

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO REFORÇO COM FIBRA DE CARBONO NA ÁREA TRACIONADA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS A DIFERENTES FAIXAS DE TEMPERATURAS

Yuri Estevam Cristiano (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) ecyuri@hotmail.com, (2) dss@unesec.net

RESUMO

O concreto é um dos materiais de construção civil mais utilizados, no entanto quando exposto a altas temperaturas suas propriedades mecânicas, físicas e microestruturais são afetadas consideravelmente. A fibra de carbono aplicada com resina epóxi pode tornar uma estrutura sinistrada pronta para receber as solicitações de uma edificação. Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a eficiência do reforço com fibra de carbono em vigas de concreto armado submetidas a altas temperaturas. Para isso foram confeccionadas 16 vigas e levadas ao aquecimento em três faixas de temperaturas: 500 °C, 600 °C e 700 °C, além da temperatura de referência de 23 °C. Após os aquecimentos as amostras foram submetidas à ruptura pelo ensaio de flexão a três pontos em grupos sem e com o reforço na região tracionada. Como resultado observou-se que, avaliando a carga de ruptura, todas as amostras tiveram um acréscimo significativo na resistência à flexão com a aplicação da fibra de carbono. As vigas aquecidas a 700 °C obtiveram resultados estatisticamente iguais às de referência, tanto com reforço quanto não reforçadas, uma justificativa para tal resultado pode ser que a temperatura crítica para a ineficiência do reforço esteja acima do limite estudado, justificativa esta reforçada pela análise microestrutural, que aponta a temperatura próxima aos 750 °C como sendo o pico de descarbonatação da calcita, onde possivelmente o reforço se torna ineficiente, visto que nesta temperatura, o concreto perde um dos seus principais componentes responsáveis pela sua resistência.

Palavras-chave: Concreto, Incêndio; Fibra de carbono; reforço estrutural, microestrutura.

1. INTRODUÇÃO

Uma estrutura, quando exposta à altas temperaturas, deve suportar tempo suficiente para que os ocupantes evacuem a área em tempo hábil e com segurança, e que o combate às chamas seja efetuado, sem que haja o colapso da edificação. (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

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

O concreto, quando endurecido, é um material de baixa condutividade térmica e incombustível, além de não liberar gases tóxicos. Já o aço que compõe a estrutura de concreto armado apresenta comportamento diferente. Em uma situação de incêndio, a armadura sofre dilatação, fluência, redução do módulo de elasticidade e perda de resistência. (COSTA & SILVA, 2004).

Embora muitas vezes a primeira ideia a respeito de uma estrutura exposta à um incêndio seja a demolição e reconstrução, existem outros meios de assegurar sua vitalidade e resistência. O reforço estrutural é uma alternativa muito utilizada atualmente. O compósito de fibra de carbono/resina epóxi é uma alternativa bastante eficaz para estes elementos continuarem atendendo as solicitações, pois trata-se de um material de elevadas propriedades mecânicas e físicas, muito superiores aos materiais convencionais (CARVALHO, 2011, apud PEREIRA, 2016;).

As primeiras pesquisas relativas ao uso de fibra de carbono para reforços estruturais de modo a enrijecer os nós das estruturas foram desenvolvidas há aproximadamente 25 anos no Japão, buscando-se sanar os efeitos de abalos sísmicos nas edificações. (MACHADO, 2005).

Recentemente foi elaborado por (BONFANTE 2017) um estudo da eficiência da fibra de carbono em vigas de concreto armado. A pesquisa foi feita considerando duas faixas de temperatura (400 °C e 800 °C), juntamente com a temperatura ambiente para a referência (23 °C). O estudo mostrou que o reforço é eficiente na faixa de 400 °C, mas constatou-se que para a temperatura de 800 °C, o reforço não obteve o mesmo resultado, decrescendo consideravelmente a sua resistência.

O presente trabalho tem como objetivo geral determinar a eficiência da fibra de carbono como reforço na área tracionada de vigas de concreto armado submetidas à altas temperaturas, em um intervalo de 500 °C, 600 °C, e 700 °C, bem como avaliar o efeito destas temperaturas nas propriedades microestruturais do concreto estudado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

O concreto utilizado para a produção das vigas foi do tipo C25.

As armaduras que compõem as vigas de concreto armado são de aço CA-50 Ø 6,3 mm como armadura de flexão e aço CA-60 Ø 5,0 mm para os estribos. Para o dimensionamento dos estribos foi utilizado o modelo 1 de cálculo descrito na NBR 6118 (2014), adotando-se ângulo de inclinação dos estribos de 90 graus e ângulo de inclinação das bielas de compressão de 45 graus.

Para a elaboração do ensaio, foi utilizada fibra de carbono em formato de Tecido (Tramado) medindo 1,30 x 0,95 (m); correspondentes à seção inferior da viga; com espessura 0,40 mm e resistência de 0,200 Kg/M².

Os componentes individuais do sistema de resina epóxi são misturados para aplicação final. Sua proporção de uso foi de 100 % de resina para 50 % de endurecedor, em massa. Após misturado, o tempo de trabalho foi de aproximadamente 50 minutos até que ocorresse o início do processo de polimerização. A secagem total da cola aconteceu após 5 dias de uso.

2.1 MÉTODOS

No processo de concretagem, foram moldados 16 corpos-de-prova cilíndricos de 10x20 cm, diâmetro e altura respectivamente, e 16 vigas de concreto armado com seção transversal de 12x25 cm e comprimento de 95 cm.

Para alcançar os objetivos traçados, foi necessária a execução de ensaios mecânicos nos elementos concretados, sendo estes realizados no Laboratório Experimental de Estruturas (LEE), localizado no Parque Científico e Tecnológico (IPARQUE-UNESC). Após esta etapa, as vigas foram divididas em 4 grupos de 3 vigas, que representam os diferentes níveis de temperaturas: 23 °C, adotado como temperatura de referência, 500 °C, 600 °C e 700 °C. Para alcançar as últimas três temperaturas utilizou-se a mufla de aquecimento a uma taxa de aquecimento de 03 °C/min, conforme indicação da RILEM TC129MHT (2000). Posteriormente a etapa

de aquecimento cada um dos quatro grupos de três vigas foi subdividido em dois grupos: um grupo de quatro vigas recebeu o reforço de fibra de carbono, enquanto o outro grupo, de duas vigas, não recebeu. Para a temperatura ambiente também houve divisão de vigas reforçadas e não reforçadas.

