

COMPORTAMENTO DO CONCRETO LEVE E ESTRUTURAL SUBMETIDO AOS EFEITOS DE ELEVADAS TEMPERATURAS – UMA REVISÃO DA LITERATURA

BEHAVIOR OF LIGHTWEIGHT STRUCTURAL CONCRETE SUBJECTED TO THE EFFECTS OF HIGH TEMPERATURES - A REVIEW OF THE LITERATURE

Carlos Fellipe Vieira de Araújo¹
Simone Perruci Galvão²

RESUMO

Diante do surgimento de edifícios cada vez mais altos e da necessidade da redução das cargas geradas para as fundações, o concreto leve estrutural apresenta-se como um possível potencial de uso. Este concreto, tendo em vista a utilização de agregados leves na sua composição possui massa específica reduzida, mantendo-se uma resistência mecânica compatível para ser considerado estrutural, além de proporcionar uma redução do custo final da obra. A necessidade de estudos analisando as estruturas quanto à situação de incêndio, tendo-se em vista a elevada incidência de acidentes desta natureza é relevante. Logo, além do desenvolvimento de novos materiais, o comportamento das estruturas frente ao incêndio precisa ser avaliado em conjunto com estes novos materiais para que os efeitos das elevadas temperaturas possam ser mitigados. Portanto, é objetivo deste estudo identificar através de uma revisão da literatura, as publicações relacionadas ao comportamento de estruturas confeccionadas com concreto leve estrutural, sob exposição à altas temperaturas, buscando correlacionar materiais empregados e seus efeitos na estrutura, simulando uma situação de incêndio, contribuindo para o desenvolvimento de estudos futuros. Com base nos estudos levantados entre os anos 2015-2021 foi verificado que resíduos de blocos cerâmicos, materiais pozolânicos e fibras foram utilizados na confecção destes concretos e chegou-se à conclusão que, de um modo geral, a utilização de cada um desses materiais nos traços, permitiu que os concretos ressissem por mais tempo à altas temperaturas e, em temperaturas superiores à 800°C, não entraram em colapso. **Palavras chaves:** Concreto leve estrutural. Incêndio. Altas temperaturas.

ABSTRACT

Faced with the emergence of increasingly tall buildings and the need to reduce the loads generated for foundations, structural lightweight concrete presents itself as a possible potential use. This concrete, in view of the use of light aggregates in its composition, has a reduced specific mass, maintaining a compatible mechanical strength to be considered structural, in addition to providing a reduction in the final cost of the work. The need for studies analyzing the structures regarding the fire situation, in view of the high incidence of accidents of this nature, is relevant. Therefore, in addition to the development of new materials, the behavior of structures against fire needs to be evaluated together with these new materials so that the effects of high changes can be mitigated. Therefore, the objective of this study is to identify, through a literature review, publications related to the behavior of structures made with structural lightweight concrete, under exposure to high definition, seeking to correlate materials used and their effects on the structure, simulating a fire situation, contributing for the development of future studies. Based on studies carried out between the years 2015-2021, it was verified that

¹ Bacharelando em Engenharia Civil - Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho

² Doutora em Engenharia dos Materiais, UFPE; Professora Adjunta da Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho

residues from ceramic blocks, pozzolanic materials, and fibers used in the manufacture of these concretes, and it was concluded that, in general, the use of each of these materials in traces, normal for concretes to resist longer to high temperatures and, at temperatures above 800 °C, did not collapse.

Keywords: Structural lightweight concrete. Fire. High temperatures.

INTRODUÇÃO

O concreto mais básico é um material formado por uma pasta de cimento originada da reação de hidratação do cimento com a água, mais os agregados (miúdos e graúdos) (FUSCO, 2008). Podendo-se ainda, com o intuito de melhorar as suas propriedades, utilizar adições minerais, aditivos químicos, polímeros e fibras (NEVILLE; BROOKS, 2013).

O componente mais nobre do concreto é o cimento Portland. A mistura da água com o cimento produz uma pasta que envolve os agregados, sendo esta a principal responsável pelas propriedades aglomerantes do material (JÚNIOR, 2015). Esta pasta, de acordo com Pedroso (2009), devido as reações de hidratação, endurecerá com o tempo, aderindo em torno de si os agregados.

De acordo com Helene e Andrade (2010), no Brasil e no mundo o concreto de cimento Portland é o material de construção mais importante e mais utilizado na construção civil, sua vasta utilização o coloca no topo dos materiais mais consumidos. Segundo projeções do setor, a partir de 2025 o concreto pode se tornar o material mais utilizado no mundo, superando até mesmo a água (WEIRICH, 2017).

Essa vasta utilização, de acordo com Rossignolo (2009), se deve a grande facilidade de produção dos seus componentes, com a utilização de matérias primas locais, como também pela grande versatilidade do concreto em adaptar-se com facilidade a condições variadas de projeto.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), com base na massa específica, o

concreto pode ser dividido em 3 categorias. Concreto de densidade normal, com massa específica da ordem de 2400 kg/m³, comumente utilizado para fins estruturais, o concreto leve, com massa específica menor que 1800kg/m³ e o concreto pesado, de massa específica maior que 3200 kg/m³, produzido com agregados de alta densidade.

O concreto leve estrutural, foco da análise neste estudo, aparece como sendo um material de construção reconhecido em todo o mundo, pelas suas diversas aplicações nas áreas da construção civil, em: edificações pré-fabricadas, pontes e plataformas marítimas (ROSSIGNOLO, 2009). Sua utilização repercute na diminuição de custos, devido a diminuição de esforços na superestrutura (lajes, vigas e pilares) e na infraestrutura das edificações, resultando em uma economia com formas e escoramentos, além do aumento da produtividade (NEVILLE, 2016).

É constituído completamente por agregados leves ou combinações de agregados leve e normal, possuindo uma massa específica entre 1120 e 1920 kg/m³ e apresenta uma resistência à compressão mínima de 17 MPa, aos 28 dias (ACI 213R-03, 2003).

O concreto por sua vez, apesar da sua versatilidade, pode sofrer danos devido a causas químicas, físicas, eletroquímicas, mecânicas e biológicas. Dentre as causas físicas, à ação do fogo é englobada. Em todos os lugares do mundo o incêndio em edificações tem sido motivo de grande preocupação e a análise do comportamento dos concretos sob uma situação de incêndio torna-se indispensável, visto que as suas propriedades micro e macroestruturais são modificadas quando expostas à elevadas temperaturas.

Desta forma, todos os materiais de construção precisam ser avaliados quanto as suas propriedades, sob diversas situações de exposição, garantindo o seu desempenho durante toda a vida útil da estrutura, de maneira a evitar perdas humanas e patrimoniais.

Uma das considerações na elaboração de projetos de edifícios residenciais públicos e industriais é a segurança humana em relação a ocorrência de incêndios. O concreto, diferente de materiais como a madeira e plásticos, tem demonstrado vantagens quanto a ocorrência de incêndios, pois não é combustível, e, não emite gases tóxicos quando exposto a altas temperaturas. O concreto é capaz de conservar sua resistência por tempo suficiente, permitindo operações de regaste com redução de risco e de colapso da estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Silva (2012), devido à ausência de grandes incêndios no Brasil até os anos 70, a questão da segurança contra incêndio em estruturas no país ficou em segundo plano, até que o evento começou a ocorrer em edifícios de concreto armado.

O primeiro grande incêndio ocorreu em 1972, no edifício Andraus em SP, o incêndio atingiu os 31 pavimentos, deixando 6 mortos e mais de 300 feridos. Outro grande incêndio ocorreu em 1974, no edifício Joelma em SP, com duração de aproximadamente 2 horas, até que os bombeiros conseguissem apagar o fogo causou a morte de 187 pessoas e danos aos pilares e vigas da estrutura. Em 2004, um incêndio ao prédio da Eletrobrás, no Rio de Janeiro, destruiu 6, dos 22 andares, neste não ocorreram vítimas fatais pois ocorreu à noite, mas a estrutura sofreu grandes rachaduras devido as grandes dilatações térmicas que sofreu, sendo 3 destas comprometendo a estrutura do edifício (LIMA, 2005).

Berto (2019), destaca em seu estudo, a relevância das repercussões do incêndio em estruturas de concretos. Dentre estes, evidencia-se o incêndio aos Edifícios Sede

I e Sede II da CESP, que ocorreu em 21 de maio de 1987, levando ao colapso da estrutura central da torre Sede II, em São Paulo.

Outros incêndios e de grandes repercussões foi o incêndio da boate Kiss em 2013, no Rio Grande do Sul. Nestas 242 pessoas morreram e outras 636 ficaram feridas (REUTERS, 2021). O incêndio do Edifício Wilton Paes de Almeida ocorrido em maio de 2018, em São Paulo, que resultou na morte de 7 pessoas e 2 desaparecidos, a estrutura entrou em colapso e o edifício de 24 andares desmoronou (G1, 2019).

