundo a NBR 15116:2004: os

agregados de resíduos de concreto (ARC) que são os agregados obtidos por meio do beneficiamento do resíduo, composto de no mínimo 90% em massa, na sua fração graúda, de fragmentos de concreto à base de cimento Portland e rochas, e os agregados de resíduos mistos (ARM) que também são provenientes do beneficiamento dos resíduos e tem como característica serem compostos de menos de 90% em massa, em sua fração graúda, de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

Conforme o exposto, o agregado reciclado tem grande potencial e vem sendo muito utilizado no mundo todo, como apontado pela revista Concreto – IBRACON (2005, p.24 e 25) onde em países europeus como Alemanha, Holanda, Bélgica e Dinamarca estima-se que mais de 80% dos entulhos seja reciclado e utilizado no concreto, já no Japão o volume de resíduos é destinado em sua maioria para produção de agregados, para as camadas de sub-base em pavimentações. Porém no Brasil, mais especificadamente na região de Criciúma/SC, não é comum a utilização de agregados reciclados na produção de concretos, artefatos de concreto, e até mesmo em camadas de base e sub-base em pavimentações.

Simultaneamente para tentar resolver o problema causado pela produção de resíduos de construção e o impacto ambiental gerado pelo setor, surgem muitos estudos nesta área (ARAÚJO, 2015; MOTA, 2010; SOUZA, 2014; TENÓRIO, 2007), que comprovam a adequação e qualidade do agregado reciclado, consolidando e fortificando seu uso. Porém as pesquisas ainda são incipientes quando se trata do uso do Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para produção de novos concretos com fins estruturais. Mesmo assim, alguns autores discorrem sobre resultados interessantes. Na pesquisa realizada por Mota (2010) o comportamento dos concretos de diferentes classes de resistência aconteceu independente se o agregado era natural ou reciclado, isto é, todos os concretos seguiram a Lei de Abrams que diz que quanto maior a relação água/cimento (a/c) menor é a resistência à compressão. Enquanto que Santana (2010, p. 3) afirma que:

Em concretos comuns, produzidos com agregados naturais, compactos e resistentes, a resistência à compressão tem grande influência da porosidade da matriz e da zona de transição. No caso, dos concretos reciclados, nos quais valores de resistência à compressão tendem a ser menores do que os comuns, a ruptura se faz nos agregados, levando-os a ser o elemento determinante nesta propriedade para esses concretos.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de agregados reciclados de RCD, graúdos e miúdos, nas propriedades do concreto no

estado fresco e endurecido, verificando a viabilidade do uso dos mesmos na produção de concretos estruturais, por meio de diferentes percentuais de substituição dos agregados naturais do concreto de referência, por agregados reciclados provenientes da região de Criciúma/SC.

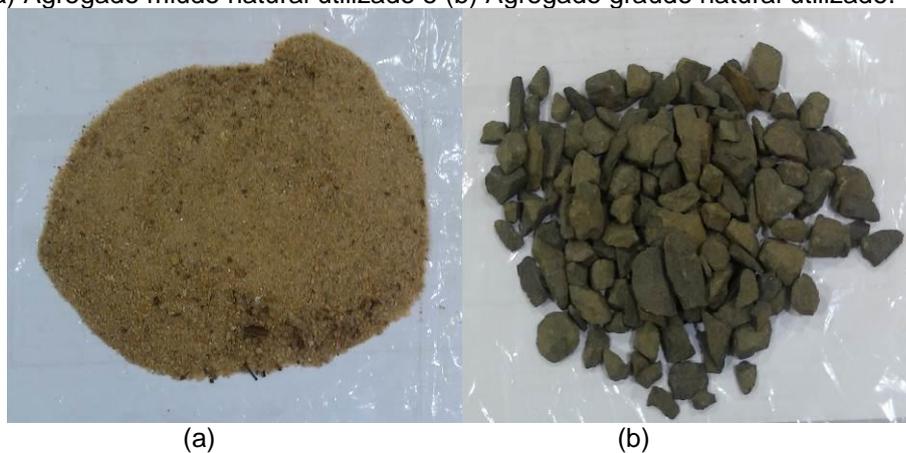
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção dos concretos foram Cimento Portland do tipo CP IV 32, agregados reciclados já triturados e selecionados, água limpa captada do sistema de abastecimento do IParque – Parque Científico e Tecnológico da UNESC, agregados naturais sendo destes o agregado graúdo classificado como brita 2 com dimensão máxima de 25 mm, que tem como origem a rocha do tipo basalto, e o agregado miúdo classificado como areia grossa lavada, ambos disponibilizados pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UNESC. A Figura 1 mostram os agregados naturais utilizados.

Para os concretos com agregados reciclados, foi necessário à utilização do aditivo hiperplastificante *Tec-Flow 8000*, devido a porosidade elevada do agregado reciclado absorve que boa parte da água da mistura, tornando o concreto menos consistente.

Figura 1 – (a) Agregado miúdo natural utilizado e (b) Agregado graúdo natural utilizado.

