

COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO E SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS

Daniel Junior Malmann Ritt¹, Emanuele Amanda Gauer²

Resumo: O concreto é um material que apresenta baixa condutividade térmica. Isto significa que, ao ser exposto a temperaturas elevadas, como em um incêndio, aparecem nele falhas estruturais, alteração na sua cor e a sua resistência diminui drasticamente. Em função disso, a presente pesquisa teve como objetivo a avaliação da resistência mecânica do concreto, através da realização de ensaios de compressão uniaxial em corpos de prova de concreto expostos a variadas temperaturas, com e sem adição de fibras de polipropileno monofilamentadas. Para tal, foram realizados 4 traços de concreto, sendo um deles sem adições de fibra de polipropileno e os demais com teores de fibras de 600 g/m³, 4300 g/m³ e 8000g/m³, especificadas conforme as indicações do fabricante. Os corpos de prova foram aquecidos em uma câmara Mufla a temperaturas de 200, 400 e 600°C, sendo parte submetidos a um resfriamento rápido e parte a um resfriamento lento. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que, de maneira geral, a resistência dos corpos de prova de concreto diminuiu à medida que se aumentou a temperatura a que eles foram submetidos. Além disso, os corpos de prova submetidos ao resfriamento rápido perderam mais resistência que aqueles submetidos ao resfriamento lento. Pode-se observar, ainda, que as fibras de polipropileno não tiveram influência positiva no ganho e/ou na manutenção da resistência do concreto após serem submetidos às altas temperaturas.

Palavras-chave: Resistência do concreto. Altas temperaturas. Fibras de polipropileno.

1 INTRODUÇÃO

O concreto consiste em um material amplamente utilizado em estruturas de construção civil. Em condições normais de temperatura, mudanças químicas e físicas ocorrem durante boa parte de sua vida útil. Quando exposto a elevadas temperaturas, como em situação de incêndio, as mudanças se intensificam, podendo ser aceleradas e/ou modificadas pelo calor excessivo. Testes realizados

1 Egresso do Curso de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Taquari.

2 Engenheira Civil, Doutora, Professora da Universidade Federal de Santa Maria.

com amostras de concreto demonstraram um comportamento deste material ao fogo, do ponto de vista de segurança. Alguns autores apontam como os principais fatores para este comportamento o fato de ele não se tratar de um material inflamável, apresentando baixa condutividade térmica e emitindo poucos gases tóxicos no momento em que é aquecido. Porém, ao ser exposto ao fogo, a resistência do concreto pode ser muito reduzida (COSTA; SILVA, 2002).

Segundo Souza (2016), o desempenho do concreto exposto a altas temperaturas varia de acordo com a atuação de cada um dos seus elementos que o constitui, mudando conforme o nível de hidratação, parcela de água e finos presentes no material e o tipo de agregado.

Além disso, Nince, Figueiredo e Bittencourt (2003) observaram que o concreto, quando submetido a altas temperaturas, possui seu comportamento influenciado por fatores que se classificam em externos e internos. Como fatores externos tem-se a taxa de aquecimento, a temperatura máxima atingida, o tempo e o tipo de exposição, o carregamento, a umidade do ambiente, o tipo de resfriamento, as condições do ensaio e a concentração de tensões térmicas provenientes do aquecimento próximas aos cantos do corpo de prova. Já os fatores internos, segundo os autores, consistem da distribuição e dos tamanhos dos poros, a diferença de dilatação térmica entre o agregado e a pasta, a relação água-cimento, a resistência das partículas finas e o grau de hidratação. Nesta linha, Viana (2014) ressalta que o desempenho do concreto submetido a elevadas temperaturas em ensaios de resistência à compressão depende de dois parâmetros principais: o período em que é submetido a elevadas temperaturas e o método empregado para o resfriamento das amostras.

Figueiredo, Costa e Silva (2002) relatam que, dependendo do tipo de concreto utilizado, o aumento progressivo da temperatura pode causar variadas consequências como: mudanças na cor, diminuição da resistência, esfarelamento e/ou deslocamento da superfície, trincas e, por fim, pode até mesmo levar a ruína da estrutura constituída por este material.

Aditivos e fibras são empregados em concretos convencionais para conseguir possibilitar que o material possa ser submetido a altas temperaturas por um maior tempo, além de possibilitar um alcance de resistência superior aos concretos sem nenhuma adição no momento em que ele for exposto a altas temperaturas (NEVILLE, 2015).

Lima *et al.* (2004) relatam que, em concretos mais compactos, pode ocorrer um aumento em sua fragilidade nas situações de temperaturas elevadas, como em um incêndio, onde ocorre uma rápida elevação na temperatura. Esse fato se dá pelo aumento da pressão que acontece nos poros do concreto, em consequência da eliminação da água através da vaporização. Isso tudo, somado às tensões provocadas pela taxa de deformação térmica, pode vir a causar deslocamentos de parte da camada superficial do concreto, chamado de efeito *spalling*.

Para conter os deslocamentos, Scoaris (2005) menciona que a adição de fibras na mistura do concreto pode limitar o crescimento das fissuras, impedindo que elas se transformem em microfissuras, que resultam nos deslocamentos. Neste sentido, Figueiredo, Costa e Silva (2002) ressaltam sobre a eficiência das fibras, que ao serem adicionadas ao concreto, retardam o aparecimento das fissuras e, após o aparecimento destas, ajudam na capacidade de resistência do concreto, o que também acaba diminuindo o surgimento de novas fissuras. Lima (2005) também considera que a adição de fibras de polipropileno ao concreto é avaliada como uma medida para reduzir os resultados de *spalling*, pois o emprego deste material contribui para o acréscimo da resistência residual.

Diante do anteriormente exposto, esta pesquisa avalia a influência das altas temperaturas no comportamento resistente do concreto sem e com adição de fibras. Para tal, foram utilizados quatro traços de concreto, sendo um deles convencional (sem fibras), e os demais utilizando fibras de polipropileno (com teores de fibras de 600 g/m³, 4300 g/m³ e 8000 g/m³), em que as amostras foram submetidas a temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C e resfriadas rápida ou lentamente.

