

Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) em caso de incêndio

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.004-001>

Fabrizio Longhi Bolina

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM),
Departamento de Engenharia Civil e Estruturas, Santa
Maria (SP) Brasil

E-mail: fabriciobolina@gmail.com

RESUMO

O concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) tem propriedades mecânicas excepcionais à temperatura ambiente. No entanto, não existem procedimentos padronizados para caracterizar UHPC em incêndio. Isso se deve à escassez de pesquisas sobre o tema, deixando lacunas para estudos experimentais e numéricos. Este estudo coleta uma série de dados paramétricos de UHPC em altas temperaturas. Difusividade térmica, condutividade térmica, deformação térmica e calor específico como parâmetros térmicos foram definidos para diferentes faixas de temperatura. Os resultados foram comparados com outros concretos estruturais propostos na literatura (NSC, HSC e UHSC). O UHPC exibiu um comportamento particular do fogo. Em comparação com NSC, HSC e UHSC, a expansão térmica e os parâmetros mecânicos de UHPC são menos afetados no fogo, mas sua condutividade térmica e perda de massa são maiores. UHPC também tem o maior calor específico em comparação com outros concretos. O campo térmico da UHPC tende a ser maior em comparação com os outros concretos.

Palavras-chave: UHPC, Propriedades térmicas, Estruturas em incêndio.

Notação:

CA	Agregado graúdo
FA	Cinzas volantes
HSC	Concreto de alta resistência
NSC	Concreto de resistência normal
PVA	Acetato de polivinila
SF	Sílica ativa
UHPC	Concreto de Ultra-Alto Desempenho
UHSC	Concreto de Ultra-Alta Resistência
p/b	Relação água-aglutinante
C _p	Calor específico
k	Condutividade térmica

1 INTRODUÇÃO

O concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) é um concreto cimentício com notáveis propriedades mecânicas à temperatura ambiente. A resistência à compressão especificada deve ser de pelo menos 120 MPa de acordo com a norma ASTM C1856 (2017) [1]. UHPC tem baixo w/b, alto teor de cimento, agregados, fibras (aço, PVA, vidro) e superplastificante. Sua matriz é muito densa e possui um mínimo de poros interconectados, tornando-se uma opção atrativa em ambientes quimicamente agressivos.

Os edifícios são vulneráveis ao fogo. (2021) [2], não há muitas pesquisas sobre UHPC em altas temperaturas. No entanto, o UHPC deve se comportar bem no fogo para ser usado como material de construção. Estudos como Xiong e Liew (2016) [3], Kodur e Khaliq (2011) [4], Li, Qian e Sun (2004) [5], Poon, Shui e Lam (2004) [6], Kodur e Sultan (2003) [7] e Shin et al (2002) [8] já mostram que o concreto de alta resistência (CHC) não tem o mesmo comportamento de fogo que o concreto de resistência normal (NSC) devido ao spalling do concreto, (2022) [9] e Akca e Zihnioglu (2013) [10]. (2013) [11], o spalling ocorre mais frequentemente em UHPCs do que em NSCs devido à sua estrutura densa e permeabilidade limitada. A análise do spalling de concreto tem sido foco de pesquisas que buscaram analisar parametricamente as UHPC sob condições de incêndio [3, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17].

Não há requisitos padronizados de projeto de incêndio para estruturas UHPC. Normas como EN 1992-1.2 (2004) [18], ACI-216 (2014) [19], AS 3600 (2018) [20], NZS 3101-1 (2006) [21] e NBR 15200 (2012) [22] não fornecem valores termomecânicos para estruturas de RC de projeto de incêndio com resistência à compressão superior a 100 MPa. Existem poucos estudos sobre este tema, e o comportamento do fogo em UHPC não é bem conhecido na literatura. Este é um problema no projeto de incêndio de estruturas de RC. Poucos estudos têm tentado definir as propriedades térmicas da UHPC em incêndio. A esse respeito, autores como Ullah e colaboradores (2022) [9] não sugerem qualquer aplicação da UHPC no fogo.

Há uma discrepância. Autores como Du et al (2021) [23], Willie, Naaman e Parra-Montessinos (2011) [24] e Habel et al (2006) [25] acreditam que a UHPC é um dos materiais de construção mais promissores para o futuro, mas outros, incluindo Zhu et al (2021) [2] e Ullah et al (2022) [9], questionam sua sensibilidade ao fogo. Há necessidade de fazer mais pesquisas sobre UHPC em incêndios. Segundo SFPE (2008) [33], o desempenho das estruturas ao fogo depende das propriedades de alta temperatura de seus materiais.

Por outro lado, pesquisas recentes da UHPC não analisam o comportamento do fogo. (2022) [26] estudaram o comportamento mecânico da coluna de concreto armado com camisa UHPC à temperatura ambiente; (2022) [27] e Zhou et al (2023) [28] estudaram o desempenho da UHPC sob carga cíclica; (2022) [29] o comportamento flexural de feixes UHPC; (2023) [30] o uso de UHPC com

concreto fino reciclado; (2023) [31] as propriedades mecânicas da UHPC com diferentes tipos de cimento, Cui et al (2023) [32] com agentes expansores na mistura de concreto, entre outros.