2.2.1 Aquecimento das amostras

As 16 vigas concretadas foram divididas em quatro grupos de quatro vigas, que representam os diferentes níveis de temperaturas: 23 °C, (adotado como temperatura de referência), 500 °C, 600 °C e 700 °C. Para alcançar as três últimas faixas de temperaturas utilizou-se a mufla de aquecimento. O mesmo método foi adotado para os corpos-de-prova. Os 16 corpos-de-prova foram divididos em 4 faixas de temperatura e aquecidos junto com as vigas.

2.2.2 Termogravimetria (DTA/TGA)

O ensaio de termogravimetria foi realizado no Laboratório de Valoração de Resíduos – LabValora, localizado no Parque Científico e Tecnológico (IPARQUE-UNESC). Para realizar esse ensaio foi utilizado o equipamento TA instrument, modelo Q600 simultaneous TGA/DTA, nas condições de ensaio de atmosfera de ar sintético, no intervalo de temperatura de 23 a 1000 °C e taxa de aquecimento de 10 °C/min. Para realização do ensaio, as amostras dos corpos de prova foram fragmentadas em pedaços menores manualmente, moídas com Moinho Triturador Centrífugo tipo periquito, e depois foram peneiradas utilizando-se a peneira 200 µm, obtendo-se o material fino passante na peneira #200.

2.2.3 Espectroscopia de infravermelhos por Transformada de Fourier (FTIR)

O objetivo da análise por espectroscopia de Infravermelhos é encontrar as ligações químicas presentes nas amostras de concreto. A forma mais simples de se medir é através da técnica de espectroscopia dispersiva: a amostra é sujeita a um feixe de

luz monocromático, a absorção é medida e em seguida, a análise é repetida para um outro comprimento de onda.

Para realização do ensaio, as amostras dos corpos de prova foram fragmentadas em pedaços menores manualmente, moídas com Moinho Triturador Centrífugo tipo periquito, e depois foram peneiradas utilizando-se a peneira 200 μm , obtendo-se um material fino. O equipamento utilizado para realizar esse ensaio foi um espectrofotômetro de FTIR marca Shimadzu, modelo IRPrestige-21 localizado no Parque Científico e Tecnológico (IPARQUE-UNESC). A análise foi realizada por transmitância, com uma velocidade de 0,2 cm/s e uma resolução de 4 cm^{-1} com intervalo de 4000 a 400 cm^{-1} .

2.2.4 Caracterização por Difração de Raios-X (DRX)

A Difractometria (Difração) de Raios X (DRX) teve como objetivo identificar as modificações da microestrutura do concreto, identificando as fases cristalinas presentes nas amostras. Os dados foram obtidos através da difração dos raios produzidos pelos átomos característicos do mineral. Esses raios geram picos de valores máximos, que são coletados e interpretados. Os resultados da análise de cada amostra foram apresentados em forma de gráfico, cujas variáveis são o ângulo 2θ (eixo horizontal) e a intensidade dos picos difratados (eixo vertical).

Para realização do ensaio, as amostras dos corpos de prova foram fragmentadas em pedaços menores manualmente, moídas com Moinho Triturador Centrífugo tipo periquito, e depois foram peneiradas utilizando-se a peneira 200 μm , obtendo-se um material fino. Para realização do ensaio, foi utilizado o equipamento SHIMADZU LAB X modelo XRD-6000 localizado no Parque Científico e Tecnológico (IPARQUE-UNESC). O equipamento possui radiação $k\text{-}\alpha$ com tubo de cobre de comprimento de onda (λ) de 1,5406 Å, ângulo de varredura de 3 a 80° em 2θ e velocidade de 2°/min, com 25 kV de voltagem e 25 mA de corrente elétrica.

2.2.5 Ensaio de esclerometria

O ensaio não destrutivo de esclerometria realizou-se após a desforma das vigas, que foi aproximadamente aos 120 dias de idade. O equipamento utilizado foi o esclerômetro de Schmidt, tipo N com energia de percussão de 2,25 N.m. O ensaio foi executado seguindo as normas da NBR 7584/2012.

2.2.6 Ensaio de flexão à 3 pontos

Os ensaios de flexão foram executados pelo pórtico de reações. A célula de carga do cilindro hidráulico foi conectada ao sistema de aquisição de dados Quantum X® que por meio do software Catman Easy® transmitiu todas as informações do processo.

Por se tratarem de vigas de pouco comprimento (95 cm), os ensaios de flexão foram realizados à três pontos, descartando o método tradicional à quatro pontos, o embasamento teórico adotado é descrito pela norma americana ASTM C293 (2002).

2.2.7 Ensaio de Resistência à Compressão Axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados nos corpos-de-prova pela prensa hidráulica Emic modelo PC200 com capacidade máxima de 2000 KN, localizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil, seguindo os procedimentos descritos pela NBR 5739 (2007). Os dados foram captados por meio do software Tesc 3.04.

Os ensaios foram realizados a 120 dias após a concretagem. Tal idade foi adotada, pois segundo Mehta e Monteiro (2008), a partir dos 90 dias de cura, tendem se a estabilizar as reações químicas presentes no concreto, diminuindo interferências que poderiam ocorrer devido aos efeitos dessas reações.

2.2.8 Ensaio de Módulo de Elasticidade

Os ensaios para obtenção do módulo de elasticidade foram realizados nos corpos-de-prova pela prensa EMIC modelo PC 200CS, localizada no Laboratório de

Materiais de Construção Civil do Parque Científico e Tecnológico (IPARQUE-UNESC). A norma que regeu o ensaio foi a ABNT NBR 8522:2003.

