

COMPARATIVO DO EFEITO DA TEMPERATURA EM VIGAS SINISTRADAS COM AS ÍNTEGRAS DO PAÇO MUNICIPAL MARCOS ROVARIS EM CRICIÚMA/SC – ESTUDO DE CASO

Franciellen Alves Cardoso (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2)

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

RESUMO

O concreto quando submetido a altas temperaturas, como as de um incêndio, tende a apresentar alterações físicas e químicas em sua estrutura, provocando deterioração das propriedades mecânicas e residuais. Entretanto essas alterações dependem de inúmeros fatores, como por exemplo, o tipo de agregado e de cimento, a relação água/cimento, tempo de exposição, taxa de aquecimento, resfriamento, entre outros. O presente trabalho consiste na análise dos efeitos gerados pelos incêndios seguidos ocorridos no Paço Municipal Marcos Rovaris em Criciúma/SC em meados de 2015. Foram estudadas as transformações microestruturais desenvolvidas na pasta de cimento hidratada, bem como as alterações nas propriedades mecânicas. A metodologia aplicada consistiu na extração de quatro testemunhos, sendo dois testemunhos no foco do incêndio e os outros dois em área não sinistrada. A partir disso foram realizados os ensaios de compressão axial, difração de raio-X (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análises térmicas (ATD/TG). Foram também realizados ensaios de esclerometria em 100 vigas, sendo 50 vigas em área sinistradas e as outras 50 em área íntegra. De acordo com os resultados obtidos não foi possível observar alterações significativas na estrutura, constatando que a estrutura em estudo não foi submetida a uma temperatura elevada que ocasionasse alterações consideráveis nas propriedades mecânicas.

Palavras-Chave: incêndio, concreto, propriedades mecânicas, microestrutura.

1 INTRODUÇÃO

O colapso de uma estrutura submetida a altas temperaturas pode ocorrer através do conjunto: temperatura máxima atingida, tempo de exposição, traço do concreto, tipo da estrutura e velocidade do resfriamento. Destaca-se também o fato de o concreto ser praticamente incombustível e não exalar gases tóxicos ao ser aquecido. No entanto, o aumento da temperatura nos elementos de concreto causa redução de sua resistência e de seu módulo de elasticidade, levando a uma redução da rigidez da estrutura. (SOUZA, 2016, p.05).

Em condições reais de aplicação nem todas as faces do elemento estrutural estarão submetidas à ação do fogo, haja vista a existência de paredes, rebaixos, ou outros

elementos que faceiam a estrutura. Além disso, a baixa condutividade térmica do concreto induz a gradientes térmicos entre sucessivas camadas da seção, promovendo transformações diferenciais no elemento. (FERNANDES et al., 2017).

As principais alterações das propriedades físico-químicas do concreto exposto à ação do fogo são consequências da variação volumétrica dos agregados constituintes e pela evaporação da água presente em sua matriz. Tais fenômenos podem provocar redução das propriedades macro e microestruturais. (SILVA, 2006). Lorenzon (2014) ressalta que pelo fato do concreto não ser um material homogêneo, duas amostras jamais terão exatamente as mesmas características e que as condições de ensaio, embora normalizadas, jamais serão as mesmas, torna-se vital a realização de inúmeros estudos. Situações onde poucos ensaios são realizados induzem a erros e corre-se o risco de que existam resultados não representativos, dificultando o processo de análise.

Após um incêndio é necessário decidir se a estrutura deverá ser demolida ou recuperada, para isso é necessário conhecer os danos causados pelo incêndio nos elementos estruturais sinistrados. Algumas técnicas não destrutivas podem auxiliar na análise qualitativa da estrutura, podendo correlacionar propriedades do concreto residual com suas propriedades mecânicas. Entretanto diversos fatores influenciam nos resultados dos ensaios não destrutivos, causando variação ou distorção nas grandezas medidas e no traçado da melhor curva de correlação da resistência com a propriedade medida.

Diante do exposto, a presente pesquisa tem o intuito de conhecer os efeitos das altas temperaturas na estrutura de concreto sinistrada no Paço Municipal Marcos Rovaris em Criciúma/SC. Obtendo informações qualitativas sobre os compostos da estrutura.

Para esta avaliação foram realizados ensaios não destrutivos de esclerometria na estrutura sinistrada e íntegra. Posteriormente foram realizados ensaios destrutivos, através da extração de quatro testemunhos, sendo dois testemunhos da estrutura íntegra e os outros dois da estrutura sinistrada. A partir dessas amostras foram realizados os seguintes ensaios: compressão axial, difração de raio-X (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análises térmicas (ATD/TG).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Como o estudo busca analisar as propriedades mecânicas, residuais, e microestruturais do concreto após o sinistro ocorrido, iniciou-se a pesquisa com visitas in loco no Paço Municipal Marcos Rovaris para realização dos ensaios destrutivos e não destrutivos. Bem como com a junção de todos os laudos, vistorias e projetos cedidos pela Secretaria de Infraestrutura e Mobilidade Urbana de Criciúma/SC.

2.1 HISTÓRICO DO SINISTRO

Conforme laudo técnico da estrutura emitido pelo IBAPE (Instituto Catarinense de Engenharia de Avaliações e Perícias), o primeiro incêndio ocorreu em 27 de maio de 2015, tendo início por volta das 3h20m e conforme parecer emitido pelos bombeiros foram danificados 500 m² na parte térrea da edificação. Os bombeiros conseguiram controlar o incêndio por volta das 4h, e depois disso iniciaram o trabalho de rescaldo.

