



INSTITUTO FEDERAL
Piauí
Campus Teresina Central



PPGEM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMPORTAMENTO RESIDUAL DO CONCRETO LEVE NÃO ESTRUTURAL COM
PÉROLAS DE EPS APÓS EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS E
RESFRIAMENTO RÁPIDO

MARIANA MELO MENESES CARVALHO

ORIENTADOR: Prof. Dr. HUDSON CHAGAS DOS SANTOS

TERESINA
2022

MARIANA MELO MENESES CARVALHO

**COMPORTAMENTO RESIDUAL DO CONCRETO LEVE NÃO ESTRUTURAL COM
PÉROLAS DE EPS APÓS EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS E
RESFRIAMENTO RÁPIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí (IFPI) como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia de Materiais sob a orientação do Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos.

Área de concentração: Síntese e Caracterização de Materiais.

**TERESINA
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Carvalho, Mariana Melo Meneses

C331c Comportamento residual do concreto leve não estrutural com
pérolas de EPS após exposição a altas temperaturas e resfriamento
rápido / Mariana Melo Meneses Carvalho. - 2022.
80 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal do
Piauí, Campus Teresina Central, 2022.

Orientador : Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos.

1. Concreto. 2. Poliestireno expandido. 3. Incêndio. 4. Propriedades
mecânicas. I. Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Sindya Santos Melo CRB 3/1085

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ - IFPI
CAMPUS TERESINA CENTRAL / DIRETORIA DE PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS / PPG-EM
Praça da Liberdade, 1597 - Centro - Teresina - PI CEP. 64.000-040
Fone: (86) 3131 – 9468, endereço eletrônico: <http://ppgem.ifpi.edu.br/home>

MARIANA MELO MENESES

COMPORTAMENTO RESIDUAL DO CONCRETO LEVE NÃO ESTRUTURAL COM
PÉROLAS DE EPS APÓS EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS E
RESFRIAMENTO RÁPIDO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 17/03/2022.

BANCA EXAMINADORA

ASSINATURA NO ORIGINAL

Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI
Orientador

ASSINATURA NO ORIGINAL

Prof. Dr. Gilvan Moreira da Paz
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI
Avaliador Interno

ASSINATURA NO ORIGINAL

Prof. Dr. Ediomar Costa Serra
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA
Avaliador Externo

Aos meus pais, Socorro e Gil;
ao meu marido, André, com todo carinho e amor.

AGRADECIMENTOS

O caminho percorrido até chegar essa etapa foi gratificante, e muitas pessoas estiveram envolvidas. Cada uma foi de grande importância em alguma etapa, outras estiveram presentes até o momento da conclusão final. O que me faz ter a certeza de que sem a colaboração de cada uma, este trabalho de pesquisa poderia nem ter sido concluído. Espero poder expressar e agradecer tão bem toda ajuda recebida.

Ao meu marido, André de Carvalho Amorim, por ser tão dedicado e me apoiar em todas as fases da minha vida.

Aos meus pais, Socorro e Gil, por acreditarem e não medirem esforços para que eu alcance meus objetivos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eng.º Civil Hudson das Chagas Santos pela orientação no desenvolvimento deste trabalho e pela amizade conquistada ao longo destes anos de convívio, tanto da graduação como da pós. E, por depositar em mim confiança para que eu pudesse percorrer toda esta trajetória dentro da pesquisa acadêmica.

Ao amigo, Laécio Guedes, por toda atenção e dedicação na resolução dos problemas com equipamentos e insumos essenciais para a parte experimental desta pesquisa.

Combati o bom combate, terminei a corrida, guardei a fé.

2 Timóteo 4:7

RESUMO

A concepção de concreto leve com poliestireno expandido (EPS) surgiu com o desenvolvimento da tecnologia do concreto e a constante preocupação com a questão da sustentabilidade. No entanto, para que as vantagens do concreto leve sejam exploradas, faz-se necessário, por questão de segurança, que seja estudado o seu desempenho nas mais variadas situações em que ele possa ser submetido. O conhecimento do comportamento residual do concreto leve não estrutural com pérolas de poliestireno expandido (EPS) após situação de incêndio e resfriamento rápido é de fundamental importância, para que se possam reduzir os efeitos nocivos causados por incêndios, uma vez que estruturas de concreto eventualmente são expostas a situações de incêndio controladas por meio de resfriamento rápido com água. Portanto, esse trabalho objetiva-se analisar o comportamento residual do concreto leve com pérolas de EPS após ser submetido a altas temperaturas e resfriamento rápido. Para isto, os corpos de provas foram submetidos a um aquecimento via forno e gasolina que obedece a curva do incêndio padrão até determinados patamares predefinidos, e então foram submetidos a resfriamento rápido e hidratação durante 7, 14, 21 e 28 dias. A determinação das propriedades mecânicas ocorreu através dos ensaios de Compressão Normal e Compressão Diametral. Os resultados obtidos evidenciam ganhos da resistência à compressão após períodos de hidratação das amostras aquecidas no forno e gasolina. Durante o aquecimento não foi verificado em nenhum dos corpos de provas algum tipo de deslocamento explosivo. Acredita-se que a quantidade de poros existentes na matriz permitiu a migração do vapor para a superfície com relativa facilidade, e que o fato das amostras apresentarem baixa umidade em função do tempo de cura ao ar livre reduziu a possibilidade do *spalling*. Porém, a resistência à tração dos corpos de prova sem e com hidratação não segue um padrão teórico de ganho ou perda total com o passar dos dias. A massa específica dos materiais queimados a gasolina e forno foram menores em relação ao material não queimado. Os resultados deste trabalho reforçam a importância em se estudar o comportamento do concreto perante as elevadas temperaturas provenientes de um incêndio. Além de indicar que a reidratação do concreto após o aquecimento pode contribuir para a recuperação da parte da resistência mecânica inicial.

Palavras-Chave: concreto; poliestireno expandido; incêndio; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The design of lightweight concrete with expanded polystyrene (EPS) came about with the development of concrete technology and the constant concern with the issue of sustainability. However, in order for the advantages of lightweight concrete to be exploited, it is necessary, for safety reasons, to study its performance in the most varied situations in which it can be subjected. Knowledge of the residual behavior of non-structural lightweight concrete with expanded polystyrene (EPS) beads after a fire and rapid cooling situation is of fundamental importance, in order to reduce the harmful effects caused by fires, since concrete structures are eventually exposed to fire situations controlled by rapid cooling with water. Therefore, this work aims to analyze the residual behavior of lightweight concrete with EPS beads after being subjected to high temperatures and rapid cooling. For this, the specimens were subjected to heating via oven and gasoline that obeys the standard fire curve to certain predefined levels, and then they were subjected to rapid cooling and hydration for 7, 14, 21 and 28 days. The determination of the mechanical properties occurred through the tests of Normal Compression and Diametral Compression. The results obtained show gains in compressive strength after periods of hydration of the samples heated in the oven and gasoline. During the warming, no explosive detachment was verified in any of the specimens. It is believed that the amount of pores in the matrix allowed the migration of steam to the surface with relative ease, and that the fact that the samples have low humidity due to the curing time in the open air reduced the possibility of spalling. However, the tensile strength of specimens without and with hydration does not follow a theoretical pattern of total gain or loss over the days. The specific mass of materials burned in gasoline and oven were lower compared to unburned material. The results of this work reinforce the importance of studying the behavior of concrete in the face of high temperatures from a fire. In addition to indicating that the rehydration of the concrete after heating can contribute to the recovery of the part of the initial mechanical strength.

Keywords: concrete; expanded polystyrene; fire; mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da seção transversal da cúpula do Panteão de Roma.....	18
Figura 2 – Catedral de Santa Sofia em Istambul	18
Figura 3 – Lançamento da embarcação USS Selma 1919.....	19
Figura 4 – Fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura.	21
Figura 5 – Fator de redução do módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura.....	22
Figura 6 – Efeito do tipo de agregado e condições de ensaio sobre a resistência ao fogo	25
Figura 7 – Efeitos de colapsos devidos a um incêndio	27
Figura 8 – Colapso parcial do Ronan Point, em Londres – UK, 1968	27
Figura 9 – Colapso parcial da Katrantzos Sport em Atenas – Grécia, 1980.....	28
Figura 10 – Colapso total da Biblioteca Municipal de Linköping – Suécia, 1996.....	28
Figura 11 – Colapso total de um edifício residencial em São Petersburgo – Rússia, 2002	28
Figura 12 – Colapso total de um edifício residencial no Cairo – Egito, 2004.....	29
Figura 13 – Colapso localizado da laje de cobertura de um estacionamento subterrâneo em Gretzenbach – Suíça, 2004.....	29
Figura 14 – (a) Incêndio no edifício Andraus em 1972 e (b) edifício Joelma em 1974	30
Figura 15 – Colapso parcial do edifício Sede II da CESP em São Paulo – Brasil, 1987	31
Figura 16 – Colapso total do depósito das lojas Zêlo, em Barueri (SP) – Brasil, 1995	31
Figura 17 – Danos nos elementos estruturais do Condomínio Edifício Cacique, em Porto Alegre – Brasil, 1996.....	32
Figura 18 – Fluxo de Calor Convectivo.....	33
Figura 19 – Fluxo de Calor Radiante	34
Figura 20 – Condução	34
Figura 21 – Curva tempo-temperatura típica de um incêndio real.....	36
Figura 22 – Modelo do incêndio-padrão	37
Figura 23 – Curva Padrão – Temperatura x tempo (ISO 834:1999).....	38
Figura 24 – (a) Concreto com agregados leves, (b) concreto celular e (c) concreto	