(2020) [37] investigaram as propriedades térmicas da UHPC. Condutividade, calor específico, perda de massa e expansão foram investigados pelos autores. A revisão de literatura recomendada por Zhu et al (2021) [2] demonstrou ser o único estudo que sugeriu parâmetros térmicos para UHPC em diferentes faixas de temperatura. (2020) com valor f_c entre 164 e 178 MPa contém SF, areia de sílica, PP e fibras de aço, escória e agregados graúdos (AC). (2019) [38] já mostram que o CA reduz o campo térmico do UHPC, ou seja, o UHPC sem CA tem um gradiente de temperatura muito maior do que o UHPC com CA. A UHPC deste estudo não contém CA, mas sim fibras de PVA e uma cura de 750 dias do concreto, o que torna este estudo um precedente. A UHPC sem CA ainda não foi avaliada na literatura.

Neste estudo, as propriedades térmicas da UHPC sem CA foram determinadas. Condutividade, difusividade, calor específico e alongamento térmico foram determinados como propriedades térmicas. Equações, diagramas e tabelas para o uso desses parâmetros no dimensionamento de estruturas a incêndio foram apresentados para preencher uma lacuna nos procedimentos padrão.

2 MÉTODOS

Os métodos utilizados para caracterizar UHPC em cada faixa de temperatura são mostrados. Os materiais usados para construir o UHPC são mostrados abaixo.

2.1 MATERIAIS

O cimento utilizado foi do tipo de alta resistência inicial e que continha menos adições químicas de cimento. É um cimento Portland utilizado no Brasil classificado como CP-V ARI pela NBR 16697 [39]. Foram utilizadas sílica ativa (88,5% de silício) e cinza volante (50,0% de silício) com, respectivamente, massa específica de 350 kg/m³ e 210 kg/m³. A sílica ativa atua como um micropreenchedor. Também reage com hidróxido de cálcio, aumentando assim a resistência final.

Foi incorporada areia natural de quartzo com 260 kg/m³. É uma areia de rio que recebeu um processo de lavagem para eliminar impurezas. A fibra de aço tinha comprimento de 25 mm e diâmetro de 0,75 mm, resistência à tração de 1100 MPa e módulo de elasticidade de 210 GPa. A fibra de PVA (polivinil acetato) apresentou comprimento de 12 mm e 0,04 mm de diâmetro, resistência à tração de 1600 MPa e módulo de elasticidade de 41 GPa. Aditivo superplastificante à base de policarboxilatos foi incorporado para melhorar a trabalhabilidade do concreto. A produção e mistura UHPC foi feita de acordo com o método de Cristo et al (2022) [40].

A mistura de concreto é apresentada na Tabela 1.

Mesa 1 – Mistura de concreto

Material	Conteúdo unitário (kg/m ³)	Proporções da mistura de concreto
Cimento	488	1.00
Sílica ativa	268	0.55
Cinzas volantes	235	0.48
Areia natural (agregado miúdo)	1025	2.10
Fibra de aço	120	0.25
Fibra PVA	6	0.02
Aditivo químico	17.6	0.03
Água	178	0.36

As resistências médias à compressão do concreto aos 28, 150 e 750 dias foram de 108,0, 146,4 e 162,4 MPa, respectivamente. O módulo de elasticidade foi de 41,4, 44,0 e 46,1 GPa em, respectivamente, 28, 150 e 750 dias. Estes resultados foram obtidos através do ensaio de um cilindro de concreto com dimensão de 150x300 mm (diâmetro x comprimento) confeccionado de acordo com a norma ASTM C470 [41]. O ensaio de resistência à compressão do concreto foi obtido de acordo com a norma ASTM C39 [42] e o módulo de elasticidade de acordo com os procedimentos da norma ASTM C469 (2014) [43]. As amostras de concreto são produzidas de acordo com as normas ASTM C31 [44] e ASTM C192 [45].

2.2 DEFINIÇÕES DE PROPRIEDADES TÉRMICAS

Os dados de difusividade térmica, calor específico, condutividade térmica e alongamento térmico foram determinados como mostrado abaixo.

2.2.1 Diffusivity

A difusividade térmica da UHPC foi obtida de acordo com o Método Flash proposto pela norma ASTM E1461 [39]. O método é usado para medir valores de difusividade térmica de uma ampla gama de materiais sólidos. Os resultados foram obtidos ensaiando-se um cilindro de concreto com dimensão de 12,7x2,5 mm (diâmetro x espessura) de acordo com as prescrições da norma ASTM E1461-13 [46]. Os espécimes UHPC foram aquecidos a 100, 200, 300, 400, 500 e 600°C. O equipamento de teste utilizado foi um analisador de difusividade térmica (TDA) com faixa de temperatura de -125°C a 500°C, faixa de medição de difusividade térmica de 0,01mm²/s a 1000mm²/s e condutividade térmica de 0,1W/mK a 2000W/mK.

De acordo com os resultados de difusividade térmica (α) e com a densidade em fogo (ρ) é possível obter o calor específico (C_p) e a condutividade térmica (k) de acordo com a Equação (1).

$$\alpha = k/\rho \cdot C_p \quad (1)$$

2.2.2 Calor específico

De acordo com os resultados de difusividade térmica e de acordo com a Equação 1, os valores de calor específico foram definidos para as mesmas faixas de temperatura do item 2.2.1.

2.2.3 Condutividade

De acordo com os resultados da difusividade térmica e da Equação 1, os valores de condutividade térmica foram definidos para as mesmas faixas de temperatura do item 2.2.1.

2.4 CORRELAÇÃO COM OS PROCEDIMENTOS E REFERÊNCIAS PADRÃO

Os resultados (dados disponíveis nesta pesquisa) foram comparados com os propostos pelas referências. Quando possível, os dados foram comparados com concretos de resistência normal (NSC), alta resistência (HSC), ultra-alta resistência (UHSC) e, quando disponíveis, ultra-alto desempenho (UHPC) semelhantes a esta pesquisa. Foram propostos gráficos com os resultados da UHPC desta pesquisa. Destas, novas equações foram extraídas.

