

Análise do concreto de alta resistência (CAR) com adição de fibras de politereftalato de etileno (PET) submetido a altas temperaturas

Analysis of high strength concrete (CAR) with added polyethylene terephthalate (PET) fibers submitted to high temperatures

DOI:10.34117/bjdv7n12-352

Recebimento dos originais: 12/11/2021

Aceitação para publicação: 10/12/2021

Milena Fabiani Pinto

Mestranda e Engenheira Civil
UNC, Rua Victor Sopelsa, nº 3000 – Salete, Concórdia, SC.
E-mail: milenafabiani@outlook.com

Cristina Vitorino da Silva

Dra. Engenheira Civil
Uri Campus II, RS 331, Erechim – RS
E-mail: cristina@uricer.edu.br

Andressa Panizzon

Mestranda e Engenheira Civil
UNC, Rua Victor Sopelsa, nº 3000 – Salete, Concórdia, SC.
E-mail: andypanizzon@gmail.com

RESUMO

O concreto de alta resistência (CAR) apresenta uma microestrutura mais densa, devido à baixa relação água/cimento, presença de adições minerais e elevado consumo de cimento, dessa forma, sua matriz torna-se menos permeável e mais resistente. Essas particularidades que o fazem tão vantajoso também trazem prejuízos, uma vez que o concreto torna-se mais suscetível ao desenvolvimento de fissuração frágil se comparado ao concreto convencional. Quando exposto a altas temperaturas, o compósito tende a sofrer alterações físicas, químicas e mecânicas que comprometem a estabilidade e a resistência mecânica dos elementos estruturais. Nesse contexto, será agregado ao CAR (fck de 55 MPa), fibras de Politereftalato de Etileno (PET), com o intuito de retardar o risco de colapso da estrutura pela formação de uma rede de canais que facilitam a fuga do vapor d'água, reduzindo a poro-pressão no interior do elemento estrutural. Através do ensaio de resistência à compressão de corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas e tempos de exposição, sem e com adição (teor fixo de 0,5 %), concluiu-se que o valor da resistência à compressão do concreto decresce a medida que ocorre aumento da temperatura e do tempo de exposição. Por outro lado, a adição elimina os danos apresentados pelos CP's sem fibra nos corpos de prova sujeitos a 400 °C e 800 °C, indicando que o derretimento do PET aumentou a porosidade do material e minimizou os danos causados pela poro-pressão, sendo uma alternativa eficiente para redução do fenômeno spalling, além de contribuir para o reaproveitamento de resíduos por meio da redução do descarte inadequado deste material que ocasionaria impactos ambientais.

Palavras chave: Concreto de Alta Resistência, spalling, Fibras de Politereftalato de Etileno.

ABSTRACT

High-strength concrete (HDC) presents a denser microstructure, due to the low water/cement ratio, the presence of mineral additions and high cement consumption, thus, its matrix becomes less permeable and more resistant. These particularities that make it so advantageous also bring losses, since the concrete becomes more susceptible to the development of brittle cracking if compared to conventional concrete. When exposed to high temperatures, the composite tends to suffer physical, chemical, and mechanical changes that compromise the stability and mechanical strength of structural elements. In this context, polyethylene terephthalate (PET) fibers will be added to the SCC (fck 55 MPa), in order to delay the risk of collapse of the structure by forming a network of channels that facilitate the escape of water vapor, reducing pore pressure inside the structural element. Through the compressive strength test of specimens submitted to different temperatures and exposure times, with and without addition (fixed content of 0.5%), it was concluded that the value of the compressive strength of concrete decreases as the temperature and exposure time increase. On the other hand, the addition eliminates the damage presented by the specimens without fiber at 400 °C and 800 °C, indicating that the melting of PET increased the porosity of the material and minimized the damage caused by pore pressure, being an efficient alternative to reduce the spalling phenomenon, besides contributing to the reuse of waste by reducing the improper disposal of this material that would cause environmental impacts.

Keywords: High Strength Concrete, spalling, Polyethylene terephthalate fibers.

1 INTRODUÇÃO

O concreto como material estrutural veio paulatinamente desenvolvendo-se até tornar-se o produto mais consumido pela construção civil. As vantagens associadas ao uso do material bem como a facilidade de adaptação a diferentes ambientes e situações, tornam o produto atrativo ao consumo. Dentre suas principais propriedades pode-se destacar a versatilidade, durabilidade e capacidade de desempenho, responsável pela garantia da vida útil dos elementos.

Ainda que a maior parte das obras utilize concretos de resistências convencionais, alterações nas dosagens são feitas para a produção de características especiais, voltadas para novas tecnologias no concreto. A incorporação seja de aditivos, adições minerais, fibras ou técnicas diferenciadas, permitiu o surgimento de concretos designados por Isaia (2011), de “última geração”.

