

ANÁLISE MICRO ESTRUTURAL DO CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS SOB ALTAS TEMPERATURAS

Camila Bardini (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)camila.bardini@outlook.com, (2)dss@unesc.net

RESUMO

O setor da construção civil é considerado um dos mais importantes para o crescimento econômico e desenvolvimento social do país, sendo um grande gerador de empregos e renda. Contudo, a grande utilização de matérias-primas não-renováveis e de origem natural, bem como a grande quantidade de resíduos gerada, torna este setor um dos maiores causadores de impactos ambientais. Por serem gerados em grandes quantidades, muitas vezes não recebendo o tratamento adequado, esses resíduos têm grande responsabilidade na degradação ambiental, de forma que transformar estes resíduos em uma nova fonte de matéria prima dentro do próprio meio da construção civil se tornou um desafio. Dentro deste contexto, o presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de analisar a microestrutura de concretos produzidos com substituição parcial dos agregados naturais por agregados de origem reciclada quando submetidos a altas temperaturas. Foram moldados corpos de prova com diferentes teores de substituição e expostos a diferentes temperaturas. Após o aquecimento dos corpos de prova, foram realizados ensaios de Compressão Axial e Módulo de Elasticidade para a caracterização das propriedades físicas do concreto. Para a análise micro estrutural, foram realizados os ensaios de FTIR, DRX, DTA/TGA e microscopia óptica. De acordo com os resultados obtidos, pode-se perceber que a utilização do agregado reciclado pode ser alternativa para a utilização dos resíduos de obras auxiliando na preservação da natureza que pode deixar de receber estes despejos inadequados.

Palavras-Chave: Concreto, Resíduos da Construção Civil, Agregados Reciclados, Microestrutura.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é identificada como uma das atividades mais importantes para o crescimento econômico e desenvolvimento social do país. Contudo, caracteriza-se como grande causadora de impactos ambientais devido a utilização de matérias-primas não-renováveis e de origem natural, bem como pela modificação da paisagem e geração de resíduos. (PABLOS & SICHIERI, 2010)

Os resíduos da construção civil têm grande responsabilidade na degradação ambiental proporcionada pelas edificações, uma vez que são gerados em grandes

volumes e, muitas vezes, não recebem a destinação adequada. Silva e Fernandes (2012) apontam que cerca de 40 a 60% dos resíduos sólidos urbanos produzidos diariamente nas cidades têm origem no setor da construção civil.

Atualmente o reaproveitamento dos resíduos sólidos gerados pela construção civil, torna-se uma necessidade não somente ambiental, mas também econômica, tendo em vista que podem apresentar um novo material com diversas possibilidades de uso, transformando-se novamente em matéria-prima.

Para Patto (2006, p. 4), “a reciclagem dos resíduos de construção e demolição pode auxiliar na produção de materiais a baixo custo, colaborando para a construção de habitações mais baratas”.

De acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307, de 5 de julho de 2002, Art. 2º, os resíduos de construção civil são aqueles gerados nas construções, em reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, bem como os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.

Ainda de acordo com a mesma resolução, pode-se classificar agregado reciclado, como o material granular proveniente de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de engenharia.

O crescimento populacional, juntamente com o aumento do número de edificações contribuem para o aumento da geração de resíduos sólidos provenientes da construção civil, que quando não recebem uma correta destinação, acabam sendo depositados em locais impróprios, ocasionando graves impactos ambientais. Para Gradin & Costa (2009 apud Filho et al, 2007), o despejo desapropriado dos resíduos sólidos nas cidades contribui para a destruição da mata ciliar nas margens de rios e córregos, poluição visual, proliferação de vetores causadores de doenças, bem como possíveis contaminações de lençóis freáticos.

A utilização dos resíduos da construção civil na substituição dos agregados do concreto, vem se tornando uma alternativa de destino para boa parte destes resíduos, trazendo benefícios ambientais e econômicos para as construções.

“Uma gestão adequada dos resíduos popularmente chamados de “entulho” reduz custos sociais, financeiros e ambientais”. (BLUMENSCHNEIN, 2007, p. 5)

Angulo e Figueiredo (2011) acrescentam que a substituição do agregado convencional pelo reciclado pode evitar que 95 milhões de toneladas de resíduos

sejam depositadas em aterros, além de diminuir o consumo de recursos naturais não renováveis.

Sá (2016, p.2) diz que os resíduos provenientes do concreto, possuem maior potencial para serem reutilizados, uma vez que os conhecimentos de suas propriedades são vastos e possuem baixo índice de contaminação por outros produtos.

Tendo em vista a importância da reutilização dos resíduos da construção civil, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos com a finalidade de avaliar as propriedades do concreto produzido com agregados reciclados, buscando sua possível utilização em peças estruturais.

Viana (2015, p. 15), constatou que para a Compressão Axial as amostras com substituição de 30% do agregado gráudo natural pelo reciclado, obtiveram um aumento de 5,61% na resistência em relação ao traço referência sem AR (Agregados Reciclados). Contudo no traço com 60% de substituição, houve uma redução na resistência de 6,17%.

Observando os resultados satisfatórios obtidos com o concreto produzido com agregado reciclado, aparece a necessidade do estudo deste quando exposto a temperaturas elevadas.

Para Bonfante (2017), os materiais utilizados na construção civil, quando expostos a altas temperaturas, sofrem alterações na intensidade das forças de ligação interatômicas na microestrutura, modificando assim as suas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Andrade (2017, p. 17) concluiu que para altas temperaturas, a Resistência à Compressão Axial e Resistência a Flexão, o traço com substituição de 30% do agregado gráudo natural pelo reciclado mostrou-se mais resistente que o traço referência sem AR. Porém, o traço com 60% de substituição não apresentou diferença significativas em relação ao traço referência.

