

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO E NANOTUBOS DE CARBONO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS E DE DURABILIDADE DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA SOB ELEVADAS TEMPERATURAS

Heron Freitas Resende^{[1]*}

^[1] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG).
Av. Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - MG, Brasil.

* Autor correspondente: heronfr@hotmail.com

Eduardo Brandão Diniz Lage

Msc. Eng. Civil, UNIFUNCESI
brandaolage@gmail.com

Resumo

Os elementos estruturais utilizados na construção civil devem ser projetados para atender aos requisitos de desempenho mecânico, durabilidade e resistência ao fogo. Os principais atributos do concreto de alta resistência (CAR) são sua maior resistência mecânica e durabilidade. Entretanto, dada sua baixa porosidade, o CAR tem menor resistência ao fogo quando comparado com concreto de resistência normal (CRN), ou seja, é mais propenso a sofrer ruptura, normalmente explosiva. Sabe-se que o uso de fibras de polipropileno (FPs) no concreto em elevadas temperaturas não evita a formação de propagação de trincas sob altos níveis de tensões. Todavia, o seu uso em concreto reduz significativamente a ocorrência do lascamento no material quando submetido às elevadas temperaturas. Além disso, concretos com adição de nanotubos de carbono (NTCs) têm apresentado melhorias em algumas das propriedades mecânicas do concreto, como aumento da resistência à compressão, à tração e diminuição da porosidade. Assim, este trabalho visa elucidar a influência das altas temperaturas sobre as propriedades mecânicas residuais e a durabilidade do concreto de alta resistência com adição de fibras de polipropileno e de nanotubos de carbono (CAR-FPNC), bem como analisar a possível ocorrência de deslocamento (*spalling*). Para atingir este objetivo proposto, a revisão sistemática de literatura (RSL) foi aplicada para selecionar as publicações mais relevantes dos últimos dez anos, resultando em dois artigos para análise integral. Os resultados da RSL indicam melhorias nas propriedades mecânicas residuais, durabilidade e de microestrutura quando se adiciona NTCs e FPs em argamassas em diferentes temperaturas quando comparada com argamassa simples (sem adições). Além disso, aborda as lacunas a serem preenchidas em pesquisas futuras como a necessidade de estudar o efeito do *spalling* em elevadas temperaturas, a durabilidade e as propriedades mecânicas residuais, como o uso de NTCs e de FPs no CAR, é vital.

Palavras-chave: concreto de alta resistência, fibras de polipropileno, nanotubos de carbono, propriedades mecânicas residuais, durabilidade.

1. Introdução

O uso de concreto de alta resistência (CAR) tem se tornado cada vez mais atrativo e aplicado na construção civil principalmente por oferecer vantagens econômicas, arquitetônicas e estruturais significativas quando comparada ao concreto de resistência normal (CRN) (LAM *et al.*, 2012). Atualmente o CAR pode ser produzido por diversas usinas, é amplamente utilizado em todo o mundo e está em franco desenvolvimento (BEHNOOD; GRANDEHARI, 2009). Desse modo, os riscos de sua exposição a elevadas temperaturas, como em situações de incêndios acidentais ou mesmo de altas temperaturas contínuas, também aumentaram.

Nesse sentido, observa-se uma tendência do uso do CAR por parte das indústrias de construção civil. De acordo com Kodur (2005), os pilares e os demais elementos de sustentação das grandes estruturas, como edifícios altos e principalmente aqueles projetados para resistir a elevados esforços de compressão, representam um dos maiores campos de aplicação do CAR. Em comparação com o CRN, sabe-se que o CAR tem maior resistência mecânica e durabilidade, características estas fundamentais para o desempenho e segurança de uma edificação (BRITEZ, 2011). Entretanto, algumas pesquisas demonstraram que o CAR tem a desvantagem em resistir ao fogo, pois é mais propenso a lascas explosivas devido a sua baixa porosidade (HIREMATH; YARAGAL, 2018; Li *et al.*, 2004; BEHNOOD; GRANDEHARI, 2009).

No contexto da construção civil, especificamente, a nanotecnologia tem sido um ramo cada vez mais investigado principalmente pelo seu potencial em melhorar o desempenho de materiais à base de cimento Portland, destacando-se a adição de nanotubos de carbono (NTCs), conjunto de estruturas de carbono que obtêm forma cilíndrica em escala manométrica depois de sintetizadas. Alguns trabalhos apontam que a adição desse material ao CAR pode melhorar sua resistência mecânica e durabilidade (DUART, 2021; YAO; LU, 2021). Todavia, por se tratar de um material com alto potencial de inovação, ainda existem lacunas em relação ao seu emprego em compósitos de cimento Portland que precisam ser preenchidas, como o do seu real comportamento mecânico e de durabilidade em elevadas temperaturas.

A adição de fibras polipropileno (FPs) ao CAR, por sua vez, pode ser uma saída para o problema em elevadas temperaturas. Por apresentarem um pequeno módulo de elasticidade, as FPs não evitam a formação de propagação de trincas sob altos níveis de tensões. Entretanto, o seu uso em concreto reduz significativamente a ocorrência do lascamento no material quando submetido às elevadas temperaturas. Ademais, elas têm efeito significativo sobre o comportamento hidráulico do concreto exposto ao fogo, pois formam uma rede de pequenos vazios e canais permeáveis onde o vapor pressurizado pode passar, evitando que a pressão interna supere a do concreto e minimizando as possibilidades de ocorrência do lascamento explosivo nos concretos de alta resistência (FIGUEIREDO; NICE; SILVA, 2003).