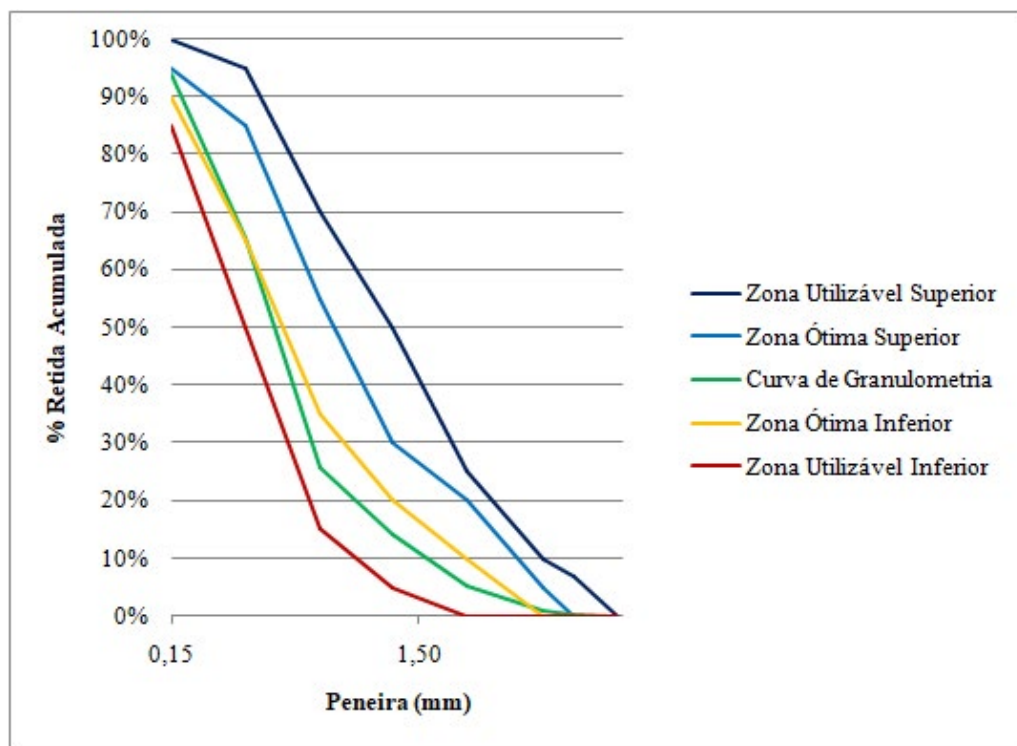
2 MATERIAL E MÉTODOS

O programa experimental da pesquisa consiste de diferentes dosagens de concreto com e sem fibras de polipropileno, que posteriormente foram submetidos a altas temperaturas e resfriados rápida e lentamente, a fim de verificar o comportamento das amostras em termos de resistência à compressão. Para tanto, utilizou-se os seguintes materiais na produção dos corpos de prova: areia (agregado miúdo), brita 1 (agregado graúdo), cimento, água, aditivo superplastificante 3ª geração e fibras de polipropileno monofilamentadas. Na sequência, apresenta-se a caracterização de cada um dos materiais utilizados.

2.1 Agregado miúdo

Para caracterizar o agregado miúdo (areia), foi realizado ensaio de granulometria, de massa específica e de massa unitária. O ensaio de granulometria foi realizado por peneiramento, conforme é descrito as instruções da NBR 7211 (ABNT, 2009). A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica da areia, tratando-se de uma areia média, composta por rochas e minerais. Observa-se na Figura 1 que o material está dentro do limite de utilização definido pela norma.

Figura 1 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.



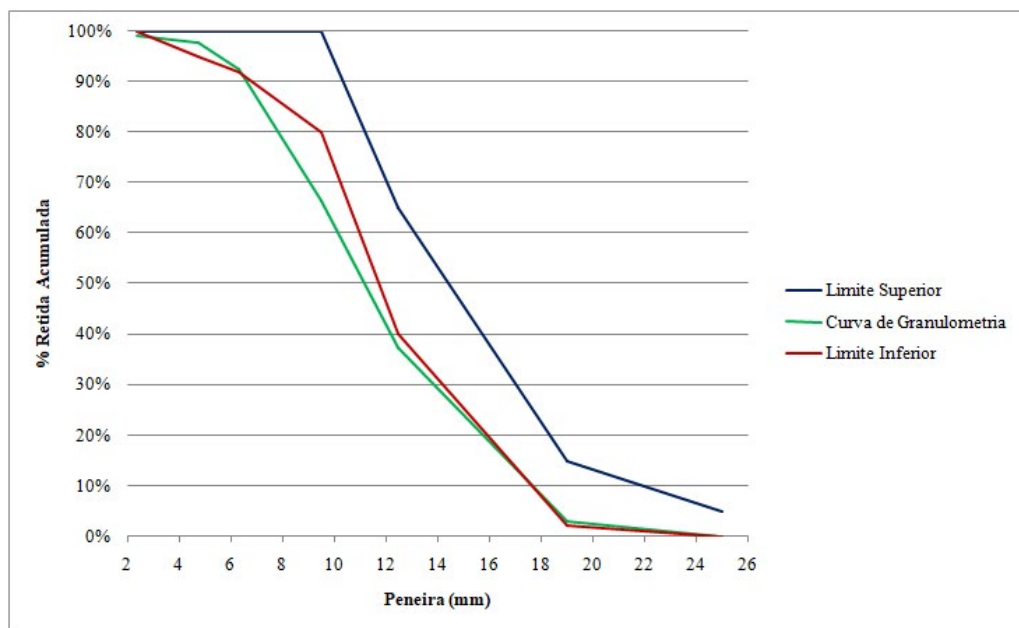
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A massa específica e massa unitária do agregado miúdo foram obtidas seguindo os procedimentos da NBR 16916 (ABNT, 2021) e da NBR 16972 (ABNT, 2021), sendo alcançados valores de 2650 e 1640 kg/m³, respectivamente.

2.2 Agregado graúdo

Assim como para o agregado miúdo, para o agregado graúdo (brita 1), que trata-se de um material composto por basalto e granito, foram realizados ensaios de granulometria, cujos resultados podem ser visualizados na Figura 2, de massa específica e de massa unitária, dos quais foram encontrados valores de 2840 kg/m³ e de 1440 kg/m³, respectivamente. Observa-se, na Figura 2, que a granulometria da brita está ligeiramente fora do limite inferior aceitável pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Figura 2 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Cabe ressaltar que, tanto o agregado miúdo quanto o graúdo, são materiais provenientes da Região do Vale do Taquari, fornecidos pela Comercial Areia Vale localizada em Estrela/RS.

2.3 Cimento

O cimento empregado foi o CP V, comercializado pela Votorantim. Esse tipo de cimento foi utilizado para o trabalho, visando um ganho de resistência mais elevado e uma estrutura porosa mais fechada após sua cura, permitindo melhor analisar o efeito *spalling*. Foram realizados ensaios para obtenção da massa específica e da massa unitária do cimento, utilizando as mesmas normativas usadas na caracterização dos agregados, sendo obtidos valores de 2840 kg/m³ e 1020 kg/m³, respectivamente.

2.4 Água

A água utilizada na composição do concreto foi a fornecida pelas redes de distribuição de água potável da Companhia Rio-Grandense de Saneamento (CORSAN), da cidade de Lajeado/RS.

2.5 Aditivo

Com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade das misturas e reduzir o consumo de água (com consequente aumento de resistência), foi utilizado aditivo superplastificante de 3ª geração, produzido com base de policarboxilatos.