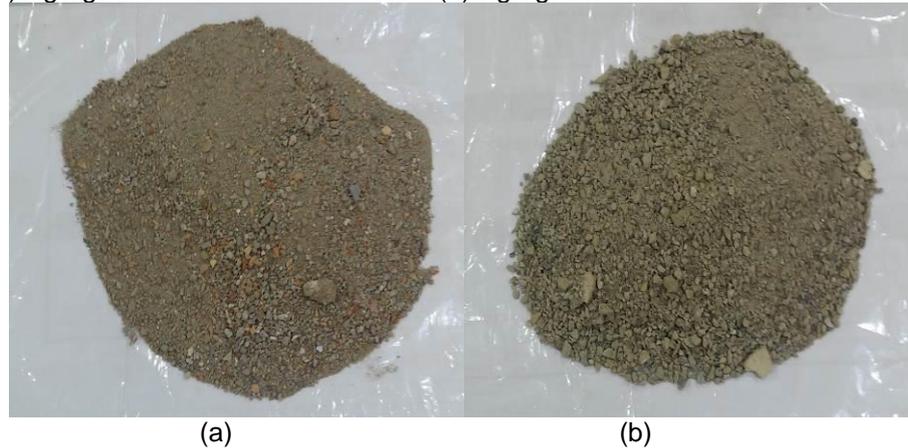


Fonte: Do autor, 2016.

2.1.1 Agregados Reciclados

Os resíduos de construção civil utilizados na pesquisa são de classe A, e de ambas as classes de agregados ARC e ARM. Nas Figuras 2 e 3 podem-se observar os agregados reciclados utilizados.

Figura 2 – (a) Agregado miúdo reciclado misto e (b) Agregado miúdo reciclado concreto.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura 3 – (a) Agregado graúdo reciclado misto e (b) Agregado graúdo reciclado concreto.



Fonte: Do autor, 2016.

Todo o material reciclado necessário para a realização do estudo foi disponibilizado pela empresa 3 R's, que é uma das responsáveis pelo recebimento, triagem e beneficiamento do RCD, na região de Criciúma/SC, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – (a) Materiais para reciclagem e (b) Usina de reciclagem 3R's.



Fonte: Do autor, 2016.

2.1.2 Classe de concreto e traço

Para efeito dessa pesquisa, foi estabelecido um fck (resistência à compressão característica) de 30 MPa. Os traços utilizados, em masa, podem ser observados na Tabela 1, e de forma unitária na Tabela 2 Onde: AM – Agregado Miúdo Natural; AG – Agregado Graúdo Natural; ARm – Agregado Reciclado Miúdo; ARg – Agregado Reciclado Graúdo.

Tabela 1 – Quantidade de materiais para cada composição.

Materiais	Composição						
	REF	ARM30	ARM60	ARM	ARC30	ARC60	ARC
AM (Kg)	23,22	16,25	9,29	-	16,25	9,29	-
AG (Kg)	26,28	18,40	10,51	-	18,40	10,51	-
ARm (Kg)	-	6,97	13,93	23,22	6,97	13,93	23,22
ARg (Kg)	-	7,88	15,77	26,28	7,88	15,77	26,28
CIM (Kg)	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
a/c inicial	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
a/c final	0,49	0,49	0,49	-	0,49	0,63	0,92
Aditivo inicial (%)	-	0,60	1,20	-	2,0	2,0	2,0
Aditivo final (%)	-	4,6	-	-	2,0	2,0	2,0

Fonte: Do autor, 2016.

Tabela 2 – Traço unitário das composições.

Composição	Traço unitário	Traço decomposto (cim:areia:brita:ARm:ARc:a/c:aditivo)
REF		1 : 2,58 : 2,92 : 0,00 : 0,00 : 0,49 : 0,00
ARM		1 : 0,00 : 0,00 : 2,58 : 2,92 : 0,49 : 0,00
ARM30		1 : 1,81 : 2,04 : 0,77 : 0,88 : 0,49 : 0,006
ARM60	1:5,5	1 : 1,03 : 1,17 : 1,55 : 1,75 : 0,49 : 0,012
ARC		1 : 0,00 : 0,00 : 2,58 : 2,92 : 0,92 : 0,02
ARC30		1 : 1,81 : 2,04 : 0,77 : 0,88 : 0,49 : 0,02
ARC60		1 : 1,03 : 1,17 : 1,55 : 1,75 : 0,63 : 0,02

Fonte: Do autor, 2016.

2.2 METODOLOGIA

2.2.1 Caracterização dos agregados

As amostras de agregados naturais e reciclados foram ensaiadas segundo prescreve a NBR NM 248:2003, obtendo assim a sua caracterização granulométrica. Para melhor interpretação dos dados e resultados obtidos posteriormente, as amostras de agregado graúdo (naturais e reciclados) foram ensaiadas conforme NBR NM 53:2009 para obtenção dos dados de massa específica e absorção de água, enquanto que os agregados miúdos (naturais e reciclados) foram ensaiados de acordo com a NBR NM 52:2009 e NBR NM 30:2001, para ambos os dados respectivamente.

2.2.2 Concretagem

Foram fabricados concretos de três diferentes tipologias: o de referência (apenas com agregados naturais), com diferentes percentuais de substituição de ARM miúdo e graúdo, substituídos simultaneamente, e ARC miúdo e graúdo, também substituídos simultaneamente. Vale lembrar que todos os agregados utilizados na pesquisa, naturais e reciclados, foram previamente secos em estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ$ até obterem constância de massa.

Primeiramente foram realizadas as misturas com 30 % de ARM (miúdo e graúdo). Por já se esperar uma consistência seca, foi inicialmente adicionado ao concreto um teor de aditivo de 0,6 % (mínimo recomendado pelo fabricante) e ainda assim o mesmo continuou sem trabalhabilidade. Seguiu-se adicionando aditivo até um teor de 4,6 % onde se decidiu encerrar a mistura, já que o concreto não atingiu a

consistência desejada (Figura 5) e já havia sido superado o nível de aditivo máximo recomendado pelo fabricante de 2 %.

Figura 5 – Consistência da mistura com 30 % de ARM.



Fonte: Do autor, 2016.