Nesta perspectiva, no trabalho desenvolvido por Hiremath e Yaragal (2018), utilizaram-se três dosagens de fibras diferentes no CAR, 0,1%, 0,5% e 0,9% por quilo de cimento. Os autores constataram que a fragmentação explosiva pode ser protegida usando dosagem mínima de fibras (0,1%) e que, à medida que a dosagem aumenta, o risco de fragmentação reduz. Além disso, o aumento da dosagem diminui as fissuras nas superfícies e poros quando o CAR é submetido a temperaturas elevadas, sendo que, neste caso, as conclusões deste trabalho apontam para o uso de dosagem de fibras 0,5% como melhor opção.

No estudo conduzido por Resende (2021, 2023, 2025), a adição de 2 kg/m³ de FPs ao CAR melhorou suas propriedades mecânicas residuais de resistência à compressão (até a faixa de 400 °C) e resistência à tração (até 200 °C), e o módulo de elasticidade (na temperatura ambiente), além das propriedades de durabilidade de compacidade (até 200 °C, medida pelo ensaio de ultrassom) e de resistividade elétrica (até patamares de 400 °C). Em elevadas temperaturas (600 °C e 800 °C), todos os ensaios mostraram desempenho similar nas propriedades mecânicas e de durabilidade, independente do uso ou não de FPs,

exceto os ensaios de absorção e de perda de massa, que pioraram com a adição de fibras em qualquer temperatura.

A adição de NTCs (NTCs) ao CAR tem se mostrado eficaz nas melhoras nas propriedades de resistência mecânica e de durabilidade. Além disso, uma alternativa muito utilizada e discutida no combate ao lascamento do material é adição de fibras de polipropileno (FPs), o qual possui baixo ponto de fusão (HEO *et al.*, 2012; CHEN, 2004). Os resultados dessa tecnologia comprovam que é possível minimizar a ocorrência do deslocamento (*spalling*) pelo fato de as fibras se fundirem e, dessa forma, permitirem uma rota de saída para os vapores durante a decomposição térmica da pasta. Desse modo, reduz-se a tensão interna gerada do concreto quando exposto à ação do fogo e o mesmo promove uma proteção às camadas internas do material, ampliando assim o tempo para o combate ao incêndio e evacuação dos usuários (CIFUENTES *et al.*, 2012; KHOURY, 2000; PHAN, 2002; KALIFA *et al.*, 2001; BILODEAL *et al.*, 2004; BENTZ, 2000).

Neste contexto, até onde sabemos, são poucos trabalhos divulgados na literatura que abordam a influência das elevadas temperaturas sobre as propriedades mecânicas residuais e a durabilidade do concreto de alta resistência com a adição de FPs e NTCs. Portanto, este manuscrito visa elucidar o estado da arte deste assunto, visando determinar como a adição conjunta de FPs e NTCs ao CAR em elevadas temperaturas influencia em: (i) seu comportamento mecânico; (ii) sua durabilidade; (iii) sua microestrutura; (iv) sua propensão ao *spalling*. Para tanto, uma revisão sistemática de literatura foi realizada para debater os resultados já consolidados e as direções para pesquisas futuras.

2. Materiais e Métodos

Foi feita uma revisão sistemática de literatura (RSL), garantindo uma melhor organização dos resultados e informações. A Figura 1 demonstra as principais etapas dessa metodologia.