2.6 Fibras de polipropileno

Utilizaram-se nas misturas, ainda, fibras de polipropileno monofilamentadas. Andrade e Possan (2017) descrevem que estas fibras apresentam uma quantidade por massa superior em comparação com as fibras de polipropileno fibriladas. A empresa TecMachine Fibras Estruturais, fornecedora deste material, recomenda que, para que seja obtida alguma alteração no ganho de resistência das misturas, é necessária uma adição de no mínimo 600 g/m³, enquanto que para que não haja embolamento das fibras, o máximo deste material a ser empregado nas misturas é de 8000 g/m³.

2.7 Programa experimental

O programa experimental desta pesquisa consiste na avaliação da resistência à compressão do concreto com adição de fibras de polipropileno e submetido a altas temperaturas com resfriamento rápido e lento. Para isso, primeiramente foram realizadas misturas de quatro traços de concreto, sendo que para cada um deles foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*). Em seguida, foram moldados os corpos de prova (CPs), os quais foram curados por 28 dias em câmara úmida. Com a etapa de cura concluída, as amostras foram secas, eliminando assim toda água que poderia estar presente no corpo de prova. Após secagem, os corpos de prova foram submetidos a elevadas temperaturas (200, 400 ou 600°C). Os CPs que foram submetidos a altas temperatura, juntamente com os que permaneceram em temperatura ambiente, foram levados para o ensaio de resistência à compressão do concreto. Juntamente com ensaio de resistência à compressão, foi realizada uma análise visual para o concreto, tanto após sair da câmara mufla como após ensaio de compressão.

Foram moldados 10 CPs cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para cada temperatura (200, 400 e 600°C) para os 4 traços. De cada uma destas séries de 10 CPs, 5 CPs foram resfriados lentamente e 5 rapidamente. Além destes, foram moldados 5 CPs cilíndricos de mesmo tamanho para cada traço, que serviram de referência. O Quadro 1 apresenta a nomenclatura empregada para o programa experimental adotado neste trabalho.

Quadro 1 – Nomenclatura utilizada no programa experimental.

| Traço/ Temperatura | Resfriamento | Ambiente | 200°C | 400°C | 600°C |
|-----------------------|--------------|----------|---------|---------|---------|
| Traço A | Rápido | A-Ref | A-200-R | A-400-R | A-600-R |
| | Lento | | A-200-L | A-400-L | A-600-L |
| Traço B | Rápido | B-Ref | B-200-R | B-400-R | B-600-R |
| | Lento | | B-200-L | B-400-L | B-600-L |
| Traço C | Rápido | C-Ref | C-200-R | C-400-R | C-600-R |
| | Lento | | C-200-L | C-400-L | C-600-L |
| Traço D | Rápido | D-Ref | D-200-R | D-400-R | D-600-R |
| | Lento | | D-200-L | D-400-L | D-600-L |

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

2.7.1 Traço do concreto

Utilizou-se o mesmo traço empregado no trabalho de Castro (2017), no qual a autora obteve o traço em massa de 1:0,73:2,16:0,40 (cimento:areia:brita:a/c) e consumo de aditivo de 0,47% em relação ao cimento.

A partir do traço padrão, definiram-se os 4 traços que foram aplicados, variando apenas as fibras. Um dos traços não possuiu em sua mistura a adição da fibra (Traço A), enquanto que, para os traços restantes, seguiu-se o recomendado por Castro (2017) e pelo fabricante das fibras, adicionando-se a quantidade mínima de 600 g/m³ (Traço B), uma quantidade intermediária de 4300 g/m³ (Traço C) e a quantidade máxima de 8000 g/m³ (Traço D), no qual a diferença presente do trabalho realizado pela Castro (2017) deste aqui apresentado será a presença de um resfriamento rápido e lento. O Quadro 2 apresenta as quantidades de material utilizadas na mistura de cada um dos traços utilizados nesta pesquisa, sendo que, para cada traço, foi preparado um volume aproximado de 68 litros de concreto.

Quadro 2 – Peso dos materiais empregados em cada traço.

| Traço | Cimento (Kg) | Areia Média (Kg) | Brita 1 (Kg) | Água (Kg) | Aditivo Superplastificante (g) | Fibras de PP (g) |
|-------|--------------|------------------|--------------|-----------|--------------------------------|------------------|
| A | 34,77 | 25,38 | 75,11 | 13,91 | 164,13 | 0,00 |
| B | 34,77 | 25,38 | 75,11 | 13,91 | 164,13 | 37,92 |
| C | 34,77 | 25,38 | 75,11 | 13,91 | 164,13 | 271,76 |
| D | 34,77 | 25,38 | 75,11 | 13,91 | 164,13 | 505,60 |

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A seguir, apresentam-se os ensaios envolvidos no programa experimental, bem como os procedimentos adotados para a sua realização.

2.7.2 Ensaio de abatimento do concreto

O ensaio de abatimento do concreto (*slumptest*), cujos procedimentos são descritos na NBR 16889 (ABNT, 2020), constitui-se de uma análise rápida do concreto para definir as características no estado fresco momentos antes de sua aplicação, fazendo parte do controle tecnológico deste material. A partir deste ensaio, analisa-se a consistência do concreto para conferir se a sua trabalhabilidade está adequada e para verificar se o concreto poderá ser empregado corretamente, a fim de que ele ocupe todos os espaços, evitando possíveis espaços vazios, evitando possíveis problemas de adensamento.

Os ensaios de abatimento foram realizados para os quatro traços desta pesquisa, denominados A, B, C e D, sendo obtidos valores de 16, 15, 14 e 11 cm, respectivamente, podendo-se observar que, conforme aumentou-se a quantidade de fibras, a trabalhabilidade do concreto diminuiu.

2.7.3 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova (CPs) seguiu as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2015). Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 10 cm diâmetro e 20 cm de altura, adensando-os, um a um, manualmente. Foram necessárias 2 camadas para cada uma das amostras, sendo que, a cada camada, foram aplicados 12 golpes com auxílio de uma haste metálica. Após executar o adensamento, retirou-se os excessos no topo e, com auxílio de uma pá, rasou-se os CPs.

Com os CPs moldados, aguardou-se o período de 24 horas para uma pré-secagem antes de retirá-los dos moldes, sendo posteriormente encaminhados para a cura úmida.

2.7.4 Cura e secagem dos corpos de prova

A cura das amostras foi realizada por um período de 28 dias em câmara úmida a uma temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, com umidade relativa do ar superior a 95%. Após este período, os CPs foram submetidos à secagem em estufa, para retirar a umidade antes de encaminhar para câmara mufla e submeter a elevadas temperaturas. A secagem das amostras foi realizada por um período de 48 horas, iniciando com 50°C por um tempo de 24 horas e o tempo restante a temperatura de 105°C . Em seguida, aguardou-se mais um período de 24 horas em repouso a temperatura ambiente. Este procedimento foi adotado nesta pesquisa, apesar de não ser usual na prática de engenharia, uma vez que, em situações normais de incêndio, o concreto não está com ausência total de umidade.