2.2.9 Análise de variância

Os valores obtidos nos ensaios foram submetidos a um método estatístico de Análise de Variância (ANOVA). O método possui um nível de confiança de 95 %, ou seja, para comprovar uma diferença significativa entre os grupos de amostras deve-se obter um valor-P inferior a 0,05, e um F superior a $F_{crítico}$. Para constatar a semelhança entre grupos as condições são invertidas, valor-P superior a 0,05 e F inferior a $F_{crítico}$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ANÁLISE TÉRMICA (DTA/TGA)

A Figura 01 apresenta a Análise Termogravimétrica (TG) e a Análise Termo-Diferencial (DTA), respectivamente, do concreto estudado nessa pesquisa.

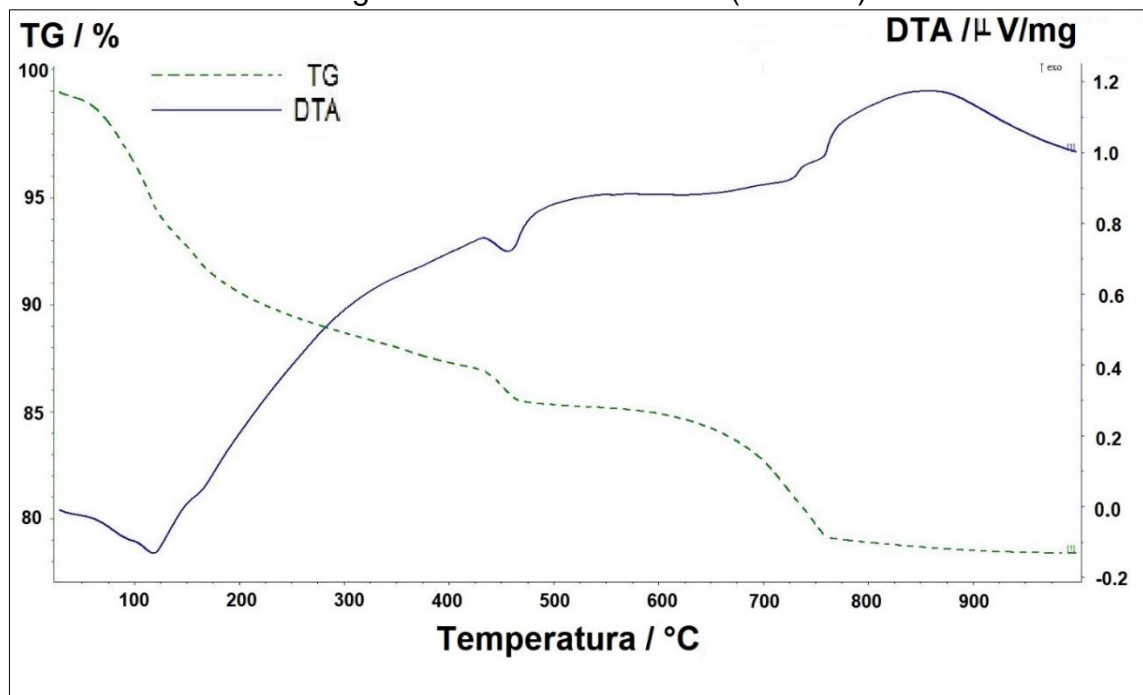
Observou-se um pico endotérmico na temperatura de 120 °C, que é explicado por (COSTA, FIGUEIREDO & SILVA, 2002; LIMA, 2005; SOUZA, 2016). A primeira parte descendente mais inclinada entre a temperatura inicial até aproximadamente 100 °C, na curva termogravimétrica, está associada à perda inicial da água absorvida e a contida nos capilares. Isso aparece como um pico endotérmico na curva termo diferencial.

(COSTA & SILVA, 2002; LIMA, 2005; SOUZA, 2016) relatam que entre as temperaturas de 100 até 420 °C inicia-se o processo de decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Na mesma faixa de temperatura acontece uma gradual perda de massa. Na pesquisa, observou-se um pico em 420 °C tanto na curva TG quanto na DTA, fato confirmado pela pesquisa de (COSTA, FIGUEIREDO & SILVA, 2002). Eles explicam que próximo aos 500 °C ocorre uma declividade acentuada na curva termogravimétrica e um pico endotérmico na curva termo diferencial. Essa curva é atribuída 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. Os resultados foram confirmados pela Difração de Raios X. Entre 650 °C e 780 °C, (COSTA & SILVA, 2002; LIMA, 2005; SOUZA, 2016) atribuem o pico endotérmico a descarbonatação da calcita (CaCO_3 – carbonato de cálcio que se divide em CaO e CO_2). Na Figura 01 observou-se esse pico em torno de 750 °C.

Figura 01 Análises térmicas (DTA/TG)