Devido ao ocorrido, para a segunda mistura com 60 % de ARM (miúdo e graúdo) elevou-se o teor de aditivo inicial para 1,2 %, uma vez que para maior eficiência do aditivo é necessário que o mesmo aja sobre o cimento, e nas misturas com agregado reciclado devido à alta absorção do agregado reciclado, o cimento absorve apenas uma pequena parcela do aditivo, tornando quase que ineficiente sua adição após a mistura de todos os elementos.

Contudo não foi possível obter a consistência desejada e optou-se por encerrar os processos de mistura com os agregados reciclados mistos. Tal resultado foi verificado por Levy (2001) apud Tenório (2007) onde se notou que os agregados de alvenaria reciclada prejudicaram mais a consistência do concreto que os agregados de concreto reciclado devido, possivelmente, à maior porosidade e maior lamelaridade daqueles.

Com base na experiência anterior e na expectativa de que os agregados reciclados de concreto tivessem melhor desempenho quanto à absorção de água – pois seus teores de absorção obtidos em ensaios preliminares foram menores que os dos ARMs –, foi determinado um teor único e inicial de aditivo de 2 % para as composições (30, 60 e 100 % de substituição) da mistura de ARC.

Iniciou-se com a mistura de referência determinando-se a sua trabalhabilidade por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone segundo a NBR NM 67:1998, sendo o ensaio repetido para todas as misturas. Posteriormente foi realizada a mistura com 100 % de ARC (miúdo e graúdo), onde não foi possível obter a trabalhabilidade desejada somente com a adição de aditivo (Figura 6), optou-se

então por adicionar água até alcançar a consistência para moldar os corpos de prova. O mesmo processo foi repetido para os teores de 30 e 60 % de substituição de ARC (miúdo e graúdo) e as relações água/cimento finais podem ser observadas na Tabela 2 do item 2.1.2 do presente estudo.

Figura 6 – (a) e (b) Consistência da mistura com 100 % de ARC.



Fonte: Do autor, 2016.

Desta forma totalizaram-se quatro composições, sendo estas: REF – concreto com agregados naturais, ARC30 – concreto com 30 % de substituição de agregado reciclado de concreto, ARC60 – concreto com 60 % de substituição e ARC – concreto com 100 % de substituição. Para cada composição (REF, ARC30, ARC60 e ARC) foram moldados 12 (doze) corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm (diâmetro x altura) conforme a NBR 5738:2015, e após dois dias foram desmoldados, demarcados e postos para curar imersos em água a temperatura ambiente durante 28 dias, para serem ensaiados na condição saturada.

Posteriormente ao período de cura dos corpos de prova, 3 (três) deles foram ensaiados a compressão axial simples conforme NBR 5739:2007, outros 3 (três) a compressão diametral conforme NBR 7222:2011, e mais 6 (seis) a módulo de elasticidade segundo NBR 8522:2008. Por não ser um ensaio destrutivo, após a obtenção do resultado de módulo de elasticidade, 3 (três) corpos de provas foram ensaiados também a compressão axial simples e os outros 3 (três) a compressão diametral.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os valores obtidos nos ensaios de absorção de água e massa específica podem ser observados na Tabela 3, onde: ARCM – agregado reciclado de concreto miúdo; ARCG – agregado reciclado de concreto graúdo; ARMm – agregado reciclado misto miúdo; ARMg – agregado reciclado misto graúdo.

Tabela 3 – Caracterização dos agregados.

Agregado	Massa específica (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Dimensão máx. característica (mm)	Módulo de finura
Areia grossa	2,52	2,33	3,36	4,75	2,08
ARCM	2,41	1,68	18,21	4,75	2,57
ARMm	2,51	1,53	25,6	4,75	2,24
Brita 2	2,93	3	0,84	25	6,99
ARCG	2,32	2,74	6,53	25	6,16
ARMg	1,88	2,57	15,5	25	6,49

Fonte: Do autor, 2016.

Os valores obtidos para a absorção de água do agregado miúdo natural e dos reciclados apresentam uma diferença significativa entre si, resultando para o agregado reciclado de concreto em um valor cerca 5,42 vezes maior que a referência, e para o agregado reciclado misto o valor obtido é aproximadamente 8 vezes maior. Já a massa específica obtida para os agregados reciclados miúdos é menor que a da referência, o que juntamente com os valores de absorção, demonstram que os agregados reciclados utilizados apresentam uma porosidade elevada.