2.7.5 Simulação de incêndio

Após o período de cura e secagem, os CPs foram levados à câmara mufla para serem submetidos a altas temperaturas (simulação de incêndio). Durante este processo, eles foram expostos a temperaturas distintas, de 200°C , 400°C e 600°C , por um intervalo de tempo de 5 horas. Em seguida, parte dos CPs foi resfriada rapidamente (5 a 10 minutos), mergulhando-os em água a temperatura de $\pm 25^{\circ}\text{C}$, enquanto que a outra parte ficou em repouso em temperatura ambiente por um período de 24 horas.

2.7.6 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no Laboratório de Tecnologias da Construção (LATEC) da Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES) e seguiram os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 2018). Os CPs foram ensaiados por meio de um equipamento da marca Emic, modelo PC200CS, com 2000 kN de capacidade, apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Ensaio de resistência à compressão do concreto.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

2.7.7 Análise visual dos corpos de prova

Todos os CPs foram analisados visualmente antes e após o rompimento. Nesta análise, pode-se observar as consequências que as elevadas temperaturas provocam no concreto, como trincas e alteração em sua coloração. Além disto, também pode-se observar alterações que ocorreram nas amostras com a adição das fibras de polipropileno ao concreto após os testes de resistência à compressão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 visualiza-se um resumo dos resultados obtidos para a resistência à compressão (em MPa) das amostras ensaiadas, com a média dos cinco CPs ensaiados para cada ponto, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV). Observa-se, nela, que a maioria dos pontos ensaiados possuem coeficiente de variação inferior a 15%, indicando uma baixa dispersão dos resultados, ou seja, que a amostragem é homogênea. Entretanto, as amostras

dos traços A e B, que foram submetidas a 600°C, tiveram pontos (A-600-L, A-600-R, B-600-L e B-600-R) cujos resultados apresentaram média dispersão (coeficiente de variação entre 15 e 30%).

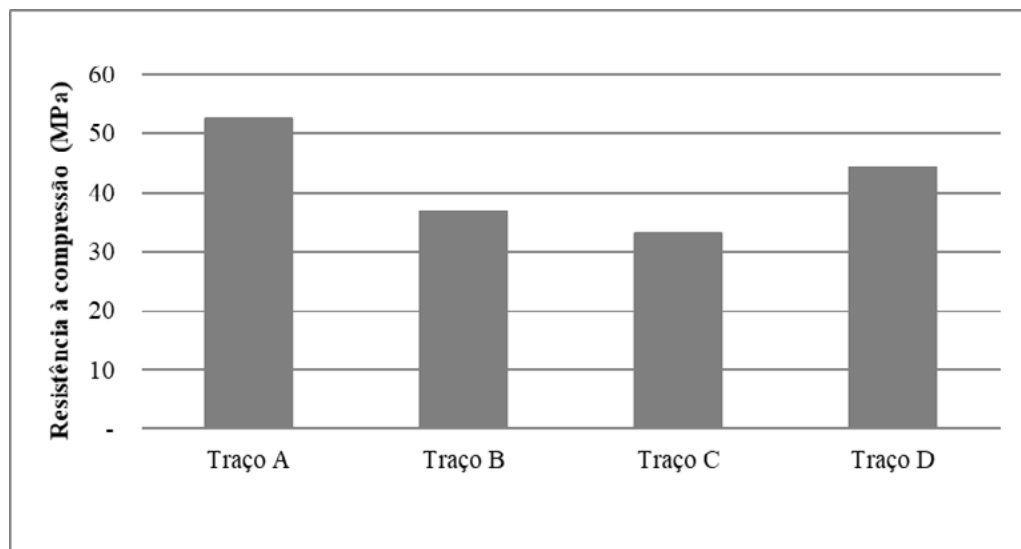
Tabela 1 – Resumo dos resultados.

| | Traço A | | | Traço B | | | Traço C | | | Traço D | | |
|-------|---------|---------------|--------|---------|---------------|--------|---------|---------------|--------|---------|---------------|--------|
| | Média | Desvio Padrão | CV (%) | Média | Desvio Padrão | CV (%) | Média | Desvio Padrão | CV (%) | Média | Desvio Padrão | CV (%) |
| Ref | 52,53 | 3,33 | 6,34 | 36,93 | 2,45 | 6,64 | 33,04 | 3,92 | 11,87 | 44,33 | 4,62 | 10,41 |
| 200-L | 48,36 | 3,66 | 7,56 | 30,03 | 0,88 | 2,94 | 33,12 | 3,42 | 10,33 | 46,18 | 2,48 | 5,36 |
| 200-R | 44,62 | 1,98 | 4,44 | 27,11 | 1,83 | 6,75 | 30,22 | 0,51 | 1,69 | 37,49 | 2,25 | 6,01 |
| 400-L | 31,65 | 1,99 | 6,28 | 16,22 | 1,02 | 6,26 | 22,85 | 1,74 | 7,63 | 27,63 | 2,42 | 8,76 |
| 400-R | 27,76 | 3,21 | 11,56 | 15,43 | 0,72 | 4,68 | 22,29 | 0,98 | 4,41 | 21,96 | 4,20 | 19,10 |
| 600-L | 16,47 | 2,56 | 15,54 | 8,70 | 1,98 | 22,78 | 15,19 | 2,00 | 13,14 | 16,81 | 1,95 | 11,61 |
| 600-R | 15,64 | 2,60 | 16,64 | 8,57 | 1,49 | 17,36 | 16,71 | 1,86 | 11,10 | 18,69 | 4,23 | 22,64 |

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos para a resistência à compressão das amostras consideradas referência para os traços A, B, C e D, ou seja, para os corpos de prova moldados e curados utilizando os procedimentos tradicionais para corpos de prova de concreto (sem serem submetidos a altas temperaturas). Pode-se observar que a adição de fibras não teve um efeito benéfico aos corpos de prova, uma vez que a adição delas diminuiu a resistência das amostras. Além disso, dentre os teores de fibras estudados, o que apresentou melhor desempenho foi o Traço D, que representa o maior teor, com 8000 g/m³.