De acordo com Berto e Oliveira (2018), a segurança contra incêndio nas edificações possui soluções complexas devido à grande quantidade de parâmetros que estabelecem as situações de risco e pelos objetivos a serem alcançados. Diante disso, as soluções relacionadas aos riscos de incêndio devem ser feitas de formas sistemáticas, desde a concepção do projeto e se estendendo por toda a vida útil da edificação.

De acordo com a NBR 15200 (2012), para garantir a segurança de estruturas contra incêndio é preciso garantir alguns requisitos, entre estes: limitar o risco à vida humana; o risco da vizinhança e da própria sociedade e o risco da propriedade exposta ao fogo. Esses requisitos são atingidos quando a estrutura de concreto demonstra a função corta-fogo, isto é, não deve permitir que o fogo ou o calor atravessem a estrutura gerando combustão na outra face e exercendo a função de suporte, de forma a evitar o colapso da estrutura.

De acordo com a NBR 15575-1 (2013), as exigências relacionadas à segurança de uma estrutura em relação a uma situação de incêndio, tem por objetivo principal, possibilitar a saída dos ocupantes da edificação em segurança; garantir condições razoáveis para o emprego de socorro público, permitindo o acesso

operacional de viaturas, equipamentos e seus recursos humanos, com tempo hábil para exercer as atividades de salvamento e combate a incêndio; evitar ou minimizar danos à própria edificação e às outras adjacentes, à infraestrutura pública e ao meio ambiente.

O concreto quando exposto a elevadas temperaturas tem suas propriedades físico-mecânicas alteradas. A medida que as temperaturas aumentam, a armadura do concreto tem sua aderência comprometida, juntamente com uma redução significativa do seu escoamento. Já o concreto, em sua parte superficial, passa a se fragmentar e as vezes de forma explosiva, perdendo seção transversal e consequentemente sua capacidade portante, expondo as armaduras a temperaturas elevadas e prejudicando ainda mais a estrutura (BERTO, 2019).

Logo, fatores importantes para mitigar o efeito da elevada temperatura em estruturas de concreto estão sendo traçados a partir de vários estudos. O traço do concreto, incluindo o fator água/cimento, os materiais e aditivos empregados são determinantes para o comportamento do concreto em situações de incêndios (BERTO, 2019). Com base nestes aspectos, este artigo visa abordar alguns aspectos deste conhecimento, tendo como foco o concreto leve e estrutural.

METODOLOGIA

Este estudo possui metodologia baseada em revisão da literatura. Para a realização desta revisão bibliográfica, foram selecionados livros, artigos, dissertações, normas e documentos relacionados ao tema. Foram encontrados poucos trabalhos sobre o tema e, como critério, os artigos foram selecionados com base na relação direta com o objetivo do estudo.

As bases de dados utilizadas foram as plataformas Scielo e Google Scholar, disponíveis gratuitamente para busca, estas

bases de dados retornaram basicamente artigos científicos publicados em periódicos, eventos científicos, teses e dissertações que foram publicados entre os anos de 2015 e agosto de 2021. O processo de escolha dos estudos passou por três etapas:

- Primeira etapa – Análise dos títulos e dos resumos, sendo constadas as relações com o tema da pesquisa. Foram considerados apenas os artigos em inglês, dada a influência no meio científico, e o português, idioma de origem do pesquisador;
- Segunda etapa – Análise das discussões e conclusões dos estudos, aferindo-se os resultados e discussões obtidas que se relacionavam com os objetivos da pesquisa;
- Terceira etapa – Após aprovação dos textos esta etapa foi iniciada, constituiu-se na leitura dos trabalhos e apresentação dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise da literatura, nas bases de dados estudadas, foram selecionados 8 artigos para discussão dos dados, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados das buscas por base de dados.

Banco de dados	Total de publicações	1º Etapa	2º Etapa
Scielo	95	13	1
Google Scholar	24700	15	7
Total	24795	28	8

Fonte: Autor (2021).

Características dos concretos submetidos a situação de incêndio

O concreto leve, quando submetido a temperaturas de até 600°C, apresentam perda de resistência à compressão muito menor se comparado ao concreto convencional (NEVILLE, 2016).

De acordo com Battagin e Silveira (2018), os produtos da reação de hidratação do cimento com a água são estáveis até

temperatura de 100°C, em temperaturas superiores até 300°C podem gerar decomposição da pasta, mais a perda de suas propriedades ligantes e perda da água livre, podendo apresentar fissuração superficial. A partir de 300°C até 600°C ocorre a decomposição do hidróxido de cálcio ($\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$) e, fissuração profunda. A partir dos 600°C ocorre a decomposição completa do CSH (Tobermorita) e acima dos 800°C ocorre a decomposição do carbonato de cálcio ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) acompanhado de fissuração generalizada.

De acordo com Serafini, Rambo e Figueiredo (2018), o comportamento do concreto exposto à elevadas temperaturas está diretamente ligado ao tipo de agregado utilizado em sua composição. Os agregados mais utilizados na construção civil são os agregados silicosos, estes apresentam variações de volume quando expostos à altas temperaturas o que danifica a estrutura.

Alguns agregados leves como a vermiculita, perlita expandida e argila expandida, apresentam coeficientes de expansão térmica mais próximos da pasta de cimento, fazendo com que concretos leves apresentem uma menor perda de resistência residual quando comparado com concretos convencionais (SERAFINI, RAMBO E FIGUEIREDO, 2018)

O uso de pozolanas diminui a concentração de hidróxido de cálcio na pasta cimentícia e assim, quando o concreto é exposto a elevadas temperaturas numa situação de incêndio por exemplo e quando a temperatura atinge os 400°C, temperatura na qual o hidróxido de cálcio passa a ser desidratado, ter-se-á menos hidróxido de cálcio na pasta que se converterá no óxido de cálcio (CaO), devido a desidratação. Com isto, haverá menos CaO que tenderá a reidratar-se na presença de água, após uma situação de incêndio. Este óxido ao reidratar-se levaria há um aumento de volume e propiciaria a desintegração do concreto (NEVILLE, 2016).

Comportamento dos concretos produzidos com Agregados leves sob situação de incêndio – Influência dos agregados.

Os agregados leves, podem ser de origem natural ou produzidos a partir de materiais naturais e resíduos industriais. Possuem como principal característica, elevada porosidade e baixa massa específica. Os concretos produzidos com esses agregados possuem massa específica entre 1.400 e 1.800 kg/m³, embora valores de até 800 kg/m³ já tenham sido obtidos (NEVILLE, 2016).

De acordo com Rossignolo (2009), as substituições dos agregados convencionais por agregados leves nos concretos leves, proporcionam a redução da massa específica, alterando outras propriedades do concreto, entre essas, a trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, durabilidade, estabilidade dimensional, condutividade térmica, espessura da zona de transição e resistência à altas temperaturas. O abatimento em concretos com agregados leves tende a ser menor, devido a absorção da água de amassamento pelo agregado.

De acordo com Neville (2016), a melhora na zona de transição dos concretos produzidos com agregado leves se dá por três fatores: a maior aderência devido a superfície mais áspera do agregado; aos valores do módulo de elasticidades próximos entre pasta e agregado (daí a melhor propriedade de módulo em relação ao concreto convencional) e devido a absorção da água da mistura pelo agregado e disponibilização da mesma ao longo do período de hidratação da pasta, fortalecendo esta região.

Para modificar as propriedades do concreto leve e melhorar o seu desempenho, utiliza-se os aditivos químicos e adições minerais incorporadas ao mesmo (ROSSIGNOLO, 2009).

De acordo com Neville (2016), a baixa condutividade térmica do agregado, aliado a um menor coeficiente de dilatação

térmica do concreto leve, são importantes parâmetros em situações em que a superfície do concreto é exposta a altas temperaturas. A expansão decorrente do aquecimento é menor e, resultam em menores tensões devido ao menor módulo de elasticidade do concreto leve, quando comparado ao concreto convencional.

Dentre os agregados leves utilizados para confecção do concreto leve, destacam-se a argila expandida, agregado de escória, agregado de poliestireno expandido, entre outros. Para concreto leve e estrutural a argila expandida é um dos principais agregados estudados.

Este agregado leve é quimicamente inerte aos componentes do concreto, tem massa unitária cerca de 2,5 vezes menor que os agregados normais de origem silicosa, granítica e pedra basáltica, e, devido a seu processo de fabricação, apresenta boa resistência à altas temperaturas (TORRES, 2002).

De acordo com Rossignolo (2009), o módulo de deformação do concreto leve é cerca de 50 a 80% do módulo concreto convencional, devido ao baixo módulo de deformação dos agregados leves.

