



# ESTUDO DA RESISTÊNCIA RESIDUAL DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO GRAUDO POR AGREGADO RECICLADO, APÓS EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS.

Icaro dos Santos da Silva (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2).

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
(1)[iss.toposambiental@gmail.com](mailto:iss.toposambiental@gmail.com), (2)[dss@unesc.net](mailto:dss@unesc.net)

## RESUMO

A construção civil é hoje uma das atividades mais importantes do país, sendo responsável por grande movimento de renda e geradora de empregos. Em contrapartida, o Brasil possui um dos maiores consumos de cimentos do mundo, e um dos métodos construtivos mais conservadores e com baixos índices de racionalização, no quesito logística e aproveitamento. No mundo inteiro a indústria da construção civil, é uma das maiores produtoras de resíduos sólidos, o qual quando não dado o devido destino acabam em depósitos clandestinos, gerando diversos problemas ambientais. Este estudo tem como objetivo central, abrir uma nova janela de possibilidades para re-utilização destes resíduos, que outrora já se provaram ser eficientes em estudos passados. Porém para um material se firmar como alternativa na substituição de outro, se faz necessário o estudo de diversas situações, entre elas seu comportamento térmico. Nesse contexto, foram produzidos três traços, um com 100 % de agregado natural, e outros dois com substituições parciais de 30 e 60 % por agregado reciclado, em uma proporção de 1:4 em massa. Os corpos-de-prova ficaram sob cura submersa durante um período de 28 dias, para após serem estocadas até atingirem a idade de 60 dias, quando então foram expostos a altas temperaturas. As amostras foram ensaiadas nos quesitos Compressão Axial, Tração por Compressão Diametral e Módulo de Elasticidade. Resultados foram apresentados em gráficos e tabelas, mostrando que além do quesito mecânico, quando se trata de exposição a altas temperaturas o concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado, também se torna uma alternativa viável na construção civil do século XXI.

Palavras-Chave: Concreto, Resíduo Construção Civil, Agregado Reciclado, Altas Temperaturas.

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais disseminado e utilizado no mundo, sendo o alicerce base da construção civil (PEDROSO, 2009). No Brasil o mesmo possui hegemonia sendo o principal material em mais de 90 % das obras. Contudo a construção civil é ao mesmo tempo uma das maiores produtoras de resíduos sólidos, que causam grandes impactos ambientais.

A quantidade de resíduos produzidos pela construção civil chegam entre 0,23 a 0,66 ton/hab/ano (PINTO, 1999).

Quando não é dada uma destinação final adequada a estes resíduos eles acabam sendo depositados clandestinamente em terrenos baldios, áreas de preservação permanente, margens de rios e córregos, vias e logradouros públicos. O descarte indevido contribui para problemas ambientais, como assoreamento e entupimento de cursos d'água, que geram enchentes entre outros problemas ambientais. (Portal resíduos sólidos, 2015).

O uso dos resíduos da construção civil, como opção para substituir agregados do concreto, busca dar um destino usual a boa parte destes resíduos, preservando a qualidade do produto final e do meio que o cerca. De acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) nº 307, Art. 2º Inciso I: "Resíduos Sólidos da Construção Civil são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha".

Entre os fatores que mais diferenciam os agregados comuns dos reciclados, é a porosidade, que também é o principal fator responsável pelos diferenciais de resistência mecânica entre corpos-de-prova de concreto comum e de concreto com presença de agregado reciclado. Ao utilizar resíduos mistos observa-se que a resistência à compressão passa a diminuir quando há uma substituição de mais de 50 % dos agregados naturais pelos agregados graúdos reciclados, devido à necessidade do aumento da relação água/cimento, que advém da porosidade (VIEIRA, 2003).

Figueiredo (2008) acrescenta: agregados reciclados são mais porosos que os agregados de rochas britadas e areias naturais. Assim, a resistência e durabilidade deste outro tipo de concreto são controladas, não apenas pela porosidade da pasta de cimento, mas também pela porosidade do agregado, que facilmente ultrapassa os 10 %. Assim, a diferença essencial entre um concreto convencional e um concreto com agregado reciclado é a porosidade.

O concreto tem um comportamento bem favorável quando exposto ao fogo, pois ele não é combustível, e continua tendo um desempenho satisfatório mesmo em um período longo de exposição, não expelindo gases tóxicos (NEVILLE, 1997).

Contudo, o concreto sofre modificações macro e micro estruturais quando o mesmo é submetido em altas temperaturas. Estas modificações podem ser: mudança na coloração, redução da resistência mecânica, módulo de elasticidade, assim como modificações cristalinas nas propriedades químicas, com o derretimento de alguns componentes constituintes (NEVILLE, 1997; LIMA, SILVA FILHO & CASONATO 2003).

A ação térmica produz grande aumento da temperatura nos elementos estruturais e variações térmicas que modificam o comportamento atômico das moléculas do material. No concreto endurecido sobre altas temperaturas há alterações físico-químicas que alteram as suas propriedades mecânicas, tais como, módulo de elasticidade e resistência à compressão e tração. Há pressões nos poros devido à evaporação da umidade, as quais produzem formação de tensões térmicas na microestrutura do concreto endurecido, há alongamentos excessivos e o aparecimento de esforços solicitantes adicionais (COSTA & SILVA, 2004).