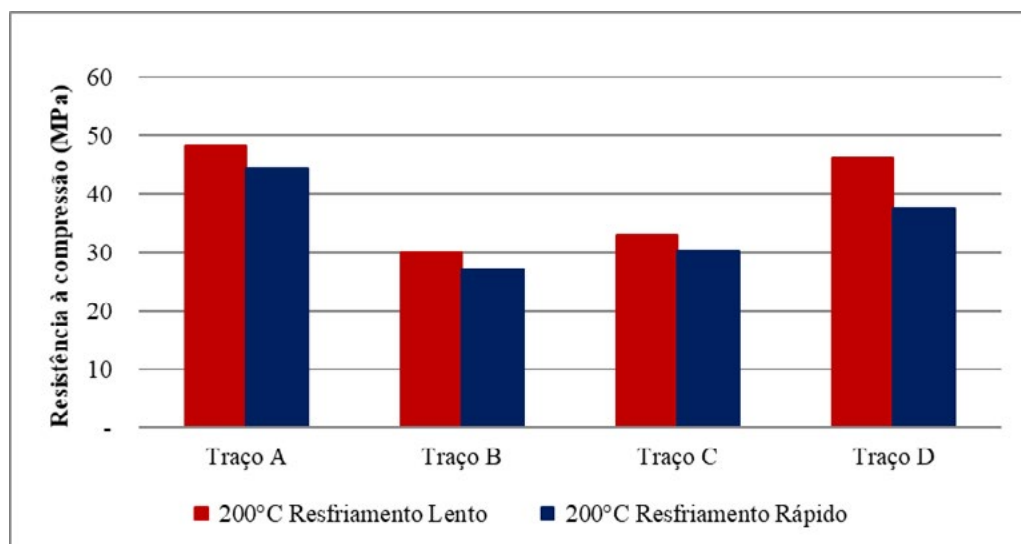
Figura 4 – Resistência à compressão das amostras de concreto utilizadas como referência.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Nas Figuras 5 a 7 apresenta-se o comparativo da resistência média das amostras que foram submetidas ao resfriamento rápido com as amostras que foram submetidas ao resfriamento lento, para cada traço e para cada uma das temperaturas a que as amostras foram submetidas. Nestas figuras, observa-se que o resfriamento rápido ocasiona no concreto, de maneira geral, uma perda de capacidade de suportar carga, verificando-se trincas nos CPs logo após serem retirados da imersão utilizada para resfriá-los rapidamente. Isto é evidenciado ao verificar-se que a resistência das amostras que foram submetidas ao resfriamento lento se apresentaram mais altas do que as que sofreram resfriamento rápido, apesar de que, para as amostras dos traços C e D submetidas a 600°C (C-600-R, C-600-L, D-600-R e D-600-L), ocorreu o oposto. Isto pode ter ocorrido devido a problemas durante a moldagem, que não foram identificados.

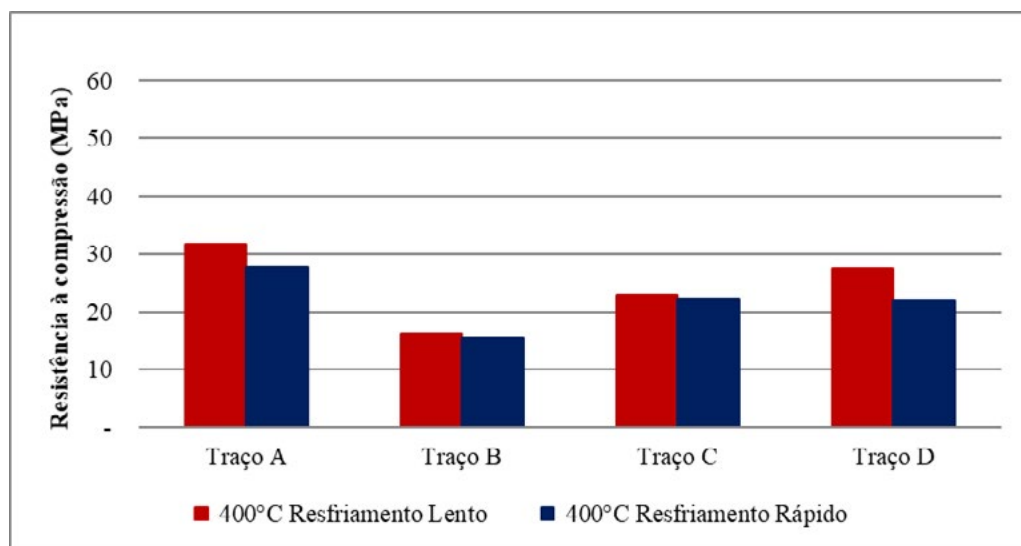
Figura 5 – Resistência à compressão do concreto submetido a 200°C.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Na Figura 5, nota-se que, a diferença entre a resistência das amostras dos Traços A e C resfriadas lentamente e a das amostras resfriadas rapidamente foi de em torno de 8%, enquanto que para o Traço B essa diferença foi de aproximadamente 10% e, para o Traço D, de 19%. Observa-se, ainda, que o material teve, quanto à presença de fibras, o mesmo comportamento observado para as amostras de referência, ou seja, a resistência diminuiu com o aumento do teor de fibras (para os traços B e C), e aumenta um pouco para o Traço D. Isto pode ter ocorrido pois, pela grande quantidade de amostras, não foi possível moldar todas as amostras no mesmo dia, podendo esta variação nos resultados ser devido à variação das condições de moldagem, como por exemplo, a temperatura.

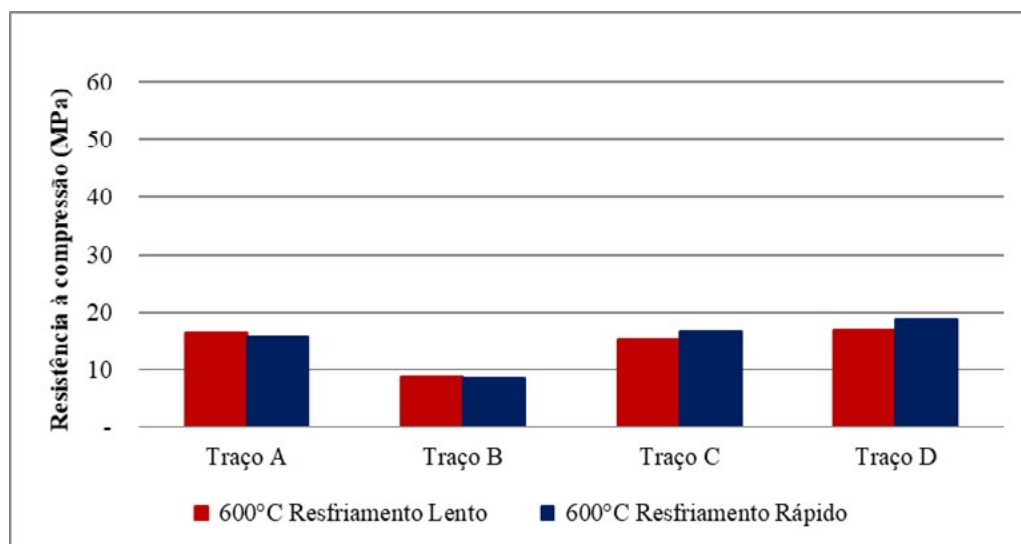
Figura 6 – Resistência à compressão do concreto submetido a 400°C.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Para a Figura 6, pode-se verificar a variação entre os métodos de resfriamento, analisando inicialmente que, com o aumento de 200°C para 400°C (comparando com a Figura 5) houve uma redução de resistência para todos os traços. A porcentagem de redução da resistência foi superior a 30% para todos os traços, passando de 40% para os traços B e D. Novamente podemos visualizar que o Traço A, que não contém adição de fibras, se apresentou com resistência superior, tendo uma queda para o Traço B e tornando a aumentar a resistência os Traços C e D, demonstrando que, apesar do pouco aumento, as fibras podem estar desempenhando seu papel de tornar os corpos de prova mais resistentes. Além disso, a diferença entre a resistência das amostras do Traço A resfriadas lentamente e a das amostras resfriadas rapidamente foi de em torno de 12%, enquanto que para o Traço B essa diferença foi de aproximadamente 5%, para o Traço C foi de 2,5% e, para o Traço D, de 20,5%.

