

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

Isadora Pinho (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) isadorapinho@outlook.com.br, (2) dss@unescc.net

Resumo: O concreto armado tornou a estrutura mais utilizada no Brasil. Portanto, as edificações devem atender aos requisitos de tempo mínimo de resistência ao fogo. Em situações de incêndio, a água presente nos poros do concreto tende a evaporar, aumentando a pressão de vapor dentro dos poros. Essa poro-pressão influencia na ocorrência de deslocamentos explosivos. O concreto de alta resistência apresenta maior sensibilidade as altas temperaturas devido a sua porosidade reduzida, embora as características térmicas sejam semelhantes ao concreto convencional. Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico dos concretos com diferentes resistências (20 e 50 MPa) com a utilização da fibra de aço quando submetidos a elevadas temperaturas (23, 450 e 900 °C). O percentual de fibras escolhido foi de 1% em relação ao volume de concreto. Para a realização dos ensaios de Compressão Axial, Tração por Compressão Diametral, Módulo de Elasticidade, Difração por Raio X (DRX) e Análise Térmica (DSC-TG) foram moldados 108 corpos de prova. A fibra influenciou nos resultados obtidos para os concretos com resistência de 20 MPa. Entretanto, para os concretos com resistência de 50 MPa a fibra não influenciou nos resultados.

Palavras-chave: concreto; fibras de aço; elevadas temperaturas; propriedades mecânicas.

Analysis of thermomechanical behavior of concrete strengthened with steel fibers

Abstract: Reinforced concrete has become the most used structure in Brazil. Therefore, buildings must meet the minimum fire resistance time requirements. In fire conditions, the water present in the pores tends to evaporate, increasing the vapor pressure within the pores. This pore pressure influences the occurrence of explosive slippage. High strength concrete has higher sensitivity at high temperatures due to its reduced porosity, although the thermal characteristics are similar to conventional concrete. Given this context, the present study aims to evaluate the mechanical performance of concretes with different strengths (20 and 50 MPa) with the use of steel fiber when subjected to high temperatures (23, 450 and 900 °C). The fiber percentage chosen was 1% in relation to the concrete volume. To perform the Axial Compression, Tensile Compression Tensile, Elasticity Module, X-Ray Diffraction (XRD) and Thermal Analysis (DSC-TG) tests, 108 specimens were molded. The fiber influenced the results obtained for concretes with resistance of 20 MPa. However, for concretes with 50 MPa strength, the fiber did not influence the results.

Key-words: concrete; steel fibers; high temperature; mechanical properties.

Introdução

O concreto conquistou grande espaço nas construções brasileiras, sendo o concreto armado a estrutura mais utilizada. Isso se deve ao fato do concreto armado possuir grande resistência a compressão e a tração, assim como apresenta características satisfatórias, como durabilidade.

Com a norma NBR 14432: 2001 e NBR 15200: 2012 em vigor, as construções devem atender ao tempo mínimo de resistência ao fogo. As normas descrevem que em situação de incêndio os elementos estruturais devem ter função suporte, a fim de evitar o colapso estrutural e função corta fogo, atendendo requisitos de estanqueidade e isolamento com o intuito de possibilitar: a fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança; a segurança das operações de combate ao incêndio e minimização de danos a edificações adjacentes e à infraestrutura pública.

Dessa forma, em situações de sinistro os concretos de alta resistência, que são eficientes à temperatura ambiente são capazes de apresentar um desempenho não satisfatório em relação aos concretos tradicionais a altas temperaturas. (MAJORANA et al, 2003, apud LIMA, 2005).

Quando ocorre um acréscimo na temperatura, a água presente nos poros do concreto tende a evaporar, gerando um aumento na pressão de vapor dentro dos poros. A poro-pressão que se desenvolve com a expansão da água, devido à mudança da fase líquida para gasosa, contribui para a ocorrência de deslocamentos explosivos (*SPALLING*). (LIMA, 2005).

Embora as características térmicas de um concreto de alta resistência sejam semelhantes aos de um concreto convencional, este material possui uma maior sensibilidade às altas temperaturas devido à sua porosidade reduzida, apresentando uma maior perda relativa das propriedades mecânicas e a ocorrência do lascamento explosivo na faixa de temperatura entre 100 °C e 400 °C. (CASTRO; TIBA; PANDOLFELLI, 2011).

Com a elevada temperatura a peça estrutural sofre variações volumétricas, gerando altas tensões internas provocando as fissuras e lascamentos (*SPALLING*) que podem ser explosivos. As consequências desse processo são perdas de seção, redução na resistência e no módulo de elasticidade dos materiais, perda de rigidez da estrutura podendo levar as peças estruturais à ruína. (COSTA et al., 2002).

Segundo Costa et al (2002) entre 4 e 80°C, os produtos de hidratação do cimento Portland comum permanecem quimicamente estáveis. As alterações na pasta de cimento são essencialmente físicas como: porosidade, crescimento de fissuras e energia de superfície. A água absorvida pelo concreto endurecido em virtude do ambiente é evaporada entre 65 °C e 80 °C e a água livre nos interstícios do concreto, entre 80 °C e 100 °C.

Segundo Castellote et al (2003, apud LIMA, 2005) entre 80°C e 200°C ocorre o aumento da taxa de perda d'água capilar e fisicamente combinada. Entre 80°C e 850°C ocorre a perda da água quimicamente combinada. Aos 150°C incide o pico do primeiro estágio de decomposição do C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Após 300°C ocorre o aumento da porosidade e microfissuras. Aos 350°C ocorre a decomposição de alguns tipos de agregados. Aos 374°C ocorre o ponto crítico da água, acima do qual não existe água livre. Entre 400°C e 600°C ocorre a dissociação do C-S-H em CaO e água. Aos 573°C ocorre a transformação da fase de α para β dos agregados quartzosos e ligeira expansão. Entre 550°C e 600°C ocorre o aumento dos efeitos térmicos. Após os 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 $\beta\text{-CS}$. Aos 800°C acontece as modificações das ligações químicas, com substituição da estrutura hidráulica por uma estrutura cerâmica. Aos 1060°C começa o derretimento de alguns constituintes.