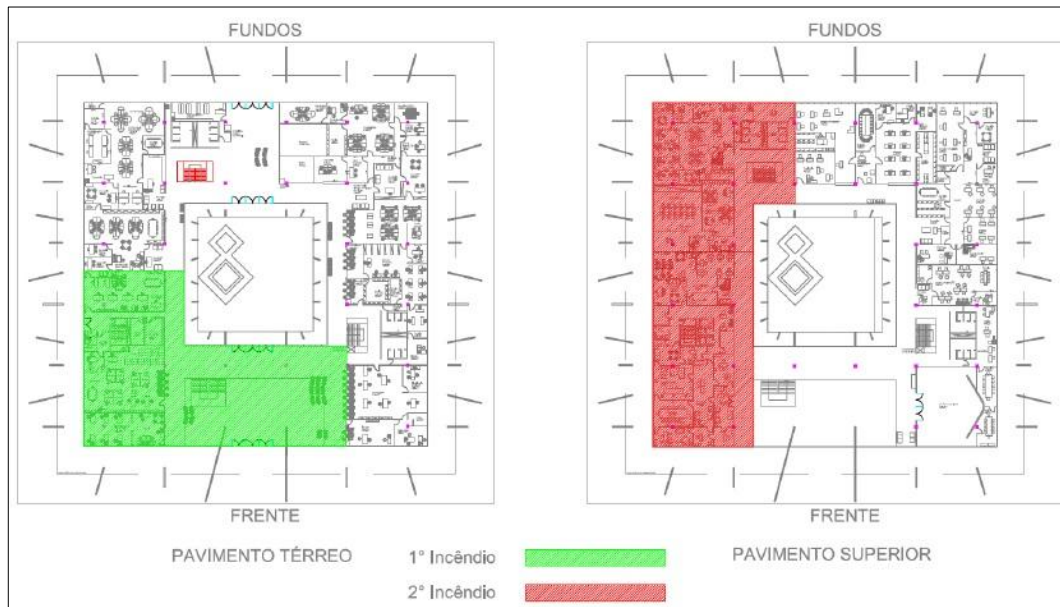
O segundo incêndio, ocorrido em 07 de junho de 2015 no andar superior foi ainda mais grave, deixando a estrutura do prédio comprometida. Teve início por volta de 12h30m, sendo que em torno de 13h45min, o foco do incêndio foi isolado e começou o trabalho de rescaldo. (TASSO et al., 2015)

Segundo os peritos a causa dos dois incêndios foi sobrecarga na parte elétrica. Para estimar a temperatura atingida no segundo incêndio os peritos correlacionaram o fato de encontrar as esquadrias de alumínio derretidas com a temperatura de fusão desse material, sendo assim a estimativa foi que o incêndio tenha atingido 660 °C. Entretanto, essa conclusão pode não significar necessariamente que tal temperatura tenha se instalado na estrutura de concreto, tendo em vista a existência de revestimento interno no forro metálico com lã de rocha. A Figura 1 apresenta a localização dos incêndios no layout da estrutura.

Como o segundo incêndio apresentou maiores danos estruturais, todos os ensaios foram realizados no pavimento superior. Foram estudadas apenas as alterações sofridas nas vigas de cobertura por esta ser de fácil acesso. Além disso, no momento que se iniciou as pesquisas os pilares que sofreram maiores danos

estruturais já haviam sido recuperados. Não optou-se pelo estudo das lajes, pela dificuldade de acesso.

Figura 1 – Croqui dos incêndios



Fonte: TASSO et al., 2015.

2.2 ESCLEROMETRIA

Foram realizados ensaios esclerométricos em 100 vigas do pavimento superior, selecionaram-se vigas que estavam no foco do incêndio e vigas que não foram atingidas pelo sinistro. Para a execução do ensaio foi utilizado gabarito com áreas espaçadas de acordo com a NBR 7584:2012. Foram disparados 16 impactos em cada viga estudada. O equipamento foi utilizado na posição horizontal e a área em estudo pode ser vista na Figura 3, exposta no subcapítulo 2.3.

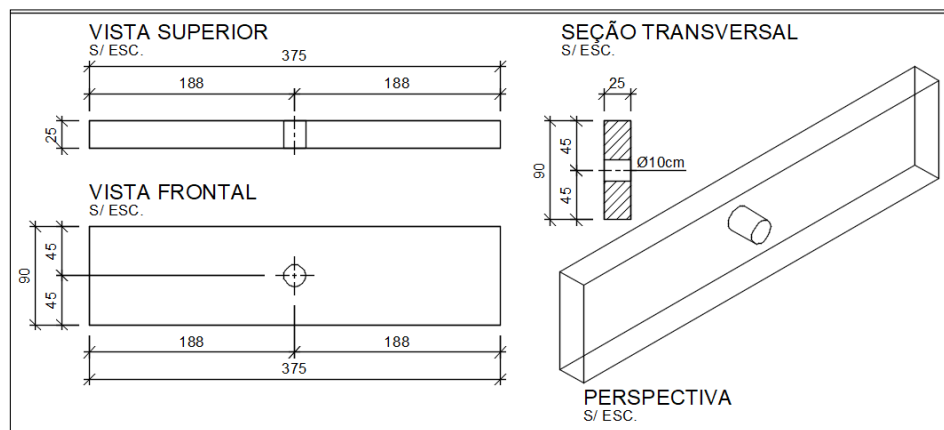
O ensaio de esclerometria foi realizado com o aparelho denominado esclerômetro de Schmidt, modelo N com energia de percussão de 2,25 Nm, sendo este normalizado pela NBR 7584:2012.