sem finos.....	40
Figura 25 – Painel de concreto leve com EPS	42
Figura 26 – Peças de concreto leve com EPS: (a) Laje durante içamento; (b) Painel Pl.....	43
Figura 27 – Laje de concreto leve com EPS.....	44
Figura 28 – Cimento utilizado CP II Z 32 - POTY	46
Figura 29 – Preparação das pérolas de EPS para realização de gráfico da distribuição granulométrica.....	48
Figura 30 – Determinação da composição granulométrica da areia.....	49
Figura 31 – Determinação da composição granulométrica do EPS	50
Figura 32 – Ilustração da preparação do concreto	50
Figura 33 – Corpos de prova - Concreto Leve.....	51
Figura 34 – Corpos de Prova acondicionados em tanques com água potável para cura	52
Figura 35 – Forno Cerâmico Caseiro	53
Figura 36 – Etapas da simulação de incêndio no forno cerâmico caseiro	53
Figura 37 – Processo de resfriamento dos corpos de prova após simulação de incêndio em forno cerâmico caseiro	54
Figura 38 – Etapas da simulação de incêndio através da utilização de gasolina	55
Figura 39 – Prensa Manual para Ensaio de Concreto - Contenco.....	56
Figura 40 – Curva Granulométrica da areia do traço.....	58
Figura 41 – Curva Granulométrica do EPS	59
Figura 42 – Ensaio de Compressão Normal para corpos de prova submetidos a alta temperatura através do forno e reidratados	60
Figura 43 – Ensaio de Compressão Normal para corpos de prova submetidos a alta temperatura através da gasolina e reidratados	61
Figura 44 – Resistência à compressão corpos de prova submetidos a alta temperatura através do forno	61
Figura 45 – Resistência à compressão corpos de prova submetidos a alta temperatura através da gasolina	62
Figura 46 – Resistência à compressão de Corpos de Prova Referência e Curados durante 28 dias e reidratados após queima no forno e a gasolina	63
Figura 47 – Ensaio de Tração por Compressão Diametral para corpos de prova submetidos a alta temperatura através do forno e reidratados	65

Figura 48 – Ensaio de Tração por Compressão Diametral para corpos de prova submetidos a alta temperatura através da gasolina e reidratados	66
Figura 49 – Resistência à tração dos corpos de prova submetidos a alta temperatura através do forno	67
Figura 50 – Resistência à tração dos corpos de prova submetidos a alta temperatura através da gasolina	67
Figura 51 – Resistência à tração por compressão Diametral de Corpos de Prova Referência e Curados durante 28 dias e reidratados após queima no forno e a gasolina.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do cimento CP II Z 32.....	47
Tabela 2 – Propriedades e Características do Aditivo Plastificante	49
Tabela 3 – Quantidade de corpos de prova.....	51
Tabela 4 – Granulometria do agregado miúdo – areia	57
Tabela 5 – Granulometria do Poliestireno Expandido	58
Tabela 6 – Comparação da Resistência à compressão Normal dos Corpos de Prova aquecidos no Forno e Gasolina.....	63
Tabela 7 – Comparação da Resistência à Tração por Compressão Diametral dos Corpos de Prova aquecidos no Forno e Gasolina.....	68
Tabela 8 – Resultados da determinação da massa específica dos materiais	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ARI	Alta Resistência Inicial
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Cimento Portland
EPS	Poliestireno Expandido
f_c	Resistência à Compressão Axial
$f_{ct,sp}$	Resistência à Tração por Compressão Diametral
IFPI	Instituto Federal do Piauí

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	GERAL	16
2.2	ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	CONCRETO LEVE	17
3.2	EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE O CONCRETO	20
3.3	EXIGÊNCIAS DA RESISTÊNCIA AO FOGO DAS EDIFICAÇÕES	23
3.3	CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	26
3.4	AÇÃO TÉRMICA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	32
3.4.1	Aplicação em Segurança contra incêndios	34
3.4.2	Incêndio real e Incêndio-padrão	35
3.4.2	Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)	37
3.5	CONCRETO LEVE COM EPS	40
3.6	COMPORTAMENTO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) AO FOGO	44
4	MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1	MATERIAIS	46
4.1.1	Cimento	46
4.1.2	Agregado miúdo	47
4.1.3	EPS	47
4.1.4	Aditivo Plastificante	48
4.2	MÉTODOS	49
4.2.1	Caracterização dos materiais	49
4.2.1.1	Agregados	49
4.2.2	Preparação do concreto	50
4.2.3	Corpos de Prova	51
4.2.4	Cura	52
4.2.5	Simulação de incêndio	52
4.2.6	Ensaio	55
4.2.7	Massa Específica	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1	ENSAIO GRANULOMÉTRICO	57

5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NORMAL	59
5.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	64
5.3	MASSA ESPECÍFICA.....	70
6	CONCLUSÃO	71
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil reflete a economia do país e em tempos de crise, principalmente, tende-se a reduzir investimentos e otimizá-los. Assim, soluções que promovam o aumento da produtividade e a redução de custos e de tempo de execução ganham espaço na construção civil em detrimento dos sistemas convencionais, em que se verifica alto desperdício de materiais, retrabalho e baixa produtividade e qualidade. Nesse contexto, o sistema de pré-moldados ganha espaço por apresentar características exigidas pelo mercado. Porém, uma das desvantagens desse tipo de sistema é o peso das estruturas, que acaba encarecendo o transporte e o manuseio sendo, assim, um inconveniente ao avanço desse modelo construtivo.

O concreto leve, por sua vez, possibilita a redução da massa específica, a diminuição dos esforços internos das estruturas e por consequência a diminuição do volume de concreto e das armaduras, além disso, também diminui a energia requerida no transporte e no processo construtivo, tornando o sistema de pré-moldados ainda mais barato (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005). O concreto leve pode ser definido como um material caracterizado pela baixa massa específica, em relação aos concretos comuns. Neville (1997) indica que o intervalo prático de massa específica dos concretos leves é de 300 kg/m³ a 1800 kg/m³.

O American Concrete Institute (ACI) 213R-87 classifica os concretos leves em três grupos, em função da massa específica, influenciada diretamente pelo teor de cimento e pelo tipo de agregado leve utilizado, cuja origem pode ser natural ou artificial (SBRIGHI NETO, 2011). Esses grupos são: concretos isolantes, destinados principalmente à composição de painéis de vedação isolantes térmicos; concretos com resistências moderadas, que possuem aplicação em enchimentos de pisos e em outras de menor responsabilidade; e concretos estruturais, que devem ter resistência mínima de 17 MPa. O uso de concretos leves teve início há 1850 anos, no Panteão romano, reconstruído, após um incêndio, pelo imperador Adriano (AITCIN, 1998). Um relato histórico interessante pode ser encontrado em Rossignolo e Agnesini (2005, 2011), que destacam a aplicação de concretos leves em obras emblemáticas e de grande porte, como edifícios altos e grandes pontes.

A concepção de concreto leve com poliestireno expandido (EPS) surgiu com o desenvolvimento da tecnologia do concreto e a constante preocupação com a

questão da sustentabilidade. A Associação Brasileira de Poliestireno Expandido – ABRAPEX define concreto leve com EPS como um concreto do tipo cimento e areia que, no lugar da pedra britada, utiliza EPS na forma de pérolas expandidas ou de flocos reciclados (ABRAPEX, 2006).

A mistura de cimento e areia, ao endurecer, envolve as partículas de EPS, cujo volume é constituído de 95% a 98% de ar, proporcionando um concreto de baixa densidade. Nos últimos anos, algumas pesquisas e estudos experimentais conduziram a um bom avanço na tecnologia de concretos com EPS, como os realizados por Catoia (2012) e Sartorti (2015). Foram avaliadas dosagens, resistências, fluência, retração e aplicações, e também foram realizados estudos sobre a durabilidade de concretos leves com EPS, como os indicados por Momtazi, Langrudi e Khodaparast (2010). Nas pesquisas dos citados autores, várias dosagens com o uso de EPS foram elaboradas, obtendo-se resultados satisfatórios quanto à absorção de água pelo concreto, resistência à condutividade elétrica e uso do concreto em ambiente marinho.

No Brasil, algumas pesquisas foram feitas com o concreto leve com pérolas de EPS. Podem ser citadas as pesquisas de: Sant’Helena (2009), que produziu concretos com substituição parcial dos agregados graúdos por EPS em pérolas, nas proporções de 20% e 40%, chegando a resultados que caracterizaram concreto leve sem função estrutural; Porto (2010) que ensaiou corpos de prova cilíndricos para obtenção de resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos “semileves”, com agregados graúdos normais e parte do volume de agregados substituído por pérolas de EPS; e Catoia (2012), que fez uma extensa caracterização do concreto leve com pérolas de EPS.

No entanto, para que as vantagens do concreto leve sejam exploradas, faz-se necessário, por questão de segurança, que seja estudado o seu desempenho nas mais variadas situações em que ele possa ser submetido. O conhecimento do comportamento residual do concreto leve não estrutural com pérolas de poliestireno expandido (EPS) após situação de incêndio e resfriamento rápido é de fundamental importância, para que se possam reduzir os efeitos nocivos causados por incêndios, uma vez que estruturas de concreto eventualmente são expostas a situações de incêndio controladas por meio de resfriamento rápido com água.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

- Analisar o comportamento residual do concreto leve com pérolas de EPS após ser submetido a altas temperaturas e resfriamento rápido.

2.2 ESPECÍFICOS

- Caracterizar os materiais utilizados para confecção dos corpos de prova;
- Determinar as propriedades mecânicas residuais dos corpos de prova.
- Comparar a recuperação de resistências mecânicas após queima a diferentes temperaturas seguidas da reidratação da pasta;
- Dosar concretos leves estruturais, após análise das características apresentadas pelos materiais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONCRETO LEVE

De acordo com Ozorio (2016), o concreto é o material artificial mais consumido no mundo, por isso são desenvolvidas muitas pesquisas sobre seu comportamento mecânico, variações de dosagens e inserção de materiais alternativos, procurando melhorar seu desempenho e otimizar o uso de seus materiais constituintes. A autora afirma ainda que, neste sentido, é impossível imaginar a vida sem produtos à base de cimento.