Liang Li et al. (2019) obtiveram resultados que indicam que quando o concreto simples sem adição de fibras atinge 400 °C a resistência à compressão mantém cerca de 88% em comparação a temperatura ambiente. Isto indica que a estrutura e composição interna não sofrem mudanças significativas. No entanto, quando a temperatura excede 400 °C, a resistência à compressão do concreto diminui bruscamente com o aumento da temperatura. Quando a temperatura atinge 800 °C, a quase totalidade da resistência do concreto fora perdida.

No entanto, a exposição a elevadas temperaturas pode comprometer a resistência do elemento, devido ao deslocamento de grandes porções de concreto, expondo a armadura e diminuindo a sua capacidade estrutural devido a respectiva redução de seção transversal. (BRITTEZ, 2011).

Segundo estudos do Liang Li et al. (2019) a combinação de uma matriz cimentícia e um reforço que consiste em fibras de aço distribuídos aleatoriamente na matriz, possui boa dureza e elevada resistência à tração, melhorando a baixa resistência à tração e a fragilidade.

Como já apresentado, para Liang Li et al. (2019), o efeito da fibra de aço é diferente para temperaturas desiguais. Em torno de 400 °C, o aspecto positivo destes mecanismos é dominante, e, em seguida, um aumento na resistência aparente aparece. Com o aumento da temperatura, especialmente superior a 600 °C, devido à decomposição significativa de CSH, bem como a deterioração da fibra e a ligação entre a matriz e fibra, o efeito de degradação é maior do que o efeito de reforço, o que resulta numa diminuição crítica da força.

O presente trabalho tem como objetivo comparar e analisar as propriedades mecânicas, por meio de ensaios referentes a tração, compressão e módulo de elasticidade e propriedades químicas através dos ensaios de DRX e DSC/TG dos concretos de classe C50 e C20 com e sem a adição de 1% de fibras de aço distribuídos de forma aleatória na matriz cimentícia, submetidos a elevadas temperaturas, sendo de 23, 450 e 900 °C.

Materiais e métodos

Este estudo teve como finalidade analisar as propriedades dos concretos com adição de fibras de aço em sua composição, sendo o conjunto submetido a altas temperaturas. A Figura 1 ilustra o fluxograma.

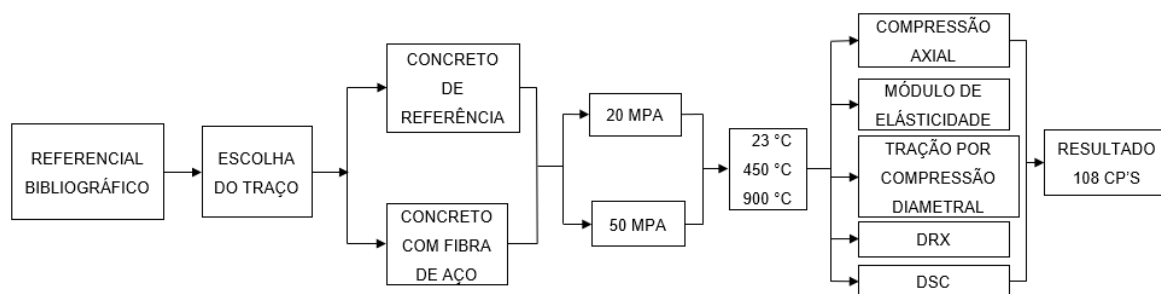


Figura 1. Fluxograma

Foram moldados 108 corpos de prova, sendo que a cada 27 corpos de prova constituiu um grupo com diferentes características, formando assim 4 grupos. Dessa forma foram moldados dois grupos referência sem adição de fibras e com a variação da resistência a compressão (f_c) em 20 e 50 MPa. Posteriormente, para cada f_c (20 e 50 MPa) foram moldados outros dois grupos com adição de 1% de fibra de aço.

O concreto foi produzido e moldado no laboratório de Materiais de Construção Civil e os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório Experimental de Estruturas, Laboratório de Valorização, Laboratório de Cerâmica e Centro de Caracterização de Materiais, situados no I-parque da UNESC. Para essa pesquisa foram realizados dois traços com o intuito de atingir a resistência de 20 e 50 MPa. Os traços referência para a concretagem dos corpos de prova foram 1:3,4:3,6 com relação água/cimento de 0,59 e 1:1,2:1,8, com relação água/cimento de 0,39 para os traços de 20 e 50 MPa respectivamente. As fibras de aço foram inseridas na betoneira aos poucos, para que não ocorressem ninhos de concretagem por má distribuição das fibras. As fibras utilizadas apresentam revestimento de cobre e superfície lisa. A Tabela 1 ilustra a quantidade de materiais necessários para cada traço.

Tabela 1. Quantidade de materiais para cada amostra

Material	Traço 20 MPa (kg)	Traço 50 MPa (kg)
Cimento	11,76	22,72
Brita	42,34	40,90
Areia	39,98	27,26
Água	6,94	8,86
Fibra de aço	0,424	0,424
Quantidade de CP's	27	27

Para a confecção dos corpos de prova os materiais foram secos de acordo com a NBR 9939:2011 e foi admitido um slump de no máximo 10 cm com variações para mais ou para menos de 2 cm. A betoneira utilizada foi de 400 L de capacidade, sendo que o adensamento manual e a moldagem realizada atenderam a NBR 5738:2015. Os 108 corpos de prova possuem dimensões de 10 x 20 cm, onde as características dos materiais empregados se encontram na Tabela 2.

Tabela 2. Características dos materiais

Material	Tipo	Dimensão máxima característica (mm)	Densidade g/cm ³
Cimento	CP IV-32	-	2,82
Agregado graúdo	Brita	19	2,83
Agregado miúdo	Areia media	6,3	2,54
Fibra	Aço	Ø 0,21 x 13	8,88

Portanto, após a moldagem e o aguardo de 48 h o material foi desmoldado e ficou submerso em cura durante 28 dias em um tanque com água. Após esse período, os corpos de prova foram retirados do tanque e permaneceram por 60 dias em temperatura ambiente, até completar a idade de 90 dias para a estabilização da resistência. Posteriormente aos 90 dias de concretagem, os corpos de prova foram aquecidos a três temperaturas distintas: 23, 450 e 900 °C. A taxa de aquecimento utilizada foi de 3 °C min⁻¹, recomendada por Rilem (2000 apud SILVA, 2009), até atingir a temperatura planejada com patamar de 30 min. Os corpos de prova foram resfriados de maneira natural após 24 h na mufla desligada. O equipamento usado foi um forno mufla CT095 com capacidade de aquecimento de até 1200 °C e dimensões internas de 500 x 470 x 500 mm.

