

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA RESIDUAL DE CONCRETOS SUBMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS POR MEIO DE ANÁLISE MACRO E MICROESTRUTURAL

Maurício Alves Batista (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) mauricioalvesb7@gmail.com, (2) dss@unesc.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. Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento de concretos de diferentes resistências (especificadas nas classes 35, 45, 55 e 70 MPa da NBR 8953:2015) quando submetidos a altas temperaturas (100, 400, 800 e 1000 °C) em comparação com a temperatura ambiente (23 °C). Para cada classe de resistência foram produzidos 50 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm e 15 corpos de prova prismáticos com dimensões de 15x20x75 cm. Os corpos de prova cilíndricos foram submetidos a ensaios mecânicos de Resistência à Compressão Axial, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Elasticidade. Os corpos de prova prismáticos foram submetidos a ensaio de Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos. Também foram realizados ensaios de microestrutura como: Difratomia (Difração) de Raios X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Análise Térmica (TGA-DTA). Com os resultados obtidos observa-se que os concretos estudados sofrem reduções estatisticamente significativas em suas propriedades mecânicas e alterações nas propriedades microestruturais com o incremento da temperatura.

Palavras-chave: Concreto, Altas Temperaturas, Propriedades Residuais, Microestrutura.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais de construção civil mais utilizados, sendo que o estudo de suas propriedades quando exposto a altas temperaturas é de fundamental importância. As propriedades mecânicas como Resistência à Compressão, Resistência à Tração e Módulo de Elasticidade, são consideravelmente afetadas durante esta exposição e podem causar deficiências estruturais significativas (SANTOS & RODRIGUES, 2011).

Como o concreto é um material composto, seus diferentes constituintes não se comportam da mesma forma quando expostos as altas temperaturas. O incremento

da temperatura provoca efeitos distintos no concreto como alteração na coloração, perda de resistência mecânica, fissuração e até a própria desintegração da estrutura. (MORALES, CAMPOS & FAGANELLO, 2011; SOUZA & MORENO JR, 2010)

As alterações que ocorrem nas propriedades mecânicas do concreto quando exposto a altas temperaturas estão diretamente ligadas com as alterações nas propriedades microestruturais do material (MEHTA & MONTEIRO, 2014; FERNANDES, B. et al., 2017).

De acordo com alguns dos resultados obtidos na pesquisa realizada por Castellote et al. (2003 apud LIMA, 2005), as transformações que ocorrem na pasta de cimento durante o processo de aquecimento são diversas. Entre 20 e 80 °C ocorre o processo de hidratação acelerado, com perda lenta de água capilar e redução das forças de coesão. Entre 80 e 200 °C ocorre o aumento na taxa da perda d'água capilar e fisicamente combinada. Entre 80 e 850 °C ocorre a perda de água quimicamente combinada. Em 150 °C ocorre o pico do primeiro estágio de decomposição do C-S-H. A partir de 300 °C ocorre o aumento da porosidade e microfissuras. Em 350 °C ocorre a decomposição de alguns tipos de agregados. Em 374 °C é considerado o ponto crítico da água, acima do qual não existe água livre. Entre 400 e 600 °C ocorre a dissociação do C-S-H em CaO e água. Em 573 °C ocorre a possível transformação de fase α para β dos agregados quartzosos e ligeira expansão. Entre 550 a 600 °C ocorre o aumento dos efeitos térmicos. A partir de 700 °C ocorre a dissociação do CaCO_3 em CaO e CO_2 (pasta e agregados carbonáticos). Em 720 °C ocorre o segundo pico da decomposição do C-S-H em $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ e $\beta\text{-CS}$. Em 800 °C ocorre a modificação das ligações químicas com substituição da estrutura hidráulica por uma estrutura cerâmica. Em 1060 °C ocorre o começo da fusão de alguns constituintes.

Diante do exposto, no presente trabalho foi realizado um estudo experimental para avaliar o comportamento de concretos de diferentes resistências (especificadas nas classes 35, 45, 55 e 70 MPa da NBR 8953:2015) quando submetidos a altas temperaturas (100, 400, 800 e 1000 °C) em comparação com a temperatura ambiente (23 °C). Para cada classe de resistência foram produzidos 50 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm e 15 corpos de prova prismáticos com dimensões de 15x20x75 cm. Os corpos de prova cilíndricos foram submetidos a ensaios mecânicos destrutivos, tais como: Resistência à Compressão Axial e

Resistência à Tração por Compressão Diametral, e não destrutivos como o Módulo de Elasticidade. Os corpos de prova prismáticos foram submetidos a ensaio de Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos. Também foram realizados ensaios de microestrutura como: Difractometria (Difração) de Raios X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Análise Térmica (TGA-DTA).

Após obtenção dos resultados dos ensaios mecânicos foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA) e Teste de Tukey, ambos considerando um intervalo de confiança de 95 %, para verificar a influência de cada nível de temperatura nas propriedades mecânicas do concreto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na produção desta pesquisa, bem como os métodos adotados para a análise dos resultados, sendo que todos estes foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil, Laboratório Experimental de Estruturas, Laboratório de Valorização, Laboratório de Cerâmica e Centro de Caracterização de Materiais, localizados no Parque Científico e Tecnológico (I-parque) da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC.