Estes concretos passaram a ser denominados de Concretos de Alta Resistência (CAR), pois as vantagens oferecidas por estes materiais iam muito além de uma elevada resistência à compressão, uma vez que são dotados de um comportamento adequado quanto à durabilidade, resistência à abrasão e ao impacto, resistência à corrosão química e mecânica, apresentando ainda baixa retração e fluência, bem como ausência de segregação e exsudação, entre outras propriedades atraentes (LIMA, 2005).

De acordo com Isaia (2011), para se obter um Concreto de Alta Resistência é preciso incorporar aditivos químicos, adições minerais e agregados de melhor qualidade ao concreto convencional, além de se observar as normas em vigência para garantir segurança ao usuário e economia, de modo que se previnam ou adiem as intervenções de correção e/ou manutenção nas edificações.

No entanto, a ocorrência de uma catástrofe natural é imprevisível, e dependendo do grau de intensidade do incidente afeta significativamente a vida útil de uma edificação. Essa interferência, geralmente devido a brusca solicitação imposta, pode ocorrer em maior ou menor escala dependendo das condições iniciais da estrutura da edificação. Como exemplos dessas ocorrências podem ser citados os incêndios, as inundações, os sismos e a ação do vento. No Brasil, os acidentes mais comuns e mais graves são devidos a ação do vento e aos incêndios (SOUZA; RIPPER, 1998).

Desde o início dos anos 90, muitos pesquisadores e profissionais passaram a levantar questionamentos sobre o comportamento do Concreto de Alta Resistência na situação de um incêndio, justamente em função da microestrutura muito compacta, que dificulta a liberação do vapor e, conseqüentemente, o alívio de pressão (LIMA, 2005).

Sob efeito de condições térmicas extremas, a alta densidade e baixo volume de vazios tornam a matriz densificada, o que colabora para o aumento da sensibilidade do material. Se a permeabilidade da pasta de cimento for baixa e a taxa de aquecimento for elevada, a presença de grande quantidade de água evaporável presente na matriz pode causar danos ao concreto. Estes danos manifestam-se sob a forma de lascamentos superficiais, ocasionados pela pressão de vapor formada no interior do material (MENESES, 2011).

A busca de materiais que, quando adicionados ao concreto, proporcionem melhorias em propriedades específicas vem sendo amplamente pesquisada nas últimas décadas. Como por exemplo o uso das fibras para correção dos efeitos causados no concreto exposto as altas temperaturas. De acordo com Nince (2006), o uso de fibras de baixo ponto de fusão diminui o risco de lascamento do concreto através da formação de uma rede de vazios e canais que permitem a dissipação da pressão de vapor, diminuindo, conseqüentemente as tensões de tração internas.

Sob essa perspectiva, espera-se que o Concreto de Alta Resistência associado a adição de fibra de PET, seja capaz de contribuir para o reaproveitamento de resíduos e reduzir os impactos ambientais causados pelo descarte indevido do PET pós-consumo; bem como minimize os efeitos de lascamento explosivo (*spalling*), colaborando para a segurança estrutural dos elementos expostos a altas temperaturas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A utilização do concreto enquanto material estrutural deve-se a suas propriedades mecânicas, principalmente pela resistência à compressão, parâmetro que serve de

referência para sua classificação. Tão eficiente à temperatura ambiente, o CAR pode apresentar um desempenho inferior na comparação com os concretos tradicionais quando submetidos a altas temperaturas.

A principal característica responsável pelo comportamento do CAR perante condições térmicas extremas, é a sua matriz compacta. A justificativa para esta suposição fundamenta-se no acréscimo de pressão que acontece dentro dos poros do concreto, em função da evaporação da água presente na matriz cimentícia com o calor, e às tensões geradas nos materiais constituintes pelos gradientes de deformações térmicas (LIMA, 2005).

A deficiência dos concretos de alta resistência, sob o ponto de vista do incêndio, é uma motivação para estudos e descobertas de novas adições que minimizem ou neutralizem essas imperfeições do material. Figueiredo (2005) expôs em seu estudo que a adição de fibras em uma matriz cimentícia pode ocasionar pelo menos dois efeitos importantes nesse sentido. O primeiro relaciona-se com o reforço do compósito sobre os carregamentos de tração, sejam de tração indireta, flexão ou cisalhamento e, secundariamente, as fibras atuam no sentido de melhorar a ductilidade e tenacidade de uma matriz com características frágeis.

De acordo com Costa. et al. (2002), as pesquisas em torno do assunto têm apresentado como alternativa eficaz a adição de fibras de polipropileno à pasta de cimento, devido ao fato de que, quando a peça estrutural é submetida a aquecimento, as fibras constituintes da matriz derretem e criam sulcos interligados que possibilitam a liberação do vapor d'água. De uma forma geral, o concreto torna-se mais poroso com a fusão de determinadas fibras, aumentando a resistência à tração e reduzindo as fissuras de retração plástica no material.