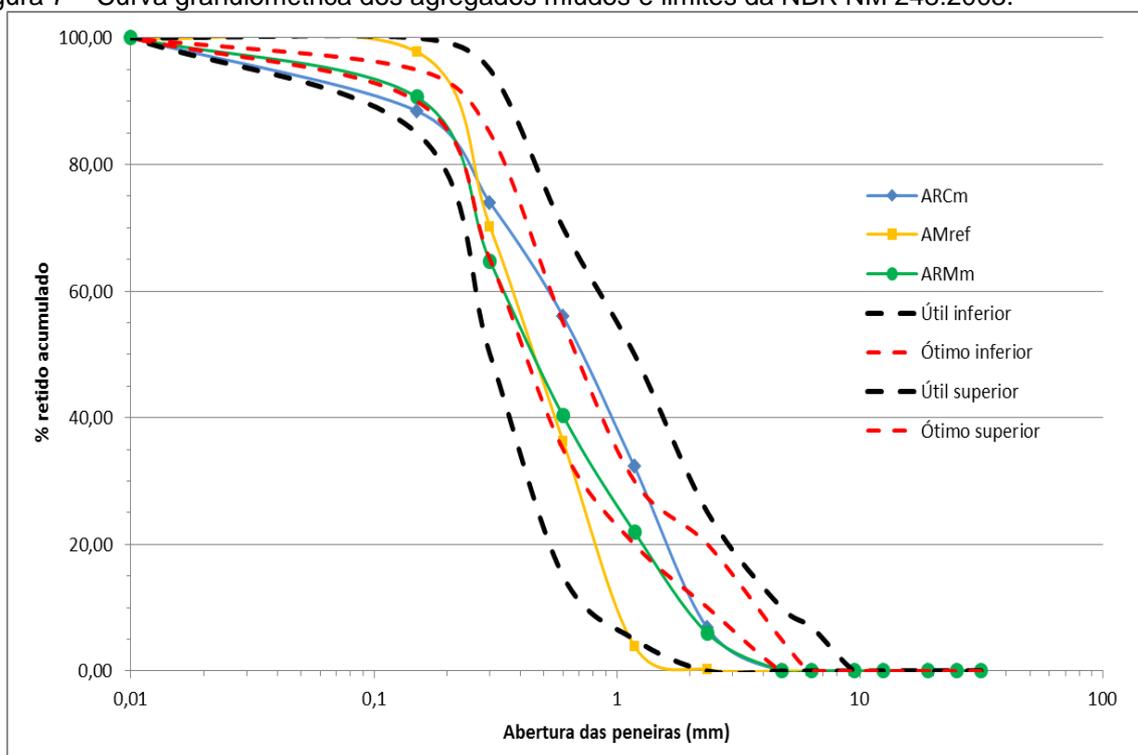
Quanto à absorção de água dos agregados graúdos reciclados, os resultados obtidos mantêm o obtido para os miúdos, sendo que os agregados reciclados de concreto apresentam uma absorção 7,77 vezes maior que a referência e os agregados reciclados mistos absorvem quase 18 vezes mais água que o agregado natural. Outro resultado importante é a diferença de absorção entre os próprios agregados reciclados, o agregado misto absorve 2,37 vezes mais água que o agregado de concreto, o que segundo Tenório (2007, p.87) demonstra “um material mais poroso e menos denso, fato que se refletiu na massa específica”. Os resultados de massa específica para os agregados graúdos reciclados mostraram-se

abaixo do valor obtido para o agregado natural, o que, novamente, indica um material mais poroso e conseqüentemente menos resistente.

Desse modo, agregados (miúdos e graúdos) muito porosos indicam uma menor resistência, podendo provocar uma queda na resistência dos concretos produzidos com eles. A maior porosidade dos agregados também influencia na trabalhabilidade dos concretos, o que será explanado melhor no próximo item. Tais resultados são similares aos encontrados por Tenório (2007).

Quanto à granulometria dos agregados miúdos, as curvas granulométricas obtidas para os agregados reciclados e naturais foram comparadas conforme Figura 7.

Figura 7 – Curva granulométrica dos agregados miúdos e limites da NBR NM 248:2003.



Fonte: Do autor, 2016.

Conforme a Figura 7 é possível observar que ambas as tipologias de agregados miúdos reciclados apresentam uma tendência a se enquadrar na zona ótima estabelecida pela NBR NM 248:2003, o que se comprova através dos valores apresentados para o módulo de finura, de 2,57 para o ARCm e 2,24 para o ARMm, sendo que os valores estabelecidos pela norma, para o enquadramento do agregado na zona ótima, situam-se no intervalo entre 2,20 a 2,90.

Quanto aos resultados do módulo de finura (Tabela 3) os agregados miúdos reciclados mostraram-se mais grossos que o agregado miúdo natural, uma vez que

seus valores foram maiores que os de referência. Este resultado confirma-se pela maior quantidade de material retido nas peneiras de malha maior (4,75 a 1,18 mm), quando comparada a granulometria do reciclado e do natural.

Ao passo que os agregados grãos reciclados apresentam uma granulometria semelhante, e não se enquadram em nenhuma das zonas granulométricas (4,75 / 12,5 e 9,5 / 25) determinadas pela NBR 7211: 2009. Quanto ao módulo de finura obtido para os agregados reciclados grãos, este se mostrou menor que o de referência, o que demonstra que os mesmos são mais finos que o agregado natural utilizado, apesar de serem igualmente classificados como brita 2.

3.2 TRABALHABILIDADE DAS MISTURAS

As trabalhabilidades obtidas nas misturas podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Trabalhabilidade das misturas.

Composição	Trabalhabilidade (cm)	a/c
REF	10	0,49
ARC	8	0,92
ARC60	14	0,63
ARC30	14	0,49

Fonte: Do autor, 2016.

Considerando o abatimento desejado para as misturas de 10 ± 2 cm, as composições REF e ARC demonstraram um resultado satisfatório. Entretanto pelo fato do aditivo utilizado se tratar de um hiperplastificante, esperava-se que o *slump* (abatimento) ultrapassasse o especificado em algumas das composições, o que foi observado para as misturas com 30 e 60 % de ARC (Figura 9). Vale lembrar que o aditivo age somente na plasticidade do concreto, não interferindo na sua resistência e com isso foram moldados os corpos de prova normalmente.

Figura 9 – (a) Abatimento da mistura ARC30 e (b) Abatimento da mistura ARC60.



Fonte: Do autor, 2016.

Pode-se notar ainda que o abatimento obtido para mistura com 100 % de substituição dos agregados naturais (ARC), é menor que o da mistura de referência para uma relação a/c de quase o dobro, evidenciando o alto nível de absorção de água dos agregados reciclados utilizados.