2.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção dos corpos de provas foram os agregados graúdos com diâmetro máximo característico de 19 mm, sendo do tipo basalto, com densidade de 2,96 g/cm³. Os agregados miúdos com diâmetro máximo de 2,4 mm, módulo de finura 2,36, classificado como fino, com densidade de 2,61 g/cm³. O cimento Portland CP IV-32, com densidade de 2,9 g/cm³.

Os traços unitários dos concretos utilizados, em massa, foram de 1:3,68:3,83:0,680; 1:3,18:3,42:0,570; 1:2,52:2,88:0,490 e 1:1,20:1,80:0,390 (cimento : areia : brita : água) para as classes de resistências de 35, 45, 55, 70 MPa respectivamente.

2.2 MÉTODOS

Antes de fazer a concretagem dos traços adotados foi necessário retirar a umidade dos agregados, secando o material em uma estufa de esterilização e secagem, modelo 400 - 9D, a uma temperatura constante na faixa de 105°C à 110°C, como determina a ABNT NBR 9939:2011.

Após pesagem dos materiais, foi realizada a concretagem em uma betoneira com capacidade de 400 litros, sendo o processo de concretagem e moldagem realizados de acordo com a ABNT NBR 5738:2015. Após desmoldagem os corpos de provas ficaram em cura submersa por 50 dias.

Para analisar os efeitos das altas temperaturas nas propriedades mecânicas do concreto, foi primeiramente necessário submeter os corpos de prova ao aquecimento, nas temperaturas que foram adotadas para essa pesquisa, e depois realizar nos corpos de prova cilíndricos os ensaios mostrados na Tabela 1 e nos corpos de provas prismáticos o ensaio mostrado na Tabela 2.

Tabela 1 - Ensaios dos corpos de prova cilíndricos nas temperaturas adotadas

CPs cilíndricos 10x20 cm - 35, 45, 55, 70 MPa					
Temperatura	Ref	100 °C	400 °C	800 °C	1000 °C
Compressão Axial	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs
Módulo de Elasticidade	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs
Tração por Compressão Diametral	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs
Reserva	1 CPs	1 CPs	1 CPs	1 CPs	1 CPs

Fonte: Autor, 2017.

Tabela 2 - Ensaio dos corpos de prova prismáticos nas temperaturas adotadas

CPs prismáticos 15x20x75 cm - 35, 45, 55, 70 MPa					
Temperatura	Ref	100 °C	400 °C	800 °C	1000 °C
Tração na Flexão	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs	3 CPs

Fonte: Autor, 2017.

2.2.1 Aquecimento dos corpos de prova

O equipamento utilizado para o aquecimento dos corpos de prova foi um forno mufla com controle digital de temperatura microprocessado, tendo dimensões úteis de 50x68x106 cm.

Os corpos de prova com 180 dias de idade foram aquecidos a 4 níveis de temperatura: 100 °C, 400 °C, 800 °C e 1000 °C em uma taxa de aquecimento de 3 °C/min, de acordo com a RILEM TC129MHT (2000) apud SILVA (2009), até alcançarem a temperatura desejada e então permaneceram expostos por 30 minutos (Tempo mínimo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) pela ABNT NBR 15200:2012). Após esse período a mufla iniciou o processo de resfriamento onde permaneceu fechada por 24 horas para que ocorresse o resfriamento natural dos mesmos.

2.2.2 Resistência à Compressão Axial

Para se obter a Resistência à Compressão Axial, foram seguidas as orientações da ABNT NBR 5739:2007 e os equipamentos utilizados foram os seguintes: prensa hidráulica da marca EMIC modelo PC 200I, com capacidade máxima de 2000 kN, juntamente com um computador que utiliza o software TESC - Test Script, que fornece recursos para leitura e obtenção de resultados dos ensaios.

2.2.3 Módulo de Elasticidade

Para se obter o Módulo de Elasticidade do concreto foi utilizado 30 % da tensão da carga de ruptura do ensaio de compressão axial, foram seguidas as orientações da ABNT NBR 8522:2008 e os equipamentos utilizados foram os seguintes: prensa servo-hidráulica da marca EMIC modelo PC 200CS, com capacidade máxima de 2000 kN, juntamente com um computador que utiliza o software TESC - Test Script, que fornece recursos para leitura e obtenção de resultados dos ensaios e extensômetros eletrônicos fixados ao corpo de prova com a ajuda de um cordão elástico, posicionados a 5,0 cm das extremidades, para medir as pequenas deformações nos corpos de prova.

2.2.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para se obter a Resistência à Tração por Compressão Diametral foram seguidas as orientações da ABNT NBR 7222:2011 e os equipamentos utilizados foram os mesmos do ensaio de Resistência à Compressão Axial, no entanto foi acoplado à prensa um par de placas metálicas retangulares.