Figura 7 – Resistência à compressão do concreto submetido a 600°C.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Na Figura 7, a respeito da variação das resistências para os dois resfriamentos a 600°C, podemos comprovar uma grande redução das resistências mecânicas, tornando a diferença entre um traço e outro reduzida. Com o aumento de 400 para 600°C houve uma redução de aproximadamente 45% na resistência para os Traços A e B, enquanto que para o traço C a redução foi de aproximadamente 25% e para o Traço D, de 15%. Nessa situação de elevadas temperaturas, aparentemente a adição de fibras contribuiu positivamente para a resistência do concreto. As amostras do Traço B apresentaram-se com resistência inferior ao esperado, pelo fato de haver uma pequena quantidade de fibras em sua mistura, e para o Traço C, a resistência manteve o padrão das demais, não havendo grandes diferenças. Para os Traços C e D, verifica-se que as amostras submetidas ao resfriamento rápido se apresentaram mais resistentes que aquelas que foram deixadas à temperatura ambiente até se resfriarem lentamente. Isto pode ter acontecido devido ao fato de que os corpos de provas foram mergulhados em tanques para seu resfriamento e, como a sua temperatura era muito elevada, a água pode ter aquecido, tornando o resfriamento ineficiente. Além disso, a diferença entre a resistência das amostras do Traço A resfriadas lentamente e a das amostras resfriadas rapidamente foi de em torno de 5%, enquanto que para o Traço B essa diferença foi de aproximadamente 15% e, para os Traços C e D, ocorreu um aumento de aproximadamente 10%.

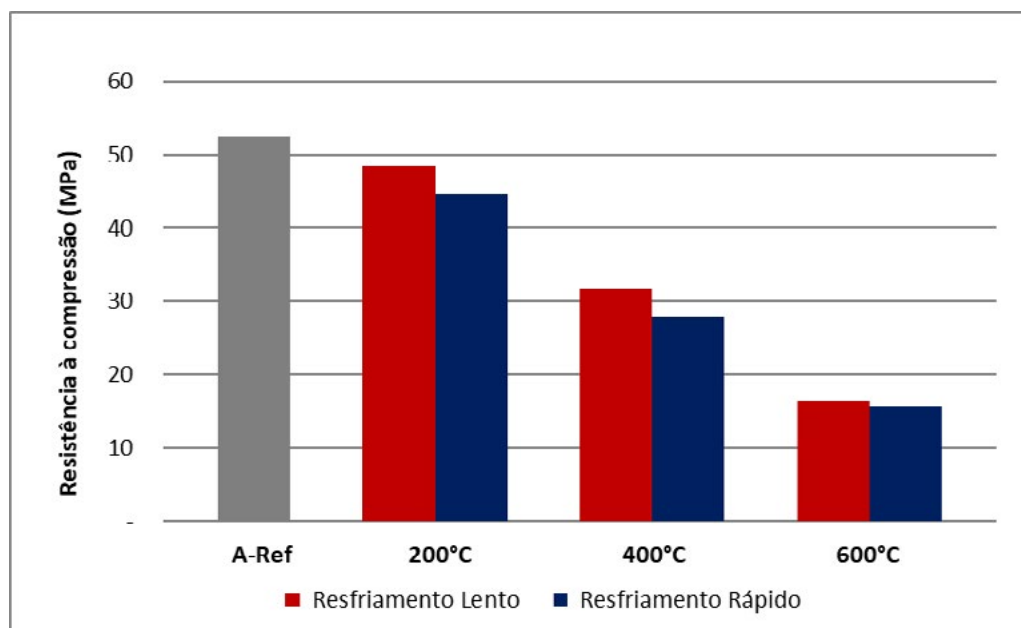
Observa-se, ainda, nas Figuras 5 a 7, que as amostras D-400-R e D-400-L foram as que apresentaram uma maior variação de resistência ao comparar os dois métodos de resfriamento, chegando a 25,8%. O traço que apresentou menor

variação de resistência na comparação entre os dois métodos de resfriamento foi o Traço B (B-600-R e B-600-L), em que a variação foi de 1,50%.

Nas Figuras 8 a 11 visualizam-se os gráficos que comparam a resistência de referência com a resistência das amostras submetidas às temperaturas de 200, 400 e 600°C e resfriadas rápida e lentamente, para os traços A, B, C e D, respectivamente.

Para a Figura 8 observam-se os resultados obtidos para as amostras de concreto do Traço A utilizadas como referência, juntamente com as demais resistências das amostras que foram submetidas às temperaturas de 200, 400 e 600°C. Pode-se observar, que a resistências diminuem linearmente conforme a temperatura aumenta, juntamente com o resfriamento rápido, que se apresenta em todos os casos inferior ao resfriamento lento.

Figura 8 – Resistência à compressão do Traço A.