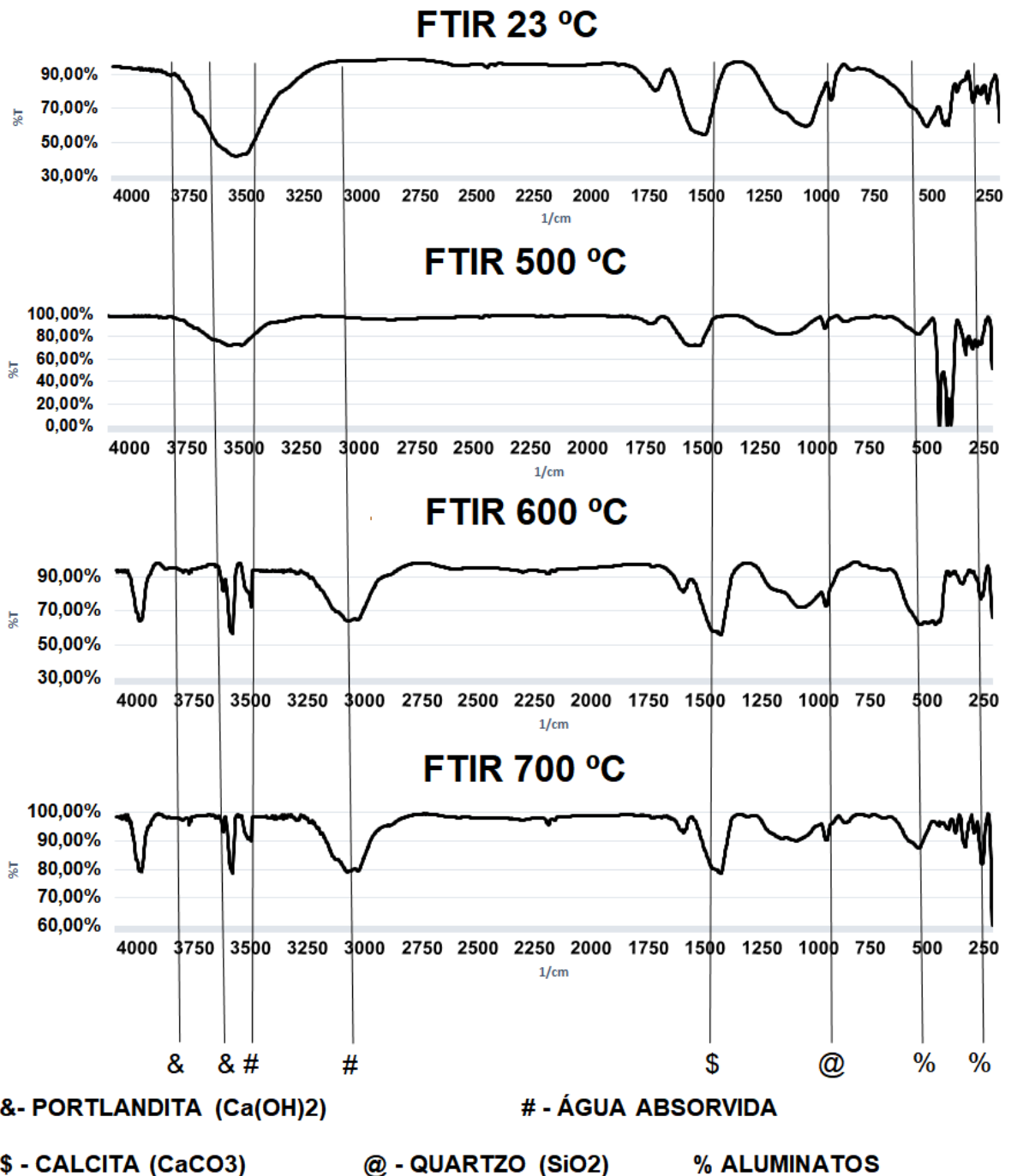


Fonte: O autor, 2018

3.2 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHOS POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Na Figura 02 são mostrados os espectros para cada faixa de temperatura estudada.

Figura 02: Espectros das amostras.



Fonte: O autor, 2018

De acordo com dados coletados da literatura (OLIVEIRA, 2007; ROMANO et al., 2016; ARAUJO et al., 2017), as bandas de absorção de infravermelho identificados nos espectros de FTIR das amostras estão relacionados com às seguintes fases hidratadas do concreto:

- 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 (CaCO_3)
- 1080 cm^{-1} , 1020 cm^{-1} e 780 cm^{-1} : bandas correspondentes à fase mineral quartzo (SiO_2)
- 525 cm^{-1} e 457 cm^{-1} : vibrações características do aluminato de cálcio (C-A-H) e aluminossilicatos hidratados (A-S-H).

O espectro da amostra de Referência ($23\text{ }^\circ\text{C}$), apresentou bandas em 3460 e em 1631 , caracterizadas como o estiramento e a vibração da ligação química H-O-H (RODRIGUES, 2013; TERESA & ANÁLIA, 2012), sendo as bandas na ordem de 3470 cm^{-1} referentes à água constituinte e absorvida pelos silicatos de cálcio, estes resultados demonstraram que o concreto utilizado hidratou (PANZERA et al, 2010).

As bandas na ordem de 2880 cm^{-1} são referentes a CaCO_3 (calcita) (TERESA & ANÁLIA, 2012). As bandas em 1433 cm^{-1} e as em 875 cm^{-1} são caracterizadas como o estiramento antissimétrico e a deformação angular C-O da calcita, respectivamente (BESSLER & RODRIGUES 2008; RODRIGUES, 2013). A banda em 985 cm^{-1} é referente à vibração de alongamento Si-O (TORRES, 2013; TREZZA, 2007). A banda em 459 cm^{-1} indica vibrações características do aluminato de cálcio (C-A-H) e aluminossilicatos hidratados (A-S-H).

Pode-se perceber que as amostras de $700\text{ }^\circ\text{C}$ também apresentaram bandas semelhantes às amostras de Referência, no entanto para as bandas na ordem de 3470 cm^{-1} referentes à água constituinte e absorvida de hidratação, as amostras de $700\text{ }^\circ\text{C}$ apresentaram diferença de intensidade, devido à perda da água pela exposição à temperatura, afetando assim a hidratação. Pode-se perceber também que as bandas na ordem de 2880 cm^{-1} referentes a CaCO_3 (calcita) desapareceram, este comportamento foi comprovado nas análises térmicas realizadas.

Não se percebem consideráveis diferenças entre as amostras de Referência e as de 700 °C, isso pode ter ocorrido devido ao tempo de exposição na temperatura de 700 °C, que foi de 30 min. Como os corpos de prova foram quebrados e moídos, as amostras coletadas continham material da parte interna e externa dos mesmos e com esse tempo de exposição possivelmente a parte interna dos corpos de prova não atingiu a mesma temperatura que a parte externa, gerando assim tais resultados.

3.3 CARACTERIZAÇÃO POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A Figura 03 apresenta os difratogramas das amostras das quatro faixas de temperatura estudadas nessa pesquisa (23, 500, 600 e 700 °C).