O concreto sofre mudanças gradativas na sua coloração quando o mesmo é exposto ao calor. As mudanças nas propriedades mecânicas podem estar relacionadas a esse fator. Portanto após um incêndio em uma estrutura de concreto, é importante avaliar a coloração da mesma para verificar se há possíveis relações com as reduções de resistência e módulo de elasticidade (SILVA, 2009).

O concreto sofre poucas alterações na resistência quando expostos a temperaturas de até 300 °C e que acima dos 800 °C ocorrem perdas significativas da resistência. (RODRIGUES, 1994).

De acordo com Hansen (2001) e confirmado nos estudos de Viana (2015) a presença de agregado reciclado em substituição do agregado graúdo no concreto, gera uma perda de 15 % a 40 % no quesito modulo de elasticidade. Uma variação de até 10 % no quesito Tração. Porém no quesito compressão axial, pode haver aumento na resistência a compressão axial, como visto no estudo realizado por Viana (2015), onde na mistura com presença de 30 % de agregado reciclado, houve um aumento de 5,61 % em sua resistência a compressão. Contudo como confirmado nos estudos de ambos os pesquisadores, as resistências em geral

tendem a cair de acordo com o aumento do percentual de substituição do agregado natural.

Segundo Oliveira (2011), como a reação de hidratação do cimento é reversível e termo ativada, a exposição do concreto às temperaturas elevadas pode ter efeitos deletérios, com a ocorrência de desidratação da matriz a base de cimento, fissuração devido a pressões internas geradas pela evaporação da água de amassamento remanescente da mistura e ao deslocamento superficial (“Spalling”). Neste estudo foi observado a resistência de concretos com substituição parcial de agregados reciclados em comparação ao concreto tradicional. Tendo como enfoque sua resistência mecânica residual após exposição a determinadas faixas de temperatura. Para que este objetivo seja alcançado se faz necessário a utilização de Ensaio de Compressão Axial, Tração por Compressão Diametral e Módulo de Elasticidade, nos corpos-de-prova pós aquecimento. Podendo assim avaliar e traçar um perfil que defina o seu comportamento.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS.**

Com o intuito de análise da resistência residual de concretos com substituição do agregado graúdo (Brita Graduada) foram produzidos corpos-de-prova de formato cilíndrico nas dimensões 10 x 20 cm, sendo estas diâmetro e altura respectivamente. Os traços tiveram como base uma reprodução do estudo de Viana em 2015, onde o mesmo estudou o efeito da adição de agregados graúdo reciclados no concreto, sendo a análise feita para temperatura ambiente. O presente estudo expôs os corpos-de-prova com mesmos traços a diferentes temperaturas, buscando possíveis variações de suas resistências.

O concreto produzido teve como base Cimento CP-IV, Areia Média e Brita (Todos cedidos pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil), e Agregado Reciclado, proveniente da usina 3R de reciclagem, localizado na Rodovia Otávio Dassoler, 1885 – Criciúma SC.

Todos os materiais passaram por secagem em estufa por um período de vinte e quatro horas, para então serem pesados, separados e misturados (Figura 1).

**Figura 1 – Materiais separados após procedimento de secagem.**



FONTE: Autor, 2016.

Na produção foi utilizado uma Betoneira de marca Horbach de capacidade máxima para 400l, conforme Figura 2.

**Figura 2 – Concretagem.**



FONTE: Autor, 2016.

Para a realização do estudo foram reproduzidos três traços, apresentando 0 %, 30 % e 60 % de substituição do agregado graúdo por Agregado reciclado, que provém basicamente de material residual de demolição, sendo estes: resíduos de concreto, material cerâmico e cerâmicas esmaltadas. Os traços utilizados são mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Concretos Produzidos**

Tipos de Mistura	Traços Unitários						
	Relação Água Cimento	Cimento CPIV	Areia Média	Brita	Agregado Reciclado (AR)	Aditivo	Abatimento
Referência	0,42	1	1,75	2,25	-	-	14,5
30% AR	0,42	1	1,75	1,58	0,67	0,6	-
60% AR	0,42	1	1,75	0,9	1,35	2,9	-

Devido à utilização de ultra-plastificante nas misturas de agregado reciclado, como alternativa para manter a relação água cimento estável, para as três misturas, o material resultante apresentou excessiva plasticidade, sendo altamente líquido e incapaz de se obter um ensaio de abatimento.

A figura 3 mostra os corpos-de-prova moldados após a concretagem.

**Figura 3 – Corpos-de-Prova moldados.**



FONTE: Autor, 2016.

Todos os corpos-de-prova produzidos foram expostos a um período de cura submersa em tanque de água por um período de 28 dias (Conforme figura 4), e então estocados em temperatura ambiente até atingirem a idade de 60 dias.

**Figura 4 – Cura Submersa.**



FONTE: Autor, 2016.