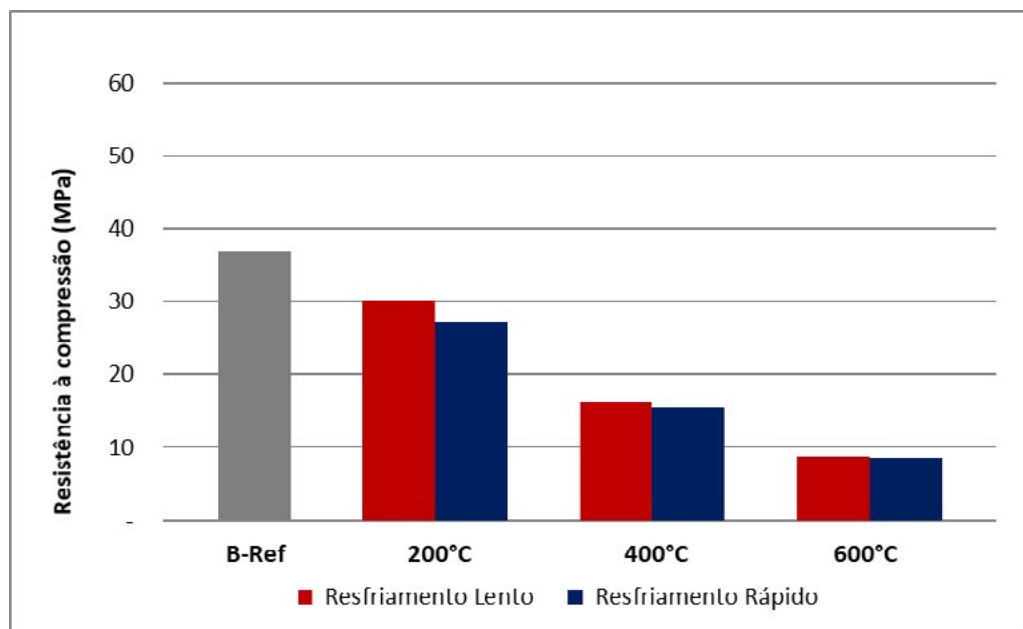


Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Na Figura 9, observam-se os resultados obtidos para as amostras de concreto do Traço B utilizadas como referência, juntamente com as demais resistências das amostras que foram submetidas às temperaturas de 200, 400 e 600°C, em que, da mesma forma como observado para o traço A, pode-se analisar uma perda linear de resistência conforme a temperatura se eleva, e as resistências do resfriamento rápido inferiores ao resfriamento lento, demonstrando que o método de resfriamento é um fator importante para a

resistência do concreto. Observa-se, ainda, que quanto mais a temperatura aumenta, menor a diferença das resistências entre os métodos de resfriamento.

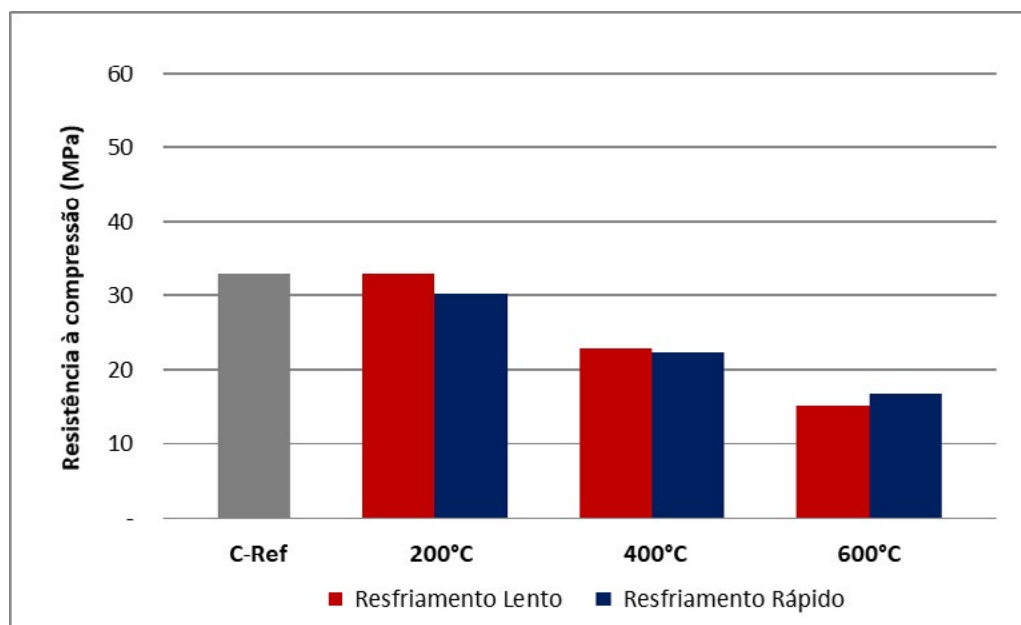
Figura 9 – Resistência à compressão do Traço B.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Na Figura 10, observam-se os resultados obtidos para as amostras de concreto do Traço C utilizadas como referência, juntamente com as demais resistências das amostras que foram submetidas às temperaturas de 200, 400 e 600°C. Pode-se verificar que a resistência de referência apresenta-se ligeiramente inferior à resistência a 200°C com resfriamento lento, essa diferença é de 0,08 MPa, sendo quase imperceptível. Para os demais casos, apresentam redução da resistência conforme se aumenta a temperatura. Para a temperatura de 600°C, observa-se um comportamento distinto, em que o resfriamento rápido resultou em maior resistência do que o resfriamento lento, o que pode ter ocorrido devido à presença de fibras.

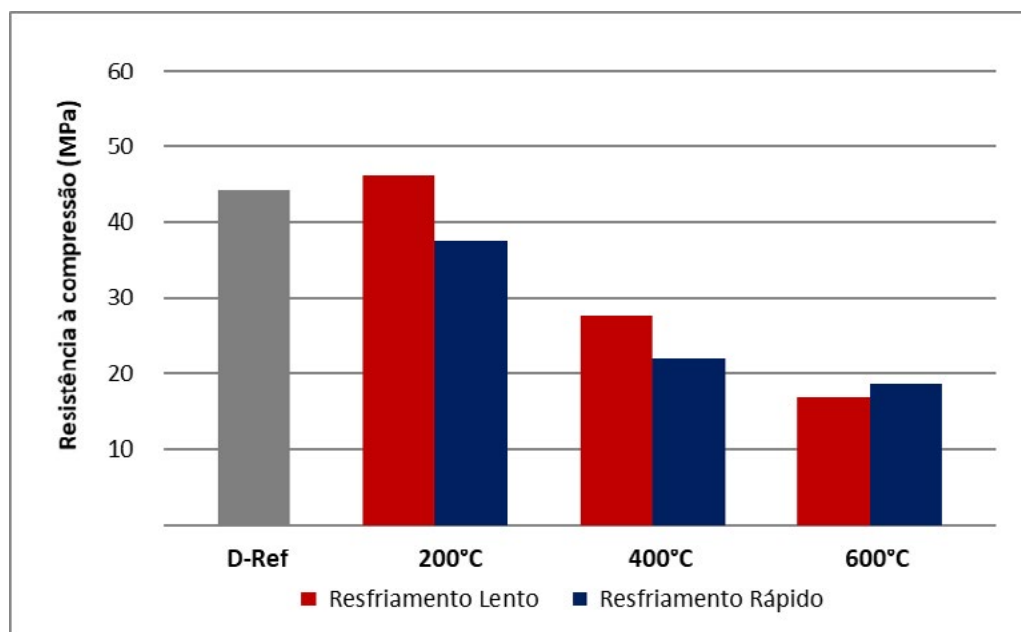
Figura 10 – Resistência à compressão do Traço C.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos para as amostras de concreto do Traço D utilizadas como referência, juntamente com as demais resistências das amostras que foram submetidas às temperaturas de 200, 400 e 600°C. Da mesma forma que se verificou para o Traço C, para o Traço D, para as amostras submetidas a 200°C e resfriadas lentamente, também foram obtidas resistências superiores às amostras de referência, porém, para esse caso a diferença foi pequena, de 1,85 MPa, podendo nitidamente ser observada no gráfico. Para as demais temperaturas, nota-se um padrão, reduzindo a resistência conforme a temperatura se eleva. Além disto, também da mesma forma como foi observado para o Traço C, para as amostras do Traço D submetidas à temperatura de 600°C registrou-se uma maior resistência para o resfriamento rápido em comparação ao resfriamento lento.