Isso por ser um material barato tendo 85% do seu volume constituído de materiais locais (água e agregados) e sua produção não necessitar de tecnologias muito modernas e também por ser um material resistente a solicitações mecânicas e ao fogo, além de ser estável e duradouro em vários ambientes (AITCIN, 2000).

O concreto convencional, produzido a partir do cimento Portland e agregados naturais apresentam deficiências. Com o propósito de superar essas limitações são desenvolvidas novas tecnologias do concreto, incluindo adições e/ou substituições de seus constituintes aliados a diferentes dosagens.

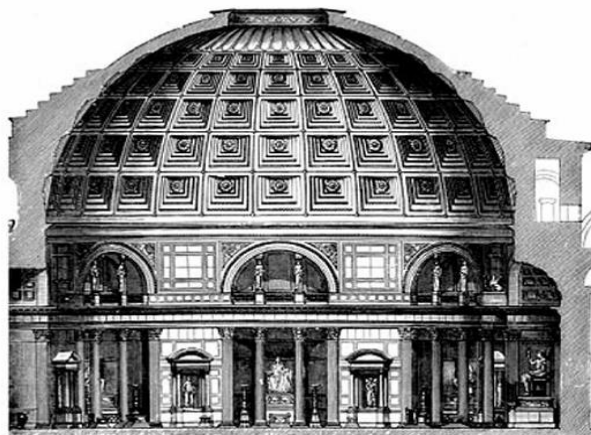
Dentre os tipos de concreto existentes, o concreto leve se destaca por ter uma massa específica reduzida, que segundo Metha e Monteiro (2014), é cerca de dois terços da apresentada pelo concreto convencional, devido ao uso de um agregado leve celular na composição da mistura. Os autores afirmam ainda que com a baixa relação resistência-peso do concreto convencional, surge o problema econômico ao construir edifícios de grande porte, pontes com grandes vãos e estruturas flutuantes. Logo, duas perspectivas resultam naturalmente ao se considerar como melhorar a relação resistência/peso: ou a massa específica do material deve ser diminuída, ou a resistência deve ser aumentada. Tendo em vista do ponto econômico, a tecnologia do concreto busca aprimorar os traços e agregados leves a fim de diminuir o peso e ainda assim possuir um compósito de alta resistência com fins estruturais.

A utilização do concreto leve não é algo novo na história da humanidade. De acordo com Rossignolo (2009), construtores pré-colombianos, que viveram na atual cidade de El Tajin (México), empregavam uma mistura de pedra-pomes com um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal, na produção de elementos estruturais há

aproximadamente 3100 anos atrás.

Os romanos também utilizaram concreto com agregados leves em estruturas como a abóboda do Panteão romano reconstruído em aproximadamente 120 d.C. A cúpula que possui 44m de diâmetro se encontra em excelente estado de conservação, após quase 2000 anos de sua construção, além de ter sido utilizado nas fundações e em diversas paredes do Coliseu (Figura 1) e na Catedral de Santa Sofia, em Istambul (Figura 2) (ROSSIGNOLO, 2009).

Figura 1 – Ilustração da seção transversal da cúpula do Panteão de Roma



Fonte: Rossignolo (2009).

Figura 2 – Catedral de Santa Sofia em Istambul

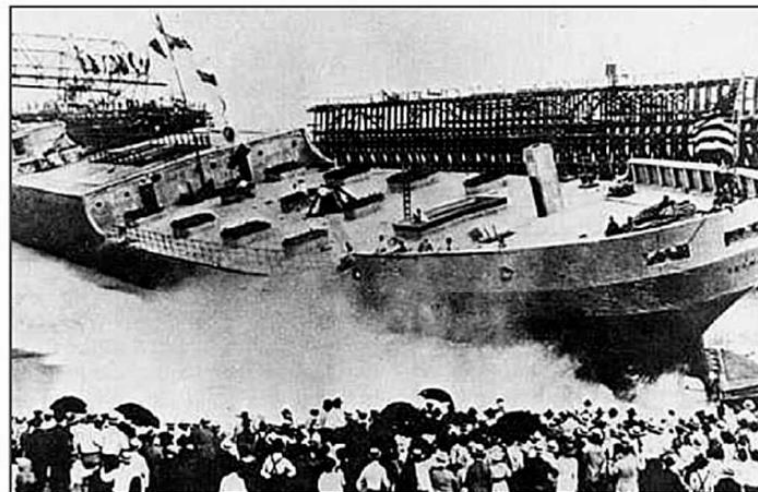


Fonte: Rossignolo (2009).

No século XX, um engenheiro fabricante de tijolos cerâmicos da cidade de Kansas, nos Estados Unidos, Stephen J. Hayde, patenteou o processo de obtenção de agregados leves pelo aquecimento em forno rotativo de pequenas partículas de xisto, argila e ardósia, denominados *Haydite* (ACI 213R-03, 2003).

A patenteação ocorreu quase uma década após a experimentação do material. Durante a Primeira Guerra Mundial, a corporação americana que construía frotas de navios de emergência aplicou o agregado leve patenteado, *haydite*, na construção de embarcações com concreto leve. Uma das embarcações é o SS Selma (Figura 3), com 123,3m de comprimento. Com 2000 m³ de concreto com argila expandida, SS Selma foi lançado ao mar em 1919, nos Estados Unidos, dispondo de 1905 kg/m³ de massa específica e 38,5 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. De acordo com Rossignolo (2009), é merecedor de nota que, na mesma época, o concreto convencional apresentava valores de resistência à compressão de 15 MPa.

Figura 3 – Lançamento da embarcação USS Selma 1919



Fonte: Rossignolo (2009).

Concomitantemente, iniciaram-se pesquisas para o emprego desse material na construção civil. A primeira aplicação estrutural de concreto leve (com agregados artificiais) em edificações foi em 1922, no ginásio da Westport High School, na cidade do Kansas. A razão da escolha do concreto leve para compor a estrutura do estádio era devido à baixa capacidade de suporte do solo a fim de aliviar os custos com a estrutura de fundação. E a primeira utilização em edifícios de múltiplos pavimentos ocorreu em 1929 (ROSSIGNOLO, 2009).

Já no final dos anos de 1960, a produção de argila expandida no Brasil foi iniciada, possibilitando o emprego do concreto leve em elementos pré-fabricados, facilitando o transporte e a montagem das peças para habitações, e visando melhorar a performance do processo produtivo.

A partir de então, a argila expandida como agregado leve obteve diversas aplicações na construção civil nacional, e a tecnologia do concreto leve não estrutural passou a ser pesquisada em várias universidades do Brasil (ROSSIGNOLO, 2009).

O ACI 213R-03 (2003) dispõe que o concreto leve, aos 28 dias, deverá ter uma resistência à compressão superior a 17 MPa com massa específica máxima de 1850 kg/m³. Já a ASTM C330 (1989), define que a resistência mínima à compressão deve ser de 28 MPa e a massa específica máxima 1760 kg/m. A ABNT NBR NM 35:1995 adota valores mínimos de resistência à compressão para o concreto leve em relação a massa específica aparente de maneira que, aos 28 dias, os valores de resistência à compressão sejam: 17, 21 e 28 Mpa para 1680, 1760 e 1840 kg/m³ respectivamente. E segundo a ABNT NBR 8953:2015, o concreto leve tem massa específica inferior a 2000 kg/m³.

Segundo Moncayo (2017), os concretos leves vêm sendo divididos em concretos com agregados leves, concretos celulares e concreto sem finos. O autor (2017) afirma ainda que o concreto leve com EPS apresenta-se como uma inovação, principalmente para aplicações estruturais, como em lajes e painéis pré-moldados.

O concreto leve feito com poliestireno expandido pode ter como constituintes os mesmos materiais que os demais concretos leves, com exceção do EPS, que, geralmente, substitui o agregado gráudo e parte do miúdo. De modo geral, as pérolas de EPS funcionam como enchimento, não atuando como material resistente e sendo incorporadas a elementos de maior peso para que promovam um concreto com resistência adequada (MONCAYO, 2017).

3.2 EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE O CONCRETO

Mehta e Monteiro (2014) afirmaram que o comportamento do concreto exposto a altas temperaturas é sensível a múltiplos fatores que interagem entre si, tornando muito difícil realizar uma análise perfeita do compósito. Para Lima (2005) a composição do concreto é um dos fatores que deve ser levado em consideração, já que tanto a pasta de cimento quanto os agregados possuem componentes que se deterioram, em maior ou menor grau, com a exposição ao calor.

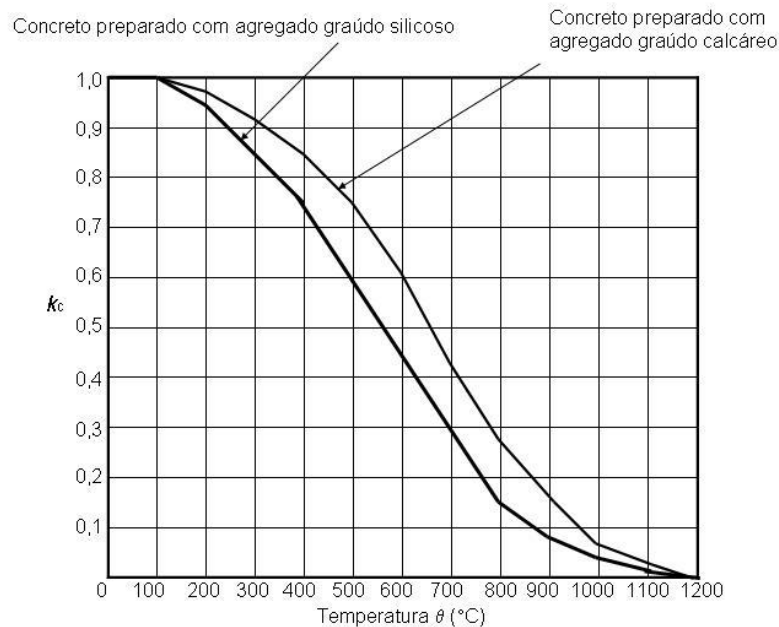
Outros fatores a serem considerados, segundo o mesmo autor (2005), são a permeabilidade do concreto, o tamanho da peça e a taxa de crescimento da

temperatura, uma vez que governam o desenvolvimento das pressões internas dos produtos gasosos em decomposição.