2.2.5 Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos

Para se obter a Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos, foram seguidas as orientações da ABNT NBR 12142:2010, sendo o ensaio realizado em um pórtico de reações composto por uma célula de carga - U10M de 500 KN, módulo de aquisição de dados Quatum X Mx840, juntamente com um notebook que utiliza o software Catman Easy para captação das informações.

2.2.6 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) teve como objetivo identificar as ligações químicas presentes nas amostras de Referência (23°C) e nas submetidas a temperatura de 800 °C, porque de acordo com a literatura nessa temperatura as reduções nas propriedades mecânicas são significativas.

Para realização do ensaio as amostras dos corpos de prova foram fragmentadas com auxílio de uma marreta em pedaços menores e depois moídas em um almofariz com um pistilo e peneiradas (peneira 200µm), obtendo-se um material fino. 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 0,2 cm/s e uma resolução de 4 cm⁻¹ com intervalo de 4000 a 400 cm⁻¹. Para a realização do ensaio, utilizou-se brometo de potássio (KBr) juntamente com as amostras, ambos, com mesma quantidade em massa para cada análise em presença de ar atmosférico.

2.2.7 Difratometria (Difração) de Raios X (DRX)

A Difratometria (Difração) de Raios X (DRX) teve como objetivo identificar as modificações da microestrutura identificando as fases cristalinas presentes nas amostras, que foram obtidas através de picos que são gerados na difração dos raios produzidos pelos átomos característicos do mineral. 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 com auxílio de uma marreta em pedaços menores e depois moídas em um almofariz com um pistilo e peneiradas (peneira 200µm), obtendo-se um material fino. Para

realizar esse ensaio foi utilizado o equipamento SHIMADZU LAB X modelo XRD-6000, radiação k- α 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.

2.2.8 Análise Térmica (TGA-DTA)

A Análise Termo-Diferencial (DTA) teve como objetivo identificar alterações das amostras com a variação da temperatura, pelo comportamento exotérmico e endotérmico dos materiais presentes nas mesmas. A Análise Termogravimétrica (TGA) teve como objetivo avaliar a perda de massa das amostras com a variação da temperatura. Para realizar esses ensaios 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 20 a 1100 °C e taxa de aquecimento de 10 °C/min.

2.2.9 Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey

Os resultados dos ensaios de Resistência à Compressão Axial, Módulo de Elasticidade, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos foram analisados pelo método de análise estatística de variância (ANOVA) para verificar se houve ou não diferença estatisticamente significativa entre os patamares de temperaturas e utilizou-se o Teste de Tukey para avaliar em quais temperaturas ocorreram diferenças estatisticamente significativas em relação à temperatura ambiente. Ambos foram realizados pelo uso do software Microsoft Excel e considerando um intervalo de confiança de 95 %.

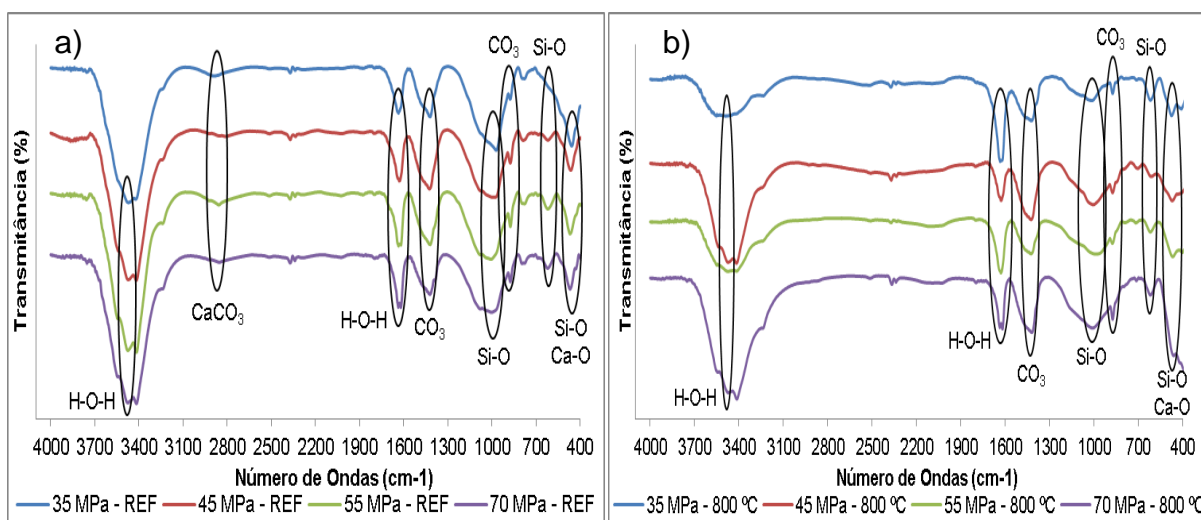
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

As Figuras 1 a) e b) apresentam os espectros de infravermelho detalhados para as faixas 4000 a 400 cm^{-1} referentes às amostras de Referência e às de 800 °C, respectivamente.