Observa-se que com o aumento dos patamares de temperatura ocorreram o desaparecimento de algumas fases. Fica evidente a decomposição de alguns compostos do concreto, como anteriormente verificados por outros pesquisadores (LIMA, 2005; VIEIRA 2016). Pode ser visualizado que a calcita (CaCO_3) cartão JPCDS 5-0586, está presente em todas as temperaturas, porém em maior quantidade nas temperaturas mais baixas. Em alguns casos, com o aumento da temperatura a calcita se decompõe em aproximadamente 800°C, em CaO e CO_2 , sendo este liberado na forma gasosa (LIMA, 2005). Fato este que não aconteceu na temperatura de 700 °C da pesquisa. Tal fato é corroborado pelo resultado das análises térmicas, expostas nos resultados da termogravimetria, evidenciando que a descarbonatação da calcita (CaCO_3), que se decompõe em CaO e CO_2 , ocorre a partir de temperaturas maiores que 700 °C. (LIMA, 2005; SOUZA, 2016; FERNANDES et al., 2017).

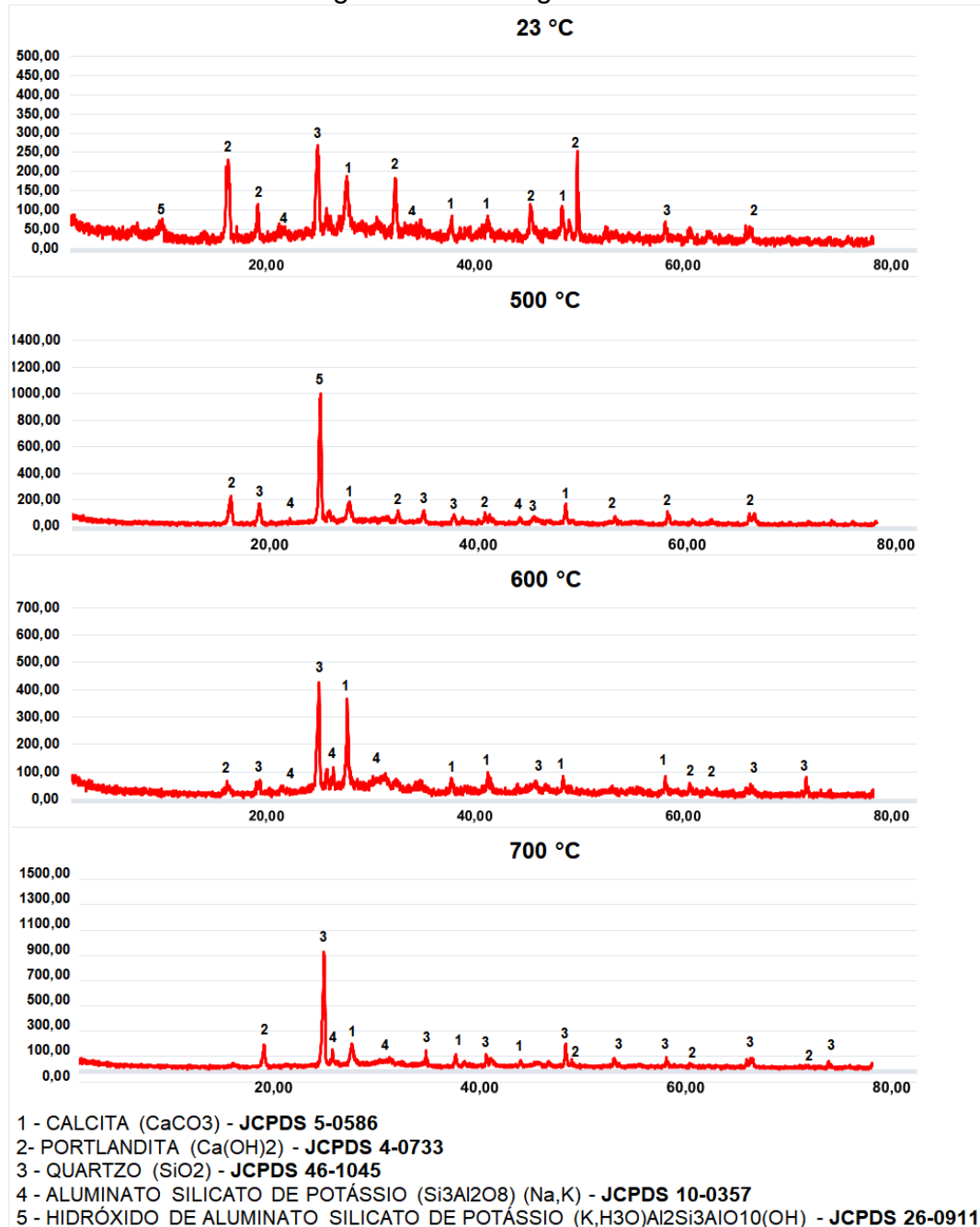
Outra fase presente em todas as faixas de temperaturas é o quartzo (SiO_2) cartão JPCDS 46-1045, o que era esperado, visto que a areia e a brita (basalto) possuem essa fase em sua constituição.

A presença de quartzo, calcita e portlandita eram esperadas, pois são típicas em amostras de materiais cimentícios (ROMANO, 2016; UGIONI, 2017).

Por fim foi encontrado a presença de alumínio silicato de sódio-potássio (Si_3AlO_8) (Na,K) cartão JPCDS 10-0357, fase característica da pedra brita, sendo esta um

agregado originado da britagem de uma rocha maior, que pode ser do tipo basalto, granito, gnaiss, entre outras.