2.3 EXTRAÇÕES DE TESTEMUNHOS

Foram realizadas quatro extrações de testemunhos na estrutura em estudo, duas extrações localizadas no pavimento superior no foco do incêndio e as outras duas

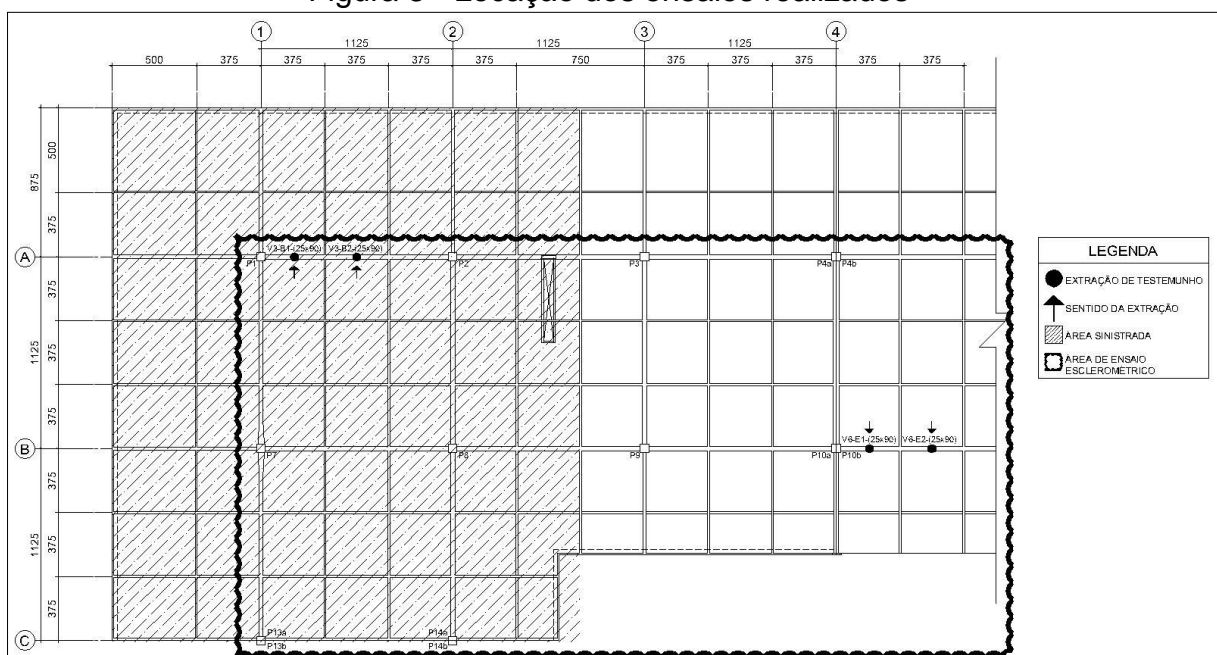
também locadas no pavimento superior, mas em área não sinistrada. Todas as extrações foram realizadas em vigas com seção transversal de 25x90 cm e vão teórico de 375 cm (Figura 2). A locação dos ensaios pode ser vista na Figura 3. Os ensaios seguiram as recomendações da NBR 7680:2015. Para extração dos testemunhos foi utilizada uma perfuratriz de impacto tipo serra-copos, com ponta adiamantada. O equipamento possuía refrigeração à água no local do corte do concreto, a fim de minimizar as vibrações ocasionadas pela extração. Todos os testemunhos foram extraídos com diâmetro de 10 cm e altura de 25 cm.

Figura 2 - Locação da extração dos testemunhos



Fonte: O Autor, 2017.

Figura 3 - Locação dos ensaios realizados



Fonte: O Autor, 2017.

2.4 ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão axial foram realizados de acordo com as orientações da NBR 5739:2007. O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica com capacidade de carga de 200 toneladas, modelo PC200i, da marca EMIC. A velocidade de carregamento foi de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s

Todos os procedimentos foram realizados no LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil, no IDT/UNESC.

Seguindo as instruções da NBR 7680:2015 os testemunhos foram ensaiados no estado de equilíbrio que se encontravam, respeitando o tempo mínimo de 72h de exposição ao ar em ambiente de laboratório, não sendo necessário acondicionamento em tanque de cura. Para seguir a orientação de $(1 < h/d \leq 2)$ estabelecida pela norma foi necessário retificar os testemunhos a fim de obter altura final de 20 cm, não foi necessário capeamento pois os testemunhos já apresentavam paralelismo entre os topos.

2.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

O objetivo principal da utilização do DRX nesse estudo foi para determinar de maneira qualitativa, a composição mineralógica dos testemunhos extraídos nas condições sinistrados e íntegros.

Para realização do ensaio as amostras foram fragmentadas, moídas e peneiradas, obtendo-se um material fino passante na peneira 200 mesh. A análise por DRX foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais do IDT/UNESC, através de um difratômetro de raios-X (marca Shimadzu, modelo XRD-6000), goniômetro 2θ , radiação $k-\alpha$ com tubo de cobre de comprimento de onda (λ) de 1,5406 Å. O passo realizado nas análises foi de $2^\circ/\text{min}$. O range de medida foi de 3° a 80° , com 25 kV de voltagem e 25 mA de corrente elétrica.

2.6 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Com o intuito de investigar a formação de novos compostos e a composição das amostras, aplicou-se o ensaio de FTIR. Para realização do ensaio as amostras foram fragmentadas, moídas e peneiradas, obtendo-se um material fino, passante na peneira 200 mesh. Após isso foi necessário prensar as amostras no formato de pastilha com uma proporção (aproximada) de 95% de brometo de potássio (KBr) e 5% de material a ser analisado. O equipamento utilizado foi um espectrofotômetro de FTIR marca Shimadzu, modelo IRPrestige-21 do IDT/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 400 a 4000 cm^{-1} .

2.7 ANÁLISES TÉRMICAS (ATD / TG)

O objetivo das análises térmicas foi investigar o comportamento dos materiais submetidos a uma determinada condição de temperatura. Sendo dividida em: análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (TG). A primeira mede a mudança da quantidade de calor liberado ou absorvido pela amostra e a segunda mede a variação de massa em função da temperatura.

As análises foram realizadas no Laboratório de Valoração de Resíduos do IDT/UNESC. Foi utilizado um analisador térmico simultâneo, modelo STA 449 F3 Jupiter da marca NETZSCH. O ensaio foi realizado em atmosfera de ar sintético, na faixa de 35 °C até 1100 °C, com taxa de aquecimento de 20 °C/min.