Para o ensaio de compressão axial foram usados 3 corpos de prova para cada nível de temperatura. O ensaio foi realizado de acordo com as orientações da NBR 5739:2018. De acordo com a norma, o carregamento deve cessar quando ocorrer uma queda de força que indique a ruptura do corpo de prova. O equipamento usado foi a prensa hidráulica modelo PC200I da marca EMIC, sendo monitorada por computador com uma célula de carga com a capacidade máxima de 2000 kN.

A determinação do módulo de elasticidade seguiu as diretrizes descritas na NBR 8522:2017, que sugere a medição da deformação dos corpos de prova por dois extensômetros eletrônicos fixos à prensa. Para a execução do módulo de elasticidade foram utilizados três corpos de prova por nível de temperatura, totalizando 9 corpos de prova por traço.

O ensaio de tração por compressão diametral foi executado seguindo a NBR 7222:2011, na qual, foram utilizados três corpos de prova por nível de temperatura, totalizando 9 corpos de prova por traço. O equipamento usado foi a prensa hidráulica modelo PC200I da marca EMIC, com uma célula de carga com máxima capacidade de 2000 kN, monitorado por computador. A carga de compressão foi aplicada na prensa hidráulica até o momento de ruptura do corpo de prova no plano vertical diametral.

A difração de raio X (DRX) teve como finalidade identificar na microestrutura as modificações, oriundas da elevação da temperatura, nas fases cristalinas presentes nas amostras, por meio de picos provocados na difração dos raios produzidos pelos átomos característicos do mineral. O ensaio foi realizado de forma que o material foi fragmentado, moído e peneirado, gerando uma amostra de material fino. O procedimento foi realizado no equipamento Shimadzu Lab X, modelo XRD-6000 com ângulo de varredura de 3 a 80° em 2θ e velocidade de 2° min⁻¹.

O ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) identificou as diferentes fases do material em função da elevação da temperatura, avaliando a entalpia e o comportamento exotérmico e endotérmico dos materiais presentes na amostra. Os parâmetros de ensaio foram atmosfera de ar sintético, com temperatura máxima de 1000 °C e taxa de aquecimento de 10 °C/min. O ensaio de Termogravimetria (TG) ocorreu de forma simultânea ao ensaio DSC e sobre as mesmas características.

Os ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade foram analisados através do método estatístico da análise de variância (ANOVA) com nível de confiança de 95%, dessa forma foi possível verificar se existiram diferenças significativas entre as variáveis da pesquisa. Em seguida foi realizado o teste de Tukey, com o intuito de identificar as diferenças entre as médias, assim como foi verificado também a hipótese de homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene. Nos testes e análises realizados foram considerados um nível de significância de 5%.

Resultados e Discussões

A Tabela 3 apresenta os resultados de abatimento de tronco de cone dos concretos produzidos com 20 e 50 MPa com e sem fibra.

Tabela 3. Abatimento do tronco de cone.

Nomenclatura	Abatimento (cm)
20SF	8,0
20CF	1,0
50SF	9,0
50CF	3,0

Os resultados indicam diferenças significativas entre os diferentes traços. Essas diferenças se devem pelo uso da fibra de aço, que como consequência torna o concreto mais coeso, reduzindo sua trabalhabilidade. Segundo Figueiredo (2000), isto ocorre principalmente porque ao se adicionar à fibra ao concreto, está adicionando também uma grande área superficial que demanda água de molhagem. Dessa forma, tem uma menor quantidade de água disponível para a fluidez da mistura.

A Figura 2 demonstra os resultados e composições obtidos através do ensaio de difração de raio X (DRX) realizado para cada traço nas temperaturas estudadas.