Fakury, Silva e Lavall (2002) *apud* Lima (2005) afirmam que as maiores temperaturas ocorridas nos incêndios em edificações variam entre 500°C e 1200°C, e que dependendo da área de ventilação, geometria do compartimento incendiado e da quantidade de material combustível o tempo de aquecimento é de 10 a 40 minutos. Já a duração do fogo, pode variar de alguns minutos a poucas horas, e por consequência, as seções mais internas dos elementos de concreto, provavelmente, não serão submetidas a uma temperatura superior a 500°C.

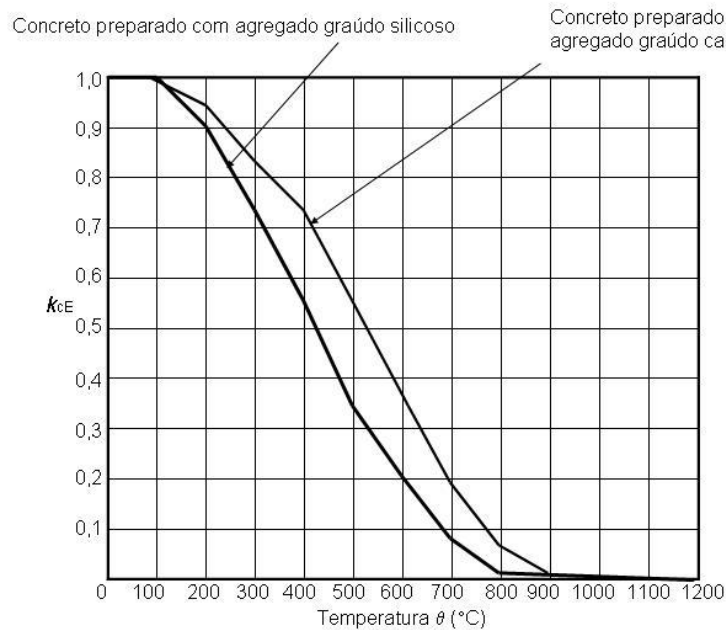
A norma brasileira para projetos de concreto em situação de incêndio ABNT NBR 15200 (ABNT, 2012), fornece valores que permitem estimar a redução da resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto com o aumento da temperatura para concretos de massa específica normal (2000 kg/m³ a 2800 kg/m³) preparados com agregados predominantemente silicosos ou calcáreos como mostram as Figuras 4 e 5.

Figura 4 – Fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura



Fonte: ABNT NBR 15200 (2012).

Figura 5 – Fator de redução do módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura



Fonte: ABNT NBR 15200 (2012).

A NBR 15200:12 estabelece os critérios de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio e a forma de demonstrar o seu atendimento. Esta Norma se aplica às estruturas de concreto projetadas de acordo com as ABNT NBR 6118 e ABNT NBR 9062. O projeto de estruturas de concreto em situação normal deve atender às prescrições da ABNT NBR 6118 e, em se tratando de estruturas de concreto pré-moldado, também da ABNT NBR 9062. O projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio é baseado na correlação entre o comportamento dos materiais e da estrutura em situação normal, ou seja, à temperatura ambiente (considerada próxima a 20°C), com o que ocorre em situação de incêndio.

Os objetivos gerais da verificação de estruturas em situação de incêndio são:

- i) limitar o risco à vida humana; ii) limitar o risco da vizinhança e da própria sociedade; iii) limitar o risco da propriedade exposta ao fogo. Considera-se que os objetivos estabelecidos são atingidos se for demonstrado que a estrutura mantém as seguintes funções: i) função corta-fogo – a estrutura não permite que o fogo a ultrapasse ou que o calor a atravesse em quantidade suficiente para gerar combustão no lado oposto ao incêndio inicial.

A função corta-fogo compreende o isolamento térmico e a estanqueidade à passagem de chamas; ii) função de suporte – a estrutura mantém sua capacidade

de suporte da construção como um todo ou de cada uma de suas partes, evitando o colapso global ou o colapso local progressivo.

Edificações grandes, sobretudo mais altas, contendo maior carga de incêndio (energia gerada pela combustão do material depositado no edifício), devem atender às exigências mais severas para cumprir com os requisitos gerais. Projetos que favoreçam a prevenção ou a proteção contra incêndio, em termos desses requisitos gerais, reduzindo o risco de incêndio ou sua propagação e especialmente facilitando a fuga dos usuários e a operação de combate, podem ter aliviadas as exigências em relação à resistência de sua estrutura ao fogo, conforme previsto na ABNT NBR 14432.

3.3 EXIGÊNCIAS DA RESISTÊNCIA AO FOGO DAS EDIFICAÇÕES

Martins e Peris (1982) relacionam as fases de evolução de um incêndio com a contribuição que os materiais combustíveis podem ocasionar em função das características de reação ao fogo que apresentam.

De uma forma geral, muitos requisitos são exigidos aos elementos construtivos de uma edificação. O conceito de qualidade da construção civil está associado a vários fatores como à beleza, conforto, funcionalidade e durabilidade. Entretanto, o comportamento dos elementos construtivos em situação de incêndio é preponderante para estabilidade da construção em face de um incêndio.

Na verdade, todos os materiais de construção são vulneráveis à ação do fogo. Embora cada material tenha um diferente comportamento sob a ação de temperaturas elevadas, todos os materiais sofrem grandes alterações em situação de incêndio.

De acordo com os conhecimentos já consolidados na literatura, o aço perde a rigidez e a resistência ao atingir uma temperatura crítica (550 °C), o concreto sofre deslocamento, conhecido como efeito “*spalling*”, despedaçando-se a altas temperaturas, enquanto a madeira sofre redução gradual da seção de seus elementos construtivos.

Nesse sentido, verifica-se que todos os materiais são prejudicados pela exposição ao fogo, inclusive os materiais não combustíveis, dessa forma, a proteção dos elementos construtivos, através de meios que possam retardar a ação do calor sobre eles, se constitui um importante aspecto da proteção passiva contra incêndio.

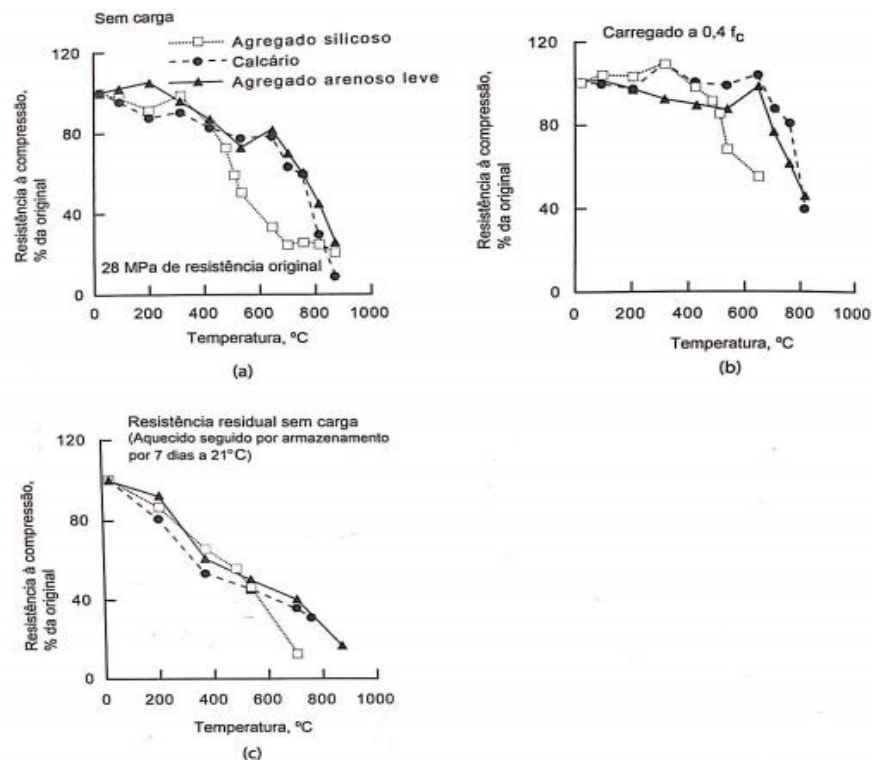
Existem diversas formas de proteção dos elementos construtivos, tais como a imersão em substâncias ignífugas ou recobrimento com placas, mantas ou tintas resistentes à ação do calor. Os métodos mais racionais para a proteção são materiais desenvolvidos especificamente para esta finalidade.

As condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram os edifícios são fixadas pela Norma Brasileira ABNT NBR 14432 — Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações — Procedimento.

Moncayo (2017) observou que o concreto leve com EPS submetido a temperatura de 200, 400 e 600°C e resfriamento lento tem uma diminuição de 15, 63 e 77%, respectivamente, da resistência à compressão em comparação ao concreto em temperatura ambiente. Foi observado também que o concreto com EPS submetido a elevadas temperaturas apresenta-se menos resistente e mais deformável, e que o concreto com EPS quando submetido a altas temperaturas apresenta um comportamento pior do que o preconizado pela NBR 15200 para concretos convencionais.