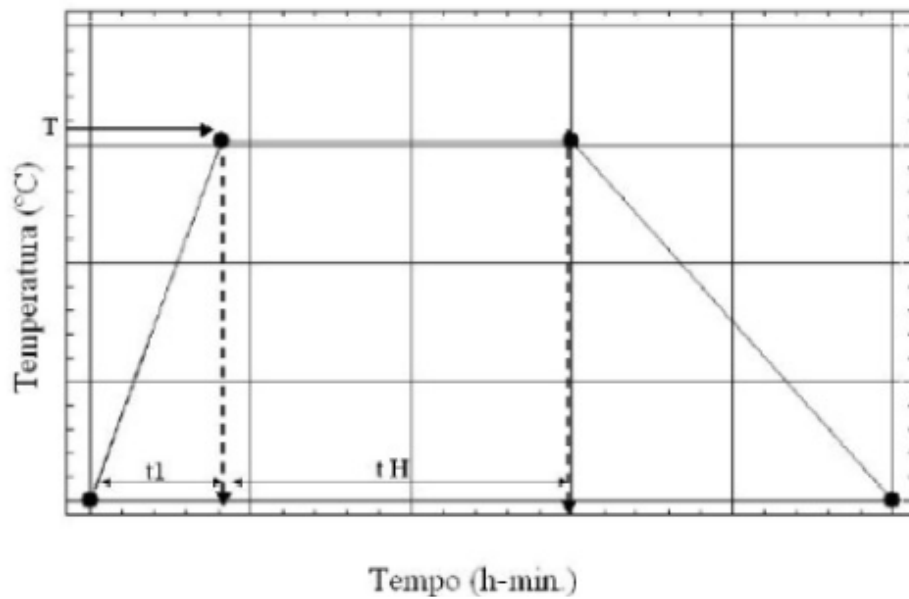
Após atingirem a idade de 60 dias, os corpos foram expostos a altas temperaturas. Devido às limitações impostas pelo equipamento, a programação de aquecimento era imprecisa, devido a esse fato, foi necessário um acompanhamento mais rigoroso do procedimento, para garantir que as temperaturas em questão fossem atingidas com sucesso. O tempo e o aquecimento atingido estão mostrados na tabela 2.

**Tabela 2 – Programa de Aquecimento.**

<b>Temperatura Desejada (°C)</b>	<b>Temperatura Atingida (°C)</b>	<b>t1 (hr:min)</b>	<b>tH (hr:min)</b>
<b>100</b>	107	00:12	00:30
<b>400</b>	417	00:42	00:30
<b>800</b>	809	01:15	00:30

O procedimento de aquecimento se comporta em função do tempo, atingindo a temperatura desejada, para então manter-se por um período de 30min, e após resfriar naturalmente (conforme figura 5).

**Figura 5 – Curva de Aquecimento.**



FONTE: (SILVA, 2009).

Para a etapa de exposição ao fogo, foi utilizado um forno mufla CT-095 com controle digital de temperatura, com capacidade térmica máxima de 1200 °C, mostrado na Figura 6.

**Figura 6 – Forno Mufla CT-095.**



FONTE: Autor, 2016.



Para garantir a integridade do equipamento, os corpos de prova foram colocados dentro de uma gaiola de proteção, feita com aço inoxidável, com o objetivo de conter possíveis lascamentos do concreto durante o procedimento.

O estudo teve como foco quatro faixas de temperaturas, sendo respectivamente 23 (ambiente), 100, 400 e 800 °C. Então 24hrs após a exposição a estas temperaturas os corpos-de-prova foram ensaiados. Para caracterização da resistência mecânica residual dos corpos-de-prova os mesmos, após aquecidos, foram submetidos aos ensaios de Resistência a Compressão Axial, Tração por compressão diametral e Módulo de Elasticidade. Foi determinado um número mínimo de corpos-de-prova para cada ensaio, buscando assim uma confiabilidade estatística conforme Tabela 3.

**Tabela 3 – Corpos de prova aquecidos para cada ensaio.**

Temperatura	Compressão			Tração			Módulo de Elasticidade		
	REF	30% AR	60% AR	REF	30% AR	60% AR	REF	30% AR	60% AR
<b>AMBIENTE</b>	2 CPs	2 CPs	2 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs
<b>100 °C</b>	2 CPs	2 CPs	2 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs
<b>400 °C</b>	2 CPs	2 CPs	2 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs
<b>800 °C</b>	2 CPs	2 CPs	2 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs

Devido a presença de saliência de agregados nos corpos-de-prova com presença de agregado reciclado, os mesmos antes de serem ensaiados foram retificados com o auxílio de uma retificadora automática de corpos-de-prova (Figura 7). A retificadora possui uma serra diamantada, e funciona com auxílio de ar comprimido.

**Figura 7 – Retificadora Automática de Corpos-de-Prova.**



FONTE: Autor, 2016.

Mesmo com uso de corpos-de-prova retificados, as pastilhas de neoprene ainda assim foram usadas no ensaio, com o intuito de padronizar os procedimentos.

## 2.1 PERDA DE MASSA.

A perda de massa é determinada a partir da comparação entre a massa antes e após o aquecimento, conforme a equação 1:

$$pm = m1 - m2$$

### Equação 1 – Perda de Massa.

Onde:

pm = perda de massa do corpo de prova (g);

m1 = massa do corpo de prova de referência (g), antes do aquecimento;

m2 = massa do corpo de prova (g) 24 horas após ser exposto à altas temperaturas;

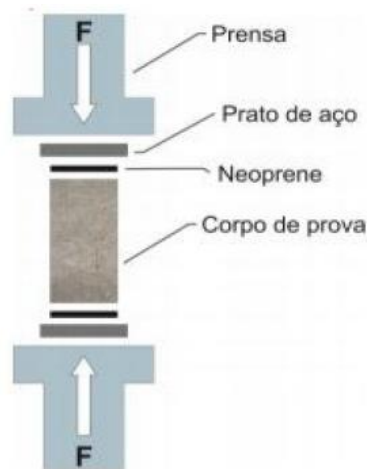
O procedimento de aquecimento causa alterações na coloração do corpo de prova que ocorre devido a perda de componentes ferrosos (LIMA, 2015).