Figura 03: Difratomogramas das amostras



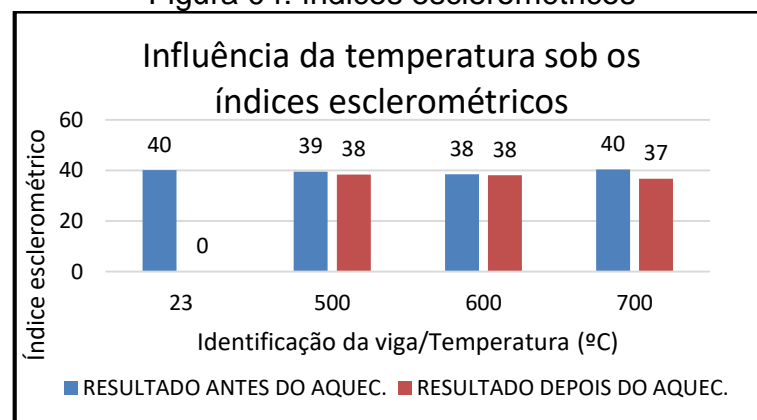
Fonte: O autor, 2018

3.4 ÍNDICES ESCLEROMÉTRICOS

A Figura 04 exhibe os resultados obtidos em cada faixa de temperatura.

Os índices esclerométricos mostraram que com o aumento da temperatura, a dureza superficial decresce. Comparando-se os dados coletados antes e após o aquecimento, para a faixa de temperatura de 500 °C o IE foi de 39 antes do aquecimento, superior ao IE de 38 das mesmas amostras após o aquecimento. Já àquelas submetidas a temperatura de 600 °C tiveram um IE de 38, tanto antes do aquecimento quanto depois.

Figura 04: índices esclerométricos



Fonte: Autor, 2018

Para a faixa de temperatura de 700 °C, a dureza superficial foi de uma média de 40 antes do aquecimento para 37 após exposição ao calor.

Para verificar se os valores dos índices esclerométricos eram diferentes, aplicou-se uma Análise de Variância (ANOVA), onde pôde-se constatar que os índices encontrados são estatisticamente iguais.

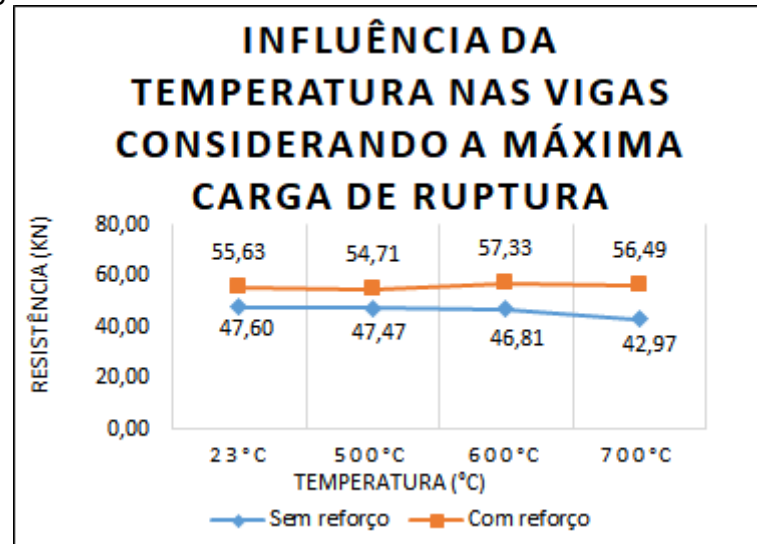
O fato de os ensaios de esclerometria terem sido executados nas vigas de concreto armado e não nos corpos-de-prova cilíndricos pode justificar os resultados. Segundo Costa e Silva (2002), as barras de aço aquecidas se dilatam mais do que o concreto, flambam e comprimem a zona de aderência aço concreto. Reação que pode ter contribuído para manter a dureza da região de ensaio.

3.5 ENSAIO DE FLEXÃO À 3 PONTOS

As 16 vigas de concreto armado foram analisadas pela máxima carga de ruptura suportada.

Os resultados da influência da temperatura nas cargas máximas de ruptura das vigas aquecidas e vigas de referência estão apresentados na Figura 05.

Figura 05: Percentual de acréscimo de resistência do reforço



Fonte: Autor, 2018

Ao elaborar a análise de variância (ANOVA), observou-se que os dados obtidos são estatisticamente iguais entre as faixas de temperatura. Tais dados explicam-se por Castro e Pandolfelli (2011) apud BONFANTE (2017) entre as temperaturas de 700 °C e 800 °C há perda da água de ligação, aumento da porosidade e, logo, o aumento da permeabilidade, deixando o concreto cada vez mais suscetível à destruição. Assim, pode-se afirmar que a temperatura crítica para a não eficiência do reforço está após 700 °C, fato este que foi comprovado pela análise térmica, onde a descarbonatação da calcita aconteceu aos 750 °C.

Outra provável causa seria que para BONFANTE (2017), nos ensaios de flexão, ao contrário da compressão axial, o principal responsável pela resistência da estrutura é o aço, que recebe grande parte da carga aplicada pelo cilíndrico hidráulico.

Por fim, convém também destacar que segundo AMARAL (2011) o concreto possui baixa condutividade térmica, sendo assim a elevação da temperatura não é constante na seção transversal, sendo mais intensa nas faces expostas, principalmente nos cantos, e menos intensa na medida em que se caminha para seu interior, assim, outra teoria que poderia explicar os valores estatisticamente iguais seria a baixa temperatura no interior (centro) da viga, mantendo algumas de suas características de resistência.

3.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A Figura 06, ilustra os resultados de resistência à compressão axial.