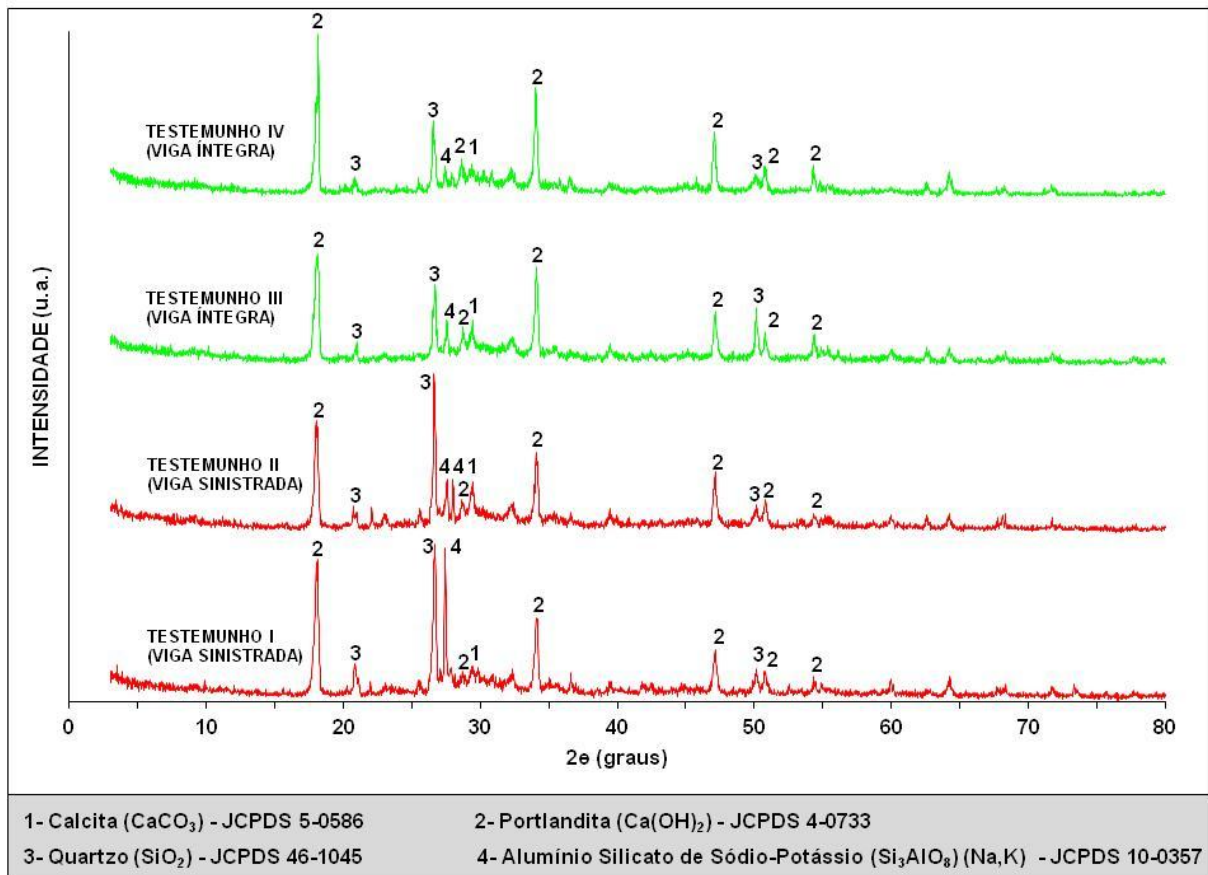
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados da seguinte maneira: primeiramente expostos os resultados das análises microestruturais das amostras e posteriormente apresentados os resultados das análises mecânicas.

3.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Na Figura 4 se observam os difratogramas de raios-X para cada amostra extraída dos testemunhos em estudo. Foram expostas as principais fases encontradas.

Figura 4 - Difratogramas das amostras



Fonte: O Autor, 2017.

Em todas as amostras foi possível encontrar a presença de calcita (CaCO₃), ficando evidente que a mesma está presente em pequena quantidade, haja visto, que o pico correspondente ocorre com baixa intensidade. Tal fato é corroborado pelo resultado das análises térmicas, expostas no próximo subcapítulo, evidenciando que a descarbonatação da calcita (CaCO₃), que se decompõe em CaO e CO₂, ocorre a partir de temperaturas maiores que 650 °C. (LIMA, 2005; SOUZA, 2016; FERNANDES et al., 2017)

A portlandita (Ca(OH)₂) também está presente em todas as amostras, sendo esta a fase predominante, ficando evidente que a exposição térmica ocorrida não foi suficiente para decompor a referida fase. Nos difratogramas obtidos por Lima (2005) foi possível verificar que a portlandita esteve estável até os 400 °C, quando começou a se transformar em óxido de cálcio até o desaparecimento, aos 900 °C.

Observou-se também a presença de quartzo (SiO_2) em todas as amostras, o que era esperado, visto que a areia e a brita (basalto) possuem essa fase em sua constituição.

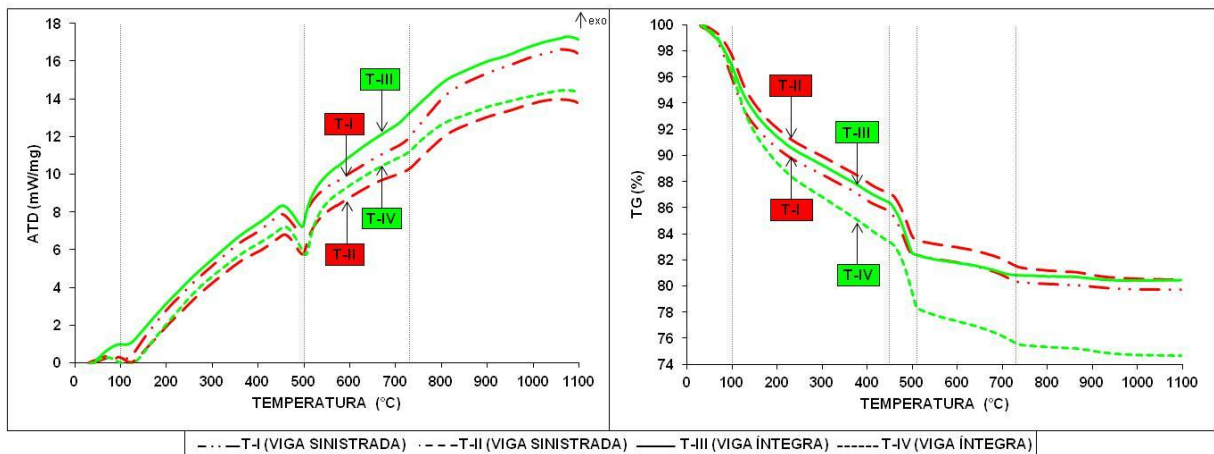
Por fim foi encontrado a presença de alumínio silicato de sódio-potássio (Si_3AlO_8) (Na,K), fase característica da pedra brita, sendo esta um agregado originado da britagem de uma rocha maior, que pode ser do tipo basalto, granito, gnaiss, entre outras.