Concretos Leves Estruturais com Argila expandida submetidos a situação de incêndio

Estudos desenvolvidos por Akçaözoğlu & Akçaözoğlu (2017), sobre o tema concretos leves produzidos com argila expandida e cimento de aluminato de cálcio, simulando uma situação de incêndio e expondo os mesmos a temperaturas elevadas (de 200°C à 1000°C), seguido do resfriamento lento (ao ar) e rápido (com água), os autores puderam dar importantes contribuições ao meio científico.

Para este estudo foram confeccionados 3 traços distintos, traço referência - M1 (concreto com cimento convencional), traço com 100% de substituição de argila expandida pelo agregado gráudo e cimento convencional - M2 e o último traço com cimento de

aluminato de cálcio e 100% de substituição de argila expandida - M3. Os corpos-de-prova foram curados em laboratório por dois meses após esse tempo foram colocados em um forno elétrico no qual a temperatura foi aumentada para 200, 400, 600, 800 e 1000°C a uma taxa de 8°C / min, e foram mantidos nas temperaturas desejadas por 60 minutos. As Tabela 2 e 3 mostram os resultados da resistência à compressão destes concretos em diferentes faixas de temperatura.

Tabela 2 - Resultados de resistência a compressão residual resfriados de forma Lenta (MPa).

Resistência à compressão resfriamento lento (MPa)			
	Traços		
	M1	M2	M3
22°C	79,1	39,9	25,0
200°C	66,5 (84%)	35,2 (88%)	17,6 (70%)
400°C	62,4 (79%)	32,2 (81%)	14,1 (56%)
600°C	48,1 (61%)	26,9 (67%)	12,6 (50%)
800°C	27,6 (35%)	18,5 (46%)	10,6 (42%)
1000°C	*	10,6 (27%)	9,4 (38%)

* Desintegrou

Fonte: Adaptada de Akçaözoğlu & Akçaözoğlu (2017).

Tabela 3 - Resultados de resistência a compressão residual resfriados de forma rápida (MPa).

Resistência à compressão resfriamento rápido (MPa)			
	Traços		
	M1	M2	M3
22°C	79,1	39,9	25,0
200°C	60,9 (77%)	33,6 (84%)	16,2 (65%)
400°C	51,5 (65%)	29,6 (74%)	13,3 (53%)
600°C	43,3 (55%)	23,2 (58%)	11,7 (47%)
800°C	22,7 (29%)	13,9 (35%)	10,2 (41%)
1000°C	*	9,2 (23%)	9,3 (37%)

* Desintegrou

Fonte: Adaptada de Akçaözoğlu & Akçaözoğlu (2017).

De acordo com os resultados de resistência à compressão residual dos concretos resfriados de forma lenta, observados na Tabela 2, houve redução da resistência com o aumento da temperatura nos três traços. O concreto leve com argila expandida (M2) foi o que apresentou menor

percentual de perda da resistência até a temperatura de 800°C, mantendo 46% da resistência inicial.

Na temperatura de 1000°C, o traço (M3) do concreto com aluminato de cálcio apresentou o melhor desempenho, tendo um menor percentual de redução da resistência quando comparado com o traço M2 para mesma condição. Nesta temperatura, o concreto padrão perdeu totalmente a resistência e se desintegrou.

Analisando os resultados de resistência à compressão residual dos concretos resfriados de forma rápida, observa-se na Tabela 3 que todos os concretos apresentaram diminuição de resistência com o aumento da temperatura.

O concreto leve com argila expandida M2, apresentou o menor percentual de perda da resistência até a temperatura de 600°C e após esta temperatura o concreto com cimento aluminato de cálcio apresentou melhor desempenho, tendo um menor percentual de redução de resistência em relação ao demais concretos para a mesma condição.

É possível observar que a perda de resistência foi mais acentuada no resfriamento rápido do que no resfriamento lento, este comportamento pode ser explicado pois, em temperaturas superiores a 400°C, ocorre a decomposição do hidróxido de cálcio, resultando em óxido de cálcio (CaO), este em contato com a água se reidrata formando elementos expansivos prejudicando a matriz, além do surgimento de fissuras no material devido à mudança brusca de temperatura ocasionada pela água.

De acordo com os autores, nos concretos resfriados rapidamente há um menor percentual de perda de massa a partir dos 400°C, que pode ser devido a permanência de água nos poros. Os concretos apresentaram maior taxa de absorção de água e índice de vazios conforme deu-se o aumento da temperatura.

De acordo com estudos realizados por Weirich (2017), analisando a situação de elevadas temperaturas e suas

repercussões nas propriedades de concretos leves com agregado de argila expandida e concreto leve com argila expandida e fibras de polipropileno, variando três traços distintos e mudando-se a relação água/cimento (Tabela 4).

Os corpos de prova utilizados foram com dimensões de 50 mm x 100 mm e 100 mm x 200 mm, sendo o ensaio de incêndio adaptado da ISO 834-11 (2014) devido a limitações da mufla. Os corpos de prova foram submetidos a elevadas temperaturas por um período de 90 minutos.

Foi observado que, com o aumento da temperatura os corpos de prova diminuem sua massa específica, sendo os concretos com fibras os que apresentaram o melhor desempenho na conservação da massa, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 4 – Traços estudados.

Traço		Cimento (kg)	Proporção			
			Areia (kg)	Argila Exp (kg)	Água (kg)	Fibra (%)
A	Sem fibras	1	1,4	0,5	0,45	-
	Com fibras	1	1,4	0,5	0,45	0,5
B	Sem fibras	1	1,4	0,5	0,50	-
	Com fibras	1	1,4	0,5	0,50	0,5
C	Sem fibras	1	1,4	0,5	0,55	-
	Com fibras	1	1,4	0,5	0,55	0,5

Fonte: Weirich (2017).

Tabela 5 - Resultados de massa específica antes e após a exposição a elevadas temperaturas.

TRAÇO	Massa Específica (kg/m³)			
	20°C	300°C	600°C	900°C
A	1561,98	1434,42	1403,16	1370,38
	1547,13	1362,04	1394,59	1335,60
	1613,33	1412,42	1375,15	1373,09
	1689,95	1504,62	1434,46	1280,82
	1726,69	1476,44	1451,44	1421,29
	1614,78	1479,35	1448,95	1385,58
B	1524,82	1398,77	1265,30	1266,83
	1527,32	1346,52	1314,53	1319,39
	1452,20	1347,77	-	1255,96
	1608,55	1439,37	1433,43	1415,00
	1668,49	1502,72	1428,72	1379,85
	1682,46	1430,72	1437,30	1424,14
C	1445,13	1223,14	1235,90	1220,06
	1450,49	1231,96	1235,39	1270,49
	1544,51	1284,51	1264,88	1234,97
	1628,00	1457,70	1482,51	1441,70
	1696,79	1400,98	1397,08	1419,74
	1641,72	1450,79	1432,14	1363,77

Fonte: Adaptado de Weirich (2017).

Para os resultados de resistência à compressão, os concretos apresentaram redução da resistência com o aumento da temperatura. Os traços com fibras apresentaram melhores resultados se comparados com os traços sem fibras, para todas as situações, exceto para a

temperatura de 900°C, no traço A, conforme Figura 1 e Tabela 6.

Os resultados das resistências destes diferentes traços são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados de resistência residual, aos 7 dias.

Temp. (°C)	Traço A		Traço B		Traço C	
	Sem fibras	Com fibras	Sem fibras	Com fibras	Sem fibras	Com fibras
20	15,42	25,17	15,07	20,31	14,04	19,27
	19,11	22,67	15,72	19,90	16,00	21,01
	20,67	21,97	11,72	19,92	19,47	19,34
300	15,20	11,93	13,87	15,27	13,33	15,31
	15,42	17,77	15,24	15,75	10,58	15,02
	14,93	15,26	12,72	15,69	12,05	16,55
600	7,64	9,36	4,13	5,32	4,10	5,78
	7,11	7,94	3,37	6,19	3,35	5,46
	6,69	9,45	-	5,66	2,93	5,33
900	4,13	3,52	2,49	2,86	2,93	3,60
	4,38	3,93	3,03	3,14	3,01	3,11
	4,10	3,24	3,43	3,74	2,74	3,38

Fonte: Adaptada de Weirich (2017).

Figura 1 - Perda de resistência dos concretos sem fibras, em relação ao concreto com fibras.

Temp. (°C)	Traço A	Traço B	Traço C
20	21%	29%	17%
300	0%	10%	23%
600	20%	34%	37%
900	-18%	8%	14%

Fonte: Adaptada de Weirich (2017).

Para a temperatura de 900°C, apenas no traço A à perda da resistência foi maior no concreto com fibra. De acordo com a autora, pode ter sido por conta da dificuldade no adensamento devido à baixa relação água/cimento do traço, deixando uma grande quantidade de vazios e, após a exposição a elevadas temperaturas com o derretimento das fibras de polipropileno, o índice de vazios foi muito alto, fragilizando o concreto.