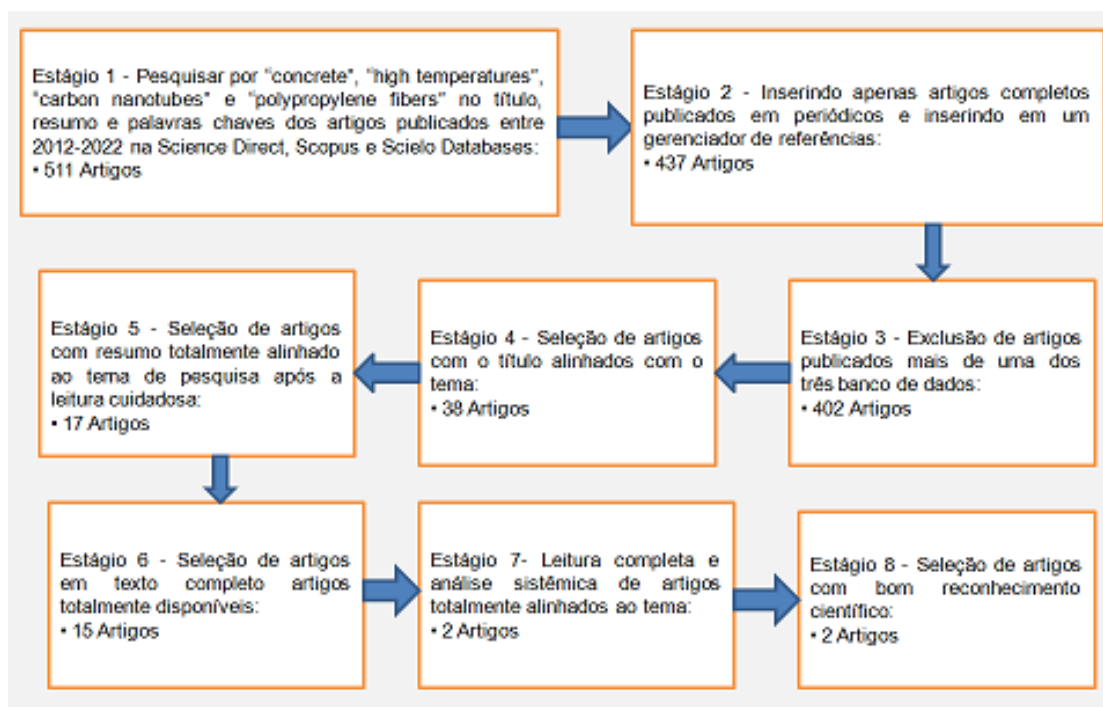


Figura 1. Estágios da RSL

A definição do recorte temporal e das bases de dados indicadas na primeira etapa visam incluir as pesquisas mais recentes sobre o tema. Da segunda à sexta etapa, após a verificação dos critérios estabelecidos, foram selecionados 15 artigos para a leitura íntegra. Em relação a estes artigos, verificou-se que apenas dois estavam totalmente alinhados com o tema de pesquisa e foram utilizadas na análise sistemática da seguinte etapa. Observa-se que os dois artigos selecionados abordam o estudo híbrido de NTCs e FPs submetidos a elevadas temperaturas em argamassas. Para o CAR, especificamente, com NTCs e FPs submetido a elevadas temperaturas não foi encontrado nenhum artigo nas bases de dados selecionadas. Apesar da extensa pesquisa que tem sido realizada nesta área, não há dados experimentais disponíveis sobre a resistência residual pós-fogo de compósitos reforçado com fibra contendo NTCs. Assim, o papel desempenhado por FPs e NTCs adicionados ao CAR precisa ser investigado de forma abrangente. Portanto, a presente RSL será realizada no efeito dessas adições em argamassas ao invés do CAR. Estes resultados divulgados podem se correlacionar com o CAR, que inclui na mistura a adição do agregado graúdo na confecção das amostras. Após a leitura completa dos artigos, foi feita uma análise sistemática através de lentes de pesquisa. Neste trabalho, as lentes de pesquisas foram as propriedades mecânicas residuais, durabilidade e degradação da microestrutura, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Lentes de pesquisa

Lente de pesquisa	Objetivo
Propriedades mecânicas residuais Durabilidade Microestrutura	Avaliar a influência de cada parâmetro quando submetido a altas temperaturas

3. Resultados

3.1. Bibliografia selecionada

A Tabela 2 detalha as referências selecionadas para o portfólio, já constando o número de citações de cada artigo de acordo com o Google Acadêmico, em 30 de outubro de 2022. Ressalta-se que os dois manuscritos foram publicados há menos de dois anos e, ainda assim, apresentam um bom número de citações.

Tabela 2. Detalhes dos artigos selecionados aplicando a metodologia ProKnow-C.

ID	Autores	Título	Periódico	Ano	Citações
[1]	Peem, N.; Narathip, B.; Pitcha, J.; Tawatchai, C.; Piti, S.	Hybrid Effect of carbon nanotubes and polypropylene fibers on mechanical properties and fire resistance of cement mortar	<i>Construction and Building Materials</i>	2021	22
[2]	Mohammad, R; Nasser, A; Mohamed, R.	Hybrid Effect of carbon nanotubes and polypropylene microfibers on fire resistance, thermal characteristics and microstructure of cementitious composites	<i>Construction and Building Materials</i>	2021	11

Peem *et al.* (2021) (referência citada somente como “[1]” daqui em diante) estudaram experimentalmente o efeito híbrido de NTCs de paredes múltiplas (NTCPMs) e FPs nas propriedades mecânicas residuais e durabilidade de resistência ao fogo da argamassa de cimento Portland. NTCs de 0,1%, 0,25% e 0,5% foram adicionados na argamassa em conjunto com as FPs que foram adicionados em uma dosagem constante de 0,2% em volume. A resistência da argamassa a várias temperaturas até 1000 °C foi determinada. Os resultados obtidos pelos autores foram promissores, indicando que 0,1% de NTCPMs melhorou a resistência à compressão e a permeabilidade da argamassa. Além disso, o estudo mostrou que a argamassa de cimento com alta resistência ao fogo pode ser desenvolvida adicionando 0,25% de NTCs e

0,2% de FPs no compósito. Depois de ter sido aquecida a 1000 °C, a argamassa produzida com essa mistura apresentou ótima resistência de aproximadamente 40%, 19% superior à observada com argamassa simples.

Irshidat *et al.* (2021) (referência citada somente como “[2]” daqui em diante) estudaram experimentalmente o efeito híbrido de NTCs e Microfibras de polipropileno nas propriedades mecânicas residuais e durabilidade de resistência ao fogo de compósitos cimentícios. As argamassas de cimentos com dosagens de NTCs de 0,353 kg, 1,412 kg foram adicionados e FPs foram adicionados em uma dosagem de 0,353 kg/m³, 0,706 K/m³ foram preparadas e aquecidas a 150 °C, 200 °C, 450 °C e 600 °C. Os resultados mostraram à capacidade de NTCs de aumentar a capacidade as resistências à compressão e flexão residuais de argamassas reforçadas com microfibras de polipropileno exposta a temperaturas elevadas até 600 °C.

Na Tabela 3 se apresenta uma revisão dos artigos dos principais parâmetros das amostras e dos ensaios de aquecimento para realização da análise sistêmica das propriedades mecânicas residuais, durabilidade e análise de microestrutura proposta na revisão sistemática.

Tabela 3. Resumo dos principais parâmetros das amostras e do ciclo de aquecimento dos artigos [1] e [2]

ID	Teor de NTC	Aditivos	Tempo de Cura	Corpos de prova	Temperaturas (°C)	Taxa de aquecimento	Tempo de exposição
[1]	NTCPM 0,1, 0,25, 0,5%. FP 0,2%.	SF (agente surfactante)	28 dias	Cubos 50 mm. Prismas 40x40x160 mm	400, 800, 1000	5 °C/min	2 horas
[2]	NTCs 0,05, 0,2%. FP 0,05, 0,1%.	Superplastificante de éter de policarboxilato (PC 485)	28 dias	Cubos 50mm Prismas 40x40x160mm	150, 200, 450, 600	2 °C/min	2 horas

Nota: O resfriamento em ambos os trabalhos ocorreu dentro do forno de aquecimento e não foi registrado *spalling*.