Mehta e Monteiro (2014) *apud* Abrams (1973) ilustraram o efeito da exposição de curta duração, até 870°C, sobre a resistência à compressão de corpos de prova de concreto com uma F_c média de 27 MPa antes da exposição, conforme a Figura 6. As variáveis incluem tipos de agregados (carbonático, silicoso ou leve de argila expandida) e condições de ensaio (aquecido sem prévio carregamento e ensaiado quente; aquecido com carregamento equivalente ao nível de tensão de ruptura de 40% e ensaiado a quente; e ensaiado sem carregamento prévio após resfriamento em temperatura ambiente).

Figura 6 – Efeito do tipo de agregado e condições de ensaio sobre a resistência ao fogo



Fonte: Mehta e Monteiro (2014) *apud* Abrams (1973).

Ao serem aquecidos sem carregamento e ensaiados quentes (Figura 6-a), os corpos de prova confeccionados com agregados de origem carbonática e agregado leve retêm mais de 75% da resistência a temperaturas até 650°C. A essa temperatura o concreto com agregado silicoso retém apenas 25% da resistência original. O melhor desempenho dos concretos com agregado carbonático e leve frente a uma temperatura mais alta de exposição pode ser devido tanto à zona de transição na interface mais forte quanto à menor diferença nos coeficientes de dilatação térmica entre matriz argamassa e agregado.

As resistências dos corpos de prova ensaiados quentes, mas carregados à compressão (Figura 6-b), ficaram até 25% mais altas do que as dos corpos de prova sem carregamento, mas o desempenho superior dos concretos com agregado carbonático ou agregado leve foi reafirmado.

Porém, ao ensaiar após o resfriamento a 21°C, o efeito da mineralogia do agregado na resistência do concreto foi reduzido significativamente (Figura 6-c), muito provavelmente como resultado da microfissuração na zona de transição na interface associada à retração térmica.

Souza (2010), em pesquisa com concretos convencionais submetidos a elevadas temperaturas, observou que a resistência à tração apresenta maiores decréscimos que a resistência à compressão e atribui este comportamento ao fato de que a microfissuração resultante da elevada temperatura prejudica em maior grau a tração. No entanto, a autora (2010) destaca que o concreto exposto a altas temperatura, quando reidratado, consegue recuperar sua resistência mecânica inicial em até 90% para temperaturas de 300°C e 60% para temperaturas de 900°C. Cabe ressaltar também que esta recuperação quando se trata de resistência à compressão pode atingir níveis próximos aos máximos em um espaço de tempo de 56 dias após o início da reidratação.

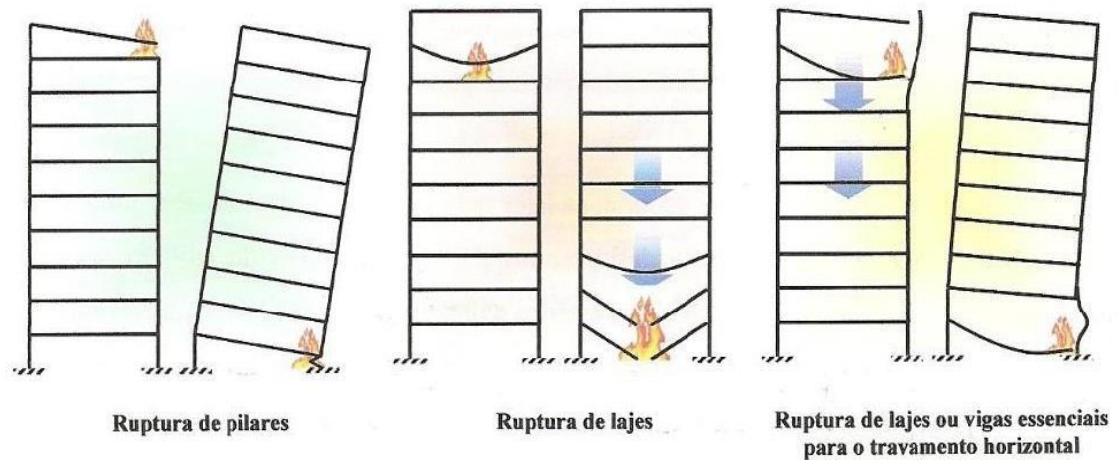
3.3 CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O principal objetivo de proteção de uma estrutura contra incêndio é a de proteger a vida humana. Entretanto, a proteção da edificação também requer atenção, principalmente em se tratando do ramo comercial, em que, com a sua paralisação, devido a danos estruturais resultantes do incidente, pode afetar o setor financeiro da empresa (RODRIGUES; OLIVEIRA, 2021).

O colapso de uma estrutura de concreto armado ocasionada por um incêndio, segundo Costa (2008), pode ser local, parcial ou global. Quando ocorre um colapso local, há a falência estrutural de elementos isolados, entretanto, sem o comprometimento da estabilidade global. No colapso parcial ocorrem problemas em alguns dos elementos estruturais, levando esta parte a desabar, isso porque a estabilidade de parte da edificação fica comprometida. Já o colapso global se caracteriza pela falência progressiva dos elementos da estrutura.

A ruptura localizada de apenas um elemento da estrutura pode ocasionar diferentes riscos à estabilidade da edificação. Como Costa (2008) mostra na Figura 7, o colapso de um pilar pode levar parte da edificação acima deste a desabar, assim como, se uma viga perder a capacidade de suporte, as lajes que se apoiam nela podem ceder sobre os pavimentos inferiores.

Figura 7 – Efeitos de colapsos devidos a um incêndio



Fonte: Adaptado de Costa (2008).

São inúmeros os casos de colapso estrutural relacionados a incêndios que ocorreram no mundo. A literatura técnica e jornais proveem registros de edificações de concreto que sofreram colapso estrutural parcial ou total, além de vitimar centenas de pessoas (Figura 8 a 12).

Figura 8 – Colapso parcial do Ronan Point, em Londres – UK, 1968



Fonte: Adaptado de Laranjeiras (2011).

Figura 9 – Colapso parcial da Katrantzos Sport em Atenas – Grécia, 1980



Fonte: Adaptado de Silva (2010).

Figura 10 – Colapso total da Biblioteca Municipal de Linköping – Suécia, 1996



Fonte: Adaptado de Andersson (1996).

Figura 11 – Colapso total de um edifício residencial em São Petersburgo – Rússia,
2002



Fonte: BBC News (2002).

Figura 12 – Colapso total de um edifício residencial no Cairo – Egito, 2004



Fonte: (CHINAdaily.com.cn, 2004).

Em 2004, um colapso ocorreu em um estacionamento subterrâneo em Gretzenbach, na Suíça. Segundo Ruiz, Muttoni e Kunz (2010), noventa minutos após o início de um incêndio no interior do parque, ocorreu o puncionamento em volta de um pilar que, de imediato, se alastrou a vários, levando ao desmoronamento de grande parte da estrutura, como pode ser visto na Figura 13. As principais causas do acidente estão associadas à sobrecarga da estrutura, colocação de uma camada de solo superior à esperada, e uma abordagem grosseira da verificação da capacidade resistente ao puncionamento (SILVA, 2012).

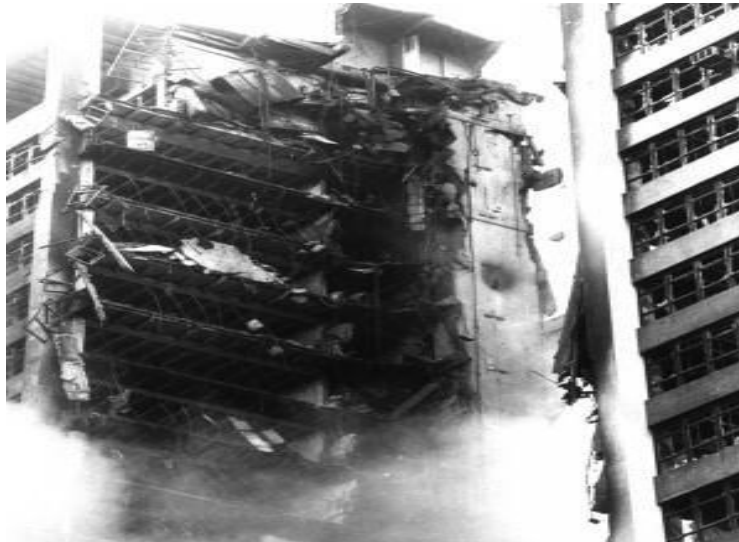
Figura 13 – Colapso localizado da laje de cobertura de um estacionamento subterrâneo em Gretzenbach – Suíça, 2004



Fonte: (FEUERWEHRVEREIN HINWIL, 2004).

Embora uma das primeiras normas para ensaios de resistência ao fogo tenha surgido em 1911 (ASTM E-119 “Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials”), no Brasil, a consideração do desempenho estrutural no âmbito da segurança contra o incêndio das edificações é recente. A regulamentação só teve incentivo a partir da década de 1970, com a publicação da norma ABNT NB 503 de 1977 (CARBONARI *et al.*, 2012; LIU; CHEN, 2014; BOUVARD *et al.*, 2007), devido a algumas catástrofes relacionadas ao assunto, como foi o caso dos incêndios dos edifícios Andraus, em 1972, e Joelma, em 1974 (Figura 14), ambos em São Paulo.

Figura 14 – (a) Incêndio no edifício Andraus em 1972 e (b) edifício Joelma em 1974



Fonte: (BLOG MEMÓRIA VIVA, 2011).

Em 1987, um incêndio nos edifícios da CESP (Figura 15) atingiu praticamente todos os andares dos edifícios “Sede I” e “Sede II” da companhia. Durante o incêndio, a parte central da “Sede 2” ruiu e desabou, ocasionando uma morte.

Figura 15 – Colapso parcial do edifício Sede II da CESP em São Paulo – Brasil, 1987



Fonte: (JORNAL ESTADO DE SÃO PAULO, 2010).