Diversas pesquisas são realizadas referentes ao monitoramento das alterações aparentes na macroestrutura do concreto aquecido, tais como o aparecimento de microfissuras, deslocamentos e perda de resistência. No entanto, as alterações sofridas pela microestrutura, razão primária da degradação do concreto, ainda são pouco enfocadas em trabalhos na área. (LIMA et all., 2004)

Sendo assim, o presente estudo tem por objetivo analisar a microestrutura do concreto produzido com agregados reciclados, provenientes de resíduos da

construção civil, nas proporções de 30% e 60% submetido a diferentes níveis de temperaturas, sendo elas: ambiente (23 °C), 400 °C e 800 °C.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de analisar as propriedades dos concretos produzidos com substituição parcial do agregado graúdo convencional pelo agregado reciclado, foram moldados 54 corpos de prova, sendo 18 para cada traço, no formato cilíndrico ($\varnothing 10 \times 20$ cm), que posteriormente foram aquecidos e submetidos a ensaios mecânicos e microestruturais.

Para a realização do presente estudo, foram reproduzidos três traços, sendo um de referência, sem substituição do agregado graúdo natural, um com 30% dos agregados graúdos naturais substituídos pelos reciclados e outro com 60% de substituição. Os traços utilizados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Traços Unitários

Traço	Relação Água/Cimento	Cimento CP-IV	Areia Média	Brita	Agregado Reciclado	Aditivo (%)	Abatimento (cm)
Referência	0,42	1	1,75	2,25	-	-	16
30% A.R.	0,42	1	1,75	1,58	0,67	0,60	-
60% A.R.	0,42	1	1,75	0,90	1,35	2,90	-

Fonte: Do Autor, 2018.

O concreto foi produzido com cimento Portland CP-IV, areia média lavada de diâmetro máximo 2,4mm e módulo de finura 2,25 e brita com diâmetro máximo de 15mm e módulo de finura 6,93. O material reciclado foi proveniente da Usina de Reciclagem 3R's. Para definição da sua granulometria foi seguido o procedimento da NM 248:2003, verificando-se que o diâmetro máximo é de 15 mm e módulo de finura 6,85.

Todos os materiais passaram por um período de 48 horas de secagem em estufa, para então, serem pesados, separados e posteriormente misturados.

Como alternativa para manter a relação água/cimento em todas as dosagens, fez-se necessário a utilização de aditivo superplastificante nos traços com agregado

reciclado, o que resultou em um concreto muito plástico, não sendo possível obter o valor do abatimento.

Todos os corpos de prova foram submetidos a um período de cura submersa até atingirem a idade de 90 dias, quando praticamente todas as reações na microestrutura do concreto já estavam supostamente concluídas, possibilitando melhor análise das reações provocadas pelas temperaturas elevadas.

Para a realização dos ensaios, os corpos de prova foram aquecidos utilizando um forno mufla, a uma taxa de aquecimento de 3°C/minuto, até atingirem as temperaturas de 400°C e 800°C, temperaturas mantidas por 60 minutos.

Posteriormente, foram realizados ensaios de Resistência à Compressão Axial e Módulo de Elasticidade, com a finalidade de comprovar as propriedades mecânicas já obtidas em estudos anteriores. Para analisar a microestrutura do concreto, foram realizados os ensaios de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Calorimetria Diferencial de Varredura – Termogravimetria (DTA/TGA) e Microscopia Óptica.

2.1. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foi realizada com o objetivo identificar as ligações químicas presentes nas amostras.

Para realização do ensaio as amostras dos corpos de prova foram fragmentadas em pedaços menores e depois moídas, obtendo-se um material fino passante na peneira #200. O equipamento utilizado para realizar esse ensaio foi um espectrofotômetro de FTIR marca Shimadzu, modelo IRPrestige-21. A análise foi realizada por transmitância, com uma velocidade de 0,2cm/s e uma resolução de 4cm⁻¹ com intervalo de 4000 a 400 cm⁻¹.

2.2. ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL – TERMOGRAVIMETRIA (DTA/TGA)

A análise térmica simultânea de Calorimetria Diferencial de Varredura – Termogravimetria (DTA/TGA) foi realizada com o objetivo de identificar as variações nas propriedades físico-químicas do concreto, perda de massa, mudança de fase, etc.

Para realização do ensaio as amostras dos corpos de prova foram fragmentadas em pedaços menores e depois moídas, obtendo-se um material fino passante na peneira #200. Para a realização do ensaio, foi utilizado o equipamento Netzsch, modelo STA 449 F3 Jupiter. A análise foi realizada em atmosfera ambiente de ar sintético, com temperatura máxima de 0°C à 1000°C e taxa de aquecimento de 10^o/min.

2.3. MICROSCOPIA ÓPTICA

A Microscopia Óptica foi realizada com o intuito de identificar a existência de poros, fissuras e deslocamentos nas amostras.

Para realização do ensaio as amostras dos corpos de prova foram fragmentadas em pedaços menores. O equipamento utilizado foi o microscópio Olympus, modelo BX41M-LED.

2.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de Resistência à Compressão Axial foi realizado conforme os procedimentos regulamentados pela NBR: 5739:2007, utilizando uma prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC200CS com capacidade máxima de 2000KN. Foram rompidos 27 corpos de prova, sendo três para cada traço em cada temperatura.