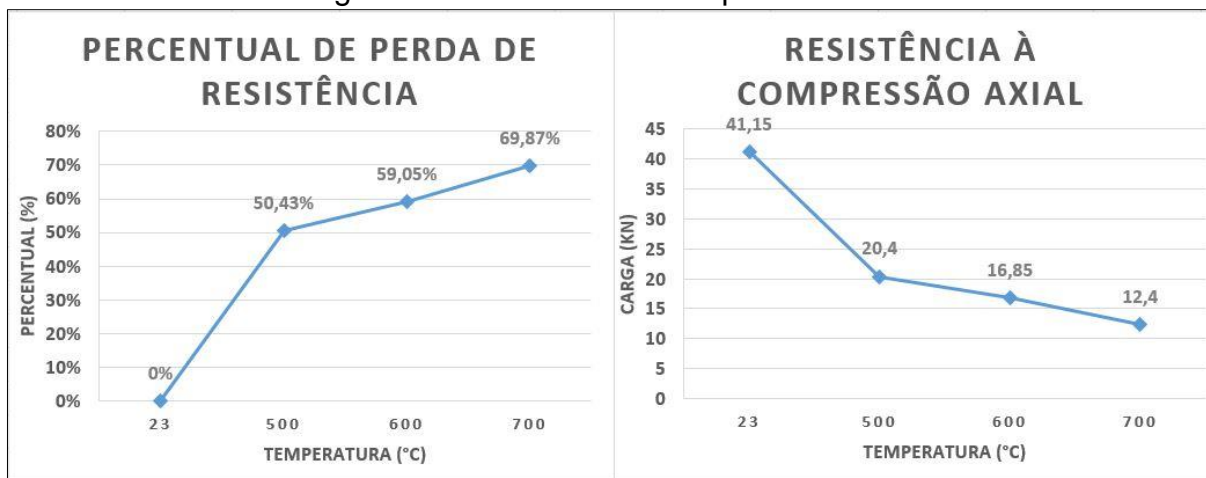
Pode-se observar que, na medida em que ocorre o incremento da temperatura, a resistência à compressão axial do concreto decresce.

Através da análise de variância (ANOVA) constatou-se uma redução significativa da resistência na medida em que há incremento de temperatura. Há também um aumento do percentual de perda de resistência.

Como mostrado na Figura 06, comparando-se cada faixa de temperatura com as amostras de referência, observou-se que para a temperatura de 500 °C houve uma perda de resistência média de 50,43% em relação às amostras de referência, já na temperatura de 600 °C a perda de resistência foi de 59,05%, enquanto na faixa de 700°C, a redução foi de 69,87% em relação às resistências obtidas na temperatura ambiente (23 °C). Segundo Costa e Silva (2004) apud BONFANTE (2017), a evaporação da água nas capilaridades 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 500 °C estudada nesta pesquisa, constatou-se perda de resistência de 50,43% em relação às obtidas na temperatura ambiente. Esta perda é explicada por (COSTA e PIGNATTA, 2002), entre 400 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.

Figura 06: Resistência à compressão axial



Fonte: Autor, 2018

Observou-se perda de 69,87% de resistência na temperatura de 700 °C, segundo análises térmicas realizadas nas amostras de referência a temperatura em que ocorreu a perda de água de ligação na estrutura foi aproximadamente 750 °C.

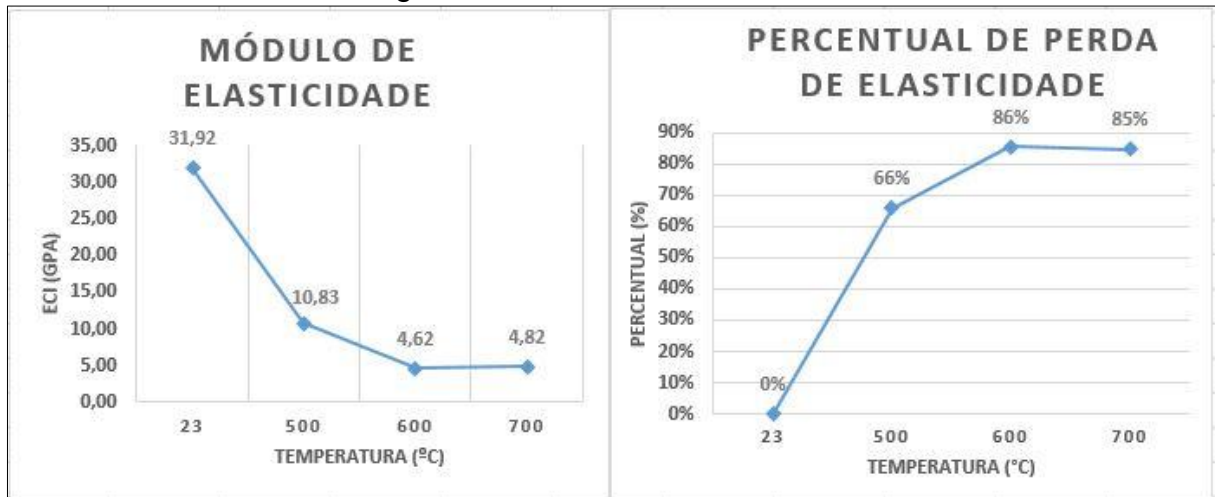
Lima (2005) afirma que a perda da água de ligação acontece em temperaturas próximas à 800 °C. As ligações químicas com substituição da estrutura hidráulica transformam-se em uma estrutura cerâmica, implicando em uma perda de 85 % na resistência do concreto.

3.7 MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

A Figura 07 ilustra os resultados obtidos das médias dos corpos de prova para os ensaios de Módulo de Elasticidade.

Através da análise estatística de variância (ANOVA) dos resultados obtidos foi possível observar que existe redução estatisticamente significativa no Módulo de Elasticidade dos concretos com o incremento da temperatura, comportamento este que já era esperado, pois, o Módulo de Elasticidade está diretamente ligado à Resistência à Compressão Axial do concreto. Como visto na Figura 06, comparando as amostras na temperatura de 500 °C com as em temperatura ambiente (23 °C), o Módulo de Elasticidade do concreto teve uma perda de 66%, enquanto para a faixa de 600 °C, a perda foi de 86 %, e para 700 °C foi de 85% em relação à temperatura de referência.

Figura 07: Módulo de elasticidade



Fonte: Autor, 2018

Ao comparar o percentual de perda de resistência obtido no ensaio de compressão axial com o ensaio de módulo de elasticidade, observa-se que as taxas de perda obtidas no ensaio de módulo de elasticidade são maiores. Tal comportamento é obtido porque, segundo MEHTA & MONTEIRO (2014), próximo à temperatura de 400 °C podem ocorrer microfissuras na zona de transição na interface (pasta de cimento/agregado). Estas microfissuras tem um efeito negativo ao Módulo de Elasticidade, sendo este efeito mais prejudicial do que a microfissuração encontrada na compressão, explicando assim uma redução em percentual do Módulo de Elasticidade das temperaturas estudadas maiores do que as reduções encontradas na Resistência à Compressão Axial (MEHTA & MONTEIRO, 2014) apud BATISTA (2017).