Finalmente, tais resultados confirmam o visto por Tenório (2007, p.43) em que quanto maior a presença de finos e/ou materiais pulverulento, quanto mais lamelar ou angular for a forma do agregado, maior porosidade e textura superficial mais rugosa, mais prejudicada é a consistência do concreto.

3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão axial simples podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios mecânicos aos 28 dias.

Amostras	Composição			
	REF	ARC30	ARC60	ARC
1	35,1	30,4	33,1	17,1
2	31,5	30	35,4	16,7
3	32,2	30	33,2	16
4*	33,5	32,6	35,6	16,3
5*	34,8	31,9	34,4	17,1
6*	34,6	33,5	34	16,5
Média	33,62	31,4	34,28	16,62
Desvio Padrão	1,488	1,485	1,063	0,44

*Corpos de prova rompidos após ensaio de módulo de elasticidade

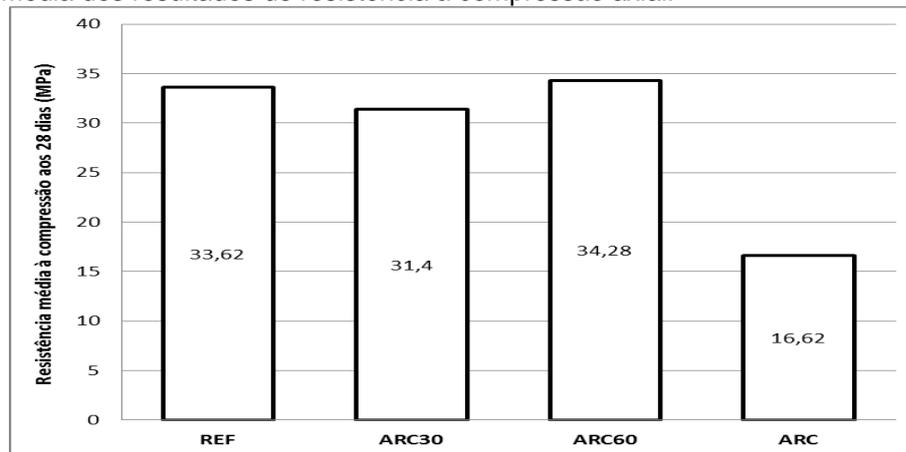
Fonte: Do autor, 2016.

Os resultados para resistência à compressão demonstram uma queda da resistência de aproximadamente 50 % da resistência média, para os corpos de prova com 100 % de substituição dos agregados naturais pelos reciclados. Tal fato pode ser explicado devido à elevação da relação a/c da mistura ARC quando comparada a referência. A adição de grande quantidade de água à mistura leva ao aumento dos poros no concreto provocando a acentuada queda.

Já para a composição ARC60 (60 % de substituição) observou-se, um discreto ganho de resistência da ordem de 2 % em relação à composição de referência. Um dos motivos para este acréscimo pode se dar a presença de partículas de cimento na fração miúda do agregado reciclado, ou ainda o alto teor de finos que atuam como fíller, diminuindo os poros, aumentando a resistência. Outro fator importante é devido à água absorvida que é liberada pelo agregado graúdo durante o processo de cura, gerando uma cura interna do concreto, tal resultado foi observado também na pesquisa realizada por Araújo (2015 p. 15) em que segundo o mesmo “[...] o agregado reciclado retém a água da mistura, por ter uma maior absorção de água quando comparado ao agregado natural, liberando-a gradualmente durante o processo de cura do concreto.”.

O mesmo ganho não pode ser observado para a composição ARC30 (30 % de substituição), por possuir menos material reciclado adicionado à mistura, o que, conseqüentemente, influi em uma menor quantidade de finos, e possíveis partículas de cimento não hidratado, bem como em uma menor quantidade de agregado graúdo reciclado diminuindo o processo de cura interna. O que se observou foi uma queda de aproximadamente 7 % na resistência quando comparado à composição de referência, porém o mesmo ainda se manteve dentro da classe de concreto desejada, de 30 MPa. A Figura 10 mostra os valores médios de resistência aos 28 dias das composições estudadas.

Figura 10 – Média dos resultados de resistência à compressão axial.



Fonte: Do autor, 2016.

No que tange a propriedade de resistência à tração os valores obtidos no ensaio podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

Amostras	Composição			
	REF	ARC30	ARC60	ARC
1	2,913	3,084	3,654	-
2	3,135	2,823	3,049	-
3	2,505	2,527	2,97	-
4*	4,195	3,419	3,918	1,487**
5*	4,409	3,435	3,801	1,391**
6*	-	3,699	3,501	1,493**
Média	3,431	3,165	3,482	1,457
Desvio Padrão	0,83	0,436	0,393	0,057

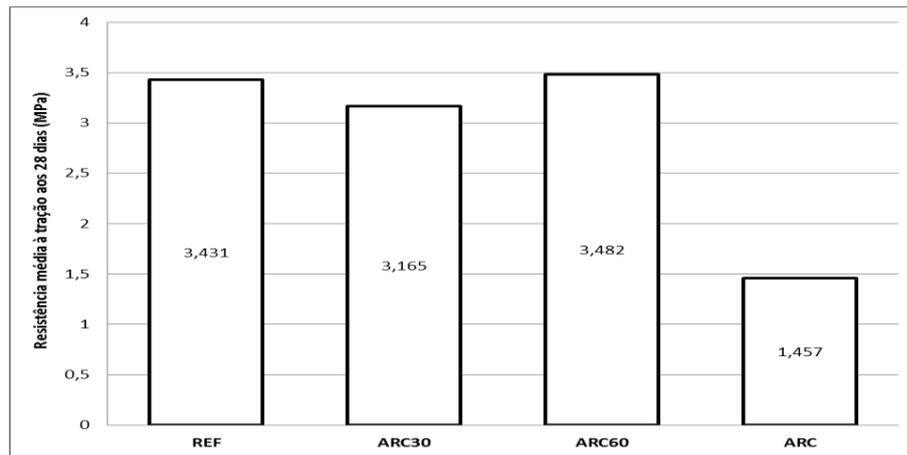
*Corpos de prova rompidos após ensaio de módulo de elasticidade.