3.2. Análise Sistêmica

3.2.1. Propriedades mecânicas residuais

O estudo das propriedades mecânicas residuais é um fator chave para entendimento do comportamento das estruturas de concreto armado quando submetido a elevadas temperaturas. As Tabelas 4 e 5 resume todos os resultados dos estudos de resistência à compressão e resistência à flexão quando as amostras de argamassas de referência e com adição de NTCs em conjunto com FP quando foram submetidas a elevadas temperaturas, além da variação percentual em relação ao concreto de referência (CR).

Tabela 4. Resultados de resistência à compressão em diferentes temperaturas.

ID	Amostras	f _{c,28} (MPa)	Variação em relação ao CR (%)
----	----------	-------------------------	-------------------------------

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO E NANOTUBOS DE CARBONO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS E DE DURABILIDADE DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA SOB ELEVADAS TEMPERATURAS

RESENDE, Heron Freitas; LAGE, Eduardo Brandão Diniz

[1]	(i) Referência	(i) 39,0	(i) -
	(ii) Combinado – 0,1 % CNTs, 0,2% PP- T 25 °C	(ii) 47,4	(ii) -
	(iii) Combinado – 0,25 % CNTs, 0,2% PP- T 25 °C	(iii) 37,7	(iii) -
	(iv) Combinado – 0,5 % CNTs, 0,2% PP- T 25 °C	(iv) 31,6	(iv) -
	(v) Referência – 400 °C	(v) 32,4	(v) (-17)
	(vi) Combinado – 0,1 % CNTs, 0,2% PP- T 400 °C	(vi) 34,3	(vi) (-27)
	(vii) Combinado – 0,25 % CNTs, 0,2% PP- T 400 °C	(vii) 37,2	(vii) (-1)
	(viii) Combinado – 0,5 % CNTs, 0,2% PP- T 400 °C	(viii) 34,8	(viii) (+10)
	(ix) Referência – 800 °C	(ix) 18,3	(ix) (-53)
	(x) Combinado – 0,1 % CNTs, 0,2% PP- T 800 °C	(x) 26,1	(x) (-45)
	(xi) Combinado – 0,25 % CNTs, 0,2% PP- T 800 °C	(xi) 24,1	(xi) (-36)
	(xii) Combinado – 0,5 % CNTs, 0,2% PP- T 800 °C	(xii) 17,7	(xii) (-44)
	(xiii) Referência – 1000 °C	(xiii) 10,5	(xiii) (-73)
	(xiv) Combinado – 0,1 %CNTs, 0,2% PP- T 1000 °C	(xiv) 12,8	(xiv) (-73)
	(xv) Combinado – 0,25 % CNTs, 0,2% PP- T 1000 °C	(xv) 15	(xv) (-60)
	(xvi) Combinado – 0,5 % CNTs, 0,2% PP- T 1000 °C	(xvi) 13	(xvi) (-59)
[2]	(i) Referência	(i) 30,3	(i) -
	(ii) Referência Combinado	(ii) 39,0	(ii) -
	(iii) Combinado – 0,05 % CNTs, 0,1% PP- T 150 °C	(iii) 43,4	(iii) (+11,3)
	(iv) Combinado – 0,05 % CNTs, 0,1% PP- T 200 °C	(iv) 46,7	(iv) (+19,7)
	(v) Combinado – 0,05 % CNTs, 0,1% PP- T 450 °C	(v) 31,2	(v) (-20,0)
	(vi) Combinado – 0,05 % CNTs, 0,1% PP- T 600 °C	(vi) 19,1	(vi) (-51,9)

Analisando a Tabela 3, nota-se que no estudo [1] a adição 0,1% NTCs e 0,2% de FPs nos compósitos cimentícios apresentaram os melhores valores de resistência à compressão na temperatura ambiente quando comparado com as demais amostras, aumento de 21,5% na resistência à compressão. Estes resultados estão de acordo com os resultados dos estudos de Sedaghatdoost *et al.* (2018). Entretanto, as adições de 0,25%, 0,50% NTCs juntamente 0,2% FP diminuiu a resistência à compressão dos compósitos quando comparados com a amostra de referência sem adição de NTCs e FPs. Os autores justificaram essa redução na diminuição na resistência à compressão devido a aglomeração dos compósitos híbridos que foram adicionados na pasta de cimento.

No caso do estudo [2], adicionando 0,05 % NTCs combinado com 0,1% FP no compósito cimentício reforçado, aumenta-se a resistência à compressão da argamassa em 28,7% quando comparado como a argamassa de referência sem adição híbrida de NTCs e de FPs. Os autores justificam que este aumento de resistência à compressão é devido ao poço distribuídos dos NTCs dentro dos produtos de hidratação que retardam a iniciação das trincas, enquanto a presença de microfibras de PP mitiga a propagação de trincas. Além disso, os NTCs poderiam aumentar a adesão entre as FP e a pasta de cimento, o que melhorou a transferência de tensão, melhorando assim a sua resistência (Sedaghatdoost *et al.*, 2018).

De acordo com os resultados expostos dos estudos [1,2] na tabela 3, conclui-se que nas condições de temperatura ambiente, ao adicionar quantidades de NTCs entre 0,05 % e 0,1 % combinado com adição de FP entre 0,1 % e 0,2 % aumenta consideravelmente a resistência à compressão das argamassas. Em contrapartida, ao adicionar valores superiores aos supracitados de NTCs nas argamassas, reduz sutilmente os valores de resistência à compressão quando comparados com os valores de resistência à compressão de argamassas de referência sem adição híbrida de NTCs e FP.