Figura 1 – Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

a) Referência; b) 800 °C



Fonte: Autor, 2017

O espectro das amostras de Referência (35, 45, 55 e 70 MPa), apresentaram bandas em 3471, 3475 e 3473 cm^{-1} e em 1635, 1639 e 1637 cm^{-1} , 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, com isso pode-se verificar que os concretos Portland hidrataram (PANZERA et al, 2010).

As bandas na ordem de 2880 cm^{-1} são referentes a CaCO_3 (calcita) (TERESA & ANÁLIA, 2012). As bandas em 1419, 1423 e 1421 cm^{-1} e as em 877 e 875 cm^{-1} são caracterizadas como o estiramento antissimétrico e a deformação angular C-O da calcita, respectivamente (BESSLER & RODRIGUES 2008; RODRIGUES, 2013). As bandas em 995, 1008 e 1002 cm^{-1} são referentes às vibrações de alongamento Si-O (TORRES, 2013; TREZZA, 2007). As bandas em 619 e 621 cm^{-1} referem-se à

vibração Si-O e as bandas em 457, 464, 470 e 468 cm^{-1} referem-se ao estiramento Si-O do quartzo (RODRIGUES, 2013). Para a classe de resistência de 35 MPa a banda na ordem de 619 cm^{-1} fica sobreposta pela banda que aparece em 457 cm^{-1} . As bandas caracterizadas como bandas de Ca-O (424 cm^{-1}) ficaram sobrepostas pelas bandas na ordem de 460 cm^{-1} (IMTIAZ et al, 2013).

Pode-se perceber que as amostras de 800 °C 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 800 °C apresentaram diferença, 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.

Não se percebem consideráveis diferenças entre as amostras de Referência e as de 800 °C, isso pode ter ocorrido devido ao tempo de exposição na temperatura de 800 °C, que foi de 30 min. Como os corpos de prova foram quebrados e moídos as amostras continham material da parte interna e externa dos mesmos e com esse tempo de exposição possivelmente a parte interna do corpos de prova não atingiu a mesma temperatura que a parte externa, gerando assim tais resultados.

3.2 DIFRATOMETRIA (DIFRAÇÃO) DE RAIOS X (DRX)

As Figuras 2 a), b), c) e d) apresentam os difratogramas das amostras das quatro classes de resistência nos cinco patamares de temperatura estudados nessa pesquisa.

Observando-se as Figuras 2 a), b), c) e d), percebe-se que com o aumento dos patamares de temperatura ocorreram mudanças de fase. Fica evidente a decomposição de alguns compostos do concreto, como anteriormente verificados por outros pesquisadores (LIMA, 2005; VIEIRA 2016).

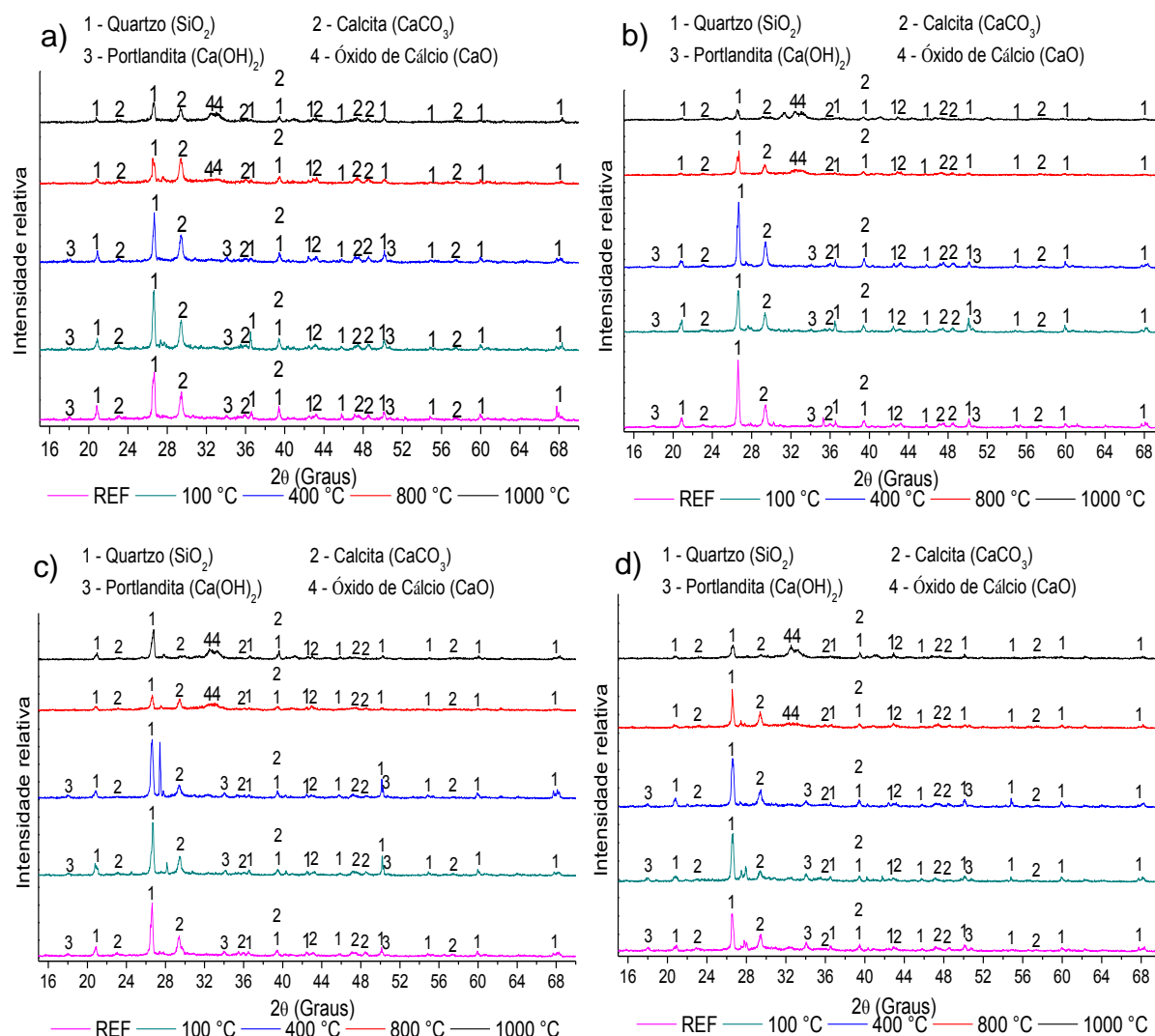
Pode ser visualizado que a portlandita (Ca(OH)_2) cartão JPCDS 4-0733, uma das fases que contribuem para a resistência do concreto, apresentou-se estável até a temperatura de 400 °C. Verifica-se que a 800 °C a portlandita desapareceu totalmente, surgindo uma nova fase identificada como óxido de cálcio (CaO) cartão JPCDS 28-0775, em virtude da decomposição térmica (LIMA, 2005; FERNANDES, B. et al., 2017).