**Não foi possível romper os CP's destinados a compressão diametral devido a problemas de adensamento, foram então rompidos 3 CP's após o ensaio de módulo de elasticidade.

Fonte: Do autor, 2016.

O comportamento das composições quanto à resistência à tração foi semelhante ao visto na resistência à compressão, onde a composição de ARC teve sua resistência diminuída em quase 50 % em relação à composição de referência, a composição de ARC60 obteve um pequeno acréscimo de 1,5 % quando comparada a REF, e a de ARC30 uma queda (8 %), em relação à composição de referência, mantendo-se na classe de resistência estabelecida. Na Figura 11 são expostas as resistências médias à tração.

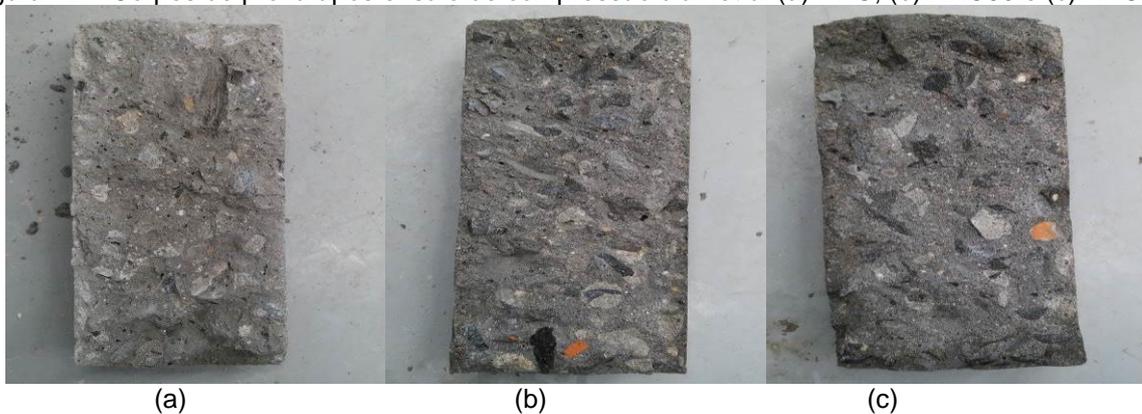
Figura 11 – Média dos resultados de resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: Do autor, 2016.

Cabe ressaltar que tais resultados apresentados são possíveis devido à boa qualidade do material utilizado na pesquisa, em que quase não havia presença de material cerâmico. Na Figura 12 estão dispostos os corpos de prova das composições de ARC, ARC60 e ARC30 após serem rompidos por compressão diametral, nela é possível perceber quase inexistência de resíduo vermelho.

Figura 12 – Corpos de prova após ensaio de compressão diametral (a) ARC, (b) ARC60 e (c) ARC30.



Fonte: Do autor, 2016.

Por fim podem ser observados na Tabela 7 os valores obtidos no ensaio de módulo de elasticidade.

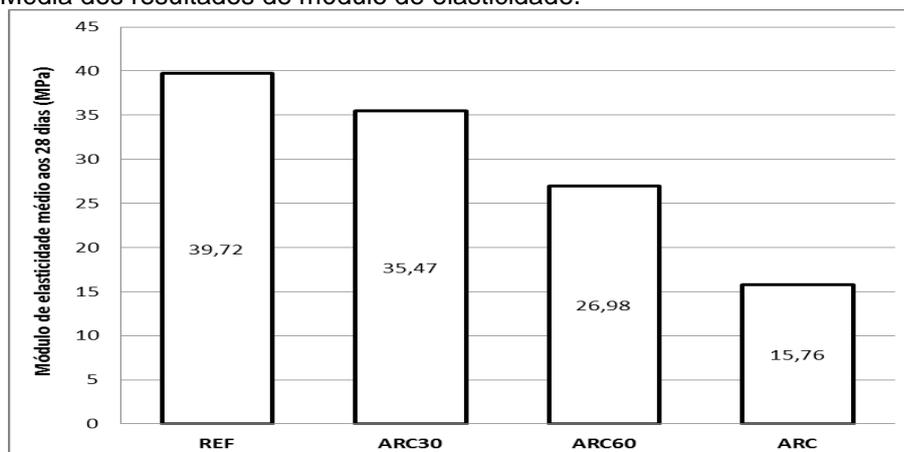
Tabela 7 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias.

Amostras	Composição			
	REF	ARC30	ARC60	ARC
1	40,19	35,98	26,39	15,31
2	41,15	35,21	26,54	15,62
3	37,83	35,67	28,74	14,97
4	42,12	35,75	27,2	16,37
5	38,65	35,51	29,51	16,05
6	38,4	34,68	23,51	16,26
Média	39,72	35,47	26,98	15,76
Desvio Padrão	1,702	0,463	2,104	0,557

Fonte: Do autor, 2016

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade diferem da literatura, uma vez que, geralmente, seguem a tendência da resistência à compressão, ou seja, quanto maior a resistência maior o módulo, isto por que ambas as propriedades tem extrema ligação com a porosidade do concreto. O que pode se observar na Figura 13, é a diminuição do módulo de elasticidade à medida que cresce a substituição do agregado natural pelo reciclado, resultando em uma queda de 11 % para ARC30, de 24 % para ARC60 e de 60 % para ARC, quando comparadas a amostra de referência. Esse fato pode ser explicado devido a maior presença de agregados reciclados que são menos resistentes e mais porosos, que influenciam negativamente na capacidade de deformação do concreto.