No estudo [1], observa-se que na temperatura de 400 °C, a amostra de argamassa com teores de NTCs 0,1% e 0,2% FP houve uma perda de 27% no valor de resistência à compressão quando comparado com o valor na temperatura ambiente, esta perda é superior a perda da argamassa de referência sem adição híbrida de NTCs e FP. Os autores acreditam que essa perda dos compósitos fortes/denso não é benéfica na prevenção de danos causados pelo fogo. Em outras palavras, o compósito a base de cimento com baixa

permeabilidade tem menor resistência ao fogo. Compósitos com adição 0,25% e 0,5% NTCs juntamente 0,2% FP, teve a resistência à compressão aumentada após os 400 °C, os autores justificaram este ganho de resistência devido ao processo contínuo de hidratação dos cimentos em condições de autoclave.

Ainda sobre o estudo [1], nas temperaturas de 800 °C e 1000 °C, nota-se uma diminuição significativa no valor de resistência à compressão para todas as amostras. Os resultados também mostraram que não houve diferenças significativas na resistência pós-fogo dos corpos de provas de argamassa de cimento contendo diferentes porcentagens de NTCs. Observa-se que, a adição de FPs melhorou a resistência à compressão em elevadas temperaturas. Portanto, as proporções de NTCs > 0,1% em conjunto com 0,2% FP, tiveram os melhores desempenhos e podem atingir valores de resistência à compressão residual aproximadamente a 40% após a exposição de altas temperaturas.

No estudo [2], a adição de 0,05 % NTCs combinado com 0,1% FP no compósito cimentício reforçado, houve aumento na resistência à compressão de 11,3% na temperatura de 150 °C e 19,7% na temperatura de 200 °C bem como os seus valores de resistência à compressão foram superiores aos valores de compósito cimentício de referência nestas temperaturas supracitadas. Mais uma vez, assim como ocorreu no estudo [1], este aumento de resistência foi atribuído pelos autores ao processo de hidratação das partículas de cimento, conforme mencionado (ZHANG; KAI; LIEW, 2017). Além disso, os autores relatam que este aumento é devido à capacidade dos NTCs de preencher os vazios e a capacidade das FPs de preencher as rachaduras.

Ainda sobre o estudo [2], nas temperaturas de 450 °C e 600 °C, as adições de NTCs combinados com as FPs nas argamassas resultaram em maiores valores de resistência à compressão residual quando comparados os valores de resistência residual das argamassas de referência. Os autores atribuíram este aumento à capacidade dos NTCs com a sua estrutura oca de funcionar como canais para liberar o vapor de alta pressão resultante da evaporação da água reduzindo assim os danos (ZHANG; KAI; LIEW, 2017). Portanto, conclui-se que a presença de NTCs combinado as FP em argamassas aumentou a resistência à compressão residual quando comparadas com a argamassa de referência em todos os níveis de temperaturas nos estudos [1,2].

Tabela 4. Resultados de resistência à flexão em diferentes temperaturas.

ID	Amostras	$f_{c,flexão,28}$	Varição em relação ao CR (%)
[1]	(i) Referência	(i) 6,2	(i) -
	(ii) Combinado – 0,1 % CNTs, 0,2% PP- T 25 °C	(ii) 8,5	(ii) -
	(iii) Combinado – 0,25 % CNTs, 0,2% PP- T 25 °C	(iii) 7,2	(iii) -
	(iv) Combinado – 0,5 % CNTs, 0,2% PP- T 25 °C	(iv) 5,5	(iv) -
	(v) Referência – 400 °C	(v) 3,8	(v) (-44)
	(vi) Combinado – 0,1 % CNTs, 0,2% PP- T 400 °C	(vi) 6,3	(vi) (-26)
	(vii) Combinado – 0,25 % CNTs, 0,2% PP- T 400 °C	(vii) 7,1	(vii) (-2)
	(viii) Combinado – 0,5 % CNTs, 0,2% PP- T 400 °C	(viii) 4,6	(viii) (-16)
	(ix) Referência – 800 °C	(ix) 0,9	(ix) (-86)
	(x) Combinado – 0,1 % CNTs, 0,2% PP- T 800 °C	(x) 1,8	(x) (-79)
	(xi) Combinado – 0,25 % CNTs, 0,2% PP- T 800 °C	(xi) 1,8	(xi) (-75)
	(xii) Combinado – 0,5 % CNTs, 0,2% PP- T 800 °C	(xii) 1,1	(xii) (-80)
	(xiii) Referência – 1000 °C	(xiii) 0,5	(xiii) (-92)
	(xiv) Combinado – 0,1 %CNTs, 0,2% PP- T 1000 °C	(xiv) 0,8	(xiv) (-91)
	(xv) Combinado – 0,25 % CNTs, 0,2% PP- T 1000 °C	(xv) 1	(xv) (-86)
	(xvi) Combinado – 0,5 % CNTs, 0,2% PP- T 1000 °C	(xvi) 0,6	(xvi) (-89)
[2]	(i) Referência	(i) 2,0	(i) -
	(ii) Referência Combinado	(ii) 2,75	(ii) -
	(iii) Combinado – 0,05 % CNTs, 0,1% PP- T 150 °C	(iii)4,35	iii) (+58,2)

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO E NANOTUBOS DE CARBONO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS E DE DURABILIDADE DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA SOB ELEVADAS TEMPERATURAS

RESENDE, Heron Freitas; LAGE, Eduardo Brandão Diniz

(iv) Combinado – 0,05 % CNTs, 0,1% PP- T 200 °C	(iv) 3,55	(iv) (+29,1)
(v) Combinado – 0,05 % CNTs, 0,1% PP- T 450 °C	(v) 1,55	(v) (-43,6)
(vi) Combinado – 0,05 % CNTs, 0,1% PP- T 600 °C	(vi) -	(vi) -

Nota: A resistência à flexão aos 28 dias ($f_{c,flexão,28}$) foi dada em MPa no estudo [1] e em kN no estudo [2].