A calcita (CaCO_3) cartão JPCDS 5-0586, está presente em todas as temperaturas, porém em maior quantidade nas temperaturas mais baixas. 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).

Outra fase presente em todas as classes de resistência e temperaturas é o quartzo (SiO_2) cartão JPCDS 46-1045.

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

Figura 2 - Difração de Raios X (DRX) - a) 35 MPa; b) 45 MPa; c) 55 MPa; d) 70 MPa

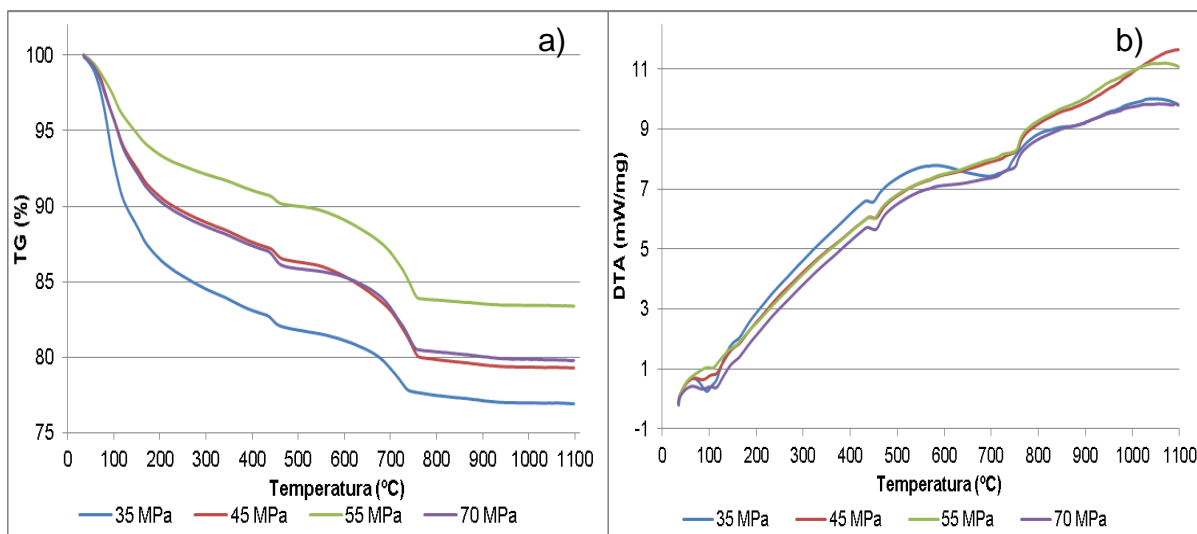


Fonte: Autor, 2017

3.3 ANÁLISE TÉRMICA (TGA-DTA)

As Figuras 3 a) e b) apresentam a Análise Termogravimétrica (TGA) e a Análise Termo-Diferencial (DTA), respectivamente, das quatro classes de resistência estudadas nessa pesquisa.

Figura 3 – a) Análise Termogravimétrica (TGA); b) Análise Termo-Diferencial (DTA)



Fonte: Autor, 2017

A primeira parte descendente mais inclinada entre a temperatura inicial até 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, FIGUEIREDO & SILVA, 2002; LIMA, 2005; SOUZA, 2016).