Figura 13 – Média dos resultados de módulo de elasticidade.



Fonte: Do autor, 2016.

3.4 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) E TESTE DE TUKEY

A fim de comprovar a significância dos resultados obtidos, foi realizada uma análise de variância ANOVA com auxílio do Microsoft Excel. Esta ferramenta de análise estatística permite analisar o nível de variância das amostras estudadas, ou seja, se ambas as amostras podem ser consideradas iguais, ou se apresentam diferença entre si. Os resultados obtidos para ANOVA podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados ANOVA.

Parâmetros	Resistência à compressão	Resistência à tração	Módulo de elasticidade
p	0,000	0,000	0,000
F	290,31	22,32	341,66
F _{crítico}	3,10	4,07	3,10

Fonte: Do autor, 2016.

A análise foi realizada para um nível de significância de 95 %, ou seja, um $p_{value} \geq 0,05$, em que para os resultados acima deste as amostras podem ser consideradas iguais com 95 % de certeza, o contrário as amostras são consideradas diferentes com a mesma precisão. Outro parâmetro importante analisado é o $F_{crítico}$, onde para valores de F superiores ao do $F_{crítico}$ as amostras são consideradas diferentes, caso contrário às amostras são consideradas iguais. Logo os resultados obtidos demonstram que as amostras mostraram-se diferentes em todos os ensaios desenvolvidos, com 95 % de precisão.

Auxiliar a ANOVA fez-se uma análise de pares de média por meio do Teste de Tukey, este método estatístico analisa as médias obtidas por pares, e através do parâmetro de “Diferença Mínima Significativa” (*d.m.s*) as duas amostras comparadas podem ser consideradas iguais ou diferentes. Novamente utilizou-se do Microsoft Excel para a execução do método, porém, diferente da ANOVA, este método não é calculado automaticamente pelo programa, portanto, com base ao exposto na literatura (VIEIRA, 1980) foram calculados os valores absolutos de diferença e o *d.m.s*, sendo estes apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados Teste de Tukey.

Pares de média	Resistência à compressão		Resistência à tração		Módulo de elasticidade	
	Valor absoluto da diferença	Valor <i>d.m.s</i>	Valor absoluto da diferença	Valor <i>d.m.s</i>	Valor absoluto da diferença	Valor <i>d.m.s</i>
REF – ARC	17,00		1,97		23,96	
REF – ARC60	0,67		0,05		12,74	
REF – ARC30	2,22	1,94	0,27	0,66	4,26	2,26
ARC – ARC60	17,67		2,03		11,22	
ARC – ARC30	14,78		1,71		19,70	
ARC60 – ARC30	2,88		0,32		8,49	

Fonte: Do autor, 2016.

A análise consiste na comparação entre os valores das diferenças absolutas e o fator *d.m.s*, em que para diferenças menores que o *d.m.s* as amostras comparadas são consideradas estatisticamente iguais, com 95 % de precisão. Sendo assim os resultados obtidos demonstram que quanto à propriedade de resistência à compressão somente as amostras REF e ARC60 são consideradas estatisticamente iguais, todas as outras apresentaram valores maiores ao do *d.m.s*, e desse modo são estatisticamente diferentes. Quanto à resistência à tração as amostras REF e ARC60, REF e ARC30, e ARC60 e ARC30 são consideradas estatisticamente iguais, entre si, com 95 % de confiança.

Finalmente para os resultados de módulo de elasticidade todas as amostras apresentaram valores superiores ao *d.m.s*, sendo consideradas estatisticamente diferentes.

4. CONCLUSÕES

Cabe ressaltar que os resultados obtidos neste trabalho representam unicamente as amostras e materiais coletados, não podendo ser tomado como padrão para todos os concretos produzidos com agregados reciclados, uma vez que há grande variação das propriedades dos mesmos. Desta forma, com tudo que foi apresentado, pode-se concluir que:

- Os agregados reciclados utilizados na pesquisa apresentaram valores de absorção de água muito superiores aos naturais, chegando a absorver até 18 vezes mais água que o agregado natural, que foi o caso do agregado reciclado misto graúdo. Tal característica juntamente com os baixos valores

de massas específicas obtidas, demonstra a porosidade elevada dos agregados analisados.