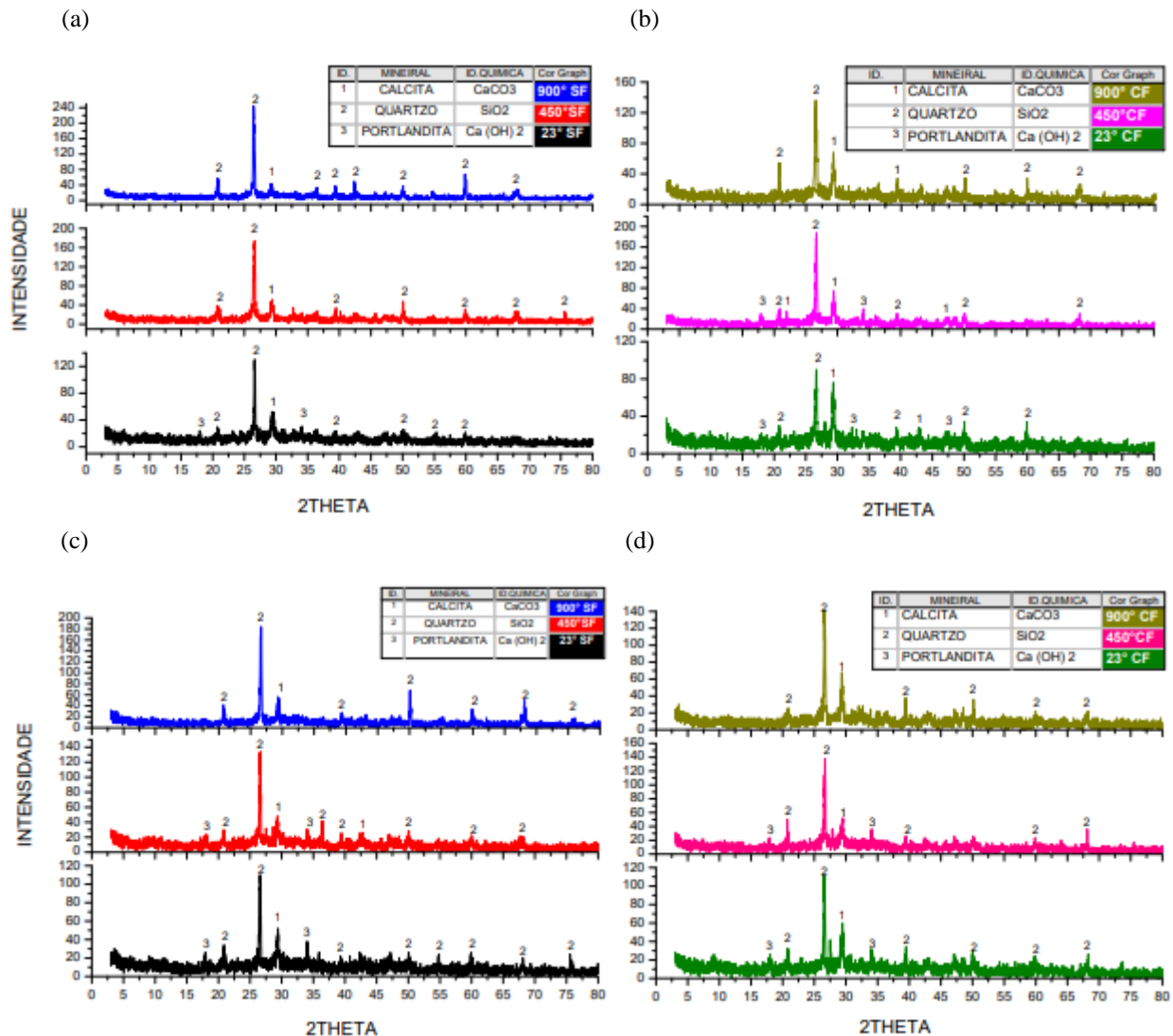


Figura 2. Gráficos de Difração de Raio X (DRX). (a) traços com 20MPa sem fibra, (b) traços com 20 MPa com fibra, (c) traços com 50 MPa sem fibra, (d) traços com 50 MPa com fibra

De acordo com a Figura 2, percebe-se que a portlandita se mostrou estável no traço C20 sem a utilização de fibra apenas na temperatura ambiente, enquanto que com o uso da fibra a portlandita se mostrou presente até 450 °C. Outras fases presentes no C20 são quartzo e calcita.

Para os traços C50, a portlandita se mostrou presente até 450 °C, a calcita e o quartzo se mantiveram em todos os níveis. Analisando a calcita para os traços C20 e C50, observa-se que os picos dos traços com fibra de aço foram mais acentuados em relação aos picos sem adição de fibra.

Segundo os estudos realizados por Lima (2005), a portlandita (CaOH₂) se apresentou estável nas amostras até 400 °C, nas amostras expostas a 600 °C se transformou em óxido de

cálcio (CaO) e desapareceu completamente a 900 °C. A calcita se decompõe em CaO em torno de 800 °C. Sendo que a portlandita e a calcita contribuem para a resistência do concreto.

A Figura 3 demonstra os resultados obtidos para o ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC) realizados para cada traço nas temperaturas estudadas.

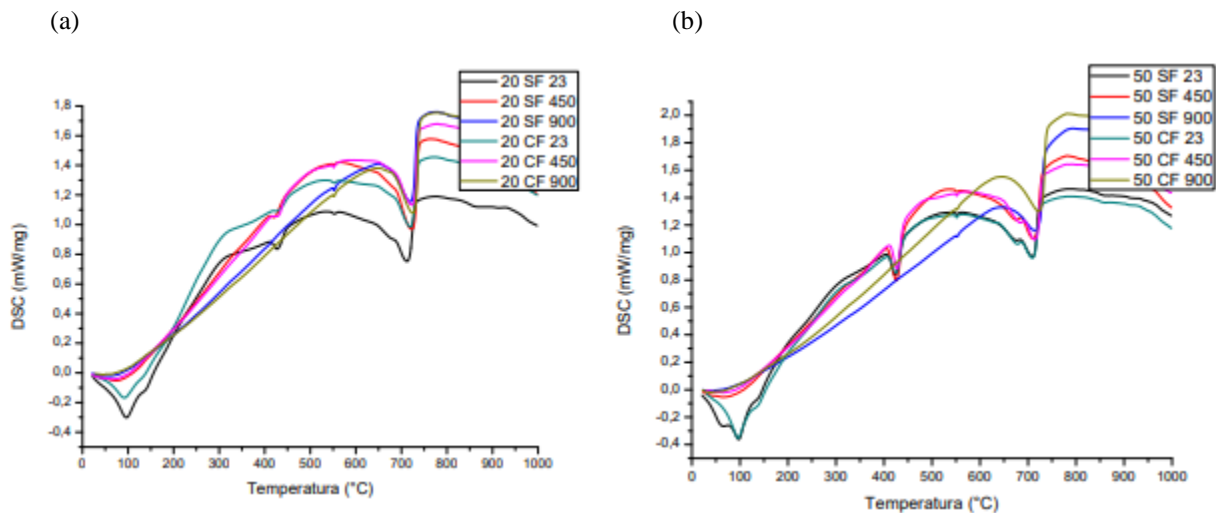


Figura 3. Gráficos de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC). (a) traços com 20MPa, (b) traços com 50MPa

Para este estudo os picos encontrados coincidiram para os traços C20 e C50 com e sem fibra, sendo eles a 96, 427, 550 e 710 °C.

A Figura 3, os picos encontrados na faixa de 100 °C são explicados pelos autores Lima (2005) e Costa (2008), como a decomposição da etringita, paralelamente à perda de água livre no concreto. Desse modo, pode-se observar que os traços submetidos a elevadas temperaturas não apresentam esse pico acentuado a 100 °C, visto que a água livre foi perdida quando aquecidos a 450 e 900 °C.

Segundo Costa (2008), a dissociação do hidróxido de cálcio, ou seja, a desidratação da portlandita ocorre a partir dos 400 °C, sendo que entre 200 e 400 °C ocorre os lascamentos explosivos “SPALLING”. Logo, pode-se observar na Figura 3, os traços com resistência de 20 e 50 MPa que foram submetidos a 900 °C não apresentam essa mudança de fase, visto que a desidratação da portlandita ocorreu durante o aquecimento a elevada temperatura, não sendo demonstrado no DSC.