É importante salientar que não ocorreu nenhuma mudança significativa entre as amostras expostas ou não ao incêndio, apesar de ocorrer pequenas variações nas intensidades dos picos, as fases analisadas acima não deixaram de estar presentes em todas as amostras.

3.2 ANÁLISES TÉRMICAS (ATD/TG)

A Figura 5 retrata as análises térmicas diferenciais (ATD) e as análises termogravimétricas (TG) realizadas para cada amostra extraída dos testemunhos.

Figura 5 – Análises térmicas (ATD/TG)



Fonte: O Autor, 2017.

Para uma melhor análise os resultados foram divididos por faixas, a fim de identificar os principais efeitos na matriz do cimento já conhecidos na literatura técnica.

Para os autores Lima (2005); Souza (2016); Fernandes et al., (2017), na faixa de 0 °C ~ 100 °C ocorre a evaporação da água livre presente nos poros, fato confirmado pelo pico endotérmico na análise térmica diferencial. Entre 100 °C ~ 450 °C ocorre a

perda da água interlamelar do C-S-H, como pode ser observado na perda de massa gradual das amostras. A perda de massa do C-S-H termina em torno de 800 °C.

Em 500 °C ocorreu uma reação endotérmica marcante, corroborando com a curva acentuada da perda de massa, fato característico da desidratação da portlandita (Ca(OH)_2). Para os autores supracitados a portlandita 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 (CaCO_3 – carbonato de cálcio que se divide em CaO e CO_2). Na Figura 6 observou-se esse pico em torno de 730 °C.

A Tabela 1 apresenta os valores de perda de massa por faixa de temperatura, a fim de identificar as perdas mais evidentes das amostras.

Tabela 1 - Análise das perdas de massa

Temperatura (°C)	Reações	Perda de massa das amostras (%)			
		T-I	T-II	T-III	T-IV
0 °C - 100 °C	Perda de água livre	4,15	2,40	3,17	3,85
100 °C - 450 °C	Perda de água combinada	10,18	10,54	10,48	12,81
425 °C - 550 °C	Desidratação da portlandita	4,03	4,24	4,76	6,13
650 °C - 780 °C	Descarbonatação calcita	1,23	1,37	0,72	1,46

Fonte: O Autor, 2017.

Através da Tabela 1 foi possível observar que a amostra T-I (viga sinistrada) estava mais hidratada, pois teve um percentual de perda de massa maior na faixa representativa da perda de água livre. Para as outras faixas de temperatura a amostra T-IV (viga íntegra) apresentou maior perda de massa, haja vista a discrepância da curva dessa amostra para as outras, conforme gráfico da análise

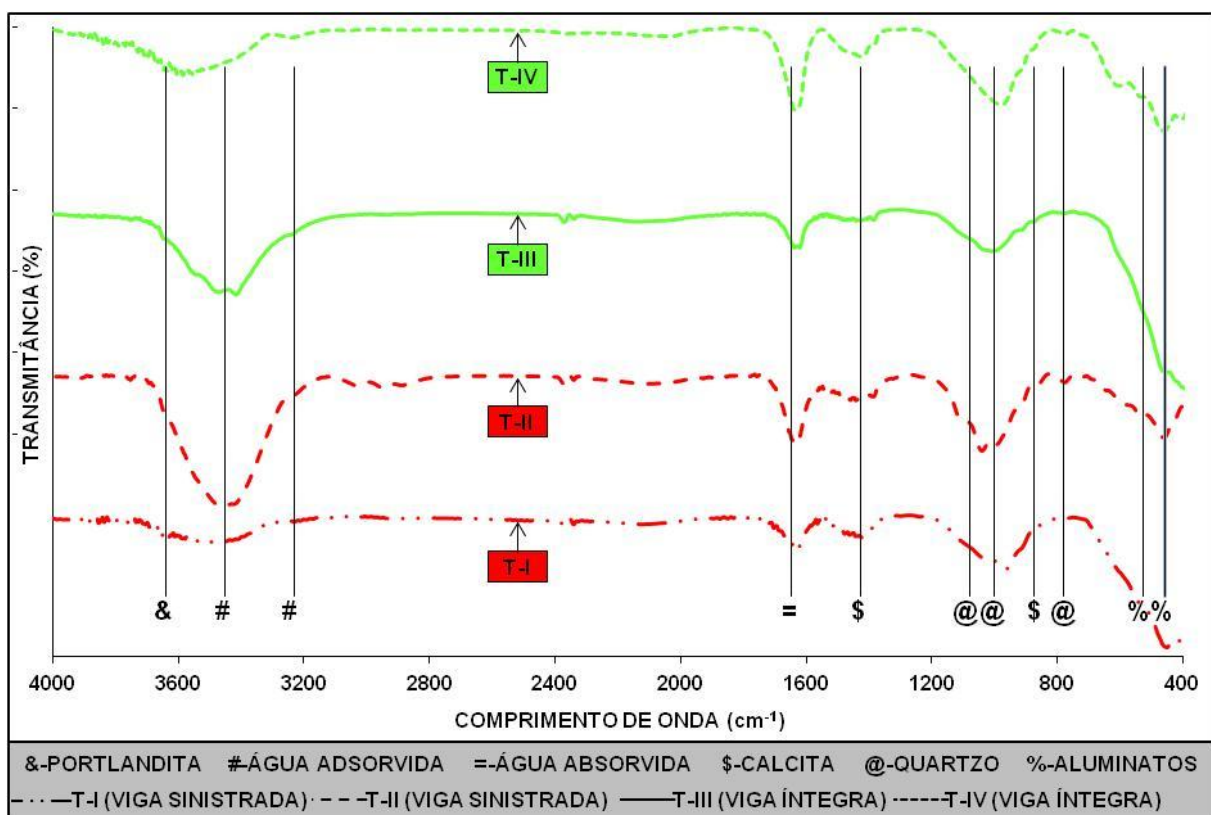
termogravimétrica. Já a amostra T-III (viga íntegra) apresentou um baixo percentual de perda de massa na faixa de temperatura onde ocorre a descarbonatação da calcita.