Este dado é de extrema importância devido que algumas estruturas de concreto tendem a criar lascamentos explosivos, consequência do acúmulo de vapor confinado dentro do corpo-de-prova.

## 2.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL.

Entre as principais características do concreto, sem dúvida alguma, a resistência a compressão é a mais solicitada e também a de maior amplitude, devido a estes fatos, a resistência a compressão axial torna-se a característica mais importante a ser avaliada. O procedimento deste ensaio é descrito pela norma NBR 5739:2007. O ensaio consiste na exposição do corpo de prova a uma força crescente, até que o mesmo venha à ruptura, registrando assim sua tensão última. O corpo-de-prova é colocado na prensa hidráulica, com suporte metálico junto a pastilhas de neoprene, como ilustrado na figura 8.

**Figura 8 – Ensaio de Compressão Axial.**



Para este ensaio foi utilizado uma Prensa Hidráulica da marca EMIC modelo PC 200 com capacidade máxima de 2000KN.

Segundo a NBR 5739:2007, o cálculo da resistência a compressão axial é dado pela Equação 2.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2}$$

**Equação 2 – Compressão Axial.**

Onde:

$f_c$  é a resistência a compressão, em megapascals (Mpa).

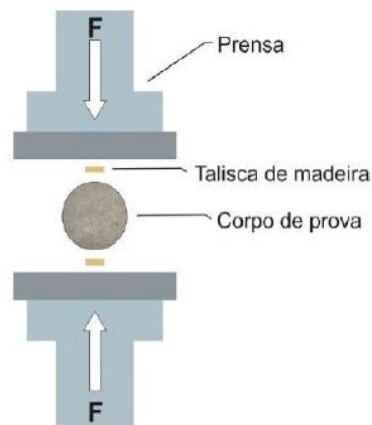
$F$  é a força máxima alcançada, em newtons (N).

$D$  é o diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros (mm).

### **2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.**

O ensaio de compressão diametral trata-se de uma forma indireta de se obter a resistência a tração. A prensa aplica duas forças de compressão concentradas de mesma intensidade e sentidos opostos no corpo-de-prova, gerando tensões de tração uniformes no sentido perpendicular ao diâmetro solicitado. Este procedimento é regulamentado pela NBR 7222:2011. Consiste no mesmo processo de ensaio da compressão axial, uma carga crescente é aplicada ao corpo de prova até que este venha a atingir sua tensão de tração última, taliscas de madeira garantem a direção da força como mostrado na figura 9.

**Figura 9 – Ensaio de Tração por Compressão Diametral.**



Para este ensaio é utilizado a mesma prensa PC200 da marca EMIC utilizada no ensaio de compressão axial (Figura 10).

**Figura 10 – Prensa Hidráulica EMIC PC200.**



FONTE: Autor, 2016.

Segundo NBR 7222:2011, o cálculo da resistência a tração por compressão diametral é dado pela Equação 3.

$$f_{ct, sp} = \frac{2F}{\pi dl}$$

**Equação 3 – Tração por Compressão Diametral.**

Onde:

$f_{ct, sp}$  é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em megapascals (Mpa).

$F$  é a força máxima obtida no ensaio, expressa em Newtons (N).

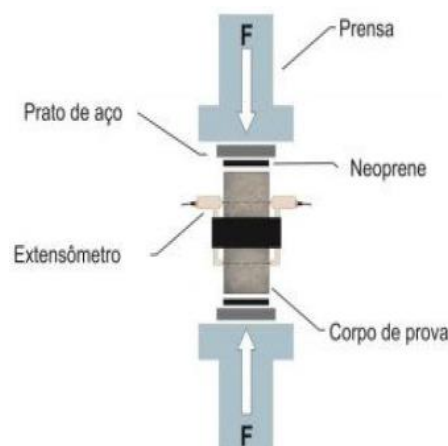
$d$  é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

$l$  é o comprimento do corpo-de-prova, expresso em milímetros (mm).

## 2.4 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE.

O módulo de elasticidade advém da inclinação da curva de tensão versus deformação. O procedimento do ensaio é descrito na NBR 8522:2008 e consiste na exposição do corpo-de-prova a uma tensão de 30 % da sua tensão de ruptura (valor que advém de uma media dos dados obtidos no ensaio de compressão axial) de forma crescente, esta exposição é mantida por um período de sessenta segundos, ate que a carga seja reduzida, mantendo a mesma freqüência do aumento gradativo de tensão, atingindo 0,5 MPA. Este período é repetido 3 vezes. Sensores no corpo-de-prova lêem as deformações, gerando dados que são processados criando assim o gráfico de tensão versus deformação. Segue Ilustração do ensaio na Figura 11.

**Figura 11 – Ensaio de Módulo de Elasticidade.**



Conforme a NBR 8522:2008, o módulo de elasticidade é dado pela Equação 4.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3}$$

**Equação 4 – Módulo de Elasticidade.**

Onde:

$\sigma_b$  é a tensão maior, em megapascals ( $\sigma_b = 0,3f_c$ );

$\sigma_a$  é a tensão menor, em megapascals ( $\sigma_a = 0,5 \text{ Mpa}$ );

$\varepsilon_b$  é a deformação específica média dos corpos ensaiados na tensão de 0,3 Fc;

$\varepsilon_a$  é a deformação específica média dos corpos ensaiados na tensão de 0,5 Mpa;

Para este ensaio foi utilizado uma prensa da marca EMIC PC200 CS com capacidade máxima de 2000 KN, com computador externo com software TESC – Test Script, conforme figura 12.