2.5. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Para realização do ensaio de Módulo de Elasticidade foram seguidas as orientações da NBR 8522:2008, utilizando uma prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC200CS com capacidade máxima de 2000KN. Foram ensaiados 27 corpos de prova, três para cada traço em cada temperatura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 2 estão apresentadas as nomenclaturas adotadas para a apresentação dos resultados e discussões.

Tabela 2: Nomenclaturas conforme teor de substituição e temperatura

Nomenclatura	Temperatura (°C)	Substituição (%)
RF-23		0
R30-23	23	30
R60-23		60
RF-400		0
R30-400	400	30
R60-400		60
RF-800		0
R30-800	800	30
R60-400		60

Fonte: Do Autor, 2018.

3.1. ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

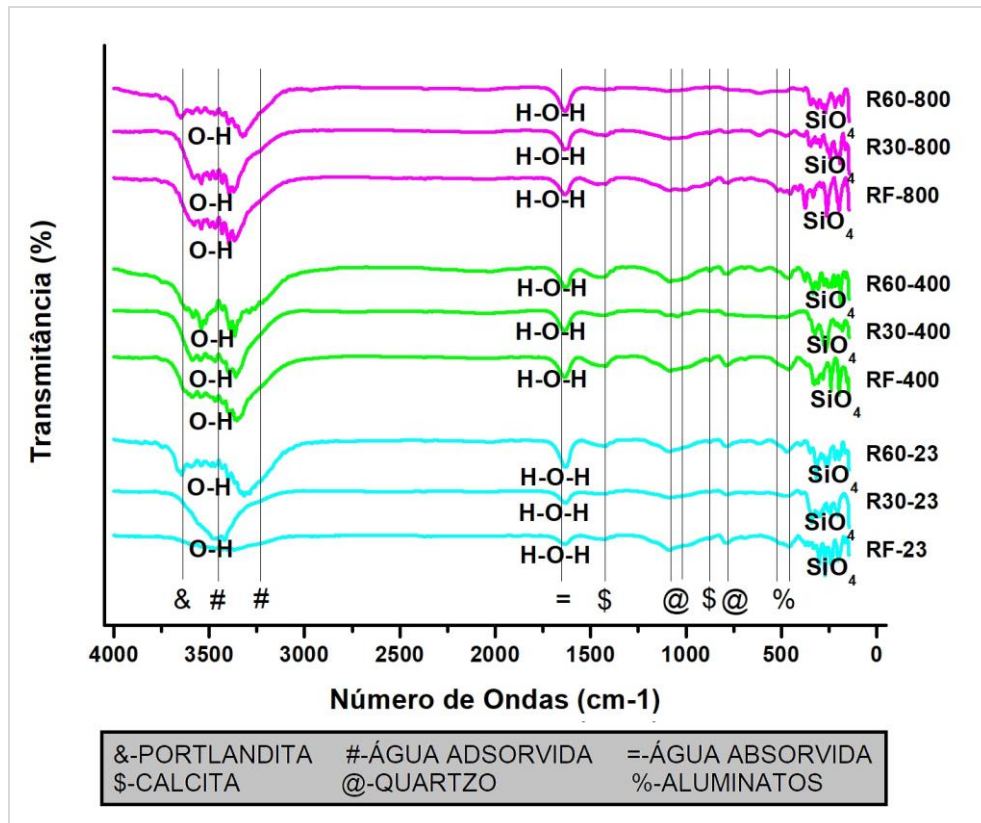
Na Figura 1, estão apresentados os espectros de cada traço nas temperaturas estudadas. Foram atribuídas as principais vibrações características de cada fase com base na revisão bibliográfica.

As bandas de absorção de infravermelho identificadas nos espectros de FTIR das amostras estão relacionadas com as seguintes fases hidratadas do concreto (OLIVEIRA, 2007; ROMANO et al., 2016; ARAUJO et al., 2017):

- 3200 cm⁻¹ ~ 3700 cm⁻¹: vibrações associadas aos grupos O-H, sendo:
 - 3640 cm⁻¹: vibrações pertencentes à portlandita (Ca(OH)₂)
 - 3452 cm⁻¹ e 3230 cm⁻¹: vibrações associadas à água molecular fisicamente adsorvida (silicatos de cálcio hidratados)
- 1650 cm⁻¹: modo de vibração H-O-H referente à deformação presente em moléculas de água
- 1425 cm⁻¹ e 875 cm⁻¹: vibrações do grupo C-O associadas à fase mineral calcita (CaCO₃)
- 1080 cm⁻¹, 1020 cm⁻¹ e 780 cm⁻¹: bandas correspondentes à fase mineral quartzo (SiO₂)

- 525 cm⁻¹ e 457 cm⁻¹: vibrações características do aluminato de cálcio (C-A-H) e aluminosilicatos hidratados (A-S-H).

Figura 1: Espectros das amostras



Fonte: Do Autor, 2018

Os espectros das amostras apresentaram bandas em 3460 cm⁻¹ e 1630 cm⁻¹, caracterizadas como o estiramento e a vibração da ligação química H-O-H (RODRIGUES, 2013; TERESA & ANÁLIA, 2012). As bandas na ordem de 3470 cm⁻¹, são referentes à água constituinte e absorvida pelos silicatos de cálcio, estes resultados demonstraram que o concreto utilizado hidratou (PANZERA et al, 2010).