Fatos esses estão relacionados com a incerteza de onde foram retiradas as amostras de cada testemunho, podendo ser superficiais ou internas, tornando a análise dos resultados mais difícil.

3.3 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

As atribuições das principais vibrações características de cada fase foram feitas com base na revisão da literatura. Na Figura 6 são mostrados os espectros das pastas de cada testemunho extraído.

Figura 6 - Espectros das amostras



Fonte: O Autor, 2017.

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

- $3200\text{ cm}^{-1} \sim 3700\text{ cm}^{-1}$: vibrações associadas aos grupos O-H, sendo:
 - 3640 cm^{-1} : vibrações pertencentes à portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
 - 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 aluminosilicatos hidratados (A-S-H).

Pode-se verificar que o cimento Portland hidratou, através das bandas referentes à água constituinte e absorvida pelos silicatos e sulfoaluminatos de cálcio. Segundo Panzera et al. (2010), os principais produtos de hidratação do cimento Portland são os silicatos de cálcio hidratados e o hidróxido de cálcio. Sabendo que os silicatos têm um papel importante na determinação das características de endurecimento e, portanto no desenvolvimento da resistência do material.

Assim como observado no ensaio de DRX já discutido anteriormente, o FTIR também não apresentou mudanças significativas entre as amostras expostas ou não ao incêndio, apresentando apenas diferenças nas intensidades das bandas.

3.4 ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO (IE)

Foram analisadas ao todo 100 vigas do pavimento superior no Paço Municipal, sendo que 50 vigas encontravam-se na área sinistrada e as outras 50 encontravam-se em área íntegra. O esclerômetro utilizado possui uma curva de correlação entre o índice esclerométrico fornecido pelo equipamento, com o valor de resistência do concreto da estrutura. Entretanto a NBR 7584:2012, anexo A, atenta ao fato de que

essas curvas não correspondem ao concreto em avaliação e referem-se geralmente a concretos preparados em outros países.

A Tabela 2 representa um comparativo das resistências estimadas através da correlação entre o IE com a equação do equipamento, bem como com a equação obtida por outros autores, obtendo o valor de resistência (f_c) estimado para cada situação exposta. Os dados apresentados referem-se à média do IE das 50 vigas sinistradas e das 50 vigas íntegras.

A NBR 7584:2012 descreve que em casos extremos, quando há carbonatação na superfície do concreto analisado os valores estimados para resistência podem superar em 50% os valores reais.

Levando em conta que a estrutura em análise tem 36 anos, para efeito de segurança foi adotada uma redução de 50% do IE encontrado.

Tabela 2 – Resistências estimadas das estruturas

	Vigas Sinistradas	Vigas Íntegras
IE Inicial	45,16	47,36
IE Corrigido	22,58	23,68
f_c Equipamento	11,14 MPa	13,00 MPa
f_c Silva (2006)	12,68 MPa	13,69 MPa
Média f_c	11,91 MPa	13,34 MPa
Desvio Padrão	$\pm 0,77$	$\pm 0,35$

Fonte: O Autor, 2017.

Segundo a NBR 7584:2012 para estimar a resistência à compressão do concreto, deve-se dispor de uma correlação confiável, efetuada com materiais locais, sendo necessário proceder a novas correlações sempre que houver mudança do tipo do cimento. Além disso, é imprescindível atentar para a influência dos inúmeros fatores, como por exemplo: tipo do cimento, tipo do agregado, tipo da superfície, condições de umidade da superfície, carbonatação, idade, incêndio, entre outros. Partindo desse conhecimento optou-se por utilizar apenas as curvas de correlações locais, estabelecidas por Silva em 2006.

Esperava-se que os IE das vigas sinistradas e íntegras tivessem uma variação significativa em decorrência do incêndio, entretanto essa expectativa não foi

confirmada na análise dos resultados. O IE das vigas sinistradas é 4,5 % inferior ao IE das vigas íntegras. Após aplicar a curva de correlação do equipamento e de Silva (2006), tem-se que os valores encontrados para a resistência do concreto das vigas sinistradas são 10,7 % inferiores aos valores de resistência das vigas íntegras.

Os valores de resistências obtidos pelas curvas do equipamento e por Silva (2006) divergem do f_{ck} (resistência característica à compressão do concreto) de 18 MPa, estabelecido nos projetos das estruturas em análise. Os valores de resistências obtidos pelo IE para as vigas sinistradas são 33,3 % inferiores ao estabelecido em projeto, já para as vigas íntegras esse percentual é de 25,9 %.

Segundo Alves (2017) ensaios de esclerometria em estruturas muito antigas apresentam variações consideráveis o que dificulta uma boa avaliação devido à possível degradação do concreto.