Analisando a Tabela 4, nota-se que no estudo [1] a adição 0,1% NTCs e 0,2% de FPs nos compósitos cimentícios apresentaram os melhores valores de resistência à flexão na temperatura ambiente quando comparado com as demais amostras, o aumento foi de 37,1% na resistência à flexão em relação à argamassa simples de referência. Observa-se também que os compósitos cimentícios que tiveram maior resistência à compressão também tiveram maior resistência à tração. Os autores justificam este aumento de resistência à flexão que os NTCs embutidos em uma matriz atuam como pontes entre os poros (AMIN; EL-GAMAL; HASHEM, 2015; BALOCH; KHUSHNOOD; KHALIQ, 2018; EL-GAMAL *et al.*, 2017) este comportamento pode melhorar a transferência de carga no compósito e melhorar a resistência à tração. Entretanto, a presença de proporções de 0,25 %, 0,5% em conjunto com 0,2% FP levou uma diminuição na resistência a flexão, o que mais uma vez, foi consistente com os resultados obtidos do teste de resistência à compressão.

No caso do estudo [2], adicionando 0,05 % NTCs combinado com 0,1% FP no compósito cimentício reforçado, aumenta-se a resistência à compressão flexão da argamassa em 58,2% quando comparado como a argamassa simples de referência.

De acordo com os resultados divulgados dos estudos [1,2] da tabela 4, conclui-se que nas condições de temperatura ambiente, ao adicionar quantidades de NTCs entre 0,05 % e 0,1 % combinado com adição de FP entre 0,1 % e 0,2 % aumenta acentuadamente a resistência à flexão das argamassas. Em contrapartida, ao adicionar valores superiores aos supracitados de NTCs e FP nos compósitos cimentícios, tem-se uma redução os valores de resistência à compressão.

No estudo [1], em todos níveis de temperaturas estudadas, nota-se que as amostras com a adições de NTCs e de FP nas argamassas tiveram melhores resultados de resistência residual a flexão quando comparado com as amostras sem argamassas simples de referência. As amostras contendo a adição 0,25% NTCs e 0,2% de FPs nos compósitos cimentícios apresentaram os melhores desempenhos em todos os níveis de temperatura estudada. Os autores atribuíram estes resultados devido ao efeito de ponte do NTCs que não apenas permitiu a transferência de tensão, mas atenuou as rachaduras durante a exposição ao fogo (AMIN; EL-GAMAL; HASHEM, 2015; BALOCH; ARSALAN; KHALIQ, 2018; EL-GAMAL *et al.*, 2017; ZHANG; KAI; LIEW, 2017). Observa-se também que as perdas de resistência à flexão foram significativamente maiores do que as perdas na resistência à compressão, possivelmente porque a primeira foi mais sensível às fissuras térmicas geradas durante os ensaios de incêndio (PENG *et al.*, 2006; CHAN; PENG; ANSON, 1999).

No estudo [2] houve a mesma tendência de resultados do estudo [1] para todos os níveis de temperaturas, notou-se que as amostras com a adições de NTCs e de FP nas argamassas tiveram melhores resultados de resistência residual a flexão quando comparado com as amostras sem argamassas simples de referência. Os autores associaram este resultado devido que a presença de NTCs com a sua condutividade térmica ajudaram a espalhar as tensões térmicas uniformemente através dos compósitos cimentícios (IRSHIDAT; AMMAR, 2018).

Assim, conclui-se que a presença de NTCs combinado as FP em argamassas aumentou a resistência à flexão residual quando comparadas com a argamassa de referência em todos os níveis de temperaturas dos estudos [1,2].

3.2.2. Durabilidade

O estudo da durabilidade é de suma importância para entendimento do comportamento das estruturas de concreto armado na temperatura ambiente e em elevadas temperaturas.

No estudo [1], não teve ensaios de durabilidade das argamassas com adição NTCs em conjunto com as FP após os corpos provas serem submetido a altas temperaturas. Entretanto, foi realizado ensaio de absorção de água dos corpos de provas de argamassa de todas as amostras. As análises destes resultados servem como parâmetros para entendimento da durabilidade. Os resultados de absorção de água da argamassa de cimento variaram de 6,9% a 8,6%, a amostra de argamassa contendo a adição 0,1% NTCs e 0,2% FF obteve os melhores resultados de absorção de água quando comparado com as demais amostras. Para esta mistura a absorção de água foi 6,9% sendo 1,2% inferior à da argamassa simples. Vale ressaltar que esta mesma amostra obteve a maior resistência à compressão quando comparado com as demais amostras. Para as amostras a adição 0,25% NTCs e 0,2% FF, 0, 5% NTCs e 0,2% FF obteve absorção de 7,3%, 8,2%, respectivamente. O que levou um aumento no percentual de água absorvida. Os autores justificaram estes resultados ao fato que a inclusão de FPs diminuiu a absorção de água no concreto (VAHID; TOGAY., 2015).

Assim, conclui-se que a presença de NTCs combinado as FP em argamassas obteve melhores resultados de absorção de água quando comparadas com a argamassa de referência nas condições de temperatura ambiente.

No estudo [2], não teve ensaios de durabilidade das argamassas com adição NTCs em conjunto com as FP nas condições de temperatura ambiente e em a altas temperaturas.

Portanto, fica claro que não tem estudos divulgados na literatura da durabilidade de compósitos cimentícios com a adição de NTCs e de FPs nas condições de altas temperaturas.

3.2.3. Análise de microestrutura

Assim como as propriedades mecânicas residuais, durabilidade o entendimento da microestrutura é de fundamental importância para compreensão do comportamento das estruturas de concreto armado nas condições de temperatura ambiente e quando submetido a altas temperaturas.