Entre a temperatura de 100 até 420 °C se inicia a decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é acompanhada de uma gradual perda de massa (COSTA & SILVA, 2002; LIMA, 2005; SOUZA, 2016).

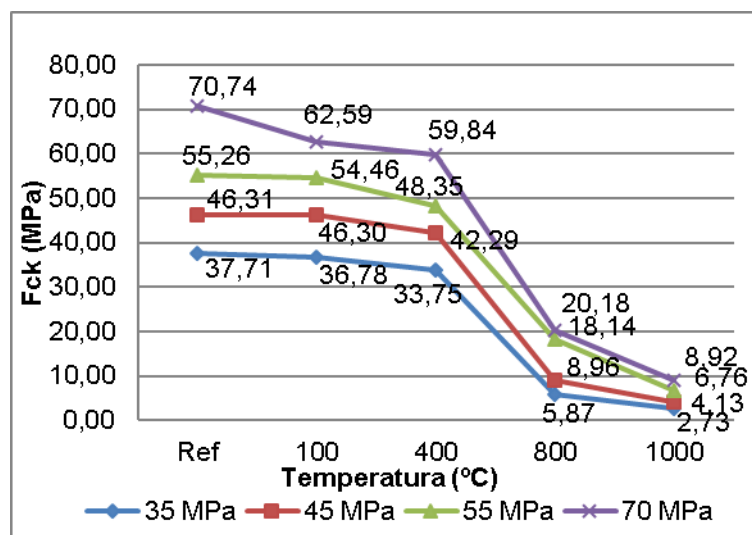
Por volta de 500 °C ocorre uma acentuada declividade na curva termogravimétrica e um pico endotérmico na curva termo-diferencial, que é atribuída à desidroxilação da portlandita (COSTA, FIGUEIREDO & SILVA, 2002; LIMA, 2005; SOUZA, 2016), o que é confirmado pelos resultados da Difração de Raios X.

Próximo aos 800 °C ocorre uma acentuada declividade na curva termogravimétrica e um pico endotérmico na curva termo-diferencial, que é atribuído à decomposição da calcita com a formação de CO₂ e CaO (LIMA, 2005; SOUZA, 2016), também corroborado pela Difração de Raios X.

3.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A Figura 4 ilustra os resultados obtidos das médias dos corpos de prova para os ensaios de Resistência à Compressão Axial.

Figura 4 - Influência da temperatura na Resistência à Compressão Axial



Fonte: Autor, 2017

Através da análise estatística de variância (ANOVA) dos resultados obtidos foi possível observar que existe redução estatisticamente significativa da Resistência à Compressão Axial dos concretos com o incremento da temperatura. Através do Teste de Tukey observou-se que a classe de resistência de 35 MPa começou a apresentar redução estatisticamente significativa na temperatura de 800 °C, já as classes de resistência de 45 e 55 MPa começaram a apresentar reduções estatisticamente significativas na temperatura de 400 °C e a classe de resistência de 70 MPa começou a apresentar redução estatisticamente significativa na temperatura de 100 °C.

Entre as temperaturas de 400 °C a 600 °C ocorre a destruição do gel de C-S-H, devido a que os hidróxidos de cálcio começam a se decompor e desidratarem, resultando em óxido de cálcio puro e água vaporizada (COSTA & SILVA, 2002), sendo que o C-S-H tem como função manter a pasta de cimento unida por meio de ligações químicas e das forças coesivas de Van der Waals, contribuindo assim satisfatoriamente para a resistência do concreto (Castellote et al. (2003 apud SILVA, 2009).

Acima de 400 °C ocorre a desidratação da portlandita, que gera retração e microfissuração da pasta de cimento e também o aumento da porosidade do concreto (FERNANDES, B. et al., 2017), contribuindo assim para redução da Resistência à Compressão Axial dos concretos estudados.

Próximo à temperatura de 600 °C, pode ser considerada como a temperatura limite para manter a integridade estrutural do concreto produzido com cimento Portland (NEVILLE, 2016), sendo esse o cimento usado nessa pesquisa.

Pode-se também observar que quanto maior a classe de resistência do concreto, menor temperatura de exposição foi necessária para apresentar reduções estatisticamente significativas. Segundo Wu et al. (2002 apud CASTRO, TIBA & PANDOLFELLI, 2011) quanto maior a resistência do concreto, maior a redução de sua Resistência à Compressão devido à maior densidade da pasta de cimento, à redistribuição de tensões promovida pelo enfraquecimento e à maior sensibilidade às microfissuras induzidas termicamente.

Como pode-se observar, os resultados da presente pesquisa estão de acordo com as indicações bibliográficas e com os resultados obtidos nos ensaios de Difração de Raios x e Análise Térmica.