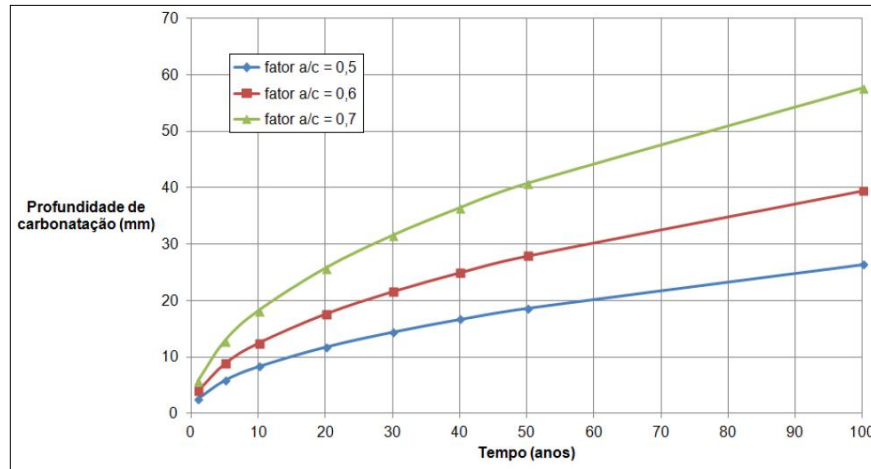
Dos fatores influenciadores citados anteriormente, associou-se a carbonatação como justificativa para um IE tão elevado. A carbonatação apresenta nas superfícies de concreto um considerável incremento no valor do índice esclerométrico, sendo que em concretos com idade superior a 3 meses a influência da carbonatação pode ser significativa, e a camada superficial deixa de ser representativa do concreto no interior da peça. (EVANGELISTA, 2002; PALACIOS, 2012).

A formação da carbonatação se dá através da reação do dióxido de carbono presente na atmosfera com o hidróxido de cálcio, presente no interior do concreto. O resultado desta reação é a formação de carbonato de cálcio, redução do pH do concreto e à conseqüente perda da película passivadora que protege as armaduras. Com a perda dessa proteção as armaduras estarão sujeitas à ocorrência de oxidação caso haja a presença de oxigênio e água. (ROCHA, 2015).

Se a carbonatação não atingisse a camada de cobrimento das armaduras ela seria benéfica para o concreto, pois aumentaria sua resistência superficial, visto que os produtos da carbonatação preenchem os poros das regiões afetadas. (SANTOS, 2015).

Para estimar a profundidade de carbonatação das estruturas em estudo foi adotado o modelo (Figura 7) apresentado por Rocha em 2015, sendo que este baseou-se nos cálculos expostos por Vesikari (1988).

Figura 7 - Profundidade de carbonatação ao longo do tempo



Fonte: ROCHA, 2015.

Considerando a estrutura em estudo com idade mínima de 36 anos e uma relação a/c de 0,7 tem-se que a profundidade de carbonatação é de aproximadamente 35 mm. Levando em consideração que o projeto estrutural da edificação foi baseado nas diretrizes da NBR 6118:1980 o cobrimento mínimo para vigas internas de uma edificação era de 20 mm. Todavia não é possível afirmar que a armadura já está sofrendo processo de corrosão, pois há inúmeras variáveis que influenciam no processo de carbonatação do concreto.

Para Possan (2010) a velocidade de avanço da frente de carbonatação é função de uma série de fatores relacionados à composição e ao consumo de cimento, à qualidade e à permeabilidade do concreto (estrutura dos poros) e às condições ambientais, sendo necessária sua consideração na modelagem do fenômeno.

3.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Segundo a NBR 7680:2015 os resultados obtidos através da compressão axial devem ser identificados como $f_{ci,ext,initial}$. Esses resultados devem ser corrigidos pelos coeficientes k_1 a k_4 , e os resultados obtidos após essa correção devem ser identificados como $f_{ci,ext}$.

A Tabela 3 apresenta os valores das resistências para cada testemunho analisado.

Tabela 3 - Valores de resistência à compressão dos testemunhos extraídos

Testemunhos	$f_{ci,ext,initial}$ (MPa)	$f_{ci,ext}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão
T- I (Viga Sinistrada)	22,00	23,30	23,22	± 0,08
T- II (Viga Sinistrada)	22,00	23,14		
T- III (Viga Íntegra)	18,30	19,43	20,16	± 0,73
T- IV (Viga Íntegra)	19,70	20,88		

Fonte: O Autor, 2017.

Esperava-se que houvesse uma diminuição considerável na resistência à compressão dos testemunhos extraídos das vigas sinistradas, já que a temperatura estimada do incêndio pela perícia foi de 660 °C. Entretanto, os testemunhos das vigas sinistradas apresentaram um aumento de resistência quando comparados com os testemunhos das vigas íntegras, aumento este de 13 %.

O que se observou também foi que os testemunhos extraídos da zona sinistrada obtiveram um aumento na resistência de 29 % quando comparados com a resistência característica ($f_{ck} \geq 18$ MPa), encontrada nos projetos. Já os testemunhos das zonas íntegras tiveram um acréscimo de 12%.

Comparando os valores de resistência estimados pelo IE com os valores obtidos pelo ensaio de compressão axial, tem-se que para as vigas sinistradas a resistência obtida pelo IE (11,91 MPa) é 48,7% menor que a resistência encontrada pelo ensaio de compressão axial (23,22 MPa). Para as vigas íntegras essa diferença é de 33,8%. Como já citado anteriormente diversos fatores influenciam o IE, tornando-se assim os resultados de compressão axial mais confiáveis.

Segundo Cánovas (1988 apud LIMA, 2005) a água livre e capilar presentes na pasta de cimento começam a evaporar após a temperatura de 100 °C, retardando o aquecimento do concreto. A evaporação total da água capilar ocorre entre 200 °C e 300 °C, mas ainda não são significativas as alterações na estrutura do cimento hidratado, bem como na resistência do concreto. Todavia, na faixa de 300 °C a 400

°C há uma redução na água de gel do cimento, gerando um considerável decréscimo na resistência e aparecendo as primeiras fissuras superficiais no concreto.

Khan e Abbas (2015 apud ALMEIDA, 2017) descrevem que para temperaturas inferiores a 300 °C ocorre um aumento da resistência, quando comparada à resistência inicial, devido à hidratação tardia do concreto.