- Quanto à granulometria dos agregados, ambos os agregados reciclados miúdos encaixaram-se dentro da zona ótima estabelecida pela NBR NM 248:2003, e conforme módulos de finura obtidos demonstraram-se mais grossos que a areia natural utilizada. Enquanto que os agregados graúdos reciclados não se encaixaram em nenhuma das zonas estabelecidas pela NBR 7211:2009 e mostraram-se mais finos que a brita utilizada na mistura, porém ambos são classificados como brita 2.
- Ao analisar a trabalhabilidade dos concretos fabricados, constatou-se que a mistura com 100% de agregado reciclado (miúdo e graúdo) obteve o abatimento desejado, porém com uma relação água cimento muito superior a mistura de referência, cerca de 1,90 vezes maior. Evidenciando o elevado teor de absorção dos materiais empregados no estudo.
- Quanto as propriedades mecânicas dos concretos fabricados, pode-se concluir que o uso de agregados reciclados em concretos estruturais é eficaz desde que observado as características e proporção de substituição dos agregados utilizados. Para a composição ARC60 obteve-se um ganho de resistência à compressão e à tração, cerca de 2 % e 1,5 %, respectivamente, quando comparadas à composição de referência e para a ARC houve uma acentuada queda das mesmas, aproximadamente 50 % em relação à referência. A composição ARC30 demonstrou uma queda nas resistências quando comparada à composição de referência, entorno de 7 % para compressão axial e 8 % para tração, porém manteve-se na classe de resistência pré-determinada.
- Já o comportamento quanto ao módulo de elasticidade deu-se diferente do esperado, onde a deformação dos corpos de prova foi maior na medida em que se aumentava o teor de substituição, resultando em uma queda em relação à composição de referência de 11 %, 24 % e 60 %, para as composições ARC30, ARC60 e ARC, respectivamente, tornando-se interessante estudar mais afundo tal propriedade nos concretos com agregados reciclados.

- Finalmente após a análise estatística realizada através da análise de variância ANOVA e do Teste de Tukey, pode-se afirmar, com 95 % de confiança, que as composições ARC60 e REF são iguais no que diz respeito à compressão axial simples, e as composições REF e ARC60, REF e ARC30, e ARC60 e ARC30 são estatisticamente iguais quanto à propriedade de resistência a tração.

Sendo assim, a presente pesquisa evidenciou a importância do estudo da aplicação dos agregados reciclados provenientes dos resíduos da construção civil, uma vez que possuem um bom desempenho em concretos estruturais e reduzem o impacto ambiental gerado pelo setor diariamente. Porém ainda faltam estudos e regulamentações quanto à triagem e beneficiamento dos resíduos da construção civil, tais etapas são essenciais para produção de um agregado reciclado de boa qualidade. Por fim os agregados reciclados utilizados mostraram-se eficientes, porém para a utilização desses em larga escala na construção civil devem ser avaliadas as suas propriedades e observados os teores de substituição, vale lembrar que a NBR 15116:2004 não permite o emprego de tais materiais em concretos estruturais, tornando-se interessante sua revisão, tendo em vista os inúmeros resultados positivos obtidos em pesquisa anteriores e nesta.

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se destacar o estudo da influência de partículas de cimento não hidratado nas propriedades de um novo concreto com agregado reciclado, por meio de diferentes percentuais de substituição do agregado reciclado miúdo de concreto e da análise da estrutura química do mesmo. Bem como a busca por um teor ótimo de substituição e elaboração de um traço de concreto para obtenção da resistência desejada, buscando a melhor relação custo/benefício, ou seja, consumo de cimento dentro dos padrões, pouca adição de aditivo e o maior percentual de agregado reciclado.

5. AGRADECIMENTOS

A 3R's Usina de reciclagem de resíduos da construção civil pelo material disponibilizado na pesquisa.

Ao engenheiro civil Tchesare Andreas Keller responsável pelo laboratório de materiais de construção civil da UNESC e a toda a equipe pelo apoio na execução das misturas e realização dos ensaios.

6. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Daniel de Lima; FELIX, Ludmylla Pires; SILVA, Leonardo Costa e, SANTOS, Thiago Martins dos. Influência de agregados reciclados de resíduos de construção nas propriedades mecânicas do concreto. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v.11, n. 1, p. 16-34 Dez./2015 – Jun/2016. Disponível em: < <http://repositorio.bc.ufg.br/handle/ri/11168>>. Acesso em: 27 Jul. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004. 17 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil. Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002. **Lex:** DOU n.136, de 17 de julho de 2002, p. 95-96.

CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto.** 2013. 127 f. Tese (doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

FERREIRA, Alice Cristina Alves; COSTA, Fernanda Monteiro Vieira da; DIAS, Isabella De Cássia Teotônio; SANTOS, Silvino. Gestão de resíduos sólidos na construção civil. **Revista Pensar Engenharia, v.2, n. 2, Jul./2014.** Disponível em: <http://revistapensar.com.br/engenharia/pasta_upload/artigos/a140.pdf>. Acesso em: 27 Jul. 2016.

MOTA, Rogério André de Oliveira; ANDRADE, Allan Richard Gonçalves; JUNIOR, Guido Santos de Almeida. Concreto estrutural com agregado reciclado. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, XIV – UNIVAP, 2010. Disponível em: <http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2010/anais/arquivos/RE_0284_0267_01.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2016

PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana.** 1999. 189 p.. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SANTANA, Valquiria Melo de; PAES, Filipe Pereira; SANTANA, Diego da Silva; CERQUEIRA, Milena Borges dos Santos; SILVA, Francisco Gabriel Santos; ARAGÃO, Hélio Guimarães. Utilização de concreto reciclado na aplicação de elementos estruturais. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, XV. Disponível em: <http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2011/anais/arquivos/0246_0254_01.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2016.

SOUZA, Leandro Moreno de; ASSIS, Cleber Decarli de; SOUTO, Sílvia Barroso Gomes. Agregado reciclado: um novo material da construção civil. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria, V.18, n. 1, p. 273-278, Abr/2014.**

TENÓRIO, Jonathas Judá Lima. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais.** 2007. 157 p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007. Disponível em: <http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes_arquivos/Dissertacoes/Jonathas%20Juda%20Lima%20Tenorio.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2016.

VIEIRA, Sonia. **Introdução à bioestatística.** 3.ed Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1980. 196 p. ISBN 8535202595