O comportamento das estruturas de concreto depende do seu módulo de elasticidade, e este é afetado significativamente pelo efeito da temperatura (NEVILLE, 2016). Segundo Lima (2005), com uma redução significativa do Módulo de Elasticidade, podem ocorrer deformações nos elementos estruturais do concreto, tornando-os inadequados ao uso.

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos na presente pesquisa, conclui-se que não foi possível determinar nos ensaios mecânicos uma temperatura crítica em que o reforço se torna ineficaz. Ficou evidenciado que a temperatura crítica para a exposição de elementos de concreto está acima de 700 °C, e que o tempo de exposição tem de ser maior do que 30 minutos. A resistência a compressão axial sofreu perdas significativas com a ação das altas temperaturas: aos 500 °C a redução foi de 50,43%, já aos 600 °C a redução foi de 59,09%, enquanto aos 700 °C a queda foi de 69,87% em relação às amostras de referência. Ao se observar o comportamento do Módulo de Elasticidade frente as altas temperaturas, foi possível constatar que este tende a reduzir de forma mais rápida que a Resistência à Compressão Axial, devido a microfissuração na zona de transição na interface (pasta de cimento/agregado). As análises microestruturais indicam mudanças de fases, alterações na composição e/ou perda e decomposição de alguns constituintes do concreto com o incremento da temperatura, sendo que esses comportamentos refletem nos resultados mecânicos encontrados. De modo geral, as alterações significativas na microestrutura tiveram início próximo à temperatura de 500 °C, devido à decomposição parcial da portlandita e à microfissuração do concreto. As análises termogravimétricas apontam a temperatura de 750 °C como sendo o pico endotérmico de descarbonatação da calcita, temperatura esta onde possivelmente seria a temperatura limite para o uso de fibras de carbono.

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o comportamento macro e microestrutural de vigas reforçadas com fibra de carbono e submetidos a altas temperaturas, com tempo de exposição maior que 30 min, e em intervalos entre 700 °C e 800 °C.
- Analisar a camada externa dos corpos de prova no estudo do comportamento microestrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN. P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1. Ed. São Paulo: PINI, 2000.

AMARAL, Rafaela de Oliveira. **Simulação do comportamento de estruturas de concreto submetidas a incêndios**. 2011. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)**. C 293 – 02. USA, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio: NBR 7584**. Rio de Janeiro, 2012.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações**: NBR 14432. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**: NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**: NBR 15200. Rio de Janeiro, 2012.

BATISTA, Maurício Alves. **Avaliação da resistência residual de concretos submetidos a elevadas temperaturas por meio de análise macro e microestrutural**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma, 2017.

BESSLER, Karl E.; RODRIGUES, Laécio C. **Os polimorfos de carbonato de cálcio – uma síntese fácil de aragonita**. Quím. Nova, São Paulo, v. 31, n 1, p. 178-180, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422008000100032&lng=en&nrm=iso> Acesso em: 12 Out. 2017.

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.

CARDOSO, Franciellen Alves. **Comparativo do efeito da temperatura na estrutura sinistrada e íntegra no Paço Municipal Marcos Rovaris em**

Criciúma/SC – estudo de caso. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma, 2017.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D. de; SILVA, V. P. **Aspectos Tecnológicos Dos Materiais De Concreto Em Altas Temperaturas.** In: NUTAU'2002 Seminário Internacional – Sustentabilidade, Arquitetura e Desenho Urbano. São Paulo, 2002.

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, Michel Cararo. **Análise Experimental de Vigas de Concreto Armado Sujeitas à Flexão Reforçadas com Fibra de Carbono.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma, 2015.

GRIFFITHS, P.; de Hasseth, J. A. (18 de maio de 2007). **Fourier Transform Infrared Spectrometry** (2nd ed.). Wiley-Blackwell. ISBN 0-471-19404-2.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas.** 2005. 207 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LIMA, R. C. A.; KIRCHHOF, L. D.; CASONATO, C. A.; SILVA FILHO, L. C. P. **Efeito de altas temperaturas no concreto.** In: II SEMINÁRIO DE PATOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES, 18 e 19 nov de 2004, Porto Alegre.

MACHADO, Ari De Paula. **“Fibras de Carbono – Manual Prático de Dimensionamento”.** Edição BASF, 2006.

MACHADO, Ari de Paula. **“Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono”.** Ed. PINI. São Paulo, 2002.

MACHADO, Marceli Gomes. **Estudo experimental da ductilidade de vigas em concreto armado reforçadas à flexão utilizando compósitos com tecido de fibras de carbono.** 2005. 301 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Área de concentração: Estruturas – Pontifícia Universidade Católica – PUC-SP, São Paulo.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **“Concreto – estrutura, propriedades e materiais”.** Ed. PINI. São Paulo, 2008.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** 5. ed PINI. São Paulo, 2016.

PEREIRA, Raí Scheffer. **“Recuperação estrutural de vigas de concreto armado colapsadas utilizando reforço de fibra de carbono”**. 2016. 27 f. Artigo (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

RODRIGUES, Paula Nader. **Caracterização das argamassas históricas da ruína de São Miguel Arcanjo/RS**. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

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

SILVA, Daiane dos Santos da. **Propriedades mecânicas residuais após incêndio de concretos usados na construção civil na grande Florianópolis**. 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Área de concentração: Estruturas – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

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 em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

TREZZA, Monica Adriana. **Hydration Study of Ordinary Portland Cement in the Presence of Zinc Ions**. Mat. Res. São Carlos, v.10, n.4, pp.331-334, Dec. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392007000400002&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 12 out. 2017.