2.5 OBSERVAÇÕES PARA TESTAR UHPC EM ALTAS TEMPERATURAS

Os primeiros testes de fogo com corpos de prova UHPC foram avaliados aos 28 e 150 dias após sua construção. No entanto, nessas épocas, houve um estilhaçamento explosivo do concreto. No primeiro caso, houve spalling quando o espécime foi aquecido a cerca de 100°C. No segundo caso, quando aquecido a 300°C. Após 700 dias, os corpos de prova não apresentaram mais borbulhamento de concreto quando aquecidos a 800°C. Isso justifica a realização dos testes com 750 dias.

A baixa porosidade do UHPC impede a dissipação interna do vapor de água produzido durante o aquecimento. É necessário que sejam realizados testes de fogo em concreto envelhecido. Devido à alta resistência mecânica do UHPC, a quantidade de vapor d'água interno é alta e o spalling de concreto é explosivo. Esses resultados estão de acordo com Zhu et al (2021) [2] e Ullah et al (2022) [9], que mostraram que a UHPC é mais suscetível ao spalling no fogo do que a NSC. No entanto, é importante ressaltar que o spalling diminui com a idade, pois a umidade interna do concreto tende a diminuir com a idade, como mostram Manica et al (2020) [50] e de acordo com os resultados anteriores desta pesquisa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa são apresentados.

3.1 ALONGAMENTO TÉRMICO

A Tabela 1 e a Figura 1 a mostram o alongamento térmico ($\Delta L/L_0$) resultados da UHPC para diferentes faixas de temperatura. A Figura 1b mostra a comparação desses resultados com as referências.

Figura 1 – Alongamento térmico a altas temperaturas

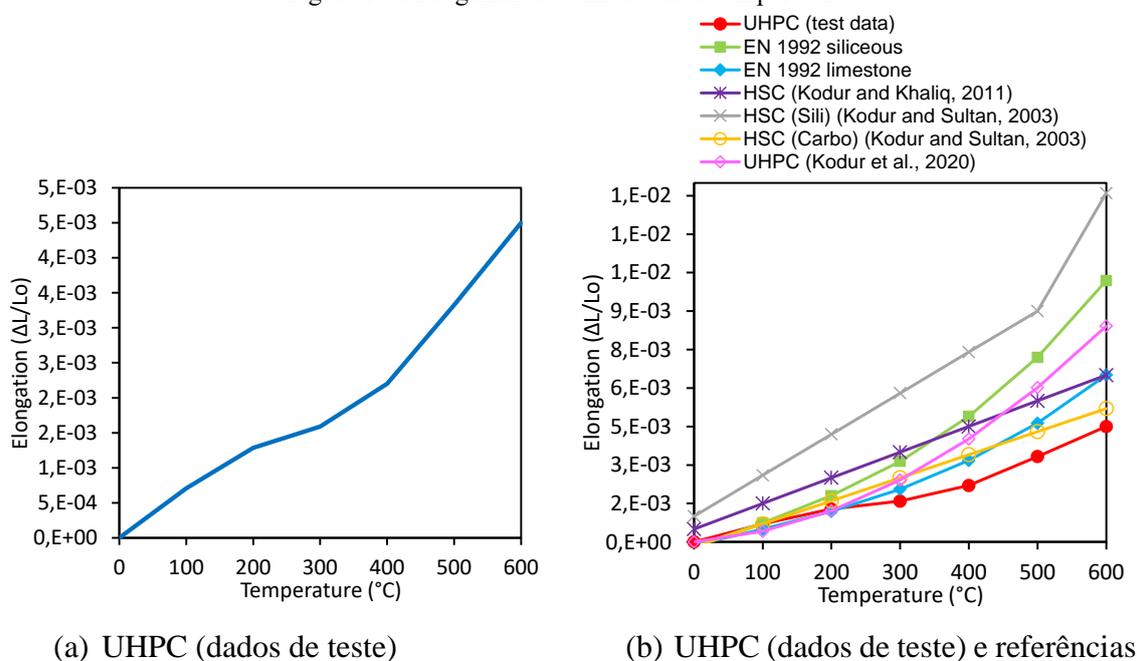


Tabela 1 – Alongamento térmico: correlação entre UHPC e referências

Temperatura ($^{\circ}C$)	Alongamento térmico $\Delta L/L_0$ ($\times 10^{-3}$)						
	UHPC Dados de teste	PT 1992 NSC (Sili) (C20/50)	PT 1992 NSC (Cal) (C20/50)	HSC (Kadur & Khaliq, 2011)	HSC - Sili (Kodur e Sultão, 2003)	HSC - Carbo (Kodur e Sultão, 2003)	UHPC (Kodur et al., 2020)
	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)
25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	0.71	0.74	0.50	1.50	2.60	0.70	0.41
200	1.28	1.80	1.19	2.50	4.20	1.60	1.21
300	1.59	3.14	2.06	3.50	5.80	2.50	2.41
400	2.20	4.89	3.18	4.50	7.40	3.40	4.01
500	3.33	7.20	4.63	5.50	9.00	4.30	6.01
600	4.50	10.2	6.50	6.50	13.6	5.20	8.41