Após a exposição a elevadas temperaturas os concretos apresentaram mudanças na sua coloração. De acordo com Weirich (2017), as mudanças de cores dos corpos de prova indicam que o concreto foi exposto a altas temperaturas e teve perda de resistência.

Os concretos começaram a apresentar microfissuras a partir de 300°C, tornando-se mais evidentes a partir dos 600°C. Os concretos com fibras apresentaram redução no tamanho e quantidade destas fissuras. Weirich (2017), indicou também que foi registrado um caso de *spalling* para o concreto sem fibras do traço B, aos 600°C, e alguns deslocamentos, o que não foi registrado para os traços com fibras, devido ao derretimento das fibras abrirem espaços na matriz cimentícia e aliviarem as tensões internas do vapor de água dentro do concreto.

Concretos leves estruturais com agregado leve graúdo produzido a partir do lodo de reservatório

Tang (2020), estudou os efeitos de elevadas temperaturas, em concretos leves, de baixa (30 MPa) e média (50 MPa) resistência e reforçados com fibras de aço (S) e fibras de polipropileno (P), estudadas de forma separada e juntas em um mesmo traço - traço híbrido (M), cujo os traços são mostrados na Tabela 7 e ainda, concretos produzidos com agregado leve graúdo, obtido a partir do lodo de reservatório, a caracterização do agregado consta no Figura 2.

Os corpos de prova foram moldados nas dimensões de 100 mm x 200 mm, para ensaio de resistência a compressão e módulo elástico e 360 mm de comprimento x 100 mm de largura x 100 mm de espessura para a resistência a flexão do concreto. As amostras foram aquecidas a uma taxa de 10 °C/min por 60 minutos para alcançar estabilidade térmica em toda amostra.

Tabela 7 – Traços adotados.

Grupo	Traço	Resistência especificada do concreto (MPa)	Conteúdo de fibra (% de volume)
Grupo de controle	C30	30	0
	C50	50	0
	E30-S	30	Fibra de aço (1%)
	E50-S	50	Fibra de aço (1%)
Grupo experimental	E50-P	50	Fibra de polipropileno (0,1%)
	E50-M	50	Fibra de aço (1%) + Fibra de polipropileno (0,1%)

Fonte: Adaptada de Tang 2020.

Figura 2 - Caracterização do agregado leve gerado a partir de lodo de reservatório.

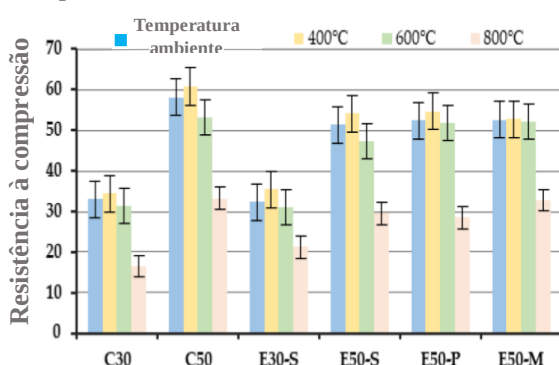
Peso específico seco	1,2
Absorção de água 1h (%)	4,9
Peso unitário (kg/m³)	707,5
Resistência a compressão (MPa)	3,6

Fonte: Adaptada de Tang (2020).

Os concretos com fibras apresentaram boa trabalhabilidade com abatimento de 18 a 21 cm, com exceção do traço híbrido que pela alta quantidade de fibras apresentou uma trabalhabilidade mais baixa 16 cm.

A incorporação da fibra de aço não contribuiu significativamente para o aumento da resistência à compressão do concreto aos 28 dias, como visto na Figura 3. Ao invés disso, diminuiu em aproximadamente 2% para os concretos leves de baixa resistência (C30) e cerca de 11% para concretos de resistência média (C50).

Figura 3 – Resultados da Resistência à compressão, aos 28 dias.



Fonte: Adaptado de Tang (2020).

Através dos resultados foi possível observar que os concretos leves obtiveram resultados de resistência à compressão abaixo dos seus respectivos de referência e todos os concretos apresentaram diminuição da resistência à medida que as temperaturas aumentavam, com exceção da temperatura de 400°C, em que a resistência de todos os traços aumentaram.

De acordo com os autores, as altas temperaturas fazem com que a reação de hidratação do cimento ocorra de forma mais completa, aumentando assim a resistência. Após os 400°C, no entanto, a resistência dos concretos diminuiu, segundo os autores, sendo causada pela degradação das fases constituintes do concreto.

Foi possível observar de forma mais significativa, na temperatura de 800°C, que os traços (C30) mantiveram 51% e 68% de resistência à flexão e compressão, respectivamente. Já os traços (C50) apresentaram os valores de 56% e 68%, da resistência à flexão e compressão, respectivamente. Enquanto que os concretos de referência (C30) manteve 37% da resistência à flexão e 56% de resistência à compressão e o traço (C50) manteve a resistência à flexão de 50% e compressão de 54%.

De acordo com os autores, o concreto híbrido foi o que apresentou o melhor desempenho em relação a resistência à compressão, entre os traços estudados. A diminuição da resistência à compressão do grupo experimental pode ter ocorrido devido às dificuldades de espalhamento e concentração das fibras no concreto.

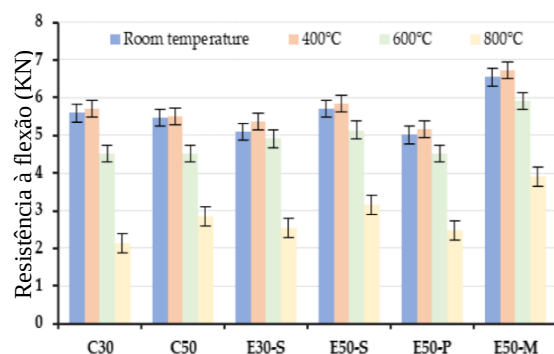
Os resultados de módulo de elasticidade mostraram que a introdução das fibras não melhorou significativamente o desempenho do concreto nesse parâmetro, o que pode ter sido causado pelo processo de mistura, devido à disposição das fibras não ter ocorrido de forma ideal. Com o aumento da temperatura, a perda do módulo de elasticidade não foi proporcional a perda da resistência à compressão, sendo bem maior. Isto provavelmente ocorreu devido

ao módulo de elasticidade ser bem mais sensível à fissuras e rachaduras em altas temperaturas.

De acordo Tang (2020), a ideia de que o módulo de elasticidade é proporcional a resistência à compressão, pode ser válida apenas para concretos em temperatura ambientes.

Quanto aos resultados de resistência à flexão, observou-se que os concretos apresentaram um pequeno aumento de resistência aos 400°C, podendo esse aumento ser atribuído a reação de hidratação do cimento. Logo após, os concretos passaram a diminuir a resistência de acordo com o aumento da temperatura, Figura 4.

Figura 4 - Resultados de resistência a flexão aos 28 dias.



Fonte: Adaptada de Tang (2020).

O grupo experimental com adição de fibras de polipropileno foi o que apresentou menor desempenho, dentre os concretos estudados, sendo o traço híbrido com o melhor desempenho em todas as temperaturas analisadas.

Analisando as amostras o traço híbrido (E50-M), o mesmo apresentou resultados em média de 54% mais satisfatórios, em todos os parâmetros, quando comparado ao traço (E50-P) que apresentou os resultados com menor desempenho dentre as amostras.

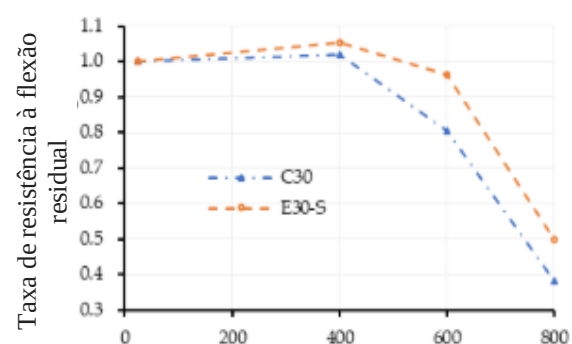
As Figuras 5 a) e b) mostram que os concretos leves estudados apresentaram uma menor redução da resistência à flexão, quando comparados, respectivamente, ao concreto referência, que as fibras

contribuíram para mitigar os danos causados para as elevadas temperaturas, sendo mais expressivos estes resultados para o intervalo entre as temperaturas de 400 a 600°C.