Em meio a tantos problemas relacionados a sustentabilidade ambiental, é de extrema importância que as pesquisas se voltem à reutilização e diminuição de resíduos. A escolha da fibra de PET como elemento de reforço da matriz do concreto, com a possibilidade de melhorar as propriedades da mesma, torna-se bastante atraente, além de tratar-se de um material reciclável, de baixo custo e abundante no meio. Assim, alia-se o benefício ambiental a uma melhoria de um material importantíssimo nas obras de construção civil.

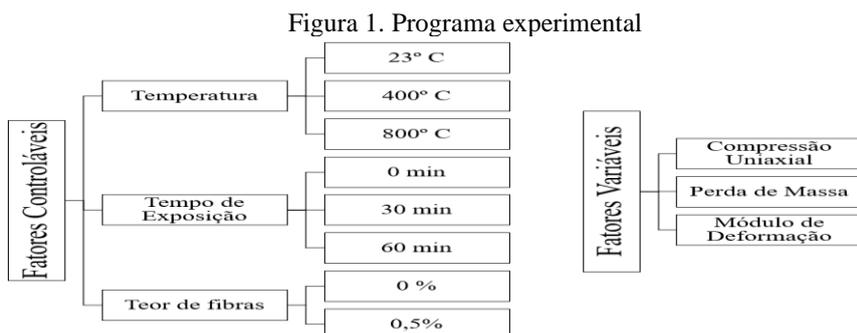
2.1 FISSURAÇÃO E LASCAMENTO DO CONCRETO (*SPALLING*)

As condições térmicas extremas podem provocar deslocamentos no concreto, sendo este fenômeno de lascamento conhecido como *spalling*. Segundo Nince (2006), o fenômeno de lascamento no concreto está relacionado a fatores internos e externos. O primeiro associa-se como a distribuição/tamanho dos poros, relação *a/c*, incompatibilidade térmica entre agregado/pasta, existência de partículas finas e/ou ultrafinas, o grau de hidratação, o grau de saturação, enquanto o segundo relaciona-se como a taxa de aquecimento, temperatura máxima, tempo de exposição, tipo de exposição, umidade do ambiente, carregamento, condições de ensaio, tipo de resfriamento (gradual ou instantâneo), dimensão, espessura, forma do elemento estrutural, e concentração de tensões térmicas desenvolvidas durante o aquecimento, que confluem para as camadas próximas aos cantos do elemento.

Segundo Figueiredo e Nince (2008) os mecanismos encontrados na literatura que tentam explicar o lascamento são três: pressão de vapor nos poros do concreto; tensões térmicas; e tensões térmicas associadas a pressão de vapor nos poros. A ação combinada da pressão de vapor nos poros e das tensões térmicas induz o desenvolvimento de fissuras paralelas à superfície, quando a tensão resultante ultrapassa a resistência à tração. Tudo isto é acompanhado por uma repentina liberação de energia e uma violenta ruptura da superfície exposta. Em suma, Figueiredo e Nince (2008) expõem que a pressão de vapor nos poros, associada as tensões térmicas, ambas influenciadas pelo carregamento externo, agem isoladamente ou combinadas entre si dependendo do tamanho da seção, do tipo de concreto e da umidade.

3 METODOLOGIA

O programa experimental, demonstrado na Fig. 1, foi elaborado de modo que se trabalhasse com fatores controláveis e variáveis para, posteriormente, analisar a influência de cada um deles nas variáveis de resposta.



3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A caracterização dos materiais foi obtida segundo suas respectivas normas, sendo eles:

- a) Cimento tipo CP V – ARI, com massa específica (ρ) de 3,04 g/cm³;
- b) Agregado miúdo é uma areia média de origem quartzosa natural, com dimensão máxima característica igual a 4,75 mm, módulo de finura igual a 2,40 e massa específica (ρ) de 2,50 g/cm³;
- c) Agregado graúdo é de origem basáltica, comumente conhecido como brita 1, com as seguintes características: dimensão máxima característica de 25 mm, módulo de finura igual a 6,94 e massa específica (ρ) correspondente a 2,84 g/cm³;
- d) Aditivo químico é um superplastificante líquido;
- e) Sílica ativa, cuja massa específica (ρ) utilizada é de 2,22 g/cm³.
- f) Fibras de PET com dimensão de aproximadamente 2 mm de espessura e 15 mm de comprimento, e massa específica (ρ) correspondente a 1,38 g/cm³.
- g) Água proveniente do abastecimento local do município de Erechim/RS.