A UHPC (Tabela 1a) apresenta alongamento térmico positivo quando exposta a altas temperaturas, assim como nos demais concretos (Tabela 1b-g). A UHPC desta pesquisa apresentou o menor valor em relação às demais. O alongamento térmico de até $100^{\circ}C$ pode estar relacionado à perda de umidade (água livre) no concreto. Entre 200 e $300^{\circ}C$, pode estar relacionada à perda de água adsorvida de compostos e agregados de cimento hidratado. Entre 300 e $500^{\circ}C$, valores podem estar associados à desidratação de CaO, conforme relatado por Laneyrie et al (2016) [16]. A menor expansão da UHPC (Tabela 1a) em relação aos demais concretos (Tabela 1b a f) mostra a influência do agregado

graúdo nesse aspecto. Em relação ao UHPC testado por Kodur et al (2020) [37], além do agregado, também o procedimento experimental (ver secção 2). $\Delta L/L_0 C_a(OH)_2$

3.1.1 Calor específico

A Figura 2a e a Tabela 2 mostram os resultados de calor específico da UHPC em diferentes faixas de temperatura. A Figura 2b mostra a comparação desses resultados com as referências.

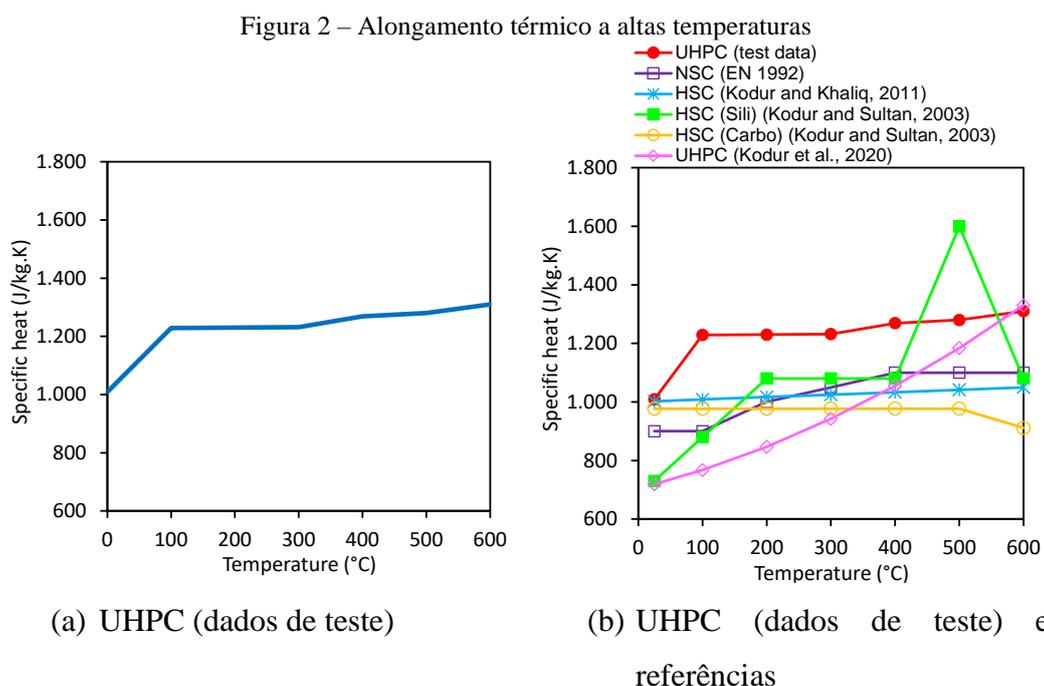


Tabela 2 – Alongamento térmico: correlação entre UHPC e referências

Temperatura (°C)	Calor específico (J/kg. K)						
	UHPC Dados de teste	NSC PT 1992 (C20/50)	NSC (Shin et al., 2002)	HSC (Kadur & Khaliq, 2011)	UHPC (Kodur et al., 2020)	HSC - Sili (Kodur e Sultão, 2003)	HSC - Carbo (Kodur e Sultão, 2003)
	a)	(b)	(c)	(d)	e)	f)	g)
25	1009	900	1104	1000	720	730	977
100	1229	900	-	1008	767	880	977
200	1230	1000	-	1016	846	1080	977
300	1232	1050	-	1025	942	1080	977
400	1269	1100	-	1033	1055	1080	977
500	1280	1100	1354	1041	1184	1600	977
600	1310	1100	-	1050	1330	1080	911

O calor específico muda com a temperatura devido às mudanças químicas e físicas que ocorrem no cimento passado e nos agregados quando em aquecimento. De acordo com fib Bulletin 38 (2007) [55] e Kodur et al (2020) [37], o calor específico em torno de 100°C aumenta devido à evaporação da umidade presente na forma de água livre (Figura 2). Entre 100°C e 300°C, o calor específico aumenta ainda mais devido à evaporação da umidade presente na água livre remanescente, além da água

adsorvida e ligada. Na faixa de 300-500°C, o C_p valor permanece quase constante devido aos efeitos de neutralização da diminuição da umidade devido à evaporação completa da água livre e do aumento da umidade devido à decomposição. Há um pequeno aumento após essa temperatura devido à liberação de umidade pela decomposição do gel C—S—H e deterioração significativa da microestrutura dentro do concreto. $Ca(OH)_2 C_p$

No caso da UHPC, a Figura 2a e a Tabela 2a mostram que a 25°C seu calor específico é de 1009 J/kg.k. Isso significa que a quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura de 1 kg de UHPC em 1K é de 1009 J. Na mesma temperatura, esses valores são semelhantes aos apresentados por Shin et al (2002) [8] para NSC, por Kodur e Khaliq (2011) [4] para HSC e Kodur e Sultan (2003) [7] por HSC com agregado carbonático. no entanto, o valor de UHPC a 25°C (Tabela 2a) foi menor do que os relatados pela EN 1992 para o NSC (Tabela 2b), para o UHPC avaliado por Kodur et al (2020) [27] (Tabela 2e), e também para HSC com agregados siliciosos propostos por Kodur e Sultan (2003) [7] (Tabela 2f).