Figura 11 – Resistência à compressão do Traço D.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Analisados os gráficos apresentados nas Figuras 8 até 11, nota-se que, apesar de alguns pontos apresentarem um leve crescimento de resistência comparado ao traço referência, na maioria dos casos a resistência está diminuindo conforme a temperatura aumenta, concluindo-se que o concreto vai sofrendo maior perda conforme a temperatura aumenta mesmo analisando temperaturas muito menores do que as encontradas em um incêndio. Além disto, o tipo de resfriamento influencia na resistência das amostras. Ao adicionar fibras, reduziu-se a resistência mecânica, mas no traço com maior teor houve um incremento em relação aos demais com fibras, podendo ter ocorrido essa variação devido às fibras não terem se integrado bem ao concreto, não dando um aumento considerável de resistência em pequenas quantidades.

Chan, Peng e Anson (1999) analisaram que geralmente o concreto comum exposto a temperaturas de cerca de 300°C tem em média 25% de redução em sua resistência à compressão. Quando a temperatura for superior a 600°C, essa redução pode chegar, em média, a 75%. Observa-se, de maneira geral, que os resultados desta pesquisa corroboram com o observado pelos autores anteriormente citados, uma vez que a redução da resistência das amostras foi maior quanto maior a temperatura a que elas foram expostas. Os corpos de prova de concreto expostos a 200°C tiveram um declínio médio de em torno de 11% em relação à resistência de referência, enquanto que os

expostos a 400°C tiveram uma redução de 45% e, os submetidos a 600°C, de 65%, aproximadamente.

Analisando visualmente os CPs após o rompimento, observou-se que as amostras sem adição de fibra se quebraram facilmente, a maioria delas partindo ao meio (apresentando um aspecto como pode-se visualizar a Figura 12), enquanto que os CPs com fibras não partiram, apenas sofreram deformações, mesmo após o fim do ensaio de compressão. A coloração das amostras também sofreu alterações, ficando com uma coloração mais esbranquiçada, da mesma forma como observado por Castro (2017).

Figura 12 – Exemplo de amostra após rompimento no ensaio de compressão.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo estudar o comportamento mecânico do concreto sem e com adição de fibras de polipropileno. Além disso, avaliou-se também a influência do tipo de resfriamento das amostras após serem submetidas às altas temperaturas.

A partir dos resultados obtidos, pode-se analisar que, mesmo com adição de fibras, o traço B não obteve um bom resultado à compressão, tendo resistência mais alta quando não foi exposto a elevadas temperaturas (B-ref). Já para os Traços A e D obteve-se um resultado satisfatório de resistência à compressão, indiferente de serem ou não expostos a elevadas temperaturas, das diferenças de temperatura e do seu resfriamento. Já o Traço C, se manteve

mediano, não atingindo grandes resistências, mas também não reduzindo muito a mesma quando submetido às temperaturas elevadas. Desta forma, não é possível afirmar que a adição das fibras de polipropileno teve influência no ganho e/ou na manutenção do concreto após serem submetidos às altas temperaturas.

Em relação ao tipo de resfriamento, observou-se que, de maneira geral, quando submetido ao resfriamento rápido, a resistência do concreto diminuiu quando comparada ao resfriamento lento. Apenas para os Traços C e D ocorreu o oposto, verificando-se que houve um aumento de resistência quando exposto à temperatura de 600°C e resfriado rapidamente. Como os corpos de prova foram mergulhados em um tanque, entende-se que a água pode ter aquecido consideravelmente, fazendo com que o resfriamento ocorresse a uma taxa mais lenta, tornando-o ineficiente para esta situação.

Visualmente, as amostras submetidas a temperaturas elevadas apresentaram modificação de sua coloração, ficando mais esbranquiçadas. Ao serem resfriadas rapidamente, observou-se nelas variadas trincas, diferente dos corpos de prova resfriados lentamente que não apresentaram trincas visíveis a olho nu.

Em relação ao efeito *spalling*, apenas um corpo de prova foi perdido por deslocamentos, sendo que este não continha adição de fibras. Como o programa experimental desta pesquisa consiste de uma pequena quantidade de amostras e devido à variabilidade dos resultados, não pode-se concluir com exatidão se as fibras contribuíram positivamente para evitar este efeito.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. Versão corrigida: 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Versão corrigida: 2019.

ANDRADE, J. J. O.; POSSAN, E. Propriedade dos Polímeros. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. In: ISAIA, G. C. 3. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2017. p. 1297-1322.

CASTRO, D. **Análise da resistência do concreto com adição de fibras de polipropileno submetido a altas temperaturas**. 2017. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2017. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/1922/1/2017DianadeCastro.pdf>. Acesso em: 16 out. 2021.

CHAN, Y. N.; PENG, G. F.; ANSON, M. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. **Cement and Concrete Composites**, 21, N. 1, p. 23-27, 1999.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Estruturas de concreto armado em situação de incêndio. **Anais[...]** In: XXX Jornadas sul-americanas de engenharia estrutural. Universidade de Brasília: Brasília, 2002.

FIGUEIREDO, A. D.; COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em alta temperatura. **Anais[...]** In Seminário Internacional NUTAU 2002: Sustentabilidade, Arquitetura, Desenho Urbano. São Paulo, 2002.

LIMA, R. C. A. de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. 257 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIMA, R. C. A.; KIRCHHOF, L. D. ; CASONATO, C. A.; SILVA FILHO, L. C. P. Efeito de altas temperaturas no concreto. **Anais[...]** In: II Seminário de Patologias das Edificações – Novos Materiais e Tecnologias Emergentes,, LEME/UFRGS, Porto Alegre, 2004.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Porto Alegre: Bookman, 2015.

NINCE, A. A.; FIGUEIREDO, A. D.; BITTENCOURT, T. N. Absorção e índice de vazios em concreto reforçado com fibra de polipropileno exposto a 400 °C e 600 °C. **Anais[...]** In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2003.

SCOARIS, M. R. **Concretos reforçados com fibras: avaliação das propriedades mecânicas através do método da maturidade**. 2005. 260 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

SOUZA, L. D. P. S. **Análise do comportamento estrutural de vigas de concreto armado submetidas às altas temperaturas utilizando a metodologia do planejamento fatorial**. 2016. 112 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-

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

VIANA, A. C. C. Concreto pré-fabricado: alteração da resistência à compressão quando exposto a altas temperaturas. **Anais[...]** In: 56° Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Natal/RN. 2014.