As bandas em 1430 cm⁻¹ e as em 875 cm⁻¹ são caracterizadas como o estiramento antissimétrico e a deformação angular C-O da calcita (BESSLER & RODRIGUES 2008; RODRIGUES, 2013).

As bandas em 620 cm⁻¹, presentes apenas nas amostras com agregados reciclados, referem-se à vibração Si-O e as bandas em 460 cm⁻¹ e 470 cm⁻¹,

observadas em todas as amostras, referem-se ao estiramento Si-O do quartzo (RODRIGUES, 2013).

O traço referência, apresentou banda em 459 cm⁻¹ em todas as temperaturas, indicando vibrações características do aluminato de cálcio (C-A-H) e aluminosilicatos hidratados (A-S-H).

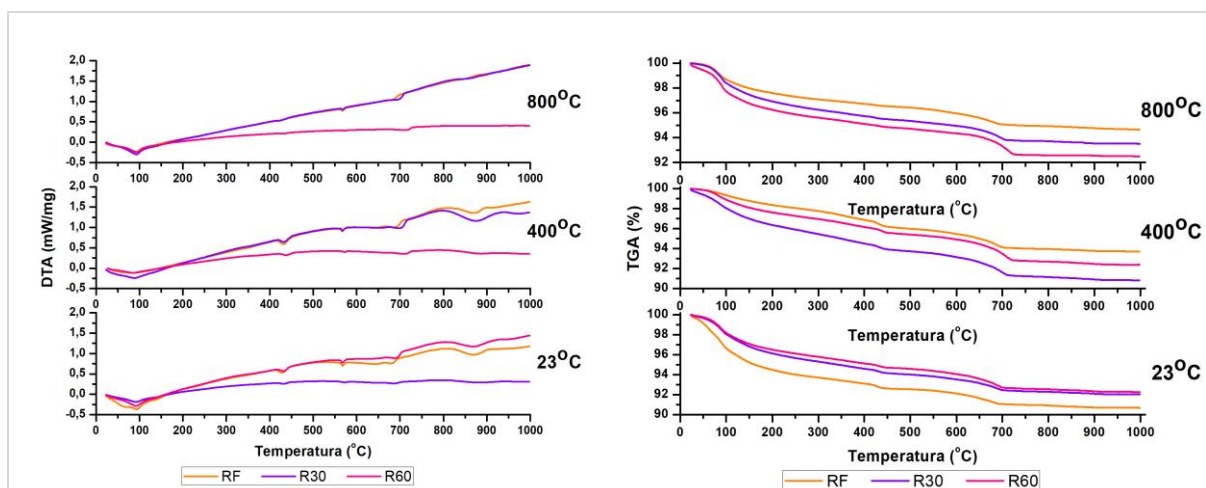
Pode-se perceber que as amostras de 800°C apresentaram bandas semelhantes às amostras de 400°C. Para as bandas na ordem de 3470 cm⁻¹ referentes à água constituinte e absorvida de hidratação, as amostras de 23°C, principalmente o traço referência, são as que mais apresentaram diferença de intensidade com relação as demais, devido à perda da água pela exposição à temperatura, afetando assim a hidratação.

Pode-se observar que o FTIR não apresentou mudanças significativas entre ligações químicas presentes nas amostras expostas as diferentes temperaturas, apresentando apenas diferenças nas intensidades das bandas.

3.2. ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL – TERMOGRAVIMETRIA (DTA/TG)

A Figura 2 retrata as análises térmicas diferenciais (DTA) e as análises termogravimétricas (TGA) realizadas para cada traço nas temperaturas estudadas.

Figura 2: Análises térmicas DTA e TGA



Fonte: Do Autor, 2018

O pico endotérmico presente em todas as temperaturas na análise térmica diferencial, pode ser confirmado pelos autores Lima (2005); Souza (2016); Fernandes et al., (2017), como evaporação da água livre presente nos poros, que ocorre na faixa de 0°C ~ 100°C.

Costa & Silva (2002); Lima (2005); Souza (2016), relatam que entre as temperaturas de 100°C até 420 °C inicia-se o processo de decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), faixa de temperatura em que acontece uma perda gradual de massa. Em 430°C, ocorreu que tanto na curva TGA quanto na DTA, comportamentos que podem ser atribuídos à desidroxilação da portlandita, que se decompõe em CaO e água, na faixa de 425°C e 550°C, sendo que a decomposição do Ca(OH)₂ nesse estágio pode não ser completa.

Acima de 550°C as perdas de massas são associadas à decomposição final do C-S-H e dos aluminatos.

Entre 650°C ~ 780°C os autores atribuem o pico endotérmico a descarbonatação da calcita (CaCO₃ – carbonato de cálcio que se divide em CaO e CO₂). Na Figura 3 observou-se esse pico em torno de 690°C.

A Tabela 3 apresenta os valores de perda de massa por faixa de temperatura, a fim de identificar as perdas mais evidentes das amostras.