De acordo com a Figura 2a e Tabela 2a, a 100°C, a UHPC testada aumentou para 1229 J/kg.K. Ao final dos testes (600°C) o valor foi de 1310 J/kg.K. Para as equações propostas na seção 5, o valor do calor específico na faixa de 100 a 600°C foi definido como a média das leituras nessa faixa de temperatura (ou seja, 1270 J/kg. K). Trata-se de uma simplificação prática do dimensionamento do fogo, uma vez que há variabilidade entre os resultados, conforme Tabela 2. $C_p C_p$

Na faixa de temperatura 100-600°C, a mesma interpretação e comparação feita a 25°C entre as pesquisas é preservada (Tabela 2a-g). No entanto, as pesquisas de Kodur et al (2020) [37] para UHPC (Tabela 2e) e Kodur e Sultan (2003) [7] (Tabela 2f) para HSC, que em temperaturas iniciais (i.e., 25 °C) não convergiram com a UHPC desta pesquisa, tende a convergir ao final da análise. Normalmente a UHPC desta pesquisa (Tabela 2a) apresenta um calor específico relativamente maior em relação aos demais concretos. Isso pode ser atribuído à menor permeabilidade e microestrutura densa da UHPC que requer mais calor para evaporação da água.

3.1.2 Condutividade

A Figura 3a plota a condutividade térmica do UHPC para várias faixas de temperatura. A Figura 3b e a Tabela 3 mostram a comparação desses resultados com a bibliografia.

Figura 3 – Alongamento térmico a altas temperaturas

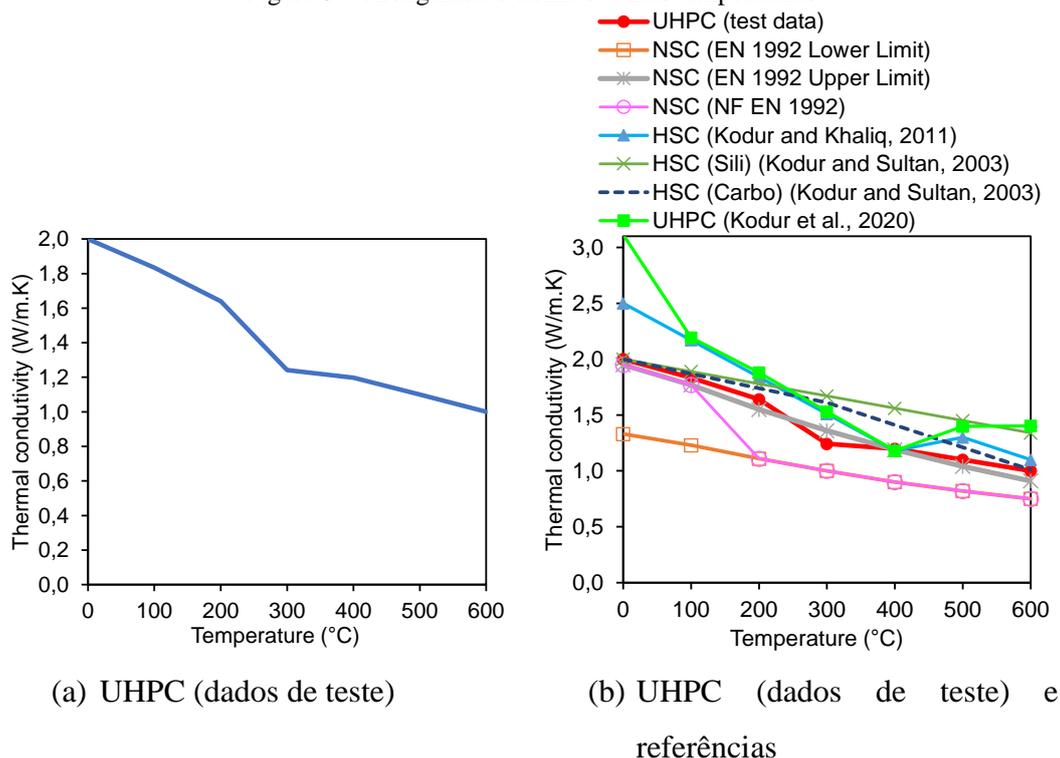


Tabela 3 – Condutividade térmica: correlação entre UHPC e referências

Temperatura (°C)	Condutividade térmica (W/m.K)								
	UHPC Dados de teste	NSC EN 1992 (limite inferior)	NSC EN 1992 (Limite máximo)	NSC NF EN 1992	NSC (Shin et al., 2002)	HSC (Kodur Khaliq, 2011)	UHPC (Kodur et al., 2020)	HSC - Sili (Kodur e Sultão, 2003)	HSC - Carbo (Kodur e Sultão, 2003)
	a)	(b)	(c)	(d)	e)	f)	g)	h)	(i)
25	2.00	1.33	1.95	1.95	2.19	2.42	3.11	1.97	1.97
100	1.83	1.23	1.77	1.77	-	2.17	2.19	1.89	1.87
200	1.64	1.11	1.55	1.11	-	1.84	1.88	1.78	1.74
300	1.24	1.00	1.36	1.00	-	1.51	1.53	1.67	1.61
400	1.20	0.90	1.19	0.90	-	1.18	1.18	1.56	1.41
500	1.10	0.82	1.04	0.82	1.28	1.30	1.40	1.45	1.21
600	1.00	0.75	0.91	0.75	-	1.10	1.40	1.34	1.00