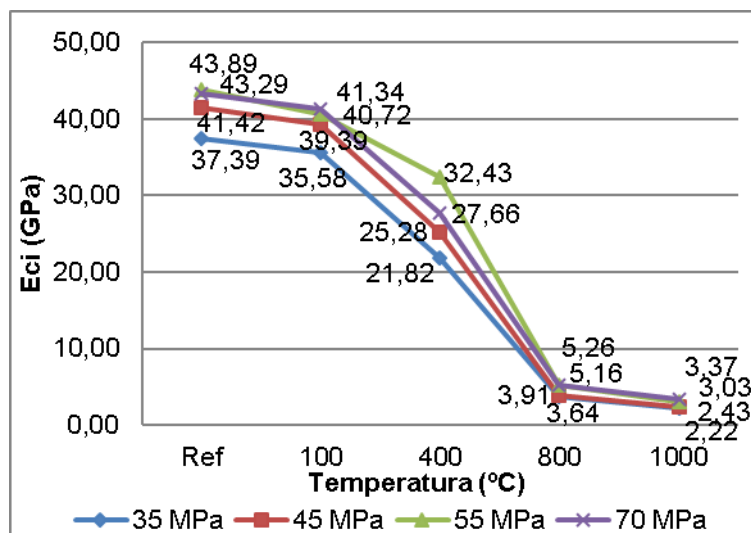
3.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE

A Figura 5 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, sendo que esse comportamento já era esperado, pois, o Módulo de Elasticidade está diretamente ligado à Resistência à Compressão Axial do concreto. Através do Teste de Tukey observou-se que os Módulos de Elasticidade dos concretos das classes de resistências de 35, 45 e 70 MPa começaram a apresentar reduções estatisticamente significativas na temperatura de 400 °C e para a classe de resistência de 55 MPa a redução estatisticamente significativa iniciou na temperatura de 100 °C.

Segundo Neville (2016), entre as temperaturas de 21 a 96 °C não há redução do Módulo de Elasticidade ou é pouco significativa, sendo que este comportamento não foi encontrado para a classe de resistência de 55 MPa.

Figura 5 - Influência da temperatura no Módulo de Elasticidade



Fonte: Autor, 2017

Segundo MEHTA & MONTEIRO (2014), próximo à temperatura de 400 °C ocorre o aparecimento de microfissuras na zona de transição na interface (pasta de cimento/agregado), que tem um efeito prejudicial ao Módulo de Elasticidade. As reduções do Módulo de Elasticidade dos concretos estudados se mostraram maiores que as reduções encontradas na Resistência à Compressão Axial, devido que a microfissuração tem um efeito prejudicial maior ao Módulo de Elasticidade do que à Resistência à Compressão. (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Segundo Lima (2005), com uma redução significativa do Módulo de Elasticidade ocorrem deformações nos elementos estruturais, tornando-os inadequados ao uso. Devido que o comportamento das estruturas de concreto normalmente depende do seu Módulo de Elasticidade, e este é afetado significativamente pela ação da temperatura (NEVILLE, 2016).

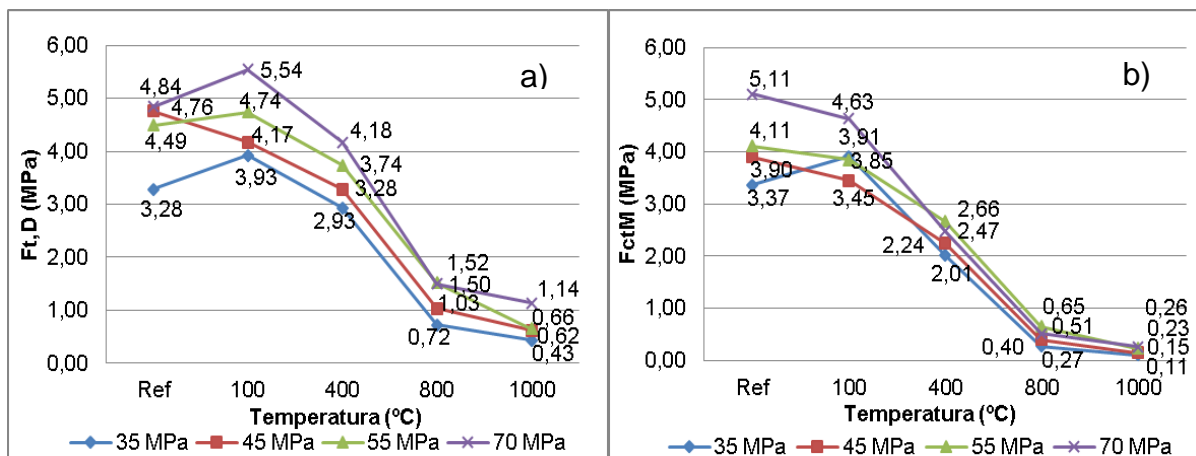
3.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DE CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS

As Figuras 6 a) e b) ilustram os resultados obtidos das médias dos corpos de prova para os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos, respectivamente.

Através da análise estatística de variância (ANOVA) dos resultados obtidos foi possível observar que existe redução estatisticamente significativa na Resistência à

Tração por Compressão Diametral e na Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos dos concretos com o incremento da temperatura. Através do Teste de Tukey observou-se que a Resistência à Tração por Compressão Diametral das quatro classes de resistências, começou a apresentar reduções estatisticamente significativas na temperatura de 800 °C. Observou-se também que a Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos das quatro classes de resistências, começou a apresentar reduções estatisticamente significativas na temperatura de 400 °C.