**Figura 12 – Prensa Hidráulica EMIC PC200 CS.**



FONTE: Autor, 2016.

Devido ao concreto apresentar baixas deformações, se faz necessário a utilização de extensômetros que tem como finalidade medir micro variações.

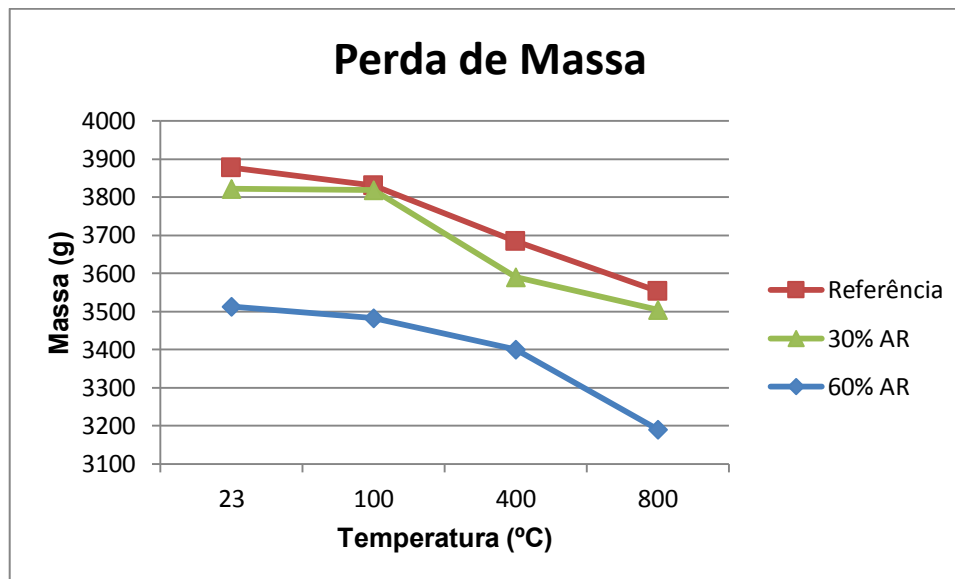
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos dos ensaios mecânicos solicitados, nas diferentes exposições a temperaturas. Os resultados estão expressos em gráficos e tabelas.

### 3.1 PERDA DE MASSA.

Através de uma média dos valores de massa obtidos do comparativo entre os corpos de prova a temperatura ambiente e os expostos a altas temperaturas, foi possível analisar a perda de massa conforme a figura 13.

**Figura 13 – Gráfico de Análise de Perda de Massa.**



FONTE: Autor, 2016.

No gráfico é possível, de partida, perceber que cada traço apresentou consideráveis diferenças entre os valores referenciais à temperatura ambiente. Traço 30 % AR (Agregado Reciclado) e o traço 60 % AR apresentaram respectivamente uma massa 1,45 % e 8,08 % menor do que o traço referencia. Em seus estudos Leite (2001), afirma que tal variação na massa de concretos comuns em comparação com concretos com presença de agregados reciclados, advém da porosidade do agregado reciclado, que proporciona maior quantidade de ar incorporado, e que tal variação tende a ser maior, de forma proporcional ao percentual de substituição. A redução da massa no traço referencia se torna mais ampla com o decorrer do aumento da temperatura, chegando a um valor de 1,23 % a 100 °C, 4,99 % a 400 °C chegando uma redução de 8,35 % a 800 °C.

O traço 30 % AR, apresentou uma mudança desprezível na massa ao ser exposto a temperatura de 100 °C, em contra partida sofreu uma redução de 6,05 % na temperatura de 400 °C valor esse que atingiu a margem de 8,31 % de redução na temperatura de 800 °C.

O mesmo padrão de queda se apresenta no traço 60 % AR, que apresentou reduções de 0,84 % a 100 °C, 3,18 % a 400 °C e 9,16 % a 800 °C.

Segundo Oliveira (2011), a redução da massa com aumento da temperatura no concreto, advém dos efeitos deletérios da temperatura nos corpos de prova, que podem causar desidratação do cimento e fissuração devido à evaporação de águas internas.

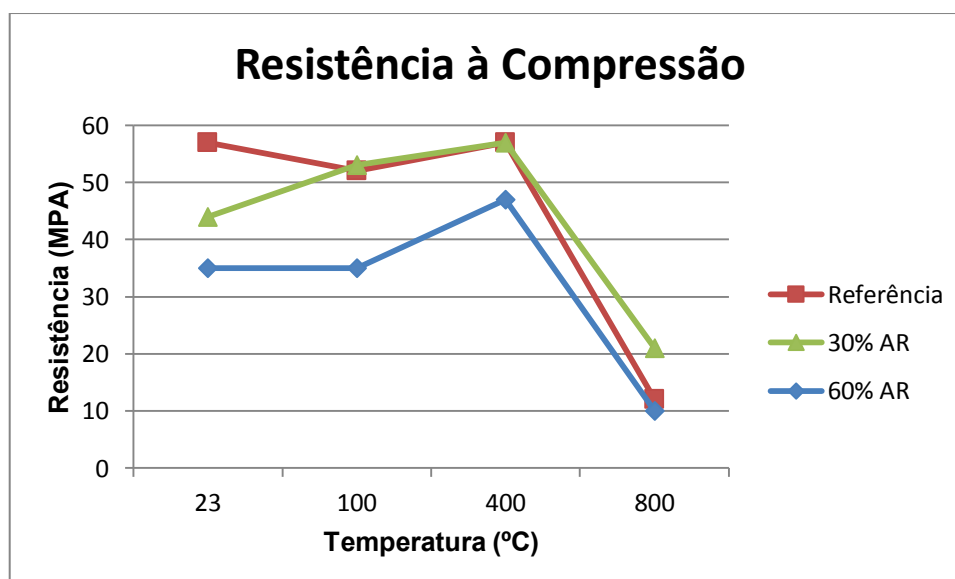
Como esperado os traços com presença de agregado reciclado apresentaram massas menores, do que o traço referencia, porém suas curvas de queda em função da temperatura foram bem semelhantes, ficando dentro dos valores esperados de 5 a 15%, que foram observados por Leite (2001), em seus estudos.