O terceiro pico demonstrado nos gráficos de calorimetria diferencial de varredura encontra-se aproximadamente a 550 °C. De acordo com Lima (2005), essa mudança de fase

pode ser explicada pelo aumento dos efeitos térmicos, sendo que entre 80 e 850 °C ocorre a perda da água quimicamente combinada.

A partir de temperaturas maiores que 650 °C ocorre a descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3), sendo que a calcita se decompõe em CaO e CO_2 . (FERNANDES et.al, 2017). Na Figura 3, pode-se observar que esse pico ocorreu em torno dos 710 °C.

A Figura 4 demonstra os resultados obtidos para o ensaio termogravimetria (TG) realizados para cada traço nas temperaturas estudadas.

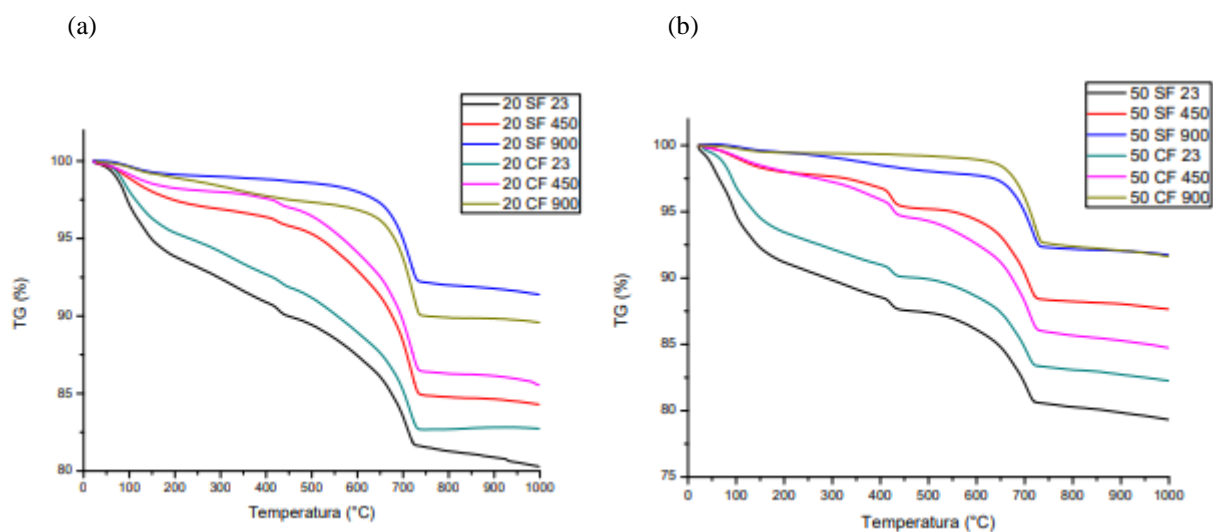


Figura 4. Gráficos de Termogravimetria (TG). (a) traços com 20MPa (Fonte: Autora, 2019), (b) traços com 50MPa (Fonte: Autora, 2019)

Analisando a Figura 4, observa-se que os traços sem fibra e a temperatura ambiente foram os que perderam maior porcentagem de massa, pelo fato de possuírem maior quantidade de água livre. Em seguida, o traço que perdeu maior quantidade de massa foi a temperatura ambiente, porém com o uso da fibra de aço.

Observando o comportamento entre as retas C20 e C50, percebe-se a diferença entre os traços com e sem fibra de temperatura 450 e 900 °C. O traço de 50MPa com fibra à 900 °C perdeu menor quantidade de massa, enquanto que para o traço de 20MPa o traço com menor perda de massa foi o sem fibra. Entretanto, para os traços submetidos a 450 °C ocorreu de forma inversa. Pode-se observar que os traços que obtiveram menor perda de massa foram os submetidos a 900 °C, pelo fato da evaporação da água livre quando foram aquecidos anteriormente.

De acordo com a Figura 4, os picos de perda de massa a 430 °C se deve pela desidratação da portlandita. O segundo pico a 720 °C refere-se a descarbonatação da calcita. Pode-se observar que nas amostras que foram mantidas a temperatura ambiente, houve perda de massa de forma mais significativa na faixa dos 100 °C, justificando a evaporação da água livre nos poros.

A Tabela 4 ilustra os resultados obtidos dos ensaios, quanto a resistência de compressão, tração e módulo de elasticidade.

Tabela 4. Resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade.

Nomenclatura	Resistência à Compressão (MPa)		Resistência à Tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média
	C20 SF – 23°C	2,229	28,68	2,345	12,11	2,886
C20 SF – 450°C	2,992	16,77	1,210	10,32	0,3928	18,40
C20 SF – 900°C	0,9648	11,63	2,775	5,024	0,2510	5,891
C20 CF – 23°C	2,101	21,41	1,205	10,53	1,572	29,77
C20 CF – 450°C	1,923	12,61	0,7882	7,123	1,272	16,23
C20 CF – 900°C	1,732	10,02	0,4186	6,553	0,1396	5,207
C50 SF – 23°C	2,042	59,04	1,329	20,46	2,980	37,29
C50 SF – 450°C	12,71	43,04	0,3436	18,52	2,142	20,06
C50 SF – 900°C	1,748	20,36	0,5329	10,56	0,5577	7,074
C50 CF – 23°C	4,702	46,74	1,930	19,48	2,572	32,15
C50 CF – 450°C	3,705	50,24	0,8887	16,56	0,09821	21,16
C50 CF – 900°C	3,101	25,03	0,9423	11,45	8,524	6,756

Analisando os dados da Tabela 4, verificou-se que para o grupo de resistência característica do concreto de 20 MPa, com fibra e sem fibra, a resistência a compressão, tração e módulo de elasticidade diminuiu no momento que a temperatura se elevou. Enquanto que, para o grupo de resistência de 50 MPa percebe-se essa mesma situação, exceto para amostra de 450 °C com fibra, que teve um ganho de resistência a compressão comparado a temperatura ambiente do mesmo traço.

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos quanto a resistência à compressão dos concretos de 20 e 50 MPa com e sem adição de 1% de fibra.