A variação da condutividade térmica do concreto com a temperatura é regulada pela mudança nos níveis de umidade no fogo. A umidade do concreto diminui com o aumento da temperatura e, portanto, a condutividade térmica diminui em altas temperaturas. Em temperaturas acima de 100°C, a água livre começa a evaporar, às vezes causando spalling. Quando a temperatura do concreto atinge cerca de 300°C, a água adsorvida do gel de hidrato de silicato de cálcio (C–S–H) e uma parte da água quimicamente ligada começam a evaporar. A temperatura do concreto superior a 400°C provoca a decomposição do concreto, convertendo-o em e , aumentando o teor de umidade do concreto. Um

aumento adicional da temperatura além de 500°C leva à decomposição de C—S—H e maior deterioração do concreto e do agregado. $C_a(OH)_2C_aOH_2O$

De acordo com a Figura 3b e Tabela 3, observa-se que os CPHU desta pesquisa (Tabela 3a) são, respectivamente, 50,4%, 2,6% e 2,6% maiores em relação ao NSC proposto pela EN 1992-1.2 [18] (Tabela 3b e c) e NF EN 1992 [53] (Tabela 3d). (2020) [37] mostram que a UHPC apresentou uma condutividade 55% maior do que as obtidas nesta pesquisa. Após 300°C, os valores entre as duas pesquisas tendem a convergir. Em relação ao NSC proposto pela EN 1992-1.2, os UHPC testados por Kodur et al (2020) foram 133,8% maiores. A notável variabilidade nesses resultados é compreensível, e pode ser atribuída à variação do teor de umidade, tipo de cimento, agregado, condições de teste e técnicas de medição utilizadas em cada pesquisa, como explicam Kodur e colaboradores (2020) [37], Kodur e colaboradores (2019) [52], Bazant e Kaplan (1996) [54].

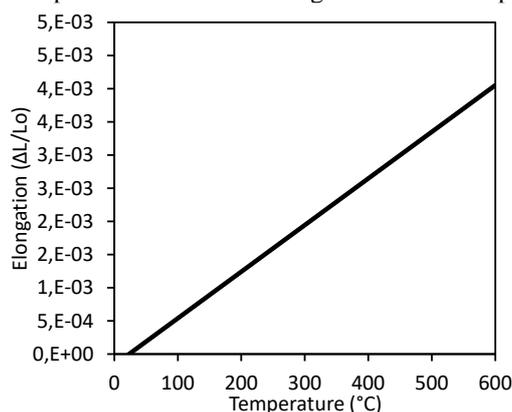
4 PROPOSTA DE PROCEDIMENTOS PARA PROJETO DE INCÊNDIO ESTRUTURAL

Nesta seção, devido à ausência da norma NBR 15200, são propostos dados paramétricos para subsidiar o projeto de incêndio de estruturas UHPC em caso de incêndio.

4.1 ELONGAÇÃO

A Figura 4 e a Equação 3 mostram os valores de alongamento térmico propostos para UHPC em diferentes faixas de temperatura.

Figura 4 – Proposta de valores de alongamento térmico para UHPC

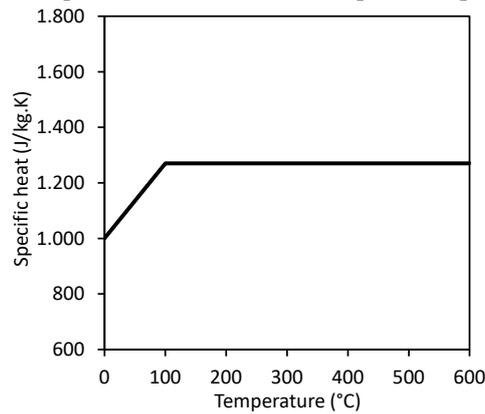


$$\frac{\Delta L}{L_0} = 7 \times 10^{-6} \times T - 2 \times 10^{-4} \quad (R^2=0,96) \quad (3)$$

4.2 CALOR ESPECÍFICO

A Figura 5 e a Equação 4 mostram os valores de calor específicos propostos para UHPC em diferentes faixas de temperatura.

Figura 5 – Proposta de valores de calor específicos para UHPC



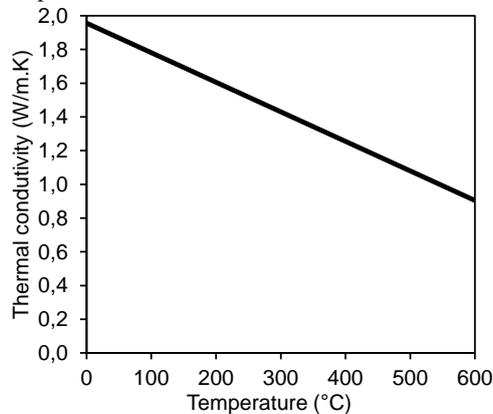
$$C_p = 2.7 \times T + 1000 \text{ [J/Kg.] K} \quad 25 \leq T < 100^\circ\text{C} \quad (r^2=0,99) \quad (4)$$

$$C_p = 1270 \text{ [J/Kg.] K} \quad (r^2=0,95) \quad 100 \leq T \leq 600^\circ\text{C}$$

4.3 CONDUTIVIDADE

A Figura 6 e a Equação 5 mostram os valores de calor específicos propostos para UHPC em diferentes faixas de temperatura.