Tabela 3: Análise das perdas de massa

Perda de massa das amostras (%)

Temperatura (°C)	Reações	RF	R30	R60	RF	R30	R60	RF	R30	R60
		23	23	23	400	400	400	800	800	800
0°C - 100°C	Perda de água livre	3,34	1,93	1,80	0,63	1,94	1,09	1,31	1,60	2,26
100°C - 450°C	Perda de água combinada	4,04	3,90	3,48	3,16	4,13	3,31	2,12	2,91	2,88
425°C - 550°C	Desidratação da portlandita	0,48	0,59	0,56	0,82	0,75	0,76	0,38	0,45	0,45
650°C - 780°C	Descarbonatação da calcita	0,69	0,85	1,03	1,03	1,45	1,73	0,66	0,91	1,49

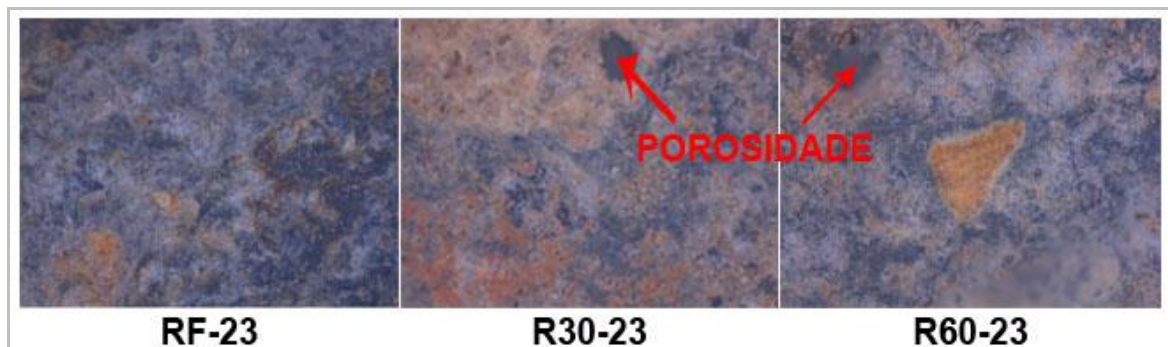
Fonte: Do Autor, 2018

É possível observar que a amostra RF-23 estava mais hidratada, pois teve um percentual de perda de massa maior na faixa representativa da perda de água livre. A perda de massa mais expressiva se dá entre 100°C e 450°C para todas as amostras, referente a perda de água combinada. Pode-se constatar que o traço referência apresentou maior perda de massa em temperatura ambiente, contudo em 400°C e 800°C foi o traço com menor perda de massa. O traço R30 teve maior perda de massa em 400°C e o R60 em 800°C. Em temperatura ambiente, os traços com substituição dos agregados apresentam perdas de massa similares.

3.3. MICROSCOPIA ÓPTICA

A Figura 3 apresenta a microscopia realizada para as amostras em temperatura ambiente. Pode-se verificar que a adição de agregados reciclados no concreto, acarreta no aumento da porosidade.

Figura 3: Microscopia 23°C



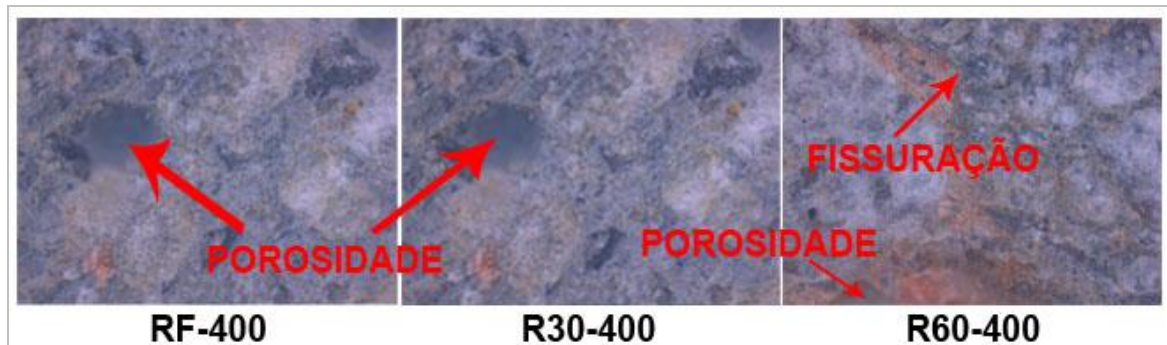
Fonte: Do Autor, 2018

Angulo e Figueiredo (2011), dizem que os agregados reciclados são mais porosos que os agregados de rochas britadas e areias convencionais. Desta forma, a resistência e durabilidade deste outro tipo de concreto, deve ser controlada não apenas pela porosidade da pasta, mas também pela porosidade do agregado.

Para Brites e Costa (2011), a partir de 300°C ocorre uma contração exacerbada associada com a perda de água. Neste estágio, os agregados continuam se expandindo, e as tensões resultantes podem ocasionar fissurações, deslocamentos e aumento da porosidade.

A Figura 4, mostra que quando aquecidas a 400°C, as amostras apresentaram aumento em sua porosidade, bem como pode-se perceber o aparecimento de algumas fissuras na estrutura.

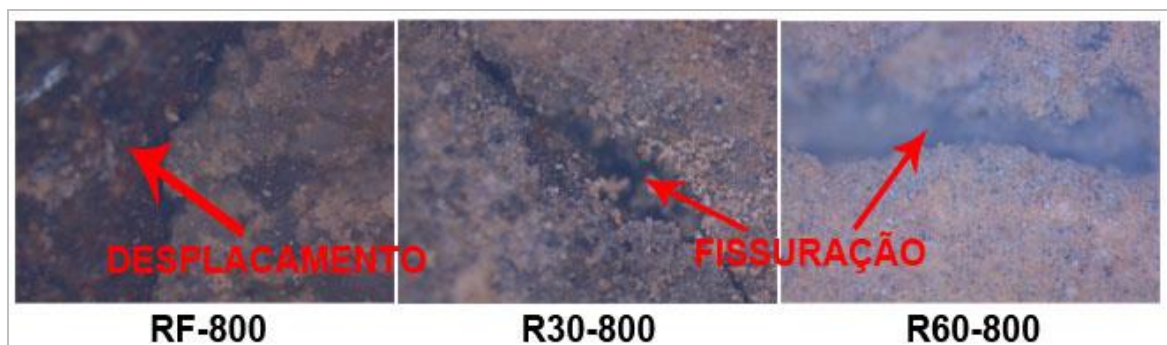
Figura 4: Microscopia 400°C



Fonte: Do Autor, 2018

Quando aquecidas a 800°C, conforme a Figura 5, podem ser observadas a ocorrência de deslocamentos do agregado com a pasta, e as fissuras aumentam sua magnitude. Nesta fase, algumas fissuras e o deslocamentos do agregado com a pasta de cimento podiam ser observados sem o auxílio do microscópio.