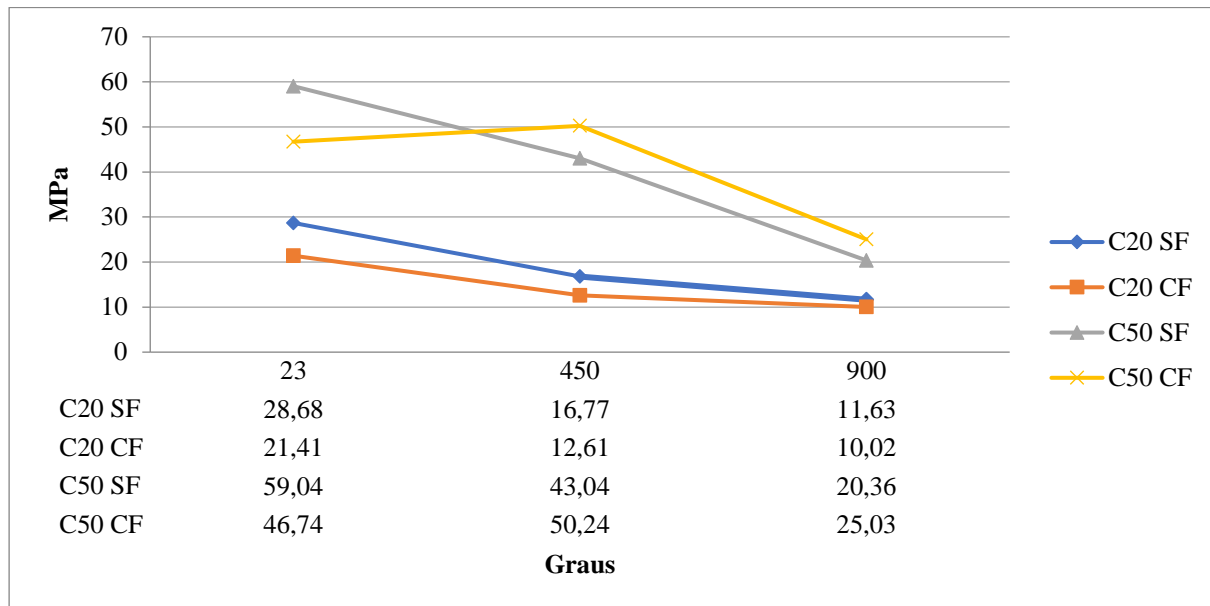


Figura 5. Gráfico de resistência à compressão

Para o traço C20, percebe-se que a resistência à compressão diminui com o uso da fibra em todas as temperaturas, essa redução foi de 23%. De acordo com a análise estatística ANOVA com nível de significância de 5%, analisou-se que houve disparidades entre as médias dos tratamentos à compressão incluídos ao grupo com resistência de 20 MPa, com e sem fibra adicionado a composição. Assim como, observou-se essa diferença entre as temperaturas analisadas. Portanto, as temperaturas e o uso da fibra de aço influenciaram significativamente nos resultados obtidos.

Analisando o traço C50 sem fibra, percebe-se que a resistência a compressão diminui com o aumento da temperatura. Enquanto que com fibra, a resistência aumenta a 450 °C de 43,04 MPa para 50,24 MPa, sendo que o aumento foi de 17%. Em 900 °C, também houve ganho de resistência de 20,36 MPa para 25,03 MPa, o aumento foi de 23%. Porém, os resultados obtidos não foram significativos quanto ao uso das fibras e entre as temperaturas de 23 e 450 °C, entretanto foram significativos em relação as temperaturas entre 450 e 900 °C.

De acordo com Herrmann (2017), o lascamento (*SPALLING*) do concreto exposto ao fogo, pode ser admitida como hipótese para a perda da eficácia das fibras de aço, sendo necessário uma combinação de fibras de aço e poliméricas para melhorar a resistência ao fogo do concreto. No presente estudo os corpos de prova submetidos a elevadas temperaturas não sofreram lascamento, no entanto sofreram esfarelamento.

O Comitê Alemão de Concreto Armado e a Associação Francesa de Engenharia Civil, consideram que o uso da fibra de aço em relação ao aumento da temperatura causa uma perda de resistência semelhante a concretos simples. Entretanto, o Conselho Nacional de Pesquisa da Itália CNR-DT 204/2006, mostra que a baixa porcentagem de fibras de aço não influencia na difusividade térmica. No entanto, as fibras de aço melhoram a resistência residual para concreto exposto a temperaturas superiores a 600 °C. Para o Instituto Americano de Concreto, no relatório ACI 544.5R-10, conclui que o uso de fibras de aço melhora a resistência residual de elementos estruturais de concreto. Além disso, o relatório menciona que as lajes com fibras de aço expostas ao fogo são de três até nove vezes mais resistentes do que lajes sem fibras de aço. (HERRMANN, 2017)

No entanto, esse presente estudo não apresentou melhoras significativas com o uso das fibras de aço em concretos submetidos a elevadas temperaturas, como descreve o Instituto Americano de Concreto no relatório ACI 544.5R-10.

Na Figura 6, ilustra os corpos de prova após o ensaio de compressão axial de 50 MPa com fibra.