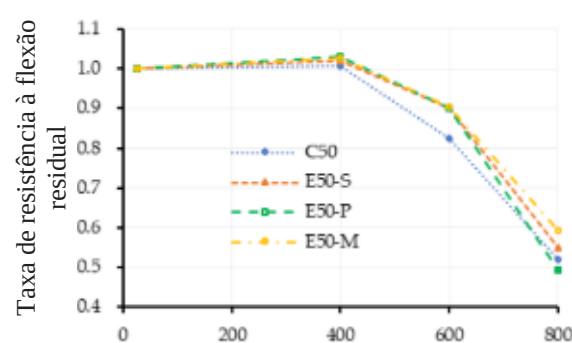
Tendo o concreto com fibra de polipropileno, apresentado em todos os parâmetros o resultado abaixo do concreto referência, isso pode ser atribuído à fusão das fibras de polipropileno a uma temperatura relativamente baixa, à 165°C, de modo que a capacidade de fazer a ponte entre fissuras não foi mantida em temperaturas mais altas.

Figura 5 -Taxas de resistência residual à flexão aos 28 dias.

a)



b)



Fonte: Adaptada de Tang (2020).

No geral, o concreto leve reforçado com fibra mista, mostrou uma melhor capacidade de resistir à perda de propriedades mecânicas causada pela alta temperatura, com resultados expressivos à 800°C°.

A incorporação da fibra de aço não contribuiu significativamente para o aumento da resistência à compressão do concreto, aos 28 dias, os estudos mostraram

que os concretos leves, com adição de fibras, apresentaram uma menor diminuição da resistência se comparado com os concretos de referência. Após a exposição a 800°C, as propriedades mecânicas residuais foram significativamente reduzidas.

Tendo em vista os resultados visualizados, é importante ter uma cuidadosa homogeneização das fibras na mistura, para potencializar as propriedades dos concretos.

Concretos leves estruturais com agregados reciclados – resíduos de blocos cerâmicos submetidos a situação de incêndio

Nos estudos realizados Passos, Moreno e Souza (2020), com agregados de resíduos de blocos cerâmicos para produção de concretos leves a serem submetidos à elevadas temperaturas, foram confeccionados 3 traços: o traço referência com agregado natural (REF), o traço com 40% de substituição do agregado gráudo natural pelo agregado reciclado (S40) e um traço com 100% de substituição do agregado gráudo natural pelo agregado reciclado (S100).

Os corpos de prova foram moldados nas dimensões de 100 mm de diâmetro por 300 mm de altura, para verificação das propriedades mecânicas residuais pós aquecimento até as temperaturas de 200, 400, 600 e 800°C. Para aquecimento das amostras foi utilizado o forno modelo ML 1300/60. A metodologia empregada seguiu o disposto, internacionalmente, pela RILEM-129, com taxa de aquecimento, e resfriamento, de 1°C/min com permanência de 60 minutos.

Os resultados em relação a resistência à compressão e módulo de elasticidade, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 100 dias.

REF	0°C	200°C	400°C	600°C	800°C
f_c (MPa)	40,62	32,12	24,06	11,17	7,83
Redução %	100	79	59	28	19
E_c (GPa)	31,75	26,45	8,35	2,69	1,50
Redução %	100	83	26	8	5

S40	0°C	200°C	400°C	600°C	800°C
f_c (MPa)	19,83	19,61	15,41	13,11	4,39
v	100	99	78	66	22
E_c (GPa)	14,50	14,58	4,41	2,24	0,81
v	100	100	30	15	6

S100	0°C	200°C	400°C	600°C	800°C
f_c (MPa)	16,44	13,38	12,59	6,97	3,31
v	100	81	77	42	20
E_c (GPa)	12,67	11,48	4,25	1,66	0,62
Redução %	100	91	34	13	5

Fonte: Passos, Moreno e Souza (2020).

Por este estudo foi observado uma maior estabilidade térmica do concreto com o agregado reciclado, quando comparado ao concreto com agregado natural.

De acordo com os autores, é possível que essa característica seja oriunda da sua elevada porosidade, ou seja, eles possuem uma menor variação volumétrica, passando a acompanhar as variações volumétricas da matriz cimentícia, o que não ocorre com os agregados naturais, pois devido a variação da temperatura há uma tendência a fraturar-se e com isto reduzir a resistência à compressão residual do concreto quando expostos à elevadas temperaturas.

Ainda, de acordo com estes autores, foi possível observar que devido a interação do agregado leve com a matriz cimentícia, houve diminuição na resistência à compressão e no módulo de elasticidade, quando os concretos foram submetidos a elevadas temperaturas, porém, estas variações foram menores em relação ao concreto padrão (REF), que apresentou perdas de 81% e 95%, da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, respectivamente.

O melhor traço (S40), apresentou uma redução de 78% da resistência à compressão e 94% do módulo de elasticidade na temperatura de 800°C e não foi apresentado lascamento ou fissurações

nos concretos, até a temperatura estudada de 800°C.

Concretos leves estruturais com pedra Pomes submetidos a situação de incêndio

Estudos realizados por Amin, Tayeh e Agwa (2020), apresentaram resultados de concretos leves confeccionados com agregado leve de pedra pomes em substituição de 65% do agregado graúdo, juntamente com fibras de polipropileno (PPF) e fibra de vidro (GF), nas proporções de 0,2 e 0,4%, em relação massa de cimento, quando submetidos a elevadas temperaturas.

Os testes de resistência a compressão foram realizados em amostras cúbicas com 100 mm aos 7, 28 e 90 dias. O ensaio de resistência a tração foi realizado aos 28 dias em amostras de cilindro com 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, a resistência flexão foi realizada em amostras de prisma com dimensões 100 × 100 × 500 mm aos 28 dias. As amostras foram submetidas a temperaturas elevadas usando um forno de temperatura regulado, que foi aquecido a uma taxa de 20°C/min por 120 minutos. Depois disso, o forno foi resfriado a uma taxa de 3°C/min para evitar choques térmicos.

Observa-se na Tabela 9, que os concretos moldados apresentaram resistência à compressão ligeiramente maiores em relação ao concreto de controle (padrão).

Tabela 9 - Resultados de resistência a compressão aos 28 dias.

	Traços				
	M 0%	M 0,2% PPF	M 0,4% PPF	M 0,2% GF	M 0,4% GF
Resistência à compressão (N/mm²)					
22°C	37,2 (100)	37,8 (100)	37,9 (100)	38,1 (100)	38,5 (100)
200°C	38,3 (103)	38,1 (101)	36,7 (97)	40,0 (105)	41,6 (108)
400°C	27,1 (73)	27,2 (72)	26,5 (70)	28,2 (74)	29,3 (76)
600°C	18,7 (50)	18,5 (49)	17,7 (47)	19,7 (52)	20,1 (52)

Fonte: Adaptada de Amym, Tayeh e Agwa (2020).

Para o caso da resistência à flexão (Tabela 10), houve aumento desta propriedade com aumentos nas porcentagens das fibras de polipropileno e fibras de vidro. Observa-se ainda na Tabela 9 e 10 que, na temperatura de exposição de 200°C, para a maioria das amostras, houve um ligeiro aumento das resistências à compressão e à flexão, não ultrapassando 8% dos seus valores iniciais.

Tabela 10 - Resultados de resistência a flexão aos 28 dias.

	Traços				
	M 0%	M 0,2% PPF	M 0,4% PPF	M 0,2% GF	M 0,4% GF
Resistência à flexão (N/mm²)					
22°C	5,8 (100)	7,0 (100)	8,2 (100)	7,1 (100)	8,4 (100)
200°C	5,9 (102)	7,1 (101)	8,0 (97)	7,5 (106)	8,8 (105)
400°C	4 (70)	5,1 (73)	4,9 (60)	5,4 (76)	6,3 (75)
600°C	2,7 (47)	3,4 (49)	3,1 (38)	3,7 (52)	4,11 (49)

Fonte: Adaptada de Amym, Tayeh e Agwa (2020).

Segundo os autores, isto pode ter ocorrido devido a reação de hidratação entre a sílica ativa e a cal livre dos compostos, formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Não foi observado o mesmo comportamento no caso da adição de 0,4%, de fibra polipropileno, neste caso foi atribuído a influência de um maior teor de fibra na mistura, a qual chegando-se ao seu ponto de fusão em aproximadamente 170°C, gerou a fragilidade da matriz.

A partir da temperatura de 400°C, os valores de resistências residuais dos concretos passaram a diminuir com o aumento das temperaturas. O concreto com 0,2% de fibra de vidro manteve 52% de resistência à compressão e o mesmo resultado para a resistência à flexão, apresentando o melhor resultado dentre os concretos estudados na mesma condição.

Através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), os autores puderam visualizar que microfissuras passaram a surgir na zona de transição pasta agregado a partir de 200°C e se intensificaram à medida que as temperaturas aumentavam, deixando

o concreto mais fragilizado e susceptível a trincas e fissuras, como passou a ocorrer a partir dos 400°C.

As fibras de vidro e polipropileno não apresentaram resultados expressivos na resistência à compressão, mas apresentaram resultados significativos na resistência à flexão e à tração do concreto leve. Com destaque para a fibra de vidro no traço com 0,4%, aumentando a resistência a compressão e tração em 53% e 38%, respectivamente. A introdução das fibras atribuiu ainda ao concreto uma característica dúctil.