3.2 DOSAGEM EXPERIMENTAL

O método de dosagem utilizado para esta pesquisa foi a do IPT/EPUSP modificado, desenvolvido para Concretos de Alta Resistência, sendo especificado um abatimento de tronco de cone de 130 ± 20 mm e resistência característica à compressão aos 28 dias da ordem de 55 MPa. Os resultados obtidos na dosagem são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Dosagem do concreto

Traço	α	Traço unitário				a/c	Abatimento (mm)	Aditivo (%)	Cimento (Kg/m ³)	H (%)	Resistência a Fcj (MPa)
		c	a	p	sa						
1:2	0,50	0,9	0,50	1,50	0,10	0,20	150	1,28	790,972	0,065	68,70
1:3,5		0,9	1,25	2,25	0,10	0,29	130	0,86	519,251	0,065	63,90
1:5		0,9	2,00	3,00	0,10	0,39	150	0,79	386,483	0,065	65,26

Ambos os traços avaliados na dosagem atenderam a resistência estipulada, no entanto, o traço 1:5 destacou-se dos demais pelo menor consumo de cimento em kg/m³, sendo este o escolhido para confecção dos corpos de prova.

3.3 PROCESSOS DE PRODUÇÃO

Ao completar 28 dias, os CP's foram retirados da cura úmida e mantidos por 72 horas em lugar arejado e protegido de intempéries, para posterior realização dos ensaios de exposição a altas temperaturas. Esse procedimento deve ser feito, principalmente pela influência que a umidade exerce em relação ao efeito *spalling*. Antes de iniciar o aquecimento, os CP's precisaram ser retificados, a fim de garantir confiabilidade aos valores obtidos.

A mufla utilizada para aquecimento é da marca SANCHIS com capacidade térmica de 1200 °C. Adotou-se uma taxa de aquecimento constante de 12 °C/min e, para isso, o equipamento conta com um controlador digital de temperatura microprocessado, além de uma gaiola de proteção confeccionada em tela moeda com abertura de 10 mm de diâmetro espaçada a cada 18 mm, com a função de proteger a integridade da mufla em caso de ruptura dos CP's, além de garantir a homogeneização da temperatura.

Após atingirem as temperaturas de 400 °C e 800 °C, os CP's permaneceram submetidos a essas temperaturas durante intervalos de tempo de 30 minutos e 60 minutos. Em seguida os CP's foram retirados da mufla de modo a garantir um resfriamento natural, até atingirem a temperatura ambiente, para iniciar a realização dos ensaios.

4 RESULTADOS

Neste item estão apresentados os resultados encontrados para este estudo, sendo que os mesmos foram tratados estatisticamente visando a eliminação dos dados ilegítimos, prosseguido de análises pelo método de análise de variância (ANOVA), através do software Statistica 7.0, seguida do teste Post Hoc de Fisher.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

Neste trabalho, o ensaio de resistência à compressão uniaxial foi adotado como parâmetro para determinar a resistência mecânica residual de concretos expostos a diferentes patamares de temperatura, com e sem a adição de fibras de PET. Após resfriamento lento, efetuou-se o rompimento dos CP's em uma prensa, da marca EMIC – modelo PC200CS, com capacidade de 2.000 KN e velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s. A partir deste ensaio, tornou-se possível avaliar o comportamento do CAR ao ser submetido aos fatores controláveis de temperatura, tempos de exposição e teor de adição. A Tab. 2 demonstra os resultados obtidos após análise estatística.

Tabela 2. Análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão

Efeito	GDL	MS	F (calc.)	P	Significância
Teor de Adição (%)	1	4,12	0,271	0,608183	NS
Temperatura (°C)	1	5493,19	361,102	0,000000	S
Tempo de Exposição (min)	1	105,69	6,948	0,015449	S
(%) * (°C)	1	99,42	6,535	0,018384	S
(%) * (min)	1	128,58	8,452	0,008425	S
(°C) * (min)	1	777,18	51,089	0,000000	S
(%) * (°C) * (min)	1	0,43	0,028	0,868201	NS

GDL: graus de liberdade; MS: média simples; F(calc): valor calculado de F; P: nível de significância; S: valor significativo; NS: valor não significativo; Se P<5%: valor significativo.

A partir da Tab. 2, pode-se afirmar que com exceção do “Teor de adição (%)” e a combinação “Teor de adição (%), Temperatura (°C) e Tempo de exposição (min)”, todos os demais fatores exercem influência estatística significativa na resistência à compressão, sejam eles isolados ou combinados.

4.2 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

O módulo de deformação pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite de proporcionalidade do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Seu estudo é importante, uma vez que o comportamento tensão-deformação do concreto é um dos parâmetros mais relevantes de desempenho, junto com a resistência mecânica à compressão, durante o projeto de estruturas em concreto armado. A Tab. 3 demonstra os resultados obtidos após análise estatística.

Tabela 3. Análise de variância (ANOVA) para módulo de deformação

Efeito	GDL	MS	F (cál.)	P	Significância
Teor de Adição (%)	1	489,15	73,552	0,000000	S
Temperatura (°C)	1	4758,70	715,557	0,000000	S
Tempo de Exposição (min)	1	740,75	111,385	0,000000	S
(%) . (°C)	1	42,03	6,321	0,000000	S
(%) . (min)	1	211,70	31,833	0,019750	S
(°C) . (min)	1	71,40	10,737	0,000011	S
(%) . (°C) . (min)	1	129,58	19,485	0,003447	S
Erro	22	6,65			

GDL: graus de liberdade; MS: média simples; F(cál.): valor calculado de F; P: nível de significância; S: valor significativo; NS: valor não significativo; Se P<5% valor significativo.