Figura 5: Microscopia 800°C



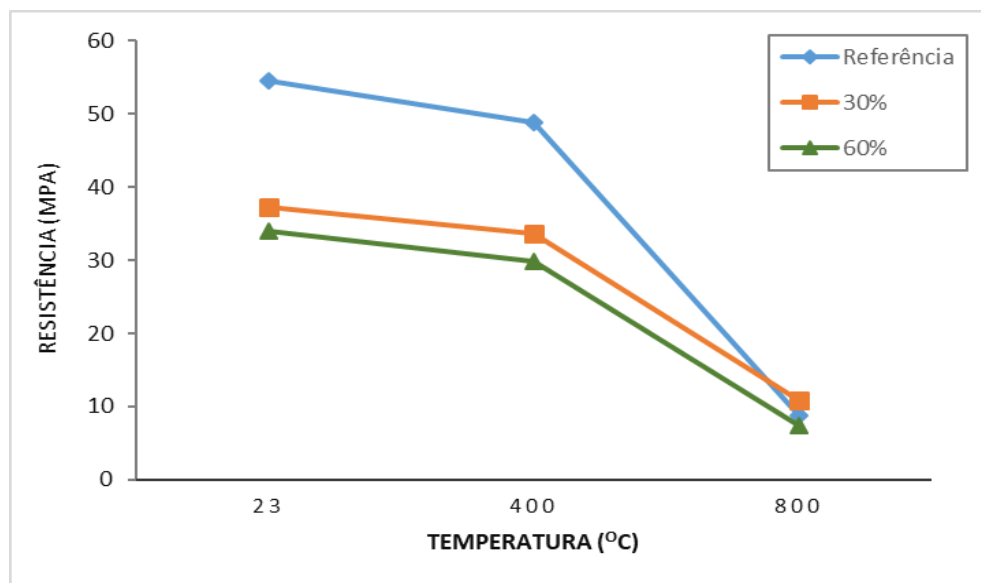
Fonte: Do Autor, 2018

3.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Pode-se verificar os resultados do ensaio de Resistência à Compressão Axial na Figura 6, onde verifica-se que a medida que ocorre o aumento da temperatura, a resistência para todos os traços diminui.

Observa-se, que a perda de resistência com o aumento da temperatura é menor para os traços com agregados reciclados, fato que pode ser explicado por Silva (2016 apud FERREIRA, 2010): materiais mais porosos tem menos prejuízos em suas resistências com exposição a altas temperaturas, devido a maior quantidade e amplitude de seus poros, facilitando o processo de expulsão da água interna, se tornando menos sujeitos a lascamentos explosivos e aumentos de tensões internas.

Figura 6: Gráfico do ensaio de Resistência à Compressão Axial



Fonte: Do Autor, 2018

Ao analisar o gráfico da figura 6, pode-se observar que em temperatura ambiente, os traços com 30% e 60% de substituição, apresentaram, respectivamente, valores de resistência a compressão axial 31,62% e 37,71% menores que o traço referência.

Com o aumento da temperatura, é possível visualizar que o comportamento permanece, com exceção do traço R30-800, que apresentou uma resistência 23,83% maior do que o traço referência.

A perda de resistência nos traços a 400°C, pode ser explicada por Costa e Silva (2004 apud BONFANTE, 2017) como a evaporação da água nas capilaridades que ocorre entre 200°C e 300°C. Até a temperatura de 400 °C o gel do C-S-H (silicato de cálcio hidratado) forma silicatos anidros e CaO (óxido de cálcio), devido a um processo de desidratação sofrido. Por consequência ocorre o aparecimento de fissuras superficiais e perda da resistência à compressão axial na faixa de 25%.

Na temperatura de 800°C as perdas de resistência do concreto podem ser explicadas por COSTA e PIGNATTA (2002): entre 400°C e 600°C começa a ocorrer dessecação dos poros e em seguida a decomposição dos produtos de hidratação e destruição do gel de C-S-H. É observada também nessa fase, a reação endotérmica da desidratação do hidróxido de cálcio e liberação de óxido de cálcio e água. A desidratação afeta as propriedades do concreto, como a resistência a coesão, por exemplo.

Percebe-se que o traço com 30% de substituição do agregado natural pelo reciclado, apresenta menor perda de resistência do que o referência, enquanto o traço com 60% de substituição, apresenta essa perda de resistência menor, apenas quando sujeito a temperatura de 800°C.

Ao analisar os dados pelo método ANOVA, temos a influência direta dos fatores Substituição e Temperatura na resistência a compressão dos concretos, que afetam de forma significativa os resultados obtidos nos ensaios.

Conforme pode-se observar na Tabela 4, o Teste de Tukey, mostrou que os traços com 30% e 60% de substituição não apresentam diferenças significativas entre si, contudo, o traço referência se difere estatisticamente dos demais. Para as temperaturas, o Teste de Tukey, mostrou que todas são significativamente diferentes entre si.