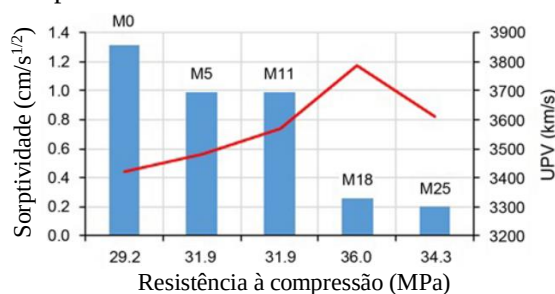
Estudos realizados por Demirel, Gultekin e Alyamac (2019), relacionaram a sorptividade (capacidade de absorção) do concreto, a velocidade do pulso ultrassônico e a resistência à compressão em amostras de concreto leve com pedra pomes e substituição parcial de cimento, por metacaulim. As proporções do metacaulim adicionado nas misturas, foram: de 0% para o concreto referência (M0), 5% (M5), 11% (M11), 18% (M18) e 25% (M25). Estes concretos foram submetidos à elevadas temperaturas.

Foram moldados corpos de prova cúbicos com dimensões de 100 mm, estes foram expostos à temperatura máxima de 400, 600 e 800°C usando um forno elétrico com taxa média de aquecimento de 2,5°C/min por 60 minutos.

Os concretos confeccionados apresentaram aumento da resistência à compressão, na temperatura ambiente, à medida que se aumentava a porcentagem de metacaulim. De acordo com os autores, isso pode ter sido devido ao alto teor de metacaulim, em massa, que se aglutinou em torno do cimento impedindo a sua hidratação.

O estudo mostra também que, à medida que a porcentagem de metacaulim aumenta, a capacidade de absorção diminui (barra azul) e a velocidade do pulso ultrassônico aumenta (linha vermelha), essa característica se deve pela diminuição de vazios gerados pelo metacaulim conforme Figura 6.

Figura 6 - Resultados de resistência a compressão, sorptividade e UPV em temperatura ambiente aos 28 dias.



Fonte: Adaptada de Demirel, Gultekin e Alyamac (2019).

Após resultados de resistência à compressão residual, aos 28 dias, (Figura 7) foi possível observar uma diminuição na resistência à compressão com o aumento da temperatura.

Figura 7 – Resultado do resultado de resistência à compressão em relação a temperatura.

Series	Subst. (%)	T (°C)	Resistência à compressão (Mpa)	Perda de Resistência (%)
M0	0	20	29,2	-
		400	25,36	13,15
		600	19,6	32,9
		800	11,3	67,1
M5	5	20	31,8	-
		400	26,7	16,3
		600	19,6	38,5
		800	13,3	58,3
M11	11	20	31,9	-
		400	26,74	16,17
		600	19,7	37,9
		800	14,1	55,8
M18	18	20	36	-
		400	27,2	25,5
		600	27,1	24,8
		800	15,2	57,7
M25	25	20	34,3	-
		400	27,59	19,56
		600	25,5	25,8
		800	13,3	61,2

Fonte: Adaptada de Demirel, Gultekin e Alyamac (2019).

Diminuições significativas foram observadas a partir dos 600°C, pode ser devido à desidratação do hidróxido de cálcio a cerca de 500 ° C, (produzindo CaO e H₂O) e, a dissociação do carbonato de cálcio.

Porém, com o aumento da proporção de metacaulim no concreto, as taxas de perda de resistência diminuem, sendo o traço M18 o que apresentou o melhor desempenho sob efeito de elevadas

temperaturas (até 600°C), com uma perda de resistência de 24,8%. Este concreto também apresentou maior resistência em temperatura ambiente, destacando uma proporção ótima entre o agregado leve e a adição, em situações de elevadas temperaturas.

Todos os concretos com metacaulim apresentaram perdas de resistências menores, em relação ao concreto de referência, mesmo na temperatura de 800°C.

Concretos leves estruturais agregado de PET – submetidos a situação de incêndio

Estudos realizados por Akçaözoglu (2018), realizou ensaio de resistência ao fogo em concretos leves com substituição do agregado natural por grânulos de PET, em porcentagem de 30% a 60%, submetidos à altas temperaturas de 150 a 450 °C por 2 horas. Os corpos de prova utilizados para o ensaio de flexão e tração foram prismáticos com dimensões de 500 x 100 x 100 mm e amostras cúbicas de 100 mm foram moldadas para medição de peso unitário, resistência à compressão absorção de água e taxas de porosidade.

Os resultados mostraram que a resistência à compressão dos concretos analisados diminuiu com o aumento da temperatura, exceto para a amostra M0 e M4 que aos 150°C apresentaram aumento da resistência conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados de resistência à compressão residual aos 365 dias.

Traços	Substituição (%)	Resistência à compressão inicial (MPa)	Resistência à compressão residual (MPa)		
			150°C	300°C	450°C
M0	0	50,4	52,0	50,6	46,8
M1	30	23,5	22,6	22,0	12,8
M2	40	19,2	18,1	17,4	10,0
M3	50	15,3	14,9	13,8	6,3
M4	60	7,5	10,8	8,6	1,9

Fonte: Akçaözoglu (2018).

É possível observar que na temperatura de 150°C, os corpos de prova

apresentaram uma baixa perda da resistência, com redução da resistência inicial em torno de 6%.

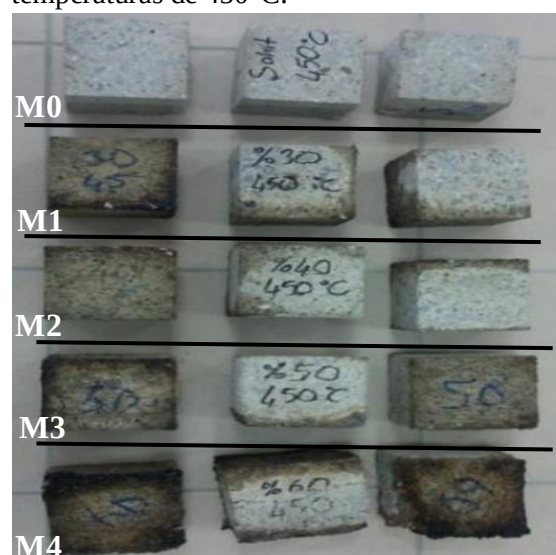
Uma exceção foi observada no concreto referência (M0) e no concreto com 60% (M4) de substituição, nestes casos houve um aumento da resistência inicial, em torno de 3% e 44%, respectivamente, podendo ser devido a reação de hidratação do cimento de forma mais completa.

Após os 150°C, todos os concretos apresentaram redução de resistência, de acordo com os autores, e isto ocorreu devido a aderência entre o PET e a pasta de cimento ter sido comprometida e não ser tão forte quanto a ligação entre o agregado natural e a pasta de cimento.

Ainda, de acordo com os autores, o agregado de PET passa a se decompor a partir de 300°C e assim os corpos de prova com 60% de substituição (M4) ficaram deformados após a temperatura de 450°C.

Os concretos produzidos com agregado de PET resistem pouco a elevadas temperaturas e este efeito é maior à medida que se aumentam a porcentagem do agregado leve. Os cp's, porém, não apresentam lascamento, conforme Figura 8.

Figura 8 – Amostras após exposição a temperaturas de 450°C.



Fonte: Adaptada de Akçaözoglu (2018).

Foi possível observar através deste estudo, que o PET não propicia uma boa ligação de aderência com a pasta de cimento

e não resiste a elevadas temperaturas, pois deforma-se e perde sua resistência à medida que se aumenta a temperatura e porcentagem do agregado.

Para o traço padrão (M0) manteve 54% da resistência inicial, já para o traço (M4) a resistência mantida foi apenas de 25%, em relação a condição inicial.

Concretos leves estruturais com ceramsita submetidos a situação de incêndio

Em estudos realizados por Wang et al (2020), para produção de concretos leves, os autores utilizaram a ceramsita de folhelho triturada (agregado graúdo) e areia de ceramsita de folhelho (agregado fino) para produção do concreto (ALWC). Foram moldados dois tipos de amostras: 100×100×300 mm para testes de resistência a compressão e amostras cúbicas de 100 mm para os testes de UPV (Velocidade de Pulso Ultrassônico) e resistência a tração, a taxa de aquecimento do forno foi de 6 °C/min. A partir de 200°C, a temperatura foi mantida constante por 5 minutos para cada 50°C. Quando a temperatura alvo foi atingida, a temperatura foi mantida constante por 60 minutos.

Os concretos foram analisados associados ao reforço com fibras de aço, de acordo com os traços apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Traços estudados em (kg / m³).