Figura 6 – a) Influência da temperatura na Resistência à Tração por Compressão Diametral; b) Influência da temperatura na Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos



Fonte: Autor, 2017

Segundo CHAN *et al.* (1996, *apud* CASTRO, TIBA & PANDOLFELLI, 2011) as reduções da Resistência à Tração por Compressão Diametral de concretos expostos às altas temperaturas é bastante distinta das reduções normalmente observadas para a Resistência à Compressão. Sendo que há esse comportamento devido a micro e macro-fissuras que são produzidas nas amostras em função das incompatibilidades térmicas existentes no interior do concreto e da decomposição do Ca(OH)₂ (portlandita), outros hidratados e componentes (como pode-se observar nos resultados obtidos nos ensaios de Difração de Raios X e Análise Térmica). Como pode-se observar, os resultados obtidos para a Resistência à Tração por Compressão Diametral não estão de acordo com a indicação bibliográfica.

De acordo com os resultados obtidos na pesquisa realizada por Souza & Moreno (2010) a Resistência à Tração, sofreu maior prejuízo que a Resistência à Compressão apresentando decréscimo de resistência mais acentuado. Segundo os autores este comportamento já era esperado devido a ocorrência da microfissuração do concreto, que prejudica em maior grau a Resistência à Tração do concreto. O mesmo comportamento pode-se observar nos resultados obtidos nessa pesquisa para a Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos na presente pesquisa, pode-se concluir que a temperatura influência de forma estatisticamente significativa na redução das propriedades mecânicas dos concretos estudados. Ficou evidenciado que quanto maior a Resistência à Compressão do concreto, mais rápida é sua degradação frente as altas temperaturas, devido a maior densidade da pasta de cimento e a maior sensibilidade à microfissuras. 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). Ao se observar o comportamento da Resistência à Tração, foi possível constatar que para a Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos ocorreram reduções mais acentuadas do que para a Resistência à Compressão Axial, devido a microfissuração do concreto.

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 tanto na microestrutura quanto nas propriedades mecânicas tiveram início próximo à temperatura de 400 °C, devido à decomposição da portlandita, à destruição do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e à microfissuração do concreto.

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o comportamento macro e microestrutural de concretos submetidos a altas temperaturas, com tempo de exposição maior que 30 min;
- Analisar o comportamento macro e microestrutural de concretos submetidos a altas temperaturas, com resfriamento brusco.

6. REFERÊNCIAS

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

_____. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais: Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 9939: Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.** Rio de Janeiro, 2012.

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.

CASTRO, A. L. de; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI, V. C.. Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas: revisão. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 341, p. 22-31, Mar. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132011000100003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 14 Out. 2017.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Estruturas de concreto armado em situação de incêndio. In: XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, maio, 2002.

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.

FERNANDES, B. et al. Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo, v. 10, n. 4, p. 838-863, Aug. 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952017000400838&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 14 Out. 2017.

IMTIAZ, A. et al. Micelle-assisted synthesis of Al₂O₃•CaO nanocatalyst: optical properties and their applications in photodegradation of 2, 4, 6-trinitrophenol. **The Scientific World Journal**. v. 2013, 11f. 2013.

LIMA, R.C.A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. 241 f Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - Microestrutura, Propriedade e Materiais**. 2.ed. Natal: IBRACON, 2014. 751 p.

MORALES, Gilson; CAMPOS, Alessandro; FAGANELLO, Adriana Patriota. A ação do fogo sobre os componentes do concreto. **Semina: Ciências Exatas e tecnológicas, Londrina**, v. 32, n. 1, p.47-55, mar. 2011. Semestral. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/viewFile/4057/8315>>. Acesso em: 25 out. 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912 p.

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.

ROMANO, R. C. O. et al. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**, São Paulo, v. 62, n. 363, p. 215-223, Set. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132016000300215&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 12 Out. 2017.

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.

SANTOS, Cristina Calmeiro dos; RODRIGUES, João Paulo C.- O efeito das altas temperaturas nas propriedades mecânicas residuais do betão. In 2as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos, Coimbra, p. 1-12, jun, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.11/1449>>. Acesso em 25 Out. 2017.

SILVA, Daiane dos Santos da. **Propriedades Mecânicas Residuais Após Incêndio de Concretos Usados na Construção Civil na Grande Florianópolis**. 2009. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SOUZA, A. A. A. de; MORENO JR, A. L.. Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo, v. 3, n. 4, p. 432-448, Dec. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952010000400005&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 30 Mar. 2017.

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.

TORRES, Júlia Cristina de Lima. **Obtenção de emulsões asfálticas convencionais e modificadas com argilas e nanoargilas**. 2013. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

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.

UGIONI, Vinicius Marcos. **“Análise das propriedades mecânicas do concreto produzido com substituições parciais e totais dos agregados graúdos e miúdos por agregados reciclados”**. 2017. 23 f. Artigo (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

VIEIRA, Andreia. **“Análise macro e microestrutural do comportamento do concreto reforçado com fibras de polipropileno submetido a elevadas temperaturas”**. 2016. 22 f. Artigo (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.