Tabela 4: Teste de Tukey - ensaio de Resistência à Compressão Axial

	N	Subconjunto			N	Subconjunto		
		1	2			1	2	3
60%	9	23,7600		800°C	9	9,0211		
30%	9	27,2444		400°C	9		37,4300	
Referência	9		37,3433	23°C	9			41,8967
Sig.		,129	1,000	Sig.		1,000	1,000	1,000

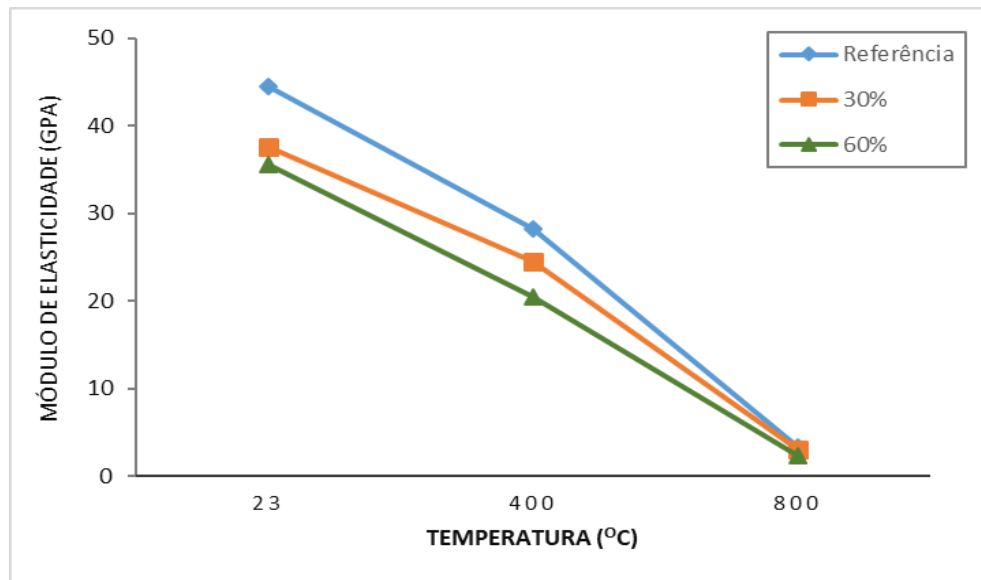
Fonte: Do Autor, 2018

3.5. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados do ensaio de Módulo de Elasticidade são apresentados na Figura 7. Para Sousa & Silva (2015) o aumento da temperatura em elementos de concreto

causa redução no valor do Módulo de Elasticidade. Esse comportamento pode ser observado com a queda no módulo de elasticidade nas temperaturas de 400°C e 800°C para todos os traços.

Figura 7: Gráfico do ensaio de Módulo de Elasticidade



Fonte: Do Autor, 2018

Na temperatura ambiente, o traço que teve melhor desempenho foi o referência, com uma média de 44,47GPa, seguido pelos traços R30-23 e R60-23, com médias de 37,52GP e 35,54GPa, consecutivamente. Na faixa da temperatura de 400°C, novamente o traço referência apresentou a média mais alta, 28,18GPa, enquanto o traço R30-400, apresentou média de 24,5GPa e o R60-400 média de 20,52GPa. Em 800 °C o resultado mais baixo foi do traço R60-800, resistindo 2,36GPa em média, o traço R30-800 apresentou média de 3,01GPa e o resultado mais satisfatório foi do traço referência resistindo em média 3,30GPa.

Analisando as médias dentro da temperatura ambiente, pode-se observar uma redução no módulo de elasticidade de 15,63% e de 20,08%, entre o traço referência e o R30-23 e R60-23 consecutivamente. Tais valores são comprovados por Leite (2001), que em seus estudos, chegou à conclusão de que os concretos com agregados reciclados, possuem menor módulo de elasticidade, variando de 15% a 40% a menos do que os concretos com agregados naturais. Tal variação é causada pelo próprio módulo de elasticidade do material pelo qual o agregado é composto. A variação nos módulos de elasticidade, se torna mais influente quando existe maior

quantidade de agregados reciclados no concreto, explicando assim as variações observadas.

Para Sousa & Silva (2015) o aumento da temperatura em elementos de concreto causa redução no valor do Módulo de Elasticidade. Esse comportamento pode ser observado com a queda no módulo de elasticidade nas temperaturas de 400°C e 800°C.

Entre o RF-23 e o RF-400, a queda no módulo de elasticidade foi de 36,63%, quando comparado ao RF-800, a diminuição é maior ainda, 92,58%. Os demais traços seguem o mesmo comportamento, para o R30-400 a perda é de 34,70% e para o R30-800, de 91,97% quando comparados ao R30-23. O traço R60-400 tem uma diminuição no valor do módulo de 42,26% e o R60-800 de 93,37% em relação ao RF-23.

O método ANOVA, mostrou que tanto o aumento da temperatura, quanto a substituição dos agregados, apresentam diferenças significativas em seus resultados referentes a perda da resistência à deformação.

Conforme pode ser observado na Tabela 5, o Teste de Tukey, mostrou que todas os traços e todas as temperaturas são significativamente diferentes entre si.