Através do método de análise de variação (ANOVA), que basicamente define o grau de significância em que uma variável influencia na dispersão dos valores em relação a média, o único fator relevante no estudo da perda de massa é a presença ou não de agregado reciclado, pois possui influencia direta na massa inicial do corpo-de-prova. No quesito aquecimento todos os traços apresentaram perdas semelhantes, com diferenças não significativas.

### 3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.

Assim como os valores apresentados na perda de massa, o valor determinado no ensaio de compressão axial advém da media dos ensaios, conforme figura 14.

**Figura 14 – Gráfico do Ensaio de Compressão Axial.**



FONTE: Autor, 2016.



É possível observar neste gráfico, o comportamento dos três traços com o decorrer do aumento da temperatura. Na temperatura ambiente os traços de 30 % AR e 60 % AR, apresentaram respectivamente valores de resistência a compressão de 22,81 % e 38,60 % menores do que o traço referencia.

Analisando especificamente o comportamento do traço referencia com o decorrer do aumento da temperatura, é possível observar uma queda de 8,77 % na temperatura de 100 °C, resistência ao qual retorna a ser a mesma da temperatura ambiente quando exposto a temperatura de 400 °C. Ao expor os corpos de prova do traço referencia a 800 °C, houve uma queda drástica na sua tensão ultima chegando uma queda de 78,95 % de sua resistência inicial.

Diferente do traço referencia o traço de 30 % AR, começa com uma resistência inicial mais baixa, e quando exposto a temperatura de 100 °C recebe um ganho de 20,45 %, se tornando maior do que a do traço referencia para essa mesma faixa de temperatura. Tal aumento se torna ainda mais significativo quando a temperatura chega a 400 °C, representando um aumento de 29,54 %, esse mesmo efeito também foi observado por (SILVA e CIMOLIN, 2015). Da mesma maneira que o traço referencia, o traço de 30% AR perde grande parte do seu desempenho ao ser exposto a temperatura de 800°C, perdendo cerca de 52,27% do seu potencial a compressão, porém esse valor ainda é duas vezes maior que a resistência residual do concreto referencia para esta mesma faixa de temperatura.

O traço 60 % AR, mostra valores mais baixos que os demais traços em todas as faixas de temperatura, mostrando uma variação desprezível a sua exposição a temperatura de 100 °C, e recebendo um acréscimo de resistência de 34,28 % a 400 °C. A temperatura de 800 °C também afeta drasticamente o traço de 60 % AR, minimizando sua resistência em 71,43 %.

Segundo Ferreira (2010), materiais mais porosos tem maior facilidade e menos prejuízos em suas resistências com exposição a altas temperaturas. Devido ao fato de terem maior quantidade e amplitude em seus poros, facilitando assim o processo de expulsão das águas internas, se tornando menos sujeitas a lascamentos explosivos, e aumentos de tensões internas.

A evaporação total da água capilar ocorre dentre 200 °C e 300 °C, e o processo de desidratação do gel C-S-H termina próximo aos 400 °C (LIMA, 2004).

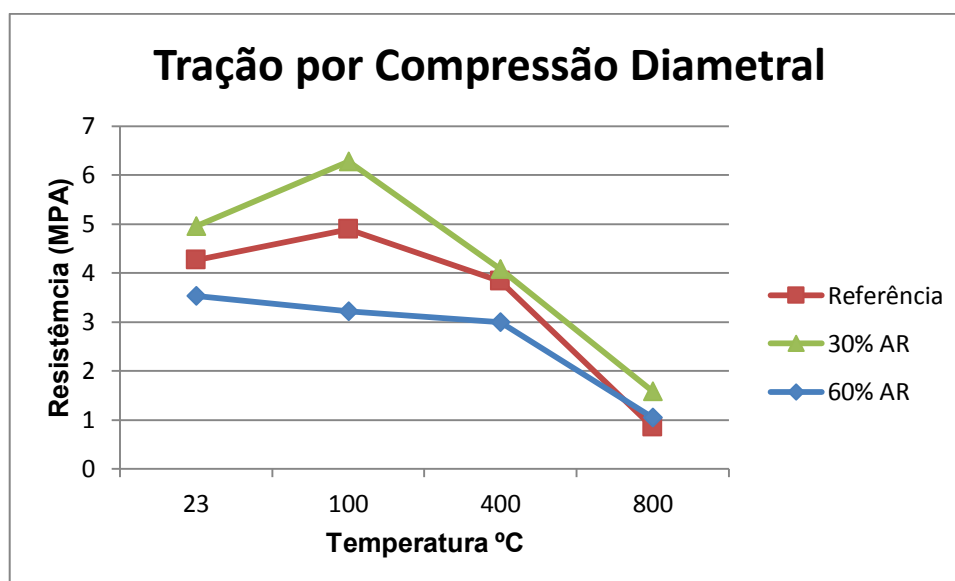
Isso explica o ganho de resistência de estruturas com agregado reciclado, que por serem mais porosas, não recebem o ganho de tensão do efeito de poropressão. Em temperaturas de 800 °C, o concreto perde sua água de ligação se tornando cada vez mais sujeito a destruição. Gerando assim quedas drásticas em sua resistência (CASTRO, PANDOLFELLI, 2011).