Figura 6 – Proposta de valores de condutividade térmica para UHPC



$$k_\theta = -1.8 \times 10^{-3} \times T + 1.95 \text{ [O/M.K.]} \quad (R^2=0,95) \quad (5)$$

5 CONCLUSÕES

As conclusões gerais deste artigo são:

- Esta pesquisa demonstrou que corpos de prova UHPC ensaiados antes de 700 dias são suscetíveis ao spalling do concreto;
- Quando comparado ao NSC (de acordo com os parâmetros EN 1992-1.2), UHPC mostrou maior difusividade térmica;



- Nesse sentido, em relação ao NSC, a UHPC terá uma temperatura média mais elevada;
- Quando comparado ao NSC e HSC, o UHPC tem o menor alongamento térmico;
- UHPC tem um calor específico maior em relação aos outros concretos (NSC, HSC). Isso pode ser atribuído à menor permeabilidade e microestrutura densa da UHPC que requer mais calor para evaporação da água;
- A condutividade térmica da UHPC também é maior do que a NSC. As fibras de aço podem justificar esses resultados;
- Novas equações foram propostas para definir os parâmetros térmicos, físicos e mecânicos da UHPC em altas temperaturas. Essas equações são essenciais para os pesquisadores que pretendem realizar pesquisas numéricas com a UHPC;
- Como pesquisas futuras, recomenda-se comparar o desempenho do fogo de UHPC com NSC. Na visão dos autores, essa comparação deve ser holística e estrutural. A combinação de resultados mecânicos e térmicos é a motivação: em relação ao NSC, a UHPC tem um campo térmico maior, mas é menos afetada mecanicamente pelas temperaturas;

REFERÊNCIAS

ASTM C1856. Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra High-Performance Concrete. ASTM International, West Conshohocken, United States (2017).

Y Zhu, H Hussein, A Kumar, G Chen. A review: Material and structural properties of UHPC at elevated temperatures or fire conditions. *Cement and Concrete Composites*. (2021) V123. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104212>

MX Xiong, JTR Liew. Mechanical behaviour of ultra-high strength concrete at elevated temperatures and fire resistance of ultra-high strength concrete filled steel tubes. *Materials and Design* (2016). v. 104, pp. 414-427. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.050>

VKR Kodur, W Khaliq. Effect of Temperature on Thermal Properties of Different Types of High-Strength Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)* (2011) V.15, Issue 2. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:2\(101\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:2(101))

M Li, CX Qian, W Sun. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research* (2004). V.34, Issue 6, pp.1001-1005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.007>

CS Poon, ZH Shui, L Lam. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research* (2004). V.34, Issue 12. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.011>

VKR Kodur, MA Sultan. Effect of Temperature on Thermal Properties of High-Strength Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* (2003). V.15, Issue 2 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:2\(101\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:2(101))

KY Shin, SB Kim, JH Kim, M Chung, PS Jung. Thermo-physical properties and transient heat transfer of concrete at elevated temperatures. *Nuclear Engineering and Design* (2002). V.212, pp.233-241. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(01\)00487-3](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(01)00487-3)

R Ullah, Y Qiang, J Ahmad, NI Vatin, MA El-shorbagy MA. Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review. *Materials* (2022). V15, pp.4431. <https://doi.org/10.3390/ma15124131>

AH Akca, NO Zihnioglu. High performance concrete under elevated temperatures. *Construction and Building Materials* (2013). V44, pp.317-328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.005>

X Liang, C Wu, Y Su, Z Chen, Z Li. Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance. *Construction and Building Materials* (2018). V. 179, pp. 400-412. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.241>

S Banerji, VKR Kodur. Effect of temperature on mechanical properties of ultra-high-performance concrete. *Fire and Materials* (2021). V.46, pp. 287-301 <https://doi.org/10.1002/fam.2979>

G Choe, G Kim, N Gucunski, S Lee. Evaluation of the mechanical properties of 200 MPa ultra-high-strength concrete at elevated temperatures and residual strength of column. *Construction and Building Materials* (2015). V86, pp.159-168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.074>

M Abid, X Hou, W Zheng, RR Hussain. Effect of fibers on high-temperature mechanical behavior and microstructure of reactive powder concrete. *Materials* (2019). V.12, pp.1-30. <https://doi.org/10.3390/ma12020329>

S Sanchayan, SJ Foster. High temperature behaviour of hybrid steel–PVA fibre reinforced reactive powder concrete. *Materials and Structures* (2016). V.49, pp.769-782. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0537-2>

C Laneyrie, AL Beaucour, MF Green, RL Hebert, B Ledesert, A Noumowe. Influence of recycled coarse aggregates on normal and high-performance concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials* (2016). V.111, pp. 368-378. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.056>

B Luo, C Deng, Y Luo (2022). Mechanical properties and microstructure of UHPC with recycled glasses after exposure to elevated temperatures. *Journal of Building Engineering* (2022). V.62, pp.105369. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105369>

EN 1992-1.2. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels, Belgium (2004).

ACI 216. Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies. American Concrete Institute (ACI). Farmington Hills, Michigan, United States (2014).

AS 3600. Concrete Structures. Australian Standard. Sydney, Australia (2018).

NZS 3101. Concrete structures standard. The design of concrete structures. Standards New Zealand. Wellington, New Zealand (2006).