Tabela 5: Teste de Tukey - ensaio de Módulo de Elasticidade

	N	Subconjunto				N	Subconjunto		
		1	2	3			1	2	3
60%	9	18,3644			800°C	9	2,8900		
30%	9		21,6778		400°C	9		24,3989	
Referência	9			25,3167	23°C	9			38,0700
Sig.		1,000	1,000	1,000	Sig.		1,000	1,000	1,000

Fonte: Do Autor, 2018

4. CONCLUSÕES

- O traço referência se mostrou significativamente mais resistente do que os traços com substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado.
- Para o ensaio de Compressão Axial, a análise ANOVA mostrou que apenas o traço referência se apresenta significativamente mais resistente dos demais.

- Para o ensaio de Módulo de Elasticidade, a análise ANOVA mostrou que todos os traços influenciam de forma significativa os resultados.
- Conforme análise ANOVA, todas as temperaturas influenciam de forma significativa os resultados de Compressão Axial e Módulo de Elasticidade.
- O ensaio de FTIR não apresentou mudanças significativas entre as ligações químicas presentes nas amostras expostas as diferentes temperaturas, apresentando apenas diferenças nas intensidades das bandas.
- Em temperatura ambiente os gráficos DTA/TGA mostram que o traço R30 apresenta menor perda de massa, enquanto os demais apresentam perdas mais elevadas e semelhantes.
- Quando em altas temperaturas, o traço R60 apresenta baixa perda de massa quando comparado aos demais, que tem suas perdas relativamente semelhantes.
- A partir da Microscopia Óptica, pode-se observar a maior porosidade das amostras com AR, bem como o surgimento de fissuras e deslocamentos percebidos com o aumento da temperatura.
- Tendo visto esses resultados, conclui-se que a utilização de AR em concreto é uma alternativa para reduzir a poluição e degradação ambiental que os resíduos ocasionam na natureza, contudo devem ser observadas algumas particularidades: sua menor resistência em idades avançadas, maior deformabilidade, maior porosidade, menor massa específica, as quais podem limitar seu uso em alguns casos.
- Ainda faltam estudos para que se prove a eficiência e a segurança da utilização de resíduos no concreto estrutural, mas tendo em vista os benefícios econômicos e de preservação da natureza que o uso de agregados reciclados podem proporcionar, é interessante maiores investimentos em estudos de triagem e beneficiamento, para propor uma normatização ao o uso de AR em concretos com funções estruturais.

5. REFERÊNCIAS

ANDRADE, Samuri Brehm; **Estudo da influência da temperatura nas propriedades mecânicas residuais de vigas de concreto armado produzidas**

com substituição parcial do agregado gráudo natural por agregados reciclados, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2017.

ANGULO, Sergio C.; FIGUEIREDO, Antônio D. de. Concreto com agregados reciclados. In:_____. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**: NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**: NM 248. Rio de Janeiro, 2003

BONFANTE, Leonardo Kny. **Análise da eficiência do reforço com fibra de carbono na área tracionada de vigas de concreto armado submetidas à altas temperaturas**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma, 2017.

BRITEZ, Carlos A.; COSTA, Carla N. Ações do fogo nas estruturas de concreto. In:_____. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.

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>. Acesso em 19 de março de 2018.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Considerações sobre a segurança das estruturas de concreto em situação de incêndio**. In: NUTAU'2004 Seminário Internacional: Demandas Sociais, Inovações Tecnológicas e a Cidade. São Paulo, 2004.

COSTA, Carla N; SILVA, Valdir P. **Estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. In: XXX JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 27 a 31 maio de 2002, Brasília.

FERNANDES, B.; GIL, A. M.; BOLINA, F. L. and TUTIKIAN, B. F.. **Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques**. Rev. IBRACON Estrut. Mater. [online]. 2017, vol.10, n.4, pp.838-863.

GRADIN, A.M.N.; COSTA, P.S.N.; **Reciclagem dos resíduos sólidos da construção civil**, Universidade Católica do Salvador, Salvador, Bahia, 2009.

LEITE, Mônica B.; **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2001.

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.

LIMA, Rogério Cattelan Antochaves de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. 257 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PANZERA, T. H. et al. Propriedades Mecânicas de Materiais Compósitos a Base de Cimento Portland e Resina Epóxi. **Cerâmica**. São Paulo, v. 56, n. 337, p. 77-82, Mar. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132010000100013&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 12 Out. 2017.

PATTO, Andre Luiz Duqui Brunini. **Minimização de impactos ambientais com a utilização de resíduos de construção e demolição como agregados**. Taubaté, SP: 2006.

ROMANO, R. C. O. et al. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**. São Paulo, vol.62, n.363, pp.215-223. 2016.

SILVA, Icaro S. da. **Estudo da resistência residual de concretos com substituição parcial do agregado graúdo por agregado reciclado, após exposição a altas temperaturas**, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, Santa Catarina, 2016.

SILVA, V. A.; FERNANDES, A. L. T. **Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG**. Revista Sociedade & Natureza, ano 24, n. 2, p. 333-344, mai. / ago. 2012.

SOUSA, D. A. de; SILVA, G. P.; **ESTRUTURAS DE CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2015.

SOUZA, Leovegildo Douglas Pereira de. **Análise do comportamento estrutural de vigas de concreto armado submetidas às altas temperaturas utilizando a metodologia do planejamento fatorial**. 2016. 112 f. Dissertação (Mestrado

UGIONI, Vinicius Marcos; **Análise das propriedades mecânicas do concreto produzido com substituições parciais e totais dos agregados graúdos e miúdos por agregados reciclados**, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2017

VIANA, Valmir S.; **Análise das propriedades mecânicas do concreto produzido com substituição parcial do agregado graúdo por agregado reciclado**, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2015