Ao analisar os dados pelo método ANOVA, temos inicialmente a influencia direta do fator Agregado Reciclado na resistência a compressão dos concretos, tendo alta significância no quesito resistência inicial. Com o decorrer do aumento da temperatura, tanto o traço 30% AR quanto o traço 60% AR obtiveram ganhos significativos em suas resistência até a temperatura de 400 °C, enquanto o traço Referencia permaneceu sem alterações significativas. Na altura dos 400 °C todos os traços apresentaram valores de resistência semelhantes, sem variações expressivas. Tais valores voltam a ser significativos quando expostos a temperatura de 800°C, onde o traço 30% AR apresentou resistência significativamente maior que os demais traços.

### 3.3 TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.

A figura 15 demonstra os valores médios das resistências dos três traços nas diferentes faixas de temperaturas, no quesito Tração por Compressão Diametral.

**Figura 15 – Gráfico do Ensaio de Tração por Compressão Diametral.**



FONTE: Autor, 2016.

Com base na temperatura de 23 °C, o traço de 30 % AR apresentou uma resistência à tração 14,11 % maior do que o referencia, enquanto o traço 60 % AR, apresentou uma resistência a tração 17,11 % menor.

Tendo enfoque no traço referencia, houve um aumento da resistência na exposição à temperatura de 100 °C de 14,78 %, para então sofrer uma queda de acordo com o aumento da temperatura chegando a uma redução de resistência de 10,09 % a 400 °C e 80,04 % a 800 °C.

Quanto ao traço de 30 % AR, que apresentou os maiores valores de resistência em todas as faixas de temperaturas, houve uma ampliação de sua resistência de 26,61 % a 100 °C, e uma queda gradativa ao decorrer do aumento do calor, chegando a quedas de 17,75 % a 400 °C e 68,15 % a 800 °C. Porém mesmo no estado mais crítico de resistência do traço 30% AR, o mesmo ainda apresentou valores de 6 a 22 % maiores do que o traço referencia.

Da mesma forma que nos demais ensaios, o traço 60 % AR apresentou os menores valores de resistência residual. Tendo quedas subseqüentes com o aumento da temperatura, alcançando reduções de sua resistência de 8,78 % a 100°C, 15,30 % a 400 °C e 70,26 % a 800 °C.

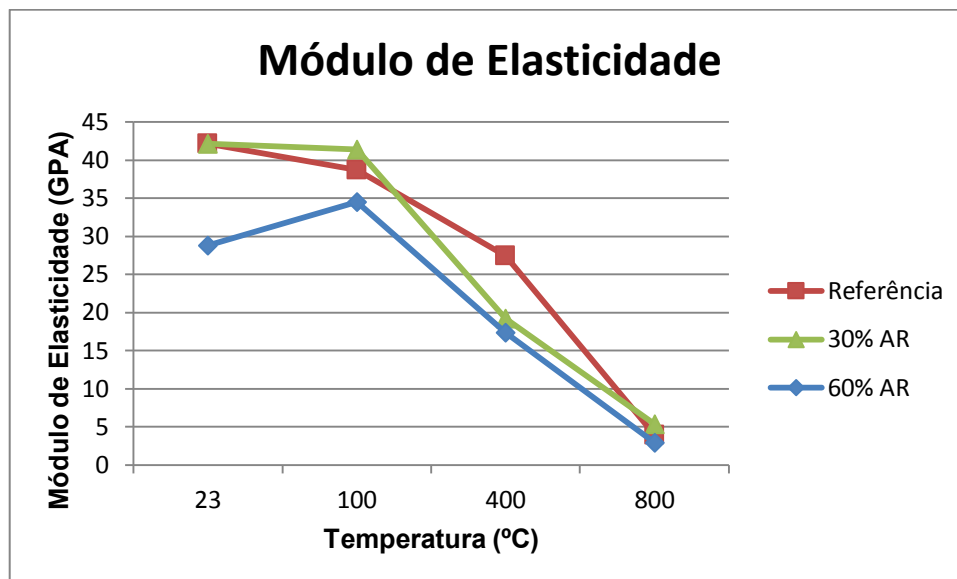
Ainda assim ambos os traços com presença de agregado reciclado, apresentaram menor perda de seu potencial de resistência com o aumento da temperatura.

Novamente com base no método ANOVA, a temperatura mostrou-se um fator determinante nas resistências de todos os três traços, apresentando alto índice de significância. Quanto ao comparativo do comportamento dos três traços em cada faixa de temperatura, houve irrelevância nas alturas de 23 e 400 °C, enquanto nas faixas de 100 e 800 °C, as variações apresentaram valores altamente significativos, mostrando um benéfico na resistência a tração para ambos os traços com presença de agregados reciclados.