Conforme a Tabela 3, todos os fatores demonstram influência estatística significativa na obtenção da variável de resposta módulo de elasticidade, sejam eles isolados ou combinados.

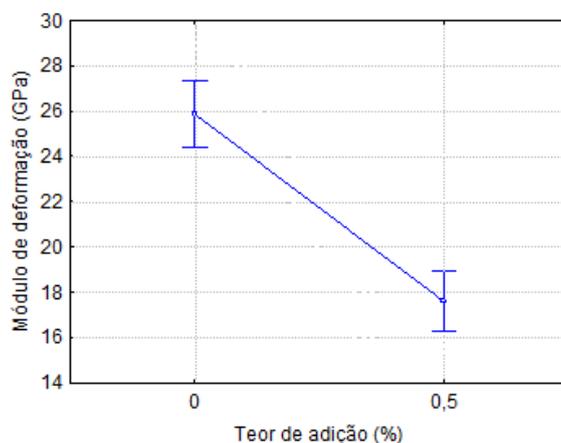
4.3 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS ISOLADAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Os efeitos isolados gerados na matriz do concreto acabaram sendo muito parecidos para a resistência à compressão e módulo de deformação. Em função disso, terão seus resultados explanados de forma conjunta nos itens 4.3.2 e 4.3.3.

4.3.1 Efeito do teor de adição

O teor de adição como fator isolado influencia de maneira significativa apenas no módulo de elasticidade do concreto. A Figura 2 ilustra esse efeito.

Figura 2. Efeito isolado do teor de adição sobre o módulo de deformação

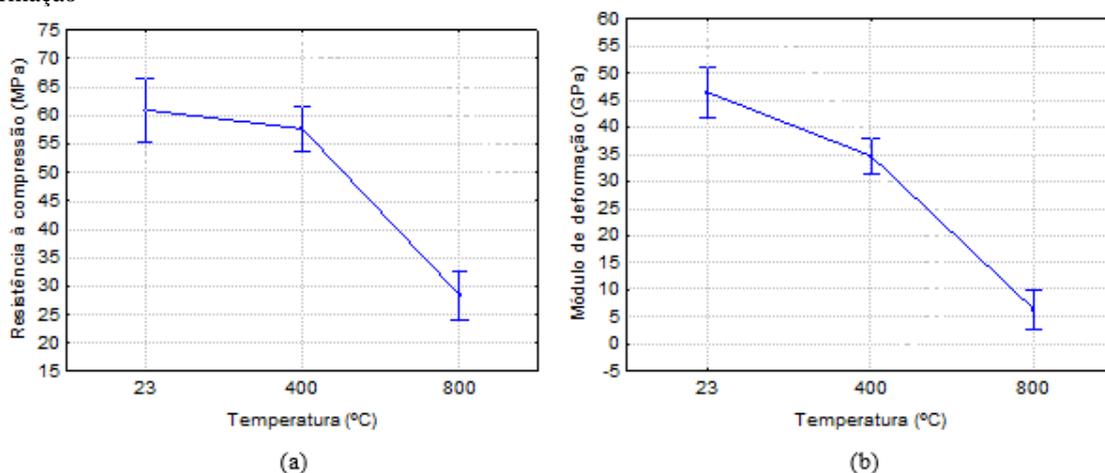


Analisando a Figura 2, percebe-se que o módulo de deformação sofre uma redução significativa com a incorporação de 0,5 % de fibra de PET a matriz. Esse fato pode ser explicado, pois a adição serve principalmente para facilitar a fuga da poro-pressão formada no interior do elemento estrutural submetido à altas temperaturas. Dessa forma, a adição acaba por promover uma maior quantidade e tamanho de poros no concreto e, conforme exposto por Lima (2005), isso influencia diretamente no módulo de deformação. Este mesmo comportamento foi apresentado por Pizzoni (2017) ao estudar um CAR com adição de 0,5 % de macrofibra de polietileno.

4.3.2 Efeito da temperatura

O efeito isolado da temperatura exerce influência significativa tanto na resistência à compressão uniaxial do concreto, quanto no módulo de deformação. Esse comportamento pode ser observado na Figura 3 (a) e (b).

Figura 3. Efeito isolado da temperatura (a) Sobre a resistência à compressão (b) Sobre o módulo de deformação



Como exposto por Silva (2001), o aumento da temperatura de um elemento estrutural pode causar reduções de resistência e rigidez, além do aparecimento de esforços solicitantes. Isso acontece pois com o aumento da temperatura os elétrons começam a vibrar e a mobilidade aumenta. Consequentemente, os componentes do concreto se dilatam e levam à ocorrência de fissuras e deslocamentos.