Devido ao reconhecimento tardio de que as estruturas necessitavam de verificações para situações de incêndio, há diversos exemplos de acidentes, tais como os apresentados nas Figuras 16 a 18.

Figura 16 –
total do
das lojas Zêlo,
Barueri (SP) –
1995



Colapso
depósito
em
Brasil,

Fonte: Silva (2010).

Figura 17 – Danos estruturais do Edifício Cacique, em Brasil, 1996



nos elementos
Condomínio
Porto Alegre –

Fonte: Adaptado de Silva (2010).

Atualmente, novas exigências para o projeto de estruturas em situação de incêndio estão em vigor. As normas ABNT NBR 14323:2013 (Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio), ABNT NBR 14432:2001 (Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento) e ABNT NBR 15200:2012 (Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio) apresentam parâmetros para que as edificações sejam mais seguras caso ocorra o sinistro (CHEN; LIU, 2004; DISSANAYAKE; JAYASINGHE; JAYASINGHE, 2017; LAM *et al.*, 2018).

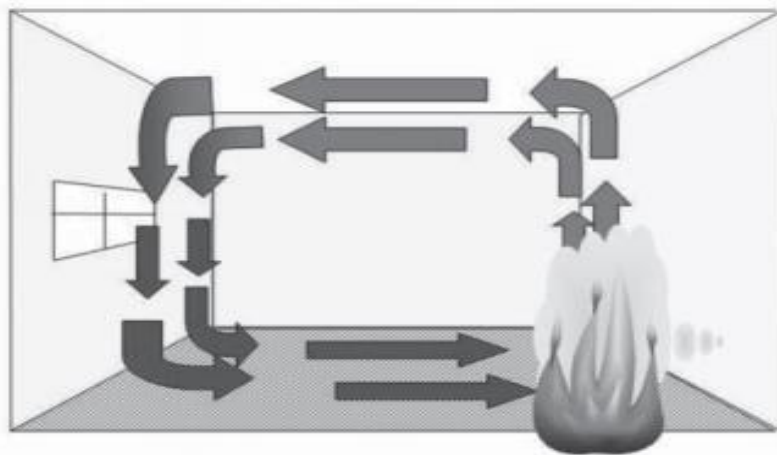
3.4 AÇÃO TÉRMICA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A diferença de temperatura entre os gases quentes e a estrutura, em um ambiente em chamas, gera uma ação térmica sobre os elementos estruturais. Essa

ação é proveniente de um fluxo de calor por radiação e convecção. Dentre as consequências do aumento dessa temperatura em elementos estruturais destacam-se a redução da sua resistência e rigidez (KHATIB; HERKI; ELKORDI, 2019; FERNANDO; JAYASINGHE; JAYASINGHE, 2017).

O fluxo de calor por convecção (Figura 18) ocorre devido à diferença de densidade entre os gases no ambiente em chamas. As massas de gases quentes – menos densos – tendem a subir, enquanto os gases frios – mais densos – tendem a ocupar a atmosfera inferior do ambiente. Em uma situação de incêndio, esse processo é livre, pois o movimento dos fluidos ocorre de forma natural, exclusivamente pela atuação do gradiente térmico (MOON; PATEL, 2021).

Figura 18 – Fluxo de Calor Convectivo



Fonte: Adaptado de Silva (2012).

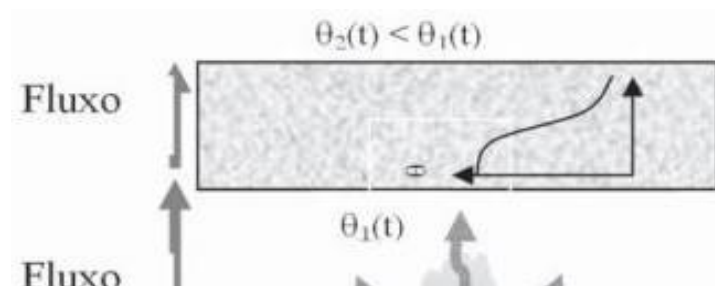
Já o fluxo de calor por radiação (Figura 19), de acordo com a Teoria do Eletromagnetismo, é o processo pelo qual o calor flui por meio de ondas eletromagnéticas, conhecidas também por ondas caloríficas ou calor radiante, de um corpo sob alta temperatura para um corpo de baixa temperatura, devido ao alto grau de agitação das partículas. Quando o calor radiante incide num determinado corpo, uma parte pode ser absorvida ou refletida pela superfície, e o restante, transmitido pelo meio (BICER, 2021; SAHEED *et al.*, 2021).

Figura 19 – Fluxo de Calor Radiante

Fonte: Adaptado de Silva (2012).

Na estrutura, o calor é conduzido de molécula a molécula (Figura 20). No concreto, o calor se propaga, elevando a temperatura gradualmente ao longo da seção do elemento e originando elevados gradientes térmicos. No aço, o calor se propaga mais rápido, e a temperatura elevada tende a se uniformizar ao longo da pequena seção das barras das armaduras (PRIYANKA; SATHYAN; MINI, 2021; KIM *et al.*, 2021).

Figura 20 – Condução



Fonte: Adaptado

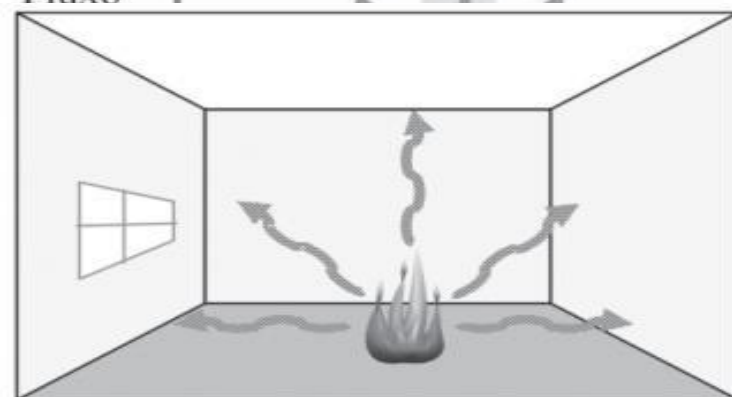
de Silva (2012).

3.4.1

Segurança
incêndios

Aplicação em
contra

Para
funcionalidade



garantia de
dos diversos

sistemas que compõe uma edificação, se faz necessário uma criteriosa avaliação em seus diversos aspectos. Referente à segurança contra incêndio, a maioria destes

sistemas somente poderão ser testados em sua plenitude em uma situação real de incêndio (HOPKINS; VAN COILE; LANGE, 2017).

Nesse sentido, a avaliação estabelecida pela norma de desempenho busca verificar a adequação de um sistema independente da solução técnica adotada, mas que seja comprovado o atendimento às exigências dos usuários (MUCKETT; FURNESS, 2007).

A norma de desempenho estabelece os respectivos métodos de ensaio que devem ser verificados aplicando-se os métodos de avaliação nela contidos. Considera a realização de ensaios laboratoriais, ensaios de tipo, ensaios em campo, inspeções em protótipos ou em campo, simulações e análise de projetos (KOBES *et al.*, 2010).

A realização de ensaios laboratoriais deve ser baseada nas normas explicitamente referenciadas, em cada caso. Nesse aspecto, a fim de atender a grande demanda que será gerada pela aplicação da norma de desempenho, torna-se imperioso o investimento em centro de pesquisa e laboratórios de ensaio (MUCKETT; FURNESS, 2007).

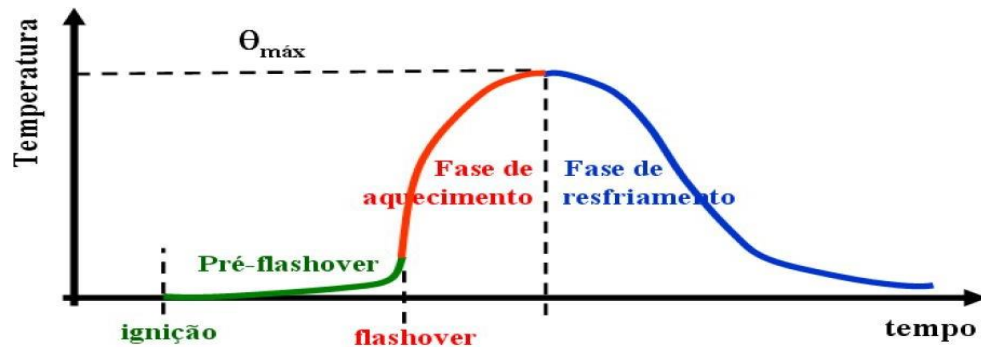
Para a avaliação dos sistemas de segurança contra incêndio da edificação, a comprovação de atendimento aos requisitos estabelecidos é realizada através análise do projeto ou da inspeção de protótipo (KOBES *et al.*, 2010).

A análise do projeto é a verificação do atendimento às normas aplicáveis a cada sistema em particular, essa prática já se tornou corrente em determinadas instituições como Prefeituras e Corpos de Bombeiros, onde os projetos são submetidos a uma aprovação para emissão de alvarás (WHITE; DIETENBERGER, 1999).

3.4.2 Incêndio real e Incêndio-padrão

Para obter a máxima temperatura atingida por um elemento estrutural, e consequentemente sua resistência ao incêndio, é utilizada a curva tempo-temperatura, que fornece a temperatura dos gases em função do tempo de incêndio (ZHANG *et al.*, 2020). A Figura 21 mostra uma curva típica de um edifício em situação real de incêndio.

Figura 21 – Curva tempo-temperatura típica de um incêndio real



Fonte: Adaptado de Silva (2012).