Traço	Água	Cimento	Silica	Cinza volante	Agregado grosso	Agregado fino	Superplasticificante	Fibra de aço
NWC	187	390	-	-	1154	663	-	-
ALWC	154	450	20	80	489	476	8,0	-
CF-AL	154	450	20	80	489	476	8,4	78
HF-AL	154	450	20	80	489	476	8,7	78
SLWC	167	390	14	60	439	821	5,4	-
CF-SL	167	390	14	60	439	821	5,8	78
HF-SL	167	390	14	60	439	821	6,1	78

Fonte: Adaptada de Wang et al (2020).

Segundo os autores constatou-se que, com o aumento da temperatura, o concreto variava a cor. Sendo a tonalidade cinza claro observada à temperatura ambiente, cinza escuro à 200°C, cinza rosa ou cinza amarelado à 400 °C, cinza

acastanhado à 600 °C e cinza-esbranquiçado à 800 °C.

De acordo com os autores, até a temperatura de 400°C, não foi possível observar rachaduras significativas nas superfícies dos concretos, porém, a partir dos 600°C, foi possível observar diversas rachaduras irregulares principalmente no concreto referência e no concreto semi-leve. Esta característica pode ser explicada pela variação volumétrica, causada pela variação térmica dos agregados naturais, quando expostos a elevadas temperaturas.

Foi possível observar que os concretos leves e semi leves, reforçados com fibras, passaram a apresentar fissuras visíveis a olho nú a partir de 800°C. Isto ocorreu devido a transferência de calor das fibras dentro da matriz ser mais uniforme, ajudando a reduzir a pressão de vapor d'água e a propagação de fissuras no concreto.

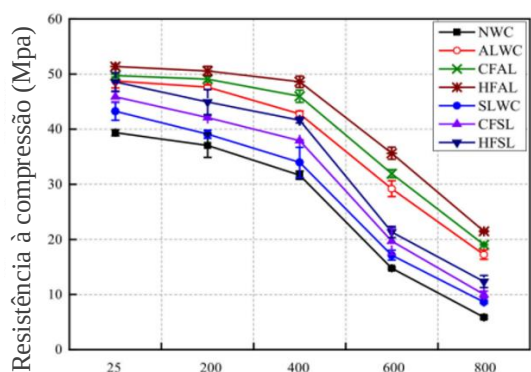
Os autores analisaram a velocidade de pulso ultrassônico para constatar a estrutura interna dos concretos estudados. A partir do resultado deste ensaio, concluíram que os concretos com e sem fibras não apresentaram resultados significativos antes e depois da exposição a elevadas temperaturas.

Todas as amostras registraram uma redução na velocidade, sendo mais expressivo a partir dos 400°C, o que pode indicar que a matriz sofre danos significativos a partir desta temperatura.

O concreto leve e o reforçado com fibra apresentaram o melhor desempenho em relação aos demais, isso pode ser explicado pela sua melhor condução de calor pela matriz diminuindo as variações volumétricas e diminuindo os vazios entre a matriz e o agregado.

A resistência a compressão residual de todas as amostras reduziu à medida que se elevou as temperaturas, sendo mais expressiva a partir dos 400°C, conforme Figura 9.

Figura 9 - Resultados de resistência à compressão residual aos 36 dias.



NWC – Concreto referência

ALWC - Concreto totalmente leve

CFAL – Concreto totalmente leve com fibra de aço ondulada

HFAL – Concreto totalmente leve com fibra de aço com extremidade em gancho

SLWC - Concreto semi leve

CFSL - Concreto semi leve com fibra de aço ondulado

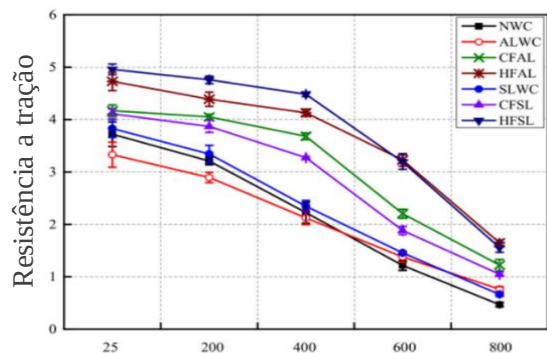
HFSL - Concreto semi leve com fibra de aço com extremidade em gancho

Fonte: Adaptada de Wang et al (2020).

Dentre os concretos leves observados, o concreto totalmente leve com fibra de aço com extremidade em gancho (HFAL), apresentou o melhor desempenho.

Os resultados de resistência à tração das amostras com fibras em sua composição, apresentaram melhores desempenhos sobre aqueles sem fibras (Figura 10), acentuando a eficácia da utilização das fibras que propiciam pontes de ligação internas na matriz.

Figura 10 - Resultados de resistência a tração aos 36 dias.

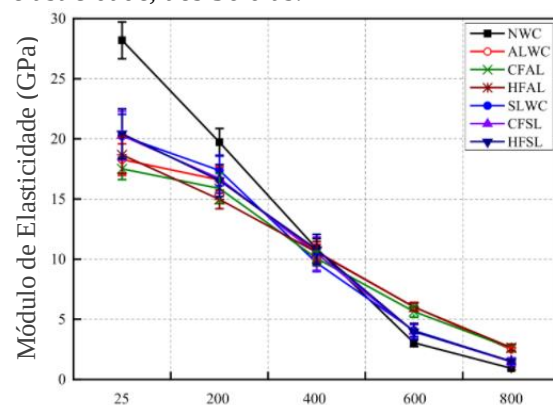


Fonte: Adaptada de Wang et al (2020).

A conservação da resistência à tração foi mais eficaz para as fibras com ganchos do que em relação às fibras onduladas. Foi possível observar que as resistências das fibras onduladas diminuem de forma expressiva à 600°C, enquanto nas com gancho estas reduções ocorrem à 800°C. Já as amostras sem adição de fibras, apresentaram fissuras inclinadas de uma ponta a outra, característica esta que não foi observada nas amostras com adição de fibras.

Para os resultados de módulo de elasticidade, de modo geral todas as amostras apresentaram diminuição com o aumento da temperatura, tendo os concretos leves o melhor desempenho em relação concreto referência conforme mostra a Figura 11. Este resultado pode se dar devido aos agregados leves terem alto grau de porosidade, uma menor variação volumétrica térmica, se comparado com o agregado natural.

Figura 11 - Resultados de módulo de elasticidade, aos 36 dias.



Fonte: Adaptada de Wang et al (2020).

O fato de terem uma menor variação volumétrica não fragilizam a zona de transição, como ocorre com os agregados naturais, uma vez que variam seu volume e fragilizam a zona de transição. Esses resultados levaram a uma melhor resistência ao fogo e menos perda de rigidez após altas temperaturas, os autores observaram ainda que agregados esféricos apresentam menos aderência com a pasta de cimento.

O pico de deformação dos concretos com ou sem fibras aumenta com o aumento da temperatura. A adição de fibra de aço não influenciou a tendência de pico de deformação com a temperatura. O pico de incremento da tensão de todas as misturas foi pequeno à 200°C, mas aumentou significativamente a partir de 400°C.

O aumento do pico de deformação deveu-se à inconsistência da expansão térmica entre o agregado e a argamassa de cimento em altas temperaturas.

Foi possível observar através do estudo que as fibras de aço com gancho apresentaram melhor desempenho em relação a fibras ondulada que dentre os concretos leves observados, o concreto totalmente leve com fibra de aço com extremidade em gancho (HFAL), apresentou o melhor desempenho.

Os resultados de resistência à tração das amostras com fibras em sua composição, apresentaram melhores desempenhos sobre aqueles sem fibras antes e depois da exposição ao fogo, acentuando a eficácia da utilização das fibras que propiciam pontes de ligação internas na matriz. A influência das fibras no módulo de elasticidade residual não foi significativa.

CONCLUSÃO

A partir deste estudo foi observado que os concretos produzidos com agregados leves e submetidos a elevadas temperaturas, há também perda de suas propriedades, entre estas: resistência à compressão, flexão e tração.

A depender dos materiais utilizados em sua produção, os concretos também apresentam fissuras ou rachaduras, como observado quando se foi utilizado argila expandida e pedra pomes que foram minimizadas pela utilização de fibras.

Foi observado também que à medida que as temperaturas aumentam os concretos leves e convencionais mudam a sua coloração.

Em relação as propriedades relacionadas, os percentuais de perdas dos concretos leves submetidos à elevadas temperaturas são menores em relação ao concreto convencional, especialmente para temperaturas acima de 800°C.

Ganho de resistência à compressão foram constatadas na maioria dos estudos, quando o concreto foi submetido a faixas de temperatura entre 0 a 400°C. Isto decorre porque, as altas temperaturas fazem com que a reação de hidratação do cimento ocorra de forma mais completa.

De 400°C a 800°C os concretos com agregados de argila expandida apresentaram perdas da resistência à compressão entre 28% e 65%. Na medida em que é aumentado a proporção do agregado no concreto, as propriedades diminuem. Concretos com argila expandida e fibras as perdas foram de até 37%.