Esses efeitos já eram esperados como foi exposto por Meneses (2011), Lorenzon (2014) e Lima (2005), uma vez que a matriz sofre processos físico-químicos durante o aquecimento que podem ser extremamente destrutivos às propriedades do concreto. À medida que se eleva a temperatura a poro-pressão é aumentada, sobretudo pelo CAR possuir uma matriz de baixa permeabilidade, gerando microfissuras internas no concreto, que influenciam diretamente na redução da resistência da matriz. Associado a esse efeito, as fibras com o aumento da temperatura começam a derreter, e ao atingirem sua temperatura de fusão, geram vazios que controlam efetivamente a resistência, responsabilizando-se pelo enfraquecimento da matriz.

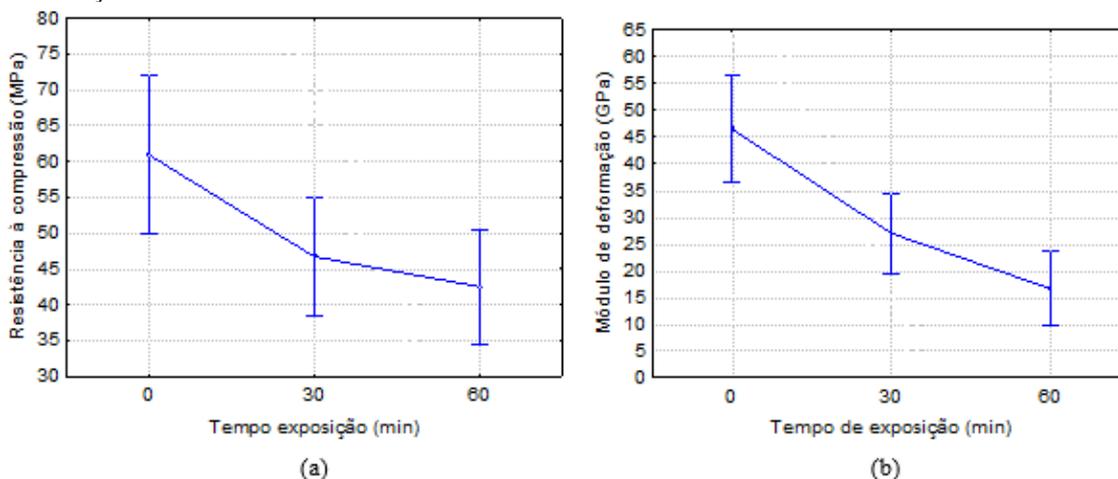
Essas alterações originam deformações não previstas nos elementos estruturais, principalmente entre a matriz cimentícia e o agregado, conforme exposto por Meneses (2011), que são prejudiciais ao módulo. Mesmo que a peça não entre em colapso, isto poderá torná-la inadequada para uso.

Através do teste Post Hoc de Fisher, constatou-se que a perda de resistência entre 23 °C e 400 °C é insignificante. No entanto, tomando-se como a referência a temperatura ambiente, para os 800 °C o decréscimo chegou a 53,40 %. Dessa forma, acorda-se com o que Neville (2003) expôs, que entre a faixa de 600 °C e 700 °C ocorre a perda total e irreversível das propriedades mecânicas do concreto.

4.3.3 Efeito do tempo de exposição

As Figuras 5 (a) e (b) demonstram o efeito isolado do tempo de exposição sobre a resistência à compressão e módulo de deformação do concreto.

Figura 5. Efeito isolado do tempo de exposição (a) Sobre a resistência à compressão (b) Sobre o módulo de deformação



Analisando as Figura 5 (a) e (b) é possível constatar que ambos os gráficos se comportam de forma muito similar, ocorrendo um decréscimo na resistência à compressão e no módulo de deformação da matriz devido ao tempo de exposição às altas temperaturas.

Realizando o teste Post Hoc de Fisher para a resistência à compressão (Figura 5 (a)), verificou-se que as maiores perdas ocorrem nos primeiros 30 minutos de exposição à altas temperaturas, acordando com o exposto por Nince (2006), enquanto que para a faixa de 30 à 60 minutos essa variação já se torna insignificante estatisticamente. Ao comparar a resistência à compressão inicial dos CP's com a final depois de 60 minutos de exposição se tem uma queda de 30 %.

No módulo de deformação, conforme Figura 5 (b), o teste de Fisher determinou que para cada intervalo de tempo, se tem uma perda significativa nessa propriedade. A redução para os primeiros 30 minutos de ensaio chegaram a aproximadamente 42 % e entre os tempos de 30 e 60 minutos a queda chegou a praticamente 39 %.