De acordo com essa curva, o trecho inicial não representa perigo à estrutura. Entretanto, nesse período o risco está relacionado à vida humana. Sendo assim, é nessa fase que os projetos de arquitetura e instalações devem prever uma desocupação rápida da edificação, para evitar danos à vida. A etapa *pré-flashover* é importante no desenvolvimento do incêndio: quanto mais longa for, maiores serão as chances de controlar esse incêndio. Uma opção muito interessante seria incluir medidas de proteção ativa no interior da edificação, como, por exemplo: extintores, hidrantes, sprinklers (pequenos chuveiros presos no teto) e alarmes de incêndio (SILVA, 2012).

Após esse período, caso o incêndio não seja extinto, há um aumento brusco na temperatura, chamado de *flashover*, tendo início no instante em que o fogo se espalha, resultando em um incêndio generalizado de todo o compartimento.

A partir desse instante, as temperaturas dos gases sobem rapidamente, caracterizando a fase de aquecimento, alcançando a temperatura máxima, até todo material combustível começar a extinguir-se, dando início, então, à fase de resfriamento.

Segundo Silva (2012), para a análise da estrutura, é usual considerar que a temperatura do ambiente em chamas atinja seu valor máximo ($\theta_{máx}$).

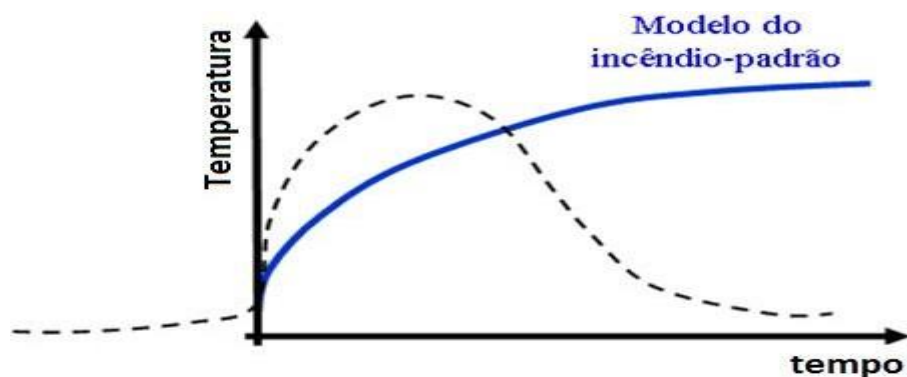
Os modelos dessas curvas são construídos a partir de análises experimentais ou computacionais que procuram simular a situação real de um compartimento em situação de incêndio. Ou seja, cada compartimento de uma edificação deveria ser projetado utilizando um tipo de curva específico para aquela situação, isso porque, geralmente, os parâmetros que influenciam a gravidade de um incêndio natural em um compartimento de uma edificação são diversos: carga de incêndio, condições de

ventilação, propriedades físico-térmicas das paredes do compartimento, tipo de combustível predominante (celulósico, hidrocarbonetos, etc.), entre outros (SILVA, 2012).

Sendo assim, devido à enorme dificuldade de se estabelecer uma curva tempo-temperatura típica de um incêndio real, dificuldade essa justificada pela grande sensibilidade dessa curva às diversas variáveis mencionadas, as principais normas sobre o assunto adotam curvas padronizadas, denominadas de curvas de incêndio-padrão (YASSIN *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2020) (Figura 22).

Essas curvas possuem apenas um ramo ascendente, admitindo, portanto, que a temperatura é sempre crescente com o tempo e, além disso, independente da carga de incêndio e das características do ambiente.

Figura 22 – Modelo do incêndio-padrão



Fonte: Adaptado de Silva (2012).

O meio técnico adota a curva de incêndio-padrão e mede a resistência do material ao fogo, em função de um tempo. Esse tempo é chamado de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).

3.4.2 Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)

Um elemento construtivo, quando sujeito à curva do incêndio-padrão, apresenta um tempo mínimo de resistência ao fogo. Esse intervalo de tempo, chamado de Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), é definido a partir das características da construção e do seu uso; portanto, não representa o tempo de desocupação ou o tempo de duração do incêndio (GUNAVEL *et al.*, 2020; ROJAS-

ARIAS *et al.*, 2020).

O calor transmitido à estrutura nesse intervalo de tempo gera em cada elemento estrutural uma distribuição de temperatura, que resulta na redução da resistência dos materiais e da capacidade portante dos elementos estruturais (BABAVALIAN; RANJBARAN; SHAHBEYK, 2020; KARLE; GAWATRE; GAWALI, 2020).

Vale ressaltar que esses intervalos referem-se ao tempo em que a estrutura deve se comportar satisfatoriamente, ou seja, os elementos estruturais não devem sofrer colapso e não pode haver fissuras que permitam que o fogo se propague para um compartimento adjacente, para que assim possibilitem o cumprimento dos objetivos descritos no art. 2º do decreto estadual nº 46.076/01 que diz:

Artigo 2º – Os objetivos deste Regulamento são:

- I – proteger a vida dos ocupantes das edificações e áreas de risco, em caso de incêndio;
- II – dificultar a propagação do incêndio, reduzindo danos ao meio ambiente e ao patrimônio;
- III – proporcionar meios de controle e extinção do incêndio; e
- IV – dar condições de acesso para as operações do Corpo de Bombeiros.

O TRRF é encontrado em normas e trata-se de um valor que é determinado em função do risco de incêndio e das consequências provenientes de um colapso estrutural. Os valores são padronizados e variam entre 30, 60, 90 e 120 minutos (SAHEED *et al.*, 2020).

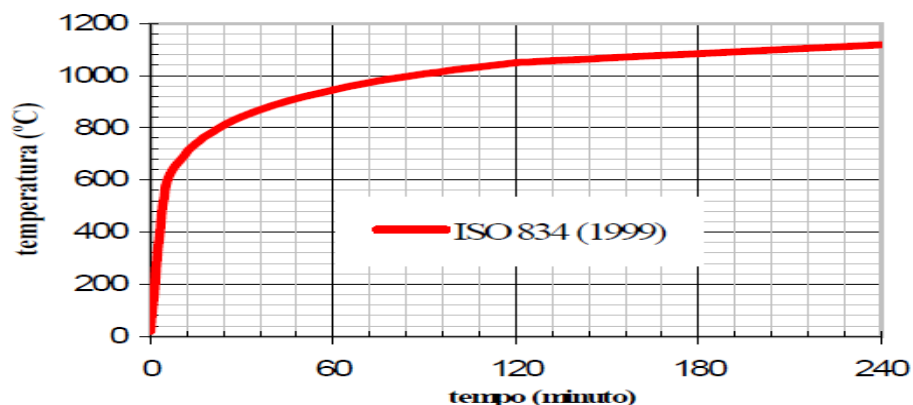
Segundo Silva (2012), o TRRF pode ser obtido pelo método tabular, contido na ABNT NBR 14432:2001, ou pelo método do tempo equivalente, que apresenta um método baseado no conceito do TRRF para o incêndio da Curva Padrão da ISO 834:1999 (Figura 23).

Figura 23 – Curva Padrão – Temperatura x tempo (ISO 834:1999)

Fonte: Adaptado de Souza (2005).

Conforto térmico é definido pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*) como “uma condição mental que expressa satisfação com as condições térmicas do ambiente que é avaliado de forma subjetiva pelo indivíduo”.

O controle ambiental em edifícios está relacionado à 4 variáveis: temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do ar e temperatura radiante. Se



conjuntamente refinados entre si e ajustados aos fatores subjetivos, podem resultar em adequados níveis de percepção de conforto térmico para a maioria das pessoas no ambiente construído (SANTOS; PORTO; SILVA, 2020).

Os dois primeiros fatores (temperatura do ar e umidade relativa do ar) são mais facilmente compreendidos. Sabe-se que para cada região geográfica/ cultural considerando um tipo de atividade exercida, e para um determinado padrão metabólico médio de indivíduos existe uma banda de temperatura do ar que é considerada confortável pela maioria das pessoas. Tanto a temperatura quanto a umidade relativa do ar podem ser controladas pelos sistemas de ar-condicionado de edifícios. Para edifícios ventilados naturalmente, o indivíduo fica sujeito às condições

climáticas externas para atingir níveis adequados de conforto térmico (SANTOS; PORTO; SILVA, 2020).

De maneira similar pode-se observar o papel da velocidade do ar. Sistemas mecânicos de ventilação podem variar a velocidade do ar, tal como pode um bom e velho ventilador. Mesmo quando a temperatura e umidade são desfavoráveis, proporcionar altas velocidades de ar em contato com a pele humana, auxilia na evaporação do suor e dissipação do calor, sendo capaz de reduzir significativamente nossa sensação térmica. Sendo assim, nos projetos, sempre que possível tenta-se resgatar a cultura do ventilador de teto, muito importante na manutenção de conforto térmico (SARRA; MULFARTH, 2021).

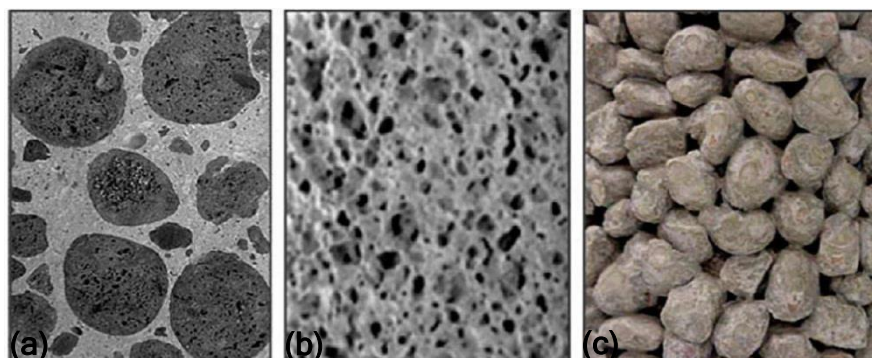
3.5 CONCRETO LEVE COM EPS

O concreto leve é caracterizado por uma diminuição na sua massa específica. Segundo Metha e Monteiro (2008), essa massa específica é de aproximadamente dois terços da relativa ao concreto convencional, o que se deve ao uso de um agregado leve celular na confecção da mistura.