### **3.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE.**

O estudo da resistência média do módulo de elasticidade residual dos traços estudados estão representados na Figura 16.

**Figura 16 – Gráfico do Ensaio de Módulo de Elasticidade.**



FONTE: Autor, 2016.

Na faixa de temperatura ambiente, o traço referencia e 30 % AR, apresentaram variações mínimas em seus módulos, enquanto o traço AR 60 %, apresentou módulo 31,78 % menor que o traço referencia.

Ao analisar a curva de temperatura do concreto referencia, observa-se uma redução do módulo de elasticidade, conforme acontece o aumento da temperatura, apresentando uma perda de elasticidade de 8,22 % a 100 °C, 34,99 % a 400 °C atingindo uma redução de 90,66 % a 800 °C.

Quanto ao traço de 30 % AR, pode-se observar uma curva bem semelhante ao traço referencia, apresentando uma diminuição de 1,80 % de seu módulo a 100 °C, 54,37 % a 400 °C e 87,37 % a 800 °C.

O traço com presença de 60 % de AR apresentou novamente os menores valores do ensaio, revelando um desempenho de 16,51 % superior ao da temperatura ambiente á 100 °C, para em seguida apresentar variações negativas em seu módulo com o aumento da temperatura, essas reduções chegam a 39,73 % a 400 °C e atingem seu pico a 800 °C, que mostra uma perda de 89,81 %.

Em seus estudos Leite (2001), concluiu que concretos com agregados reciclados, possuem naturalmente um modulo de elasticidade de 15 a 40 % menor do que concretos normais, e que isso advém do próprio módulo de elasticidade do material composto do agregado, que seriam 70 GPA do basalto e 30 GPA de residual de concreto, e que esse fator se torna mais influente com o aumento do percentual de

substituição. Isso explica as variações de módulos já presentes na temperatura ambiente.

Da mesma maneira que no ensaio de compressão, a perda de água devido à exposição a altas temperaturas é o grande fator influenciador na diminuição do módulo. Esta variação tende a ser menor até a temperatura de 96 °C, e se torna mais significativa quando a temperatura aumenta (NEVILLE, 1997).

No quesito modulo de elasticidade, o método ANOVA mostrou que a perda da resistência a deformação advêm do aumento da temperatura, pois quando comparados entre si, todos os três traços não apresentaram variações significativas, porém quando analisados separadamente, sua resistência sofrem perdas significativas em todas as faixas de temperaturas..

#### **4. CONCLUSÕES.**

- Os concretos com presença de agregado reciclado apresentaram massas menores como esperado, e sua perda com o avanço da temperatura foram bem semelhantes ao do concreto tradicional.
- Quando solicitados a compressão, os traços com presença de agregado reciclado apresentaram inicialmente ganhos de resistência com o aumento da temperatura, enquanto o concreto referencia mantia ou perdia resistência. Isso pode advir da maior compactação do concreto convencional, que torna-o mais suscetível, ao fenômeno de propressão, diminuindo sua resistência com a perda de água.
- O quesito tração por compressão diametral obteve perdas significativas com o decorrer do aumento da temperatura, contudo o traço de 30 % de AR apresentou melhores resultados em todas as faixas estudadas.
- Quanto ao módulo de elasticidade, as misturas de agregados reciclados apresentaram maior deformação, principalmente quando seu teor de substituição era mais elevado, como no traço de 60 % AR. Contudo o traço de 30 % AR apresentou um comportamento bem semelhante ao traço referencia, obtendo variações mínimas, e estatisticamente insignificantes.
- De forma geral a substituição parcial de 30 % AR apresentou ótimos resultados, mostrando alta viabilidade, muitas vezes superiores, ou então semelhantes ao do concreto referencia. Contudo substituições acima de 30%

mostraram perdas significativas tanto a temperatura ambiente, quanto ao decorrer do aumento da mesma.

## 5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise da resistência residual, a nível micro-estrutural.
- Análise química da resistência residual.
- Estudo do concreto com adição de agregado reciclado, em vigas armadas, estudando seu comportamento a flexão.

## 6. REFERÊNCIAS

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

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

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

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

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

CIMOLIN, Felipe Rocha. **Estudo do Efeito da Fibra de Polipropileno em Concreto Exposto a Altas Temperaturas** (2015) 23p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução 307, de 05 de julho de 2002**: Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>. Acesso em: 13 de maio de 2016.

LIMA, R. C. de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRS, Porto Alegre, RS, 2005.

LIMA, R. C. A. et al. **Efeito de altas temperaturas no concreto**. In: II SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES, 2004, Porto Alegre, 2004. v. 1, p. 1 - 15.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do Concreto**. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997. p.391.

PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS. **Definição de resíduos da construção civil no Brasil**. Disponível em <http://www.portalresiduossolidos.com/definicao-de-residuosda-construcao-civil-no-brasil/>. Acesso 13 de maio de 2016.

PINTO, T. de P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 189f.

SILVA, Daiane dos Santos da. **Propriedades Mecânicas Residuais Após Incêndio de Concretos Usados na Construção Civil na Grande Florianópolis**. 2009. 102p. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Univ. Fed. de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, Kelen Cristina Luiz dos Santos. **Estudo do Efeito da fibra de polipropileno no Concreto Quando Submetido à altas temperaturas** (2015) 24p.

VIANA, Valmir Soares. **Análise da propriedades mecânicas do concreto produzido com substituição parcial do agregado graúdo por agregado reciclado** (2015) 19p.