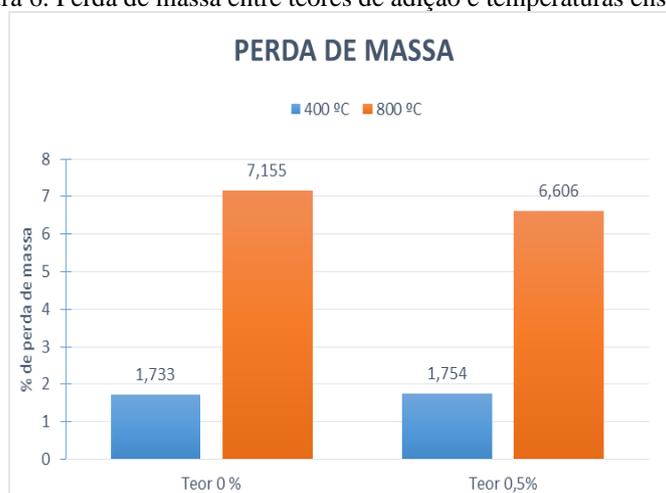
Com estes dados, atesta-se mais uma vez a importância de se estudar maneiras de adiar ou minimizar os efeitos causados pela exposição a altas temperaturas nas propriedades do concreto, de modo a se intervir da forma mais rápida possível em casos de incêndio, uma vez que há grande perda das propriedades mecânicas em curtos intervalos de tempo, concordando com o exposto por Lima (2005).

4.4 ANÁLISE DAS PERDA DE MASSA

A perda de massa é quantificada pela relação entre a pesagem dos corpos de prova antes e após a exposição às altas temperaturas. Segundo Lorenzon (2014), essa diferença ocorre em função da evaporação da água livre presente na matriz do concreto, e também, pela expansão térmica dos agregados, visto que ocupam cerca de 60 a 80% do volume do concreto, influenciando na variação da massa específica conforme sua dilatação térmica.

A Figura 6 indica a perda de massa em porcentagem dos corpos de prova, considerando o teor de adição de fibra (0 e 0,5 %) e a temperatura de exposição (400 °C e 800 °C).

Figura 6. Perda de massa entre teores de adição e temperaturas ensaiados



A partir da Figura 6 é possível constatar que a perda de massa ocorre de forma mais significativa quando os corpos de prova estão submetidos a temperaturas mais elevadas, de modo que a perda de massa do concreto durante o aquecimento resulta em acréscimo na porosidade. De acordo com o exposto por Lima (2005), o efeito pode ser associado com mudanças de fase ou transformações químicas que ocorrem na matriz.

Como uma consequência direta do aumento da temperatura, a perda de massa é associada à perda de água, eliminada no estado de vapor e também a mudança de fase da fibra de PET, que de sólida, passa a ser líquida até não ocupar mais um volume no interior do concreto endurecido.

Essa adição de fibra sob condições mais severas de temperatura possui a capacidade de reduzir a perda de massa, conforme pode ser observado na Figura 6, comprovando-se a eficácia da adição de fibra de PET em relação ao efeito *spalling*. Os poros formados representam um caminho mais curto e menos tortuoso para a liberação

do vapor de água, que tem como resultado a diminuição dos riscos de explosão (para aquecimentos mais severos).

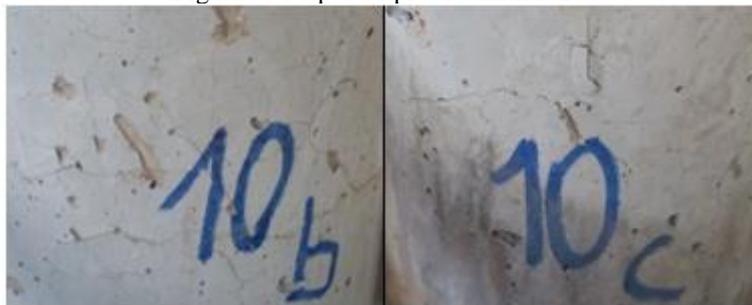
O fenômeno de *spalling* ocorreu somente em matrizes sem adição de fibra de PET, quando expostos às temperaturas acima dos 550 °C, sendo que na faixa dos 700 °C é que ocorreram os deslocamentos mais consideráveis, com grande perda de seção, e lascamento explosivo, acontecendo durante os trinta primeiros minutos de aquecimento (Figura 7).

Figura 7. Corpos de prova que sofreram fenômeno *spalling* durante o aquecimento



Por outro lado, os concretos com adição de 0,5 % de fibra de PET à temperatura de 800 °C, não apresentaram efeito *spalling*. Apenas se observou a formação de pequenas fissuras superficiais nos corpos de prova conforme Figura 8, fato que provavelmente está associado a formação de tensão interna, devido a expansão térmica dos agregados.