NBR 15200. Design of reinforced concrete structures in case of fire. Brazilian Standard Association, Rio de Janeiro [in Portuguese] (2012).

J Du, W Meng, KH Khayat, Y Bao, P Guo, Z Lyu, A Abu-obeidah, H Nassif, H Wang. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Engineering* (2021) V224. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>

K Wille, AE Naaman, GJ Parra-Montessinos. Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. *ACI Materials Journal* (2011). V.108, pp.46-34. <https://doi.org/10.14359/51664215>

K Habel, M Viviani, E Denarié, E Bruhwiler. Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Research* (2006). V36, Issue 7, pp.1362-1370. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.009>

X Zhang, X Wu, D Zhang, Q Huang, B Chen. Axial compressive behaviors of reinforced concrete composite column with precast ultra-high-performance concrete (UHPC) jacket. *Journal of Building Engineering* (2022). V.48, pp.103956. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103956>

H Tian, Z Zhou, Y Wei, L Zhang. Experimental and numerical investigation on the seismic performance of concrete-filled UHPC tubular columns. *Journal of Building Engineering* (2022). V.43, pp. 103118. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103118>

F Zhou, Q Su, Y Cheng, H Wu. A novel dynamic constitutive model for UHPC under projectile impact. *Engineering Structures* (2023). V. 280, pp.115711. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115711>

P Zhang, J Shang, Y Liu, J Shao, D Gao, Z Dong, SA Sheikh. Flexural behavior of GFRP bar-reinforced concrete beams with U-shaped UHPC stay-in-place formworks. *Journal of Building Engineering* (2022). V.45, pp. 103403. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103403>

XY Zhang, MX Fan, YX Zhou, DD Ji, JH Li, R Yu. Development of a sustainable alkali activated ultra-high performance concrete (A-UHPC) incorporating recycled concrete fines. *Journal of Building Engineering* (2023). V.67, pp.105986. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105986>

Y Li, X Zeng, Y Shi, K Yang, J Zhou, HA Umar, G Long, Y Xie. A comparative study on mechanical properties and environmental impact of UHPC with belite cement and portland cement. *Journal of Cleaner Production* (2023). V.380, pp.135003. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135003>

Y Cui, Y Li, Q Wang. Engineering performance and expansion mechanism of MgO expansion agent in ultra-high performance concrete (UHPC). *Journal of Building Engineering* (2023). V.68, pp.106079. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106079>

SFPE. *Handbook of fire protection engineering*. Society of Fire Protection Engineers, 4th Ed., Cleveland (2008).

JJ Park, DY Yoo, S Kim, SW Kim. Benefits of synthetic fibers on the residual mechanical performance of UHPFRC after exposure to ISO standard fire. *Cement and Concrete Composites* (2019). V.104. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103401>

C Kahanji, F Ali, A Nadjai, N Alam. Effect of curing temperature on the behaviour of UHPFRC at elevated temperatures. *Construction and Building Materials* (2018). V.182, pp.670-681. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.163>

DX Xuan, ZH Shui. Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature. *Fire and Materials* (2010) V.35, Issue 7. <https://doi.org/10.1002/fam.1067>

VKR Kodur, S Banerji, R Solhmirzaei. Effect of Temperature on Thermal Properties of Ultrahigh-Performance Concrete. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* (2020). V.32. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003286](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003286)

J Yang, GF Peng, J Zhao, GS Shui. On the explosive spalling behavior of ultra-high performance concrete with and without coarse aggregate exposed to high temperature. *Construction and Building Materials* (2019). V.226, pp.932-944. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.299>

NBR 16697. *Portland cement - Requirements*. Brazilian Standard Association, Rio de Janeiro [in Portuguese] (2018).

R Christ, BF Tutikian, PRL Helene. Proposition of Mixture Design Method for Ultra-High-Performance Concrete. *ACI (American Concrete Institute) Materials Journal*, (2022) V.119, pp.79-89. <https://doi.org/10.14359/51734191>

ASTM C470. *Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States (2016).

ASTM C39. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States (2022).

ASTM C469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States (2022).

ASTM C31. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States (2022).

ASTM C192. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States (2020).

ASTM E1461-13. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States (2022).

RILEM TC 129-3 Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures: compressive strength. International Union of Laboratories and Experts in Construction, Materials, Systems and Structures. Cité Descartes, France (1995).

RILEM TC 129-5 Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures: modulus of elasticity. Cité Descartes, France (2000).

ASTM E228. Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials with a Push-Rod Dilatometer. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States (2017).

G Manica, FL Bolina, BF Tutikian, M Oliveira, MA Moreira. Influence of curing time on the fire performance of solid reinforced concrete plates. *Journal of Materials Research and Technology* (2020). V.9, pp2506-2512. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.081>

D Zang, Y Liu, KH Tan. Spalling resistance and mechanical properties of strain-hardening ultra-high performance concrete at elevated temperature. *Construction and Building Materials* (2021). V.266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120961>

VKR Kodur, S Banerji, R Solhmirzaei. Test methods for characterizing concrete properties at elevated temperatures. *Fire and Materials* (2019). V.44, pp.381-395. <https://doi.org/10.1002/fam.2777>

NF EN 1992-1-2. Design of concrete structures - Part 1-2: general rules - Structural fire design - National annex to NF EN 1992-1-2. France (2005).

ZP Bazant, MF Kaplan. *Concrete at temperatures: Material properties and mathematical models*. Essex, UK: Longman Group (1996).

FIB Bulletin 38. Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling – state of art report. *Fédération Internationale du Béton*, 97p (2007).