No estudo [1], as observações de microestrutura foram realizadas através do MEV (microscópio de varredura eletrônica) das argamassas de referência e com adição de NTCs e FP. Após a cura de 28 dias nas condições de temperaturas ambiental, os autores notaram-se que os NTCs foram ancorados nas fases C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado) e se comportaram como preenchedores de espaços vazios. Consequentemente, os poros do gel C-S-H foram reduzidos e a microestrutura melhorada acarretando no aumento de resistência à compressão. Já as FP tiveram uma boa adesão com a matriz de cimento no compósito.

Ainda sobre o estudo [1] nas condições de elevadas temperaturas, os autores observaram-se que as argamassas com adição NTCs e FP tiveram melhores desempenho a altas temperaturas do que as argamassas de referência sem adições. A presença de partículas de NTCs, que possuem alta condutividade térmica, reduz as tensões térmicas devido à diferença de temperatura entre a superfície e o núcleo do compósito (Sedaghatdoost *et al.*, 2018). Além disso, (Zhang *et al.*, 2017) relataram que o transporte de vapores é facilitado por um canal interno do nanotubo e, como resultado, pode-se esperar uma redução na pressão dos poros, jáas FP poros e canais foram criados devido à fusão das fibras da mesma de tal forma que o desenvolvimento de pressão interna durante o teste de fogo foi menor do que em amostras sem fibras; este fenômeno pode ter contribuído para a diminuição do dano de fogo dos compósitos.

No estudo [2] As imagens obtidas no Microscópio de varredura eletrônica (MEV) apontam que os CNTs preencheram os poros e retardam o início das rachaduras, enquanto as fibras de PP preencheram essas rachaduras e mitigaram sua propagação. Após a cura de 28 dias nas condições de temperaturas ambiental, os autores observaram-se que foram capturados produtos típicos de hidratação como C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado), C-H (Hidróxido de cálcio) e agulhas de etringita. As FPs atuaram como micro reforços distribuídos através dos produtos de hidratação. No caso do reforço híbrido, os NTCs desempenharam um papel importante para melhorar a ligação entre as FP e a matriz de cimento. O que melhorou o processo de transferência de tensões, aumentando assim as propriedades mecânicas (QIN, Yuan *et al.*, 2019).

Ainda sobre o estudo [2] nas condições de elevadas temperaturas, os autores observaram-se que à medida que a temperatura aumentou as microtrincas térmicas começaram a se iniciar e se propagar através do corpo de prova. Os NTCs preencheram os poros e se incorporaram nas paredes das fendas e as FP preencheram essas rachaduras e mitigaram a sua propagação, uma vez que o ponto de fusão das FP foi excedido, as fibras fundiram e criaram vazios extras dentro da microestrutura da argamassa. Esses vazios adicionais permitem que o vapor gerado devido ao processo de desidratação seja liberado, reduzindo assim a pressão dos poros e podendo atrasar o *spalling* (KODUR, 2014). A geração de vazios extras dentro da matriz cimentícia representa um dos principais fatores que causaram redução nas resistências mecânicas de corpos de prova aquecidos.

Portanto, conclui-se que a adição de NTCs em conjunto com as FP em argamassa funcionam em conjunto para melhorar a resistência ao fogo da argamassa como também ficou evidente que as resistências mecânicas aos 28 dias foram maiores quando comparado com as argamassas simples sem adições.

4.CONCLUSÃO

Uma RSL sobre o estudo das propriedades mecânicas residuais e a durabilidade do CAR-FPNC submetido em elevadas temperaturas, abrangendo dois artigos, foi realizada neste estudo. Das análises realizadas, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- i. O uso da revisão sistemática de literatura não retornou nenhum artigo na literatura sobre o tópico em questão;
- ii. Foram encontrados, porém, dois artigos sobre o estudo das propriedades mecânicas residuais e a durabilidade das argamassas com a adição de NTCs e FPs submetidas a altas temperaturas, situação que se tornou então o objeto de análise desta RSL;
- iii. Em ambos os estudos, a presença de NTCs combinados com as FPs em argamassas, quando comparadas com a argamassa de referência (sem adições), levaram a um melhor desempenho nos resultados tanto de resistência compressão residual quanto de resistência à compressão após a cura de 28 dias dos corpos de provas na temperatura ambiente. O mesmo é válido para a resistência à flexão residual.
- iv. A adição de NTCs e FPs às argamassas levou a menores índices absorção de água quando comparadas com a argamassa de referência nas condições de temperatura ambiente obtendo melhor desempenho. Ficou evidente que não existem estudos na literatura sobre a durabilidade de compósitos cimentícios com a adição de NTCs e de FPs em elevadas temperaturas;
- v. Quanto à análise de microestrutura, a adição de NTCs e FPs em argamassa melhora a resistência ao fogo da argamassa e as resistências mecânicas aos 28 dias na temperatura ambiente em comparação com as argamassas simples sem adições;

- vi. Não foi relatado em nenhum estudo a ocorrência do *spalling*. Portanto, este fenômeno precisa ser mais bem pesquisado para entendimento da sua possível ocorrência quando se adiciona NTCs e FP em compostos cimentícios submetido a altas temperaturas.

Essas conclusões revelam que a adição de NTCs e FPs melhoram as propriedades mecânicas residuais, durabilidade e de microestrutura submetido em elevadas temperaturas. Entretanto, as adições em CAR requerem uma melhor compreensão completa de sua contribuição quando submetido a altas temperaturas. Além disso, a influência do *spalling* não foi encontrado na revisão. Ressalta-se que os artigos encontrados se limitam à análise do portfólio de artigos apresentado.