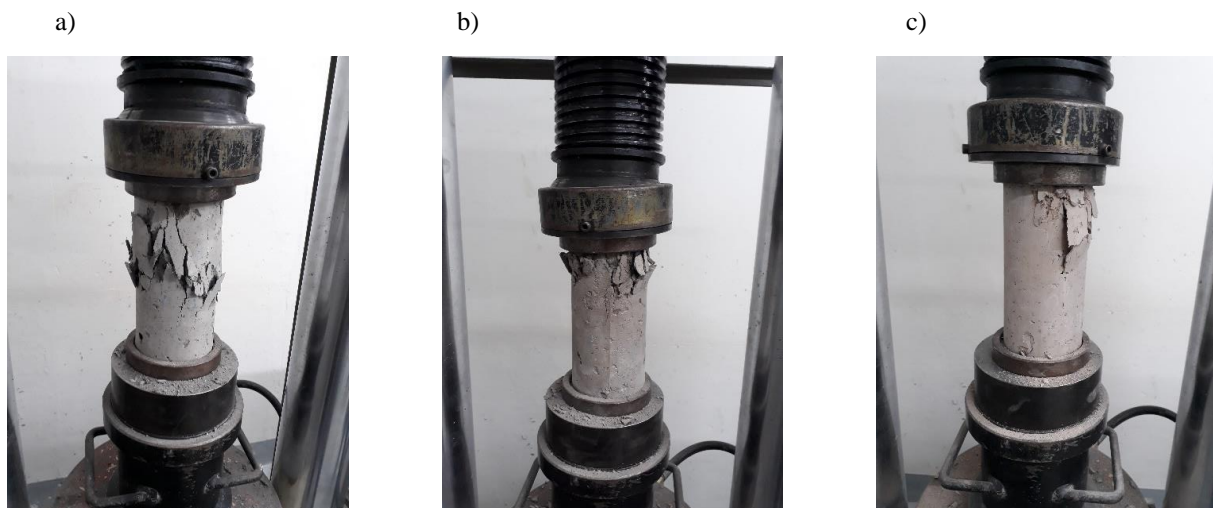


Figura 6. Ensaio de Compressão. (a) 50 MPa com fibra 23 °C, (b) 50 MPa com fibra 450 °C, (c) 50 MPa com fibra 900 °C

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos quanto a resistência à tração por compressão diametral dos concretos de 20 e 50 MPa com e sem adição de 1% de fibra.

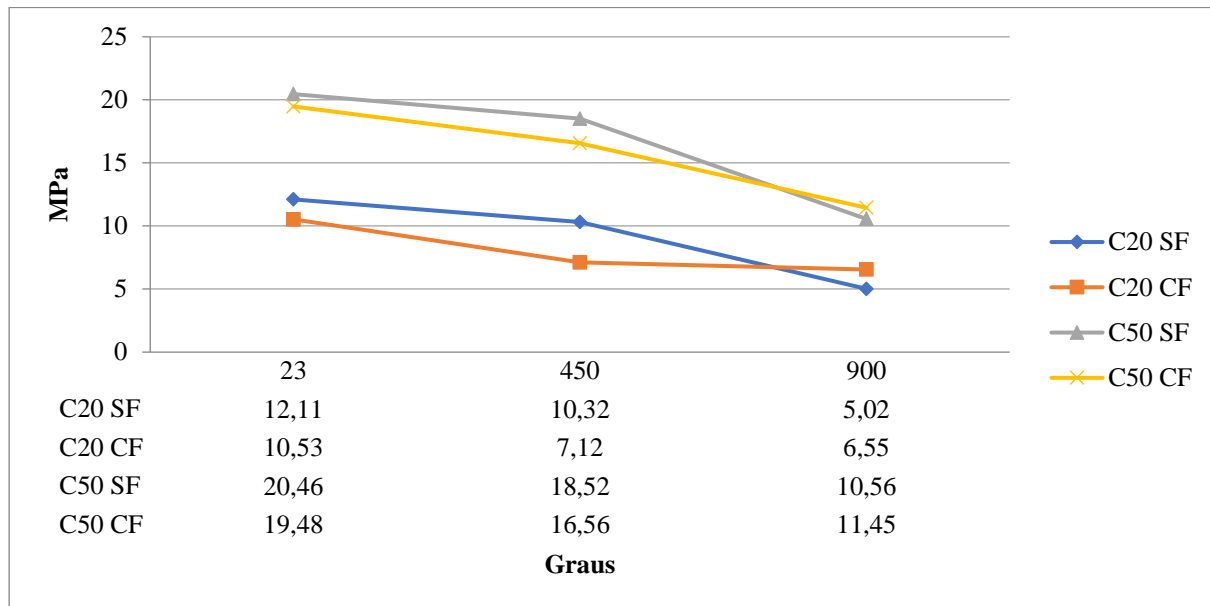


Figura 7. Gráfico de resistência à tração por compressão diametral

Em relação a resistência à tração, o traço C20 sem adição de fibra apresenta redução gradativa com o aumento da temperatura. Enquanto que a 900 °C e com adição de fibra a resistência aumenta de 5,02 MPa para 6,55 MPa, sendo esse aumento de 30% em relação ao referencial. Portanto, as temperaturas e o uso da fibra de aço influenciaram significativamente nos resultados obtidos.

Para o traço C50, observa-se o mesmo comportamento do traço C20. A 900 °C o traço C50 com fibra apresenta um aumento de 8% em relação ao traço sem adição das fibras de aço. Porém, os resultados obtidos não foram significativos quanto ao uso das fibras, entretanto foram significativos em relação as temperaturas.

Segundo estudos realizados por Bezerra (2012), os concretos reforçados com as fibras e submetidos a elevadas temperaturas apresentaram resistência à tração na compressão diametral superior ao concreto de referência sem fibras. No entanto, no presente estudo não mostrou melhoras significativas quanto ao uso da fibra em elevadas temperaturas no traço C50, porém no traço C20 a 900 °C demonstrou melhora em relação ao referencial.

Para Lima (2005), a adição de fibra de aço foi eficiente para controlar danos até 400 °C, mas não foi efetiva em 800 °C, devido à perda de aderência entre as fibras e a matriz. A adição de fibras nos corpos de prova a temperatura ambiente criou problemas de trabalhabilidade e causou a incorporação de ar, sendo este o responsável pela redução na resistência dos concretos reforçados com fibra de aço, se comparados aos concretos sem fibra.

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos quanto ao módulo de elasticidade dos concretos de 20 e 50 MPa com e sem adição de 1% de fibra.