Para Lima (2005) e Almeida (2017) o acréscimo da resistência do concreto aquecido em 200 °C pode estar ligado à maturação do concreto de pequena idade ou devido ao aumento das forças de Van der Waals decorrente da maior proximidade das partículas de gel após a evaporação da água livre. Sendo que entre 300 °C e 400 °C inicia-se uma redução acentuada na resistência do concreto, cerca de 20 %, e essa redução é acompanhada por fissuração superficial notoriamente visível. Os autores consideram 600 °C o limite de temperatura para garantir a integridade estrutural de concretos de cimento Portland.

4 ESTIMATIVA DA TEMPERATURA NO CENTRO DA VIGA

A fim de se estimar a temperatura no interior (centro) da peça adotou-se o método analítico para os cálculos de calor transiente, expostos por Çengel (2012), conforme equações abaixo:

$$Biot = Bi = \frac{hL}{k} \quad \text{Eq. 1}$$

$$Fourier = \tau = \frac{\alpha \times t}{L^2} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\theta_{o,parede} = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \quad \text{Eq. 3}$$

As principais considerações para os cálculos de calor transiente foram:

Coeficiente de convecção: $h = 200 \text{ W/m}^2\text{°C}$

Largura: $L = 12,5 \text{ cm}$

Coeficiente de condutividade térmica: $k = 1,4 \text{ W/m°C}$

Difusividade térmica: $\alpha = 6,9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Os valores para tempo de exposição ($t = 3600 \text{ s}$), temperatura inicial e final foram estimados. A temperatura inicial adotada foi uma $T_i = 20 \text{ °C}$ (temperatura ambiente) e a final foi $T_\infty = 660 \text{ °C}$. Sendo esta última adotada em decorrência do que foi constatado como temperatura atingida no incêndio pela perícia realizada.

Substituindo os parâmetros adotados nas equações e interpolando o número de Biot para encontrar os coeficientes λ_1 e A_1 , tem-se que a temperatura estimada atingida no interior da peça (centro) foi de $T_0 \sim 84$ °C. Pelo fato do concreto não ser um material homogêneo e existirem inúmeras variáveis que afetam um incêndio em escala real, essa temperatura é apenas uma hipótese do ocorrido.

Conforme exposto pelas literaturas já citadas, por volta de 84 °C não são significativas as alterações na estrutura de concreto. Para Bazant e Kaplan (1996 apud ALMEIDA, 2017) até temperaturas de 100 °C o concreto convencional de cimento Portland mantém inalteradas as suas propriedades mecânicas.

Como descrito por 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.

5 CONCLUSÕES

O estudo realizado na estrutura sinistrada e íntegra no Paço Municipal Marcos Rovaris na cidade de Criciúma/SC, não apresentou evidências de deterioração do concreto das vigas que estavam no foco do incêndio. Tal conclusão é evidenciada pelos resultados obtidos através dos ensaios realizados, sendo que não foi observada a formação ou a extinção de fases cristalinas com a elevação da temperatura. Tanto os resultados da microestrutura quanto os resultados das propriedades mecânicas seguiram a mesma tendência, não apresentando diferenças relevantes no comparativo entre a estrutura sinistrada e íntegra.

Como este trabalho é um estudo de caso de uma situação real, inúmeros fatores influenciam a interpretação dos resultados. As principais diferenças entre as amostras estão relacionadas com a água de hidratação das mesmas, sendo que alterações nessa fase não são significativas para a deterioração da estrutura.

Como não houve um cuidado na retirada das amostras para os ensaios de caracterização, não é possível afirmar se os resultados obtidos representam a estrutura interna da peça ou as faces externas dos testemunhos extraídos. Entretanto, mesmo com esse descuido, a temperatura sofrida pela estrutura não foi suficiente para diminuir as propriedades mecânicas das mesmas, como pode ser observado nos resultados de compressão axial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

_____. **NBR 7584**: concreto endurecido: avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 7680**: concreto - extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2015.

ALMEIDA, Jacinto Manuel Antunes de. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz**. 2017. 340 f. Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ALVES, Rogêrio. **Resistência mecânica de concreto de cimento portland: correlação de ensaio à compressão axial com esclerometria**. 2017. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) – Curso Universitário Univates, Lageado.

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.

ARAUJO JR., A. G. de; VALE, A. E.; AZEVEDO, A. G. de S. and STRECKER, K.. **Estudo do reaproveitamento do cimento Portland de alta resistência inicial**. 2017, vol.63, n.365, pp.58-64.

EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 219 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

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.

KANÉMA, M. PLIYA, P., NOUMOWÉ, A. GALLIAS, J-L, **Spalling, Thermal, and Hydrous Behavior of Ordinary and High-Strength Concrete Subjected to Elevated Temperature**, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 23, n.7, Technical Papers, pp. 921-931, 2011.

KANOGLU, Mehmet; ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. Porto Alegre: AMGH Ed., 2012. xxii, 902 p.

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.

LORENZON, Andressa. **Análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperaturas.** 2014. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.

OLIVEIRA, Carlos Augusto de Souza. **Avaliação microestrutural e comportamento físico e mecânico de concretos de alto desempenho produzidos com metacaulim.** 2007. 214 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

PALACIOS, Maria Del Pilar Guzman. **Emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão do concreto.** 2012. 165 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília.

PANZERA, T. H. et al. **Propriedades Mecânicas de Materiais Compósitos a Base de Cimento Portland e Resina Epóxi.** 2010, vol.56, n.337, pp.77-82.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ROCHA, Bruno dos Santos. **Manifestações patológicas e avaliação de estruturas de concreto armado.** 2015. 63 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

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

SANTOS, Aleílson Vilas-bôas dos. **Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido a carbonatação.** Revista Especialize online, Salvador, v. 10, 2015.

SILVA, Daiane dos Santos da. **Avaliação estrutural do edifício Jigue da antiga indústria carboquímica catarinense, visando sua reutilização para uma nova ocupação.** 2006. 130 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

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.

TASSO, B. J. D. et al. **Laudo técnico estrutura.** 2015. 24f. IBAPE/SC. Florianópolis.