Referências bibliográficas

- AFROUGHSABET, Vahid; OZBAKKALOGLU, Togay. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and building materials*, v. 94, p. 73-82, 2015.
- AMIN, M. S.; EL-GAMAL, S. M. A.; HASHEM, F. S. Fire resistance and mechanical properties of carbon nanotubes–clay bricks wastes (Homra) composites cement. *Construction and Building Materials*, v. 98, p. 237-249, 2015.
- BALOGH, Waqas Latif; KHUSHNOOD, Rao Arsalan; KHALIQ, Wasim. Influence of multi-walled carbon nanotubes on the residual performance of concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 185, p. 44-56, 2018.
- BEHNOOD, Ali; GHANDEHARI, Masoud. Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures. *Fire Safety Journal*, v. 44, n. 8, p. 1015-1022, 2009.
- BENTZ, Dale P. Fibers, percolation, and *spalling* of high-performance concrete. *Materials Journal*, v. 97, n. 3, p. 351-359, 2000.
- BILODEAL, A.; KODUR, V.; HOFF, G. Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the *spalling* of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. *Cement and Concrete Composites*, v. 26, n. 2, p. 163-174, 2004.
- BRITZ, Carlos Amado. Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- 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*, v. 21, n. 1, p. 23-27, 1999.
- CHEN, Bing; LIU, Juanyu. Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 6, p. 1065-1069, 2004.
- CIFUENTES, Héctor *et al.*, Effects of fibres and rice husk ash on properties of heated HSC. *Magazine of concrete research*, v. 64, n. 5, p. 457-470, 2012.
- DUART, Marcelo Adriano. Características microestruturais de concretos adicionados de CSH e NTCs. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, 2021.
- EL-GAMAL, S. M. A. *et al.*, Ceramic waste as an efficient material for enhancing the fire resistance and mechanical properties of hardened Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 1062-1078, 2017.
- FIQUEIREDO, A. D.; TANESI, J.; NINCE, A. A. Concreto com fibras de polipropileno. *Téchne*, São Paulo, v. 10, n. 66, 2002.
- Google, S. Scholar Google. Available online: <https://scholar.google.com.br/?hl=pt> (accessed on 01 November 2022).
- HEO, Young-Sun *et al.*, Limited effect of diameter of fibres on *spalling* protection of concrete in fire. *Materials and structures*, v. 45, n. 3, p. 325-335, 2012.
- HIREMATH, Parameshwar N.; YARAGAL, Subhash C. Performance evaluation of reactive powder concrete with polypropylene fibers at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 169, p. 499-512, 2018.

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO E NANOTUBOS DE CARBONO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS E DE DURABILIDADE DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA SOB ELEVADAS TEMPERATURAS

RESENDE, Heron Freitas; LAGE, Eduardo Brandão Diniz

IRSHIDAT, Mohammad R.; AL-NUAIMI, Nasser; RABIE, Mohamed. Hybrid effect of carbon nanotubes and polypropylene microfibers on fire resistance, thermal characteristics and microstructure of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, v. 266, p. 121154, 2021.

IRSHIDAT, Mohammad R.; AL-SHANNAQ, Ammar. Using textile reinforced mortar modified with carbon nano tubes to improve flexural performance of RC beams. *Composite Structures*, v. 200, p. 127-134, 2018.

KALIFA, Pierre; CHENE, Gregoire; GALLE, Christophe. High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From *spalling* to microstructure. *Cement and concrete research*, v. 31, n. 10, p. 1487-1499, 2001.

KHOURY, Gabriel Alexander. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in structural engineering and materials*, v. 2, n. 4, p. 429-447, 2000.

KODUR, V. K. R. Guidelines for fire resistance design of high-strength concrete columns. *Journal of fire protection engineering*, v. 15, n. 2, p. 93-106, 2005.

KODUR, Venkatesh. Properties of concrete at elevated temperatures. *International Scholarly Research Notices*, v. 2014, 2014.

LAM, Eddie Siu-Shu *et al.*, Monotonic and cyclic behavior of high-strength concrete with polypropylene fibers at high temperature. *ACI Materials Journal*, v. 109, n. 3, p. 323, 2012.

LI, Min; QIAN, ChunXiang; SUN, Wei. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and concrete research*, v. 34, n. 6, p. 1001-1005, 2004.

NUAKLONG, Peemet *et al.*, Hybrid effect of carbon nanotubes and polypropylene fibers on mechanical properties and fire resistance of cement mortar. *Construction and Building Materials*, v. 275, p. 122189, 2021.

PENG, Gai-Fei *et al.*, Explosive *spalling* and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 4, p. 723-727, 2006.

PHAN, Long T. *et al.*, High-strength concrete at high temperature-an overview. *Proceedings of 6th international symposium on utilization of high strength/high performance concrete*, Leipzig, Germany, p. 501-518, 2002.

QIN, Yuan *et al.*, Experimental study of compressive behavior of polypropylene-fiber-reinforced and polypropylene-fiber-fabric-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v. 194, p. 216-225, 2019.

RESENDE, Heron Freitas. Estudo da influência das elevadas temperaturas sobre as propriedades mecânicas residuais e a durabilidade do concreto de alta resistência com e sem adição de fibras de polipropileno. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

RESENDE, Heron Freitas et al. Estimation of physical and mechanical properties of high-strength concrete with polypropylene fibers in high-temperature condition. **journal of materials research and technology**, v. 24, p. 8184-8197, 2023.

RESENDE, Heron Freitas et al. Influência de fibras de polipropileno em concreto de alta resistência em temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, v. 25, p. e136778, 2025.

SEDAGHATDOOST, Arash; BEHFARNIA, Kiachehr. Mechanical properties of Portland cement mortar containing multi-walled carbon nanotubes at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 176, p. 482-489, 2018.

YAO, Yao; LU, Hao. Mechanical properties and failure mechanism of carbon nanotube concrete at high temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 297, p. 123782, 2021.

ZHANG, L. W.; KAI, M. F.; LIEW, K. M. Evaluation of microstructure and mechanical performance of CNT-reinforced cementitious composites at elevated temperatures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 95, p. 286-293, 2017.