Figura 8. Corpos de prova com fissuras



5 CONCLUSÕES

Com o objetivo de analisar o comportamento do Concreto de Alta Resistência (CAR) submetido a altas temperaturas, o presente trabalho buscou avaliar se a associação de fibras de politereftalato de etileno (PET) apresentaria desempenho satisfatório nos ensaios realizados em laboratório e seria uma alternativa viável para o mercado da construção civil no que diz respeito a minimização dos efeitos de lascamento explosivo

ou *spalling* do concreto. Os resultados obtidos nos ensaios passaram por tratamento estatístico dos dados, por meio dos quais foi possível apresentar as conclusões descritas.

A análise revelou que a adição de 0,5 % de fibra de PET provocou perda de resistência à compressão e reduziu o módulo de deformação do concreto, decrescendo ainda mais seus valores em função do acréscimo da temperatura e do tempo de exposição. Esse fato se explica pois à medida que o CP se submete ao aquecimento, a poro-pressão é aumentada gerando microfissuras no concreto, que interferem diretamente nas propriedades mecânicas.

Por outro lado, a adição eliminou os danos apresentados pelos CP's de referência (sem fibra) nos corpos de prova sujeitos a 400 °C e minimizou os efeitos dos CP's sujeitos a 800 °C, indicando que o derretimento da fibra aumentou a porosidade do material e reduziu os danos causados pela poro-pressão, sendo uma alternativa eficiente para eliminação do fenômeno *spalling*, além de contribuir para o reaproveitamento de resíduos por meio da redução do descarte inadequado deste material que ocasionaria impactos ambientais.

No que se refere a análise da perda de massa dos CP's, a temperatura também foi um fator determinante, ocorrendo sempre as maiores perdas na faixa dos 800 °C. No entanto, reduziu-se essa perda com a incorporação de 0,5 % de fibra de PET, comprovando-se mais uma vez a eficácia da adição no controle do efeito *spalling* do concreto.

É bem verdade que toda a perda de umidade do concreto resultante do aquecimento pode resultar em queda da resistência e do módulo de deformação. Daí surge a necessidade de realizar pesquisas voltadas ao estudo dos danos causados por incêndios e do comportamento do concreto sujeito à ação do fogo, e a determinação de possíveis medidas que previnam, amenizem e controlem o processo de degradação térmica dos elementos estruturais.

Por fim, conclui-se que a adição da fibra de PET no concreto, para se evitar lascamentos explosivos, provou ser eficiente, colaborando para a segurança estrutural dos elementos de CAR. O prosseguimento dessa pesquisa pode consolidar uma abordagem voltada a avaliação de um teor de adição mais adequado, que promova melhores resultados para a resistência à compressão e ao módulo de elasticidade, conduzindo-se assim à descoberta de materiais e técnicas que retardem ou reduzam a deterioração de uma estrutura.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concretos para fins estruturais*: Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. NBR 8953. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

COSTA, N. et al. Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas. In: NUTAU - SUSTENTABILIDADE, ARQUITETURA, DESENHO URBANO, 2002, São Paulo. Anais... São Paulo: USP, 2002. p. 1278-1289

FIGUEIREDO, A. D. *Concreto com Fibras*. Cap. 39. In: Isaia, G. C (Ed.). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2005

FIQUEIREDO, A. D.; NINCE, A. A. *Concreto expostos às altas temperaturas*. 2008. 36 f. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo: EPUSP, 2008.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P.E. *Microstructure of fire-damaged concrete. A case study*. *Cement and Concrete Composites*, 2004. Article in press. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science>>. Acesso em: 19 de julho de 2004.

ISAIA, G. C. (Ed.) *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 2v.

KODUR, V. *Properties of concrete at elevated temperatures*. ISRN Civil Engineering, v. 2014, 2014.

LIMA, R. *Investigação do comportamento de concretos em temperatura ambientes*. 2005. 241 f. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação UFRGS, Porto Alegre, 2005.

MENESES, I. A. *Avaliação de Concreto com Adição de Fibras PET Submetido a Altas Temperaturas*. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. *Concreto microestrutura, propriedades e materiais*. 2°ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

NEVILLE, A. M. *Neville on Concrete – An examination of issues in concrete practice*. Farmington Hill: American Concrete Institute, 2003.

NINCE, A. A. *Lascamento do Concreto exposto a altas temperaturas*. 2006. 300p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PHAN. L. T. *High-strength concrete at high temperature – an overview*. In: BUILDING AND FIRE RESEARCH LABORATORY. National Institute of Standard and Technology, 2002.

PIASTA, J. *Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste*. *Materials and Structures*, v. 17, n. 102, p. 415-420, nov./dez. 1984. RILEM – The

International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. Paris, França, 1984.

PIZZONI, A. *Análise da influência do uso de macrofibras de polietileno em concretos de alta resistência (CAR) submetidos a altas temperaturas*. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Regional Integradada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2014.

SILVA, V.P. *Estruturas de aço em situação de incêndio*. São Paulo: Zigurate Editora, 2001.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. São Paulo: PINI, 1998. 255 p.