Para os concretos produzidos com fibras de aço e vidro, submetidos a elevadas temperaturas, os resultados foram satisfatórios em relação as perdas das resistências à compressão e à flexão, neste caso as perdas de resistência com o incremento da temperatura foram minimizadas.

A utilização de pedra pomes associado ao metacaulim apresentou reduções de 13% a 59%, da resistência à compressão, a depender do teor em substituição ao cimento utilizado, enquanto no concreto padrão estas perdas foram de 13,15% a 67,1%.

Muitos estudos se limitaram a temperatura de 800°C, para os resultados a partir destas temperaturas aqueles que continham argila expandida tiveram perda de resistência entre 54% e 91% com o concreto convencional desintegrando a 1000°C.

O concreto com agregado leve proveniente de lodo de reservatório obteve perdas de resistência a compressão de 32% a 46% e perda de flexão entre 44% e 63%, sendo o concreto híbrido o resultado mais satisfatório aos 800°C mantendo 63% da

resistência a compressão enquanto o concreto padrão apenas 46%.

Concretos com resíduos de blocos cerâmicos obtiveram reduções de resistência a compressão de 78% e módulo de elasticidade de 94% se comparado com o concreto convencional que teve reduções de 81% e 95% respectivamente.

Como visto na literatura por Battagin e Silveira (2018) e Neville (2016) a partir de 600°C, reações de degradação do concreto ocorrem prejudicando suas propriedades.

Os estudos mostram a tendência de utilização de vários materiais que mitigam os efeitos das altas temperaturas, entre eles: resíduos de blocos cerâmicos, fibras, e materiais pozolânicos.

As principais características de melhoras são apresentadas pelos agregados leves, por terem uma baixa variação volumétrica térmica, sendo assim, não fraturam e nem causam fissuras que fragilizam a zona de transição pasta agregado do concreto o seu alto índice de vazios cria também caminhos que diminuem as pressões internas dentro da matriz de concreto.

Também foi possível observar que a utilização de fibras melhora o controle das fissuras e rachaduras, mais especificamente as de aço, estas ajudam também na distribuição de temperatura na matriz do concreto.

Os estudos ressaltados neste artigo foram apresentados com o intuito de despertar futuras pesquisas acerca do tema, contribuindo com os principais resultados dos concretos leves submetidos a elevadas temperaturas com matérias que mitigam os seus efeitos.

Uma das dificuldades encontradas nesta pesquisa foi a pouca quantidade de estudos publicados sobre o tema e ainda a falta de informações detalhadas de algumas publicações, apresentando dados incompletos ao leitor e dificultando uma análise do mesmo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 213R-03**: Guide for structural lightweight aggregate concrete. Michigan: ACI, 2003. 38 p. Disponível em: http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20213R-03%20Guide%20for%20Structural%20Lightweight-Aggregate%20Concrete_MyCivil.ir.pdf. Acesso em: 02 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações Habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

AKÇAÖZOĞLU, K.; AKÇAÖZOĞLU, S. The Effect of Elevated Temperature on the Lightweight Concrete Produced by Expanded Clay Aggregate and Calcium Aluminate Cement. **Bilge International Journal Of Science And Technology Research**. Isparta, p. 59-70. 30 nov. 2017. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/pub/bilgesci/issue/32353/342232>. Acesso em: 10 set. 2021.

AKÇAÖZOĞLU, S. The effect of elevated temperature on the lightweight concrete containing waste PET aggregate. **International Journal Of Business And Technology**. Nigde, p. 1-14. maio 2018. Disponível em: <https://knowledgecenter.ubt->

uni.net/ijbte/vol6/iss3/19/. Acesso em: 15 set. 2021.

AMIN, M.; TAYEH, A. B.; AGWA, I. S. Investigating the mechanical and microstructure properties of fibre-reinforced lightweight concrete under elevated temperatures. **Case Studies In Construction Materials**. [S.l.], v.13, p. 1-14. dez. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509520301315>. Acesso em: 10 set. 2021.

BATTAGIN, A. F.; SILVEIRA, A. L. Z. P. Estudo da microestrutura do concreto em situação de incêndio: um termômetro da temperatura alcançada. **Concreto & Construções**: Concreto em situação de incêndio. São Paulo, n. 89, p. 44-48, jan. 2018. ISSN 1809-7197. Trimestral.

BERTO, A. F. Incêndios em estruturas de concreto - Estudos de caso significativos em São Paulo. **Revista ALCONPAT**, São Paulo, v. 10, n. 01, p. 132-146, 30 dez. 2019. Quadrimestral. Disponível em: <https://revistaalconpat.org/index.php/RA/article/download/438/634/>. Acesso em: 16 nov. 2021.

BERTO, A. F.; OLIVEIRA, C. R. M. Resistência ao fogo das estruturas de concreto. **Concreto & Construções**: Concreto em situação de incêndio, São Paulo, v. 89, n. 89, p.22-28, jan. 2018. ISSN 1809-7197. Trimestral.

DEMIREL, B.; GULTEKIN, E.; ALYAMAC, K. E. Performance of Structural Lightweight Concrete containing Metakaolin after Elevated Temperature. **Ksce Journal Of Civil Engineering**. [S. l.], v. 23, n. 7 p. 2997-3004. 30 abr. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Bahar-Demirel/publication/332764619_Performance_of_Structural_Lightweight_Concrete_containing_Metakaolin_after_Elevated_Te

mperature/links/5d403517299bf1995b56453f/Performance-of-Structural-Lightweight-Concrete-containing-Metakaolin-after-Elevated-Temperature.pdf. Acesso em: 11 set. 2021.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural**. São Paulo: Pini, 2008. 179 p.

G1. **Incêndio e desabamento do prédio no Largo do Paissandu completam um ano; veja o que se sabe sobre o caso**. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/05/01/incendio-e-desabamento-do-predio-no-largo-do-paissandu-completa-um-ano-veja-o-que-se-sabe-sobre-o-caso.ghtml>. Acesso em: 21 dez. 2021.

JUNIOR, P. R. P. A influência dos procedimentos de cura na resistência à compressão do concreto. – **Revista Especialize On-Line Ipog**: A influência dos procedimentos de cura na resistência à compressão do concreto, Goiânia, v. 01, n. 15, p. 1-14, jul. 2018. Disponível em: <https://ipog.edu.br/wp-content/uploads/2020/11/paulo-rodrigues-pache-junior-eecam002-16189138.pdf>. Acesso em: 02 set. 2021

PASSOS, L.; MORENO, A. L. J.; SOUZA, A. A. A. Concreto leve com agregado graúdo proveniente de resíduo cerâmico sob elevadas temperaturas. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 433-454, abr. 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/MR4pwyB8Hn9xxsdV7NQLbDn/?lang=en>. Acesso em: 17 set. 2021.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto & Construções**: Concreto: material construtivo mais consumido no mundo, São Paulo, v. 53, n. 1, p. 14-19, jan. 2009. Trimestral. Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_i

bracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf. Acesso em: 10 ago. 2021.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. Cap. 29. p. 905-944. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc48.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2021.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. 257 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5085/000509828.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 22 nov. 2021.

MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obra**. São Paulo: Pini, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **M. Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. **J. Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 468 p.

REUTERS. **Boate Kiss: Justiça condena 4 réus a até 22 anos de prisão por incêndio**. 2021. Disponível em: <https://exame.com/brasil/boate-kiss-justica-condena-4-reus-a-ate-22-anos-de-prisao-por-incendio/>. Acesso em: 21 dez. 2021.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto Leve Estrutural: Produção, propriedades,**

microestrutura e aplicações. São Paulo: Pini, 2009.

SERAFINI, R.; RAMBO, D. A. S.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras em situação de incêndio. **Concreto & Construções: Concreto em situação de incêndio**, São Paulo, v. 89, n. 89, p. 58-61, jan. 2018. Trimestral.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: conforme ABNT NBR 15200:2012**. São Paulo: Blucher, 2012. 237 p.

TANG, C. Residual Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Lightweight Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperatures. **MDPI Journals**. Basileia, p. 1-17. maio 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/10/3519/htm>. Acesso em: 13 set. 2021.

WANG, H. *et al.* Mechanical Behavior of Steel Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Exposed to High Temperatures. **MDPI Journals**. Basileia, p. 1-20. dez. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/1/116/htm>. Acesso em: 13 set. 2021.

WEIRICH, J. B. **Análise da perda de resistência do concreto leve, com argila expandida e fibras de polipropileno, após exposição a elevadas temperaturas**. 2017. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Construção Civil Curso de Engenharia Civil, Pato Branco, 2017. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/14560>. Acesso em: 18 ago. 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus porque sem ele eu não teria chegado até aqui, agradeço a toda minha família e a todos que me ajudaram nessa jornada de forma direta e indiretamente, obrigado a todos!