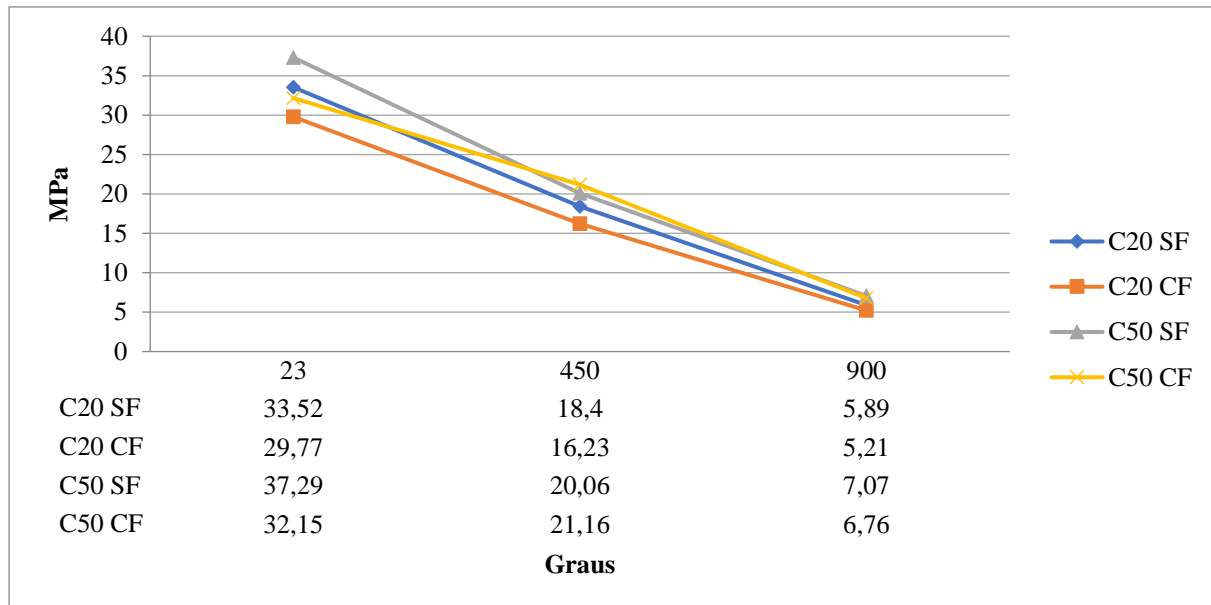


Figura 8. Gráfico de módulo de elasticidade

Analisando o traço C20, percebe-se que o módulo de elasticidade diminui com o aumento da temperatura. A utilização da fibra de aço contribuiu para a redução do módulo de elasticidade, assim como a influência da temperatura. Portanto, as temperaturas e o uso da fibra de aço influenciaram significativamente nos resultados obtidos.

Para o traço C50, observa-se que o módulo de elasticidade diminui com o aumento da temperatura, exceto no traço com fibra na temperatura de 450 °C que houve um aumento de 5,5% em relação ao referencial. Porém, os resultados obtidos não foram significativos quanto ao uso das fibras, entretanto foram significativos em relação as temperaturas.

As fibras de aço adicionadas ao concreto, dificultam a propagação das fissuras devido ao seu elevado módulo de elasticidade e permitem uma redistribuição de esforços mesmo quando utilizada em baixos teores. (FIGUEIREDO, 1997, apud FIGUEIREDO, 2000)

De acordo com estudos realizados por Bezerra (2012), os concretos reforçados com fibras curtas de aço e a temperatura ambiente apresentam módulo de elasticidade levemente inferior ao concreto referência. Esse fenômeno ocorre devido ao aumento de interfaces ocorrido pela adição das fibras. Enquanto que, os concretos submetidos a altas temperaturas e reforçado com fibras curtas de aço apresentaram módulo de elasticidade levemente superior ao concreto referência.

Segundo Lima (2005), a redução da resistência a compressão e do módulo de elasticidade entre 400 e 600 °C pode estar associada a desidratação da portlandita e a decomposição dos silicatos de cálcio e magnésio.

Conclusão

Pode-se concluir de acordo com os resultados apresentados nesse estudo, que a fibra de aço influencia significativamente em todos os ensaios mecânicos do concreto de 20 MPa. Em relação ao módulo de elasticidade e a resistência à compressão, a fibra reduz a resistência quando submetido a elevadas temperaturas e na temperatura ambiente. Já para a resistência à tração, a fibra de aço aumenta a resistência no patamar de 900 °C.

Para os ensaios mecânicos do concreto de 50 MPa, a fibra de aço não influencia nos resultados obtidos em nenhum dos casos abordados. Os resultados encontrados foram influenciados apenas pela temperatura.

Pela análise ANOVA, percebe-se que a temperatura influencia de forma significativa nos resultados obtidos quanto a Compressão Axial, Tração por Compressão Diametral e Módulo de Elasticidade para os concretos de 20 e 50 MPa.

No ensaio de TG, os traços com menor perda de massa consistem nos traços submetidos a 900 °C, enquanto que os traços a temperatura ambiente perdem maior quantidade de massa.

No ensaio de DRX, os resultados obtidos mostram que a portlandita se mostra presente até 450 °C no concreto com 50 MPa com e sem fibra e no concreto de 20 MPa com fibra. Sendo que o traço C20 sem fibra apresenta portlandita apenas na temperatura ambiente.

Tendo em vista as discordâncias entre o Comitê Alemão de Concreto Armado, a Associação Francesa de Engenharia Civil, Conselho Nacional de Pesquisa da Itália e Instituto Americano de Concreto fica evidente que não existe consenso no meio técnico sobre a utilização da fibra de aço em concretos expostos ao fogo. Conclui-se que esse assunto necessita de estudos para comprovar a eficiência do uso da fibra de aço.

Citações e referências

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9939**: Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012. 48 p.

BEZERRA, Augusto Cesar da Silva. **Concreto com fibras curtas de aço submetido à alta temperatura**. 2012. 129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012

BRITEZ, Carlos Amado. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas**. 2011. 252 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/TD29.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2019.

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, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v57n341/v57n341a03.pdf>>. Acesso em: 6 abr. 2019.

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. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008. 724f. Tese (Doutorado em engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.

FERNANDES, B. et al. Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. **Ibracon**, v. 10, n. 4, p.838-863, ago. 2017.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto com fibras de aço**. 2000. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 256 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

HERRMANN, Frank Dehn Annemarie. Steel fibre-reinforced concrete (SFRC) in fire – normative and pre-normative requirements and code-type regulations. **Concreto & Construções: Ibracon**, São Paulo, v. 1, n. 87, p.108-112, jul. 2017. Disponível em: <http://ibracon.org.br/site_revista/concreto_construcoes/pdfs/revista87.pdf#page=108>. Acesso em: 27 nov. 2019.

LIANG, L. et al. Experimental study on dynamic compressive behavior of steel fiber reinforced concrete at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 210, p.673-684, 2019.

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

SILVA, D. S. **Propriedades mecânicas residuais pós incêndio de concreto usado na construção civil na grande Florianópolis**. 2009. 102 f. Dissertação (Pós-graduação em engenharia civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia de Estruturas, Santa Catarina.