De acordo com o ACI 213R-87 (1999), esse tipo de concreto deve apresentar, aos 28 dias, resistência à compressão superior a 17 MPa e massa específica menor ou igual a 1850 kg/m³. Já para a ASTM C330, a resistência mínima à compressão e a massa específica máxima devem ser de 28 MPa e 1760 kg/m³, respectivamente. Além disso, a ASTM C330 especifica a necessidade de que os agregados leves miúdos e graúdos não excedam, na devida ordem, 1120 kg/m³ e 880 kg/m³.

Os concretos leves tradicionais podem ser classificados em: concretos com agregados leves, concretos celulares e concreto sem finos (Figura 24). O concreto leve com EPS constitui uma inovação, principalmente para aplicações estruturais, como em lajes e painéis pré-moldados (SILVA, 2018).

Figura 24 – (a) Concreto com agregados leves, (b) concreto celular e (c) concreto sem finos



Fonte: Adaptado de Rossignolo e Agnesini (2005).

As primeiras aplicações de concreto leve datam de aproximadamente 3000 anos, época em que, no México, elementos estruturais foram construídos com a mistura de pedra-pomes, adicionando um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal.

Dentre os diversos tipos de concreto leve, destaca-se o concreto leve com EPS. Também denominado de *Concreto Ultraleve*[®] ou *Concreflex*[®], é um concreto que contém Poliestireno Expandido (EPS) atuando como agregado leve, com massa específica variando entre 400 kg/m³ e 1300 kg/m³ (KERBAUY, 2010 *apud* CATOIA, 2012). Mais recentemente, pelo fato de não atuar como material resistente, o EPS é considerado como agente incorporador de vazios (MENDONÇA *et al.*, 2020; SOUSA *et al.*, 2020; VIJAYAN *et al.*, 2020).

O concreto leve com EPS pode ser composto pelos mesmos materiais que os demais concretos leves, com exceção do Poliestireno Expandido (EPS), que, geralmente, substitui o agregado gráudo e parte do miúdo (KUMAR *et al.*, 2020; ALI *et al.*, 2020).

As pérolas de EPS servem como elementos de enchimento e devem ser incorporadas a elementos de maior peso, para que se obtenha um concreto com resistência adequada (AHMAD; SINGH, 2021).

O traço utilizado em massa foi apartir do obtido por Ozório (2016), com a parcela de EPS inserida em porcentagem de massa de 1:1:0,5:0,28 (cimento CP II Z 32: areia média: EPS: água), com adição de 1% de plastificante.

Segundo Stocco, Rodrigues e Castro (2009), o concreto leve com EPS começou a ser desenvolvido em 1957, na Alemanha, pela empresa BASF. Devido ao alto custo da matéria-prima, seus estudos foram interrompidos e somente em 1968 foram retomados, em virtude da redução do custo do EPS e da previsão de que poderia ocupar, em longo prazo, um lugar importante no setor de construção civil, por apresentar uma série de vantagens sobre o concreto convencional.

O concreto leve com EPS pode ser usado em diversos tipos de aplicações, tais como: pré-fabricados, elementos de vedação internos, isolante térmico e acústico, elementos resistentes à propagação do fogo, casas pré-fabricadas, tijolos, blocos, entre outras (SILVA, 2018).

Alguns testes de aplicação do material em estudo já foram realizados, como os exemplificados a seguir.

Souza *et al.* (2006), após pesquisas, desenvolveram uma unidade habitacional utilizando painéis de concreto leve constituído por EPS (Figura 25), elaborando estudos de resistência mecânica, conforto térmico e acústico.

Figura 25 – Painel de concreto leve com EPS

Fonte: Adaptado de Souza *et al.* (2006).

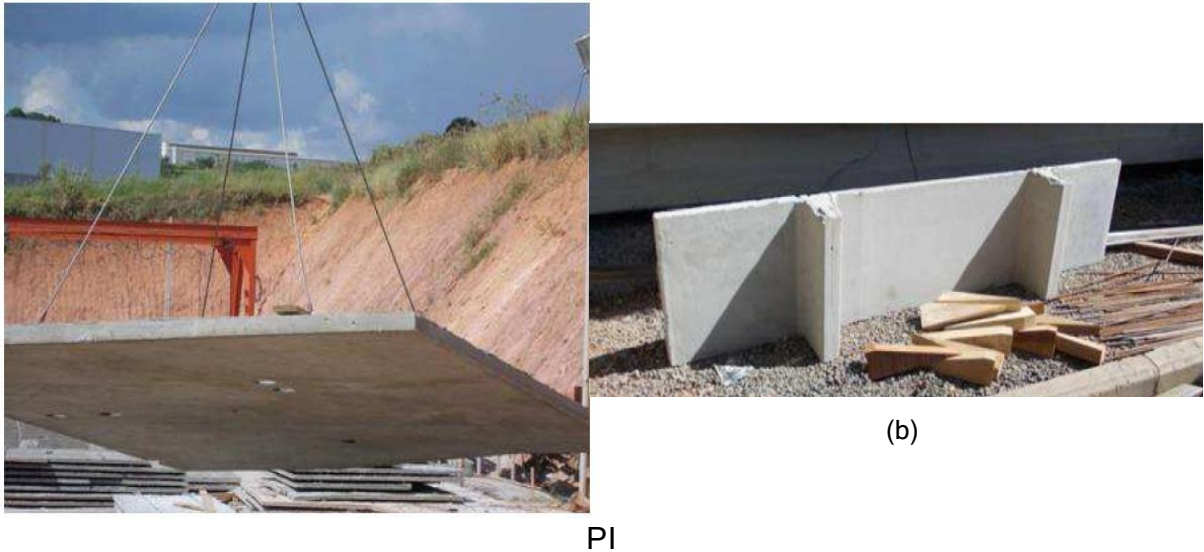
Kerbaux
Catoia (2012),
experimentos
Concreto Leve
em forma de laje
Pode-se notar
apresenta
semelhante ao



(2011) *apud*
realizou
com o
com EPS,
(Figura 26a).
que ela
acabamento
de peças de

concreto pré-moldado comum. Além disso, foi feito um painel PI (Figura 26b), que também ilustra as boas condições obtidas.

Figura 26 – Peças de concreto leve com EPS: (a) Laje durante içamento; (b) Painel



(a)

Fonte: Adaptado de (KERBAUY, 2011 *apud* CATOIA, 2012).

Catoia (2012) realizou um estudo sobre o comportamento de lajes produzidas com o *Concreto Ultraleve*[®] (Figura 27), no qual, dentre os resultados mais expressivos, tem-se:

- ✓ O estudo de deformabilidade apresentou resultados coerentes com as propriedades dos materiais e com a literatura técnica, e valores satisfatórios para aplicação do material em elementos estruturais;
- ✓ Para a análise da resistência, como era de se esperar, o resultado foi inferior para o Concreto Leve com EPS em relação ao concreto convencional, entretanto, foi constatada uma vida útil maior em relação à do concreto comum, com base em ensaios de carbonatação.

Sendo assim, concluiu-se que o concreto estudado, com aproximadamente metade da massa específica dos concretos convencionais, apresenta valores de resistência mecânica e outras características compatíveis com a produção e a aplicação comercial de lajes maciças, principalmente pré-moldadas, e de outros tipos de peças submetidas a moderadas tensões de compressão.

Figura 27 – Laje de concreto leve com EPS



Fonte: Adaptado de Catoia (2012).

Na preparação desse concreto, por ser o EPS um material que tem densidade absoluta muito baixa, deve ser levado em consideração que ele tende a flutuar durante a mistura, dificultando a homogeneização do concreto. Para evitar isso, ele deve ser, inicialmente, misturado com areia e parte da água. Depois, podem ser colocados os outros componentes. Vale lembrar que nesse concreto não é necessário misturar nenhum tipo de cola ou resina, para garantir a homogeneização do EPS.

Conforme Bauer e Toledo (1973), o processo de produção do concreto leve com EPS apresenta como vantagem a possibilidade de preparação no canteiro de obra, no mesmo patamar que a de um concreto convencional.

3.6 COMPORTAMENTO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) AO FOGO

Isoféres (2012) fez um estudo do comportamento do EPS quando submetido ao fogo, sendo utilizado como material de construção. Levou em consideração a liberação do calor, propagação da chama, produção e toxicidade da fumaça e sua contribuição para propagação de um incêndio.

O EPS é classificado em dois tipos, o tipo P (Padrão) e o tipo F (*Flame*), com retardante de chama, o qual será utilizado neste trabalho. Quando submetido ao fogo, amolece e se contrai progressivamente a partir dos 100 °C a 120 °C (110 °C a 120 °C para o tipo F). Quando atingem temperaturas em torno de 230 °C e 260 °C, os dois tipos liberam gases combustíveis.

Da pesquisa realizada, Isoféres (2012) chegou às seguintes conclusões:

- Para a segurança contra o incêndio, o ideal é estudar os elementos construtivos em suas condições de uso, e não somente os seus componentes

de forma isolada;

- O EPS produz mais fumaça por unidade de massa que outros materiais, porém deve-se considerar que o EPS contém em torno de 2% de matéria sólida, quantidade muito menor que outros materiais combustíveis;
- Os gases e fumaça liberados pelo EPS (tipo P e F) durante o incêndio são menos tóxicos do que aqueles liberados por outros materiais, como, por exemplo, cortiça, lã, madeira, linho e a maioria dos plásticos.

Isoféres (2012) destaca que o EPS quando utilizado de maneira correta na construção civil não representa risco de incêndio, não representa risco de aumento significativo na densidade da fumaça e nem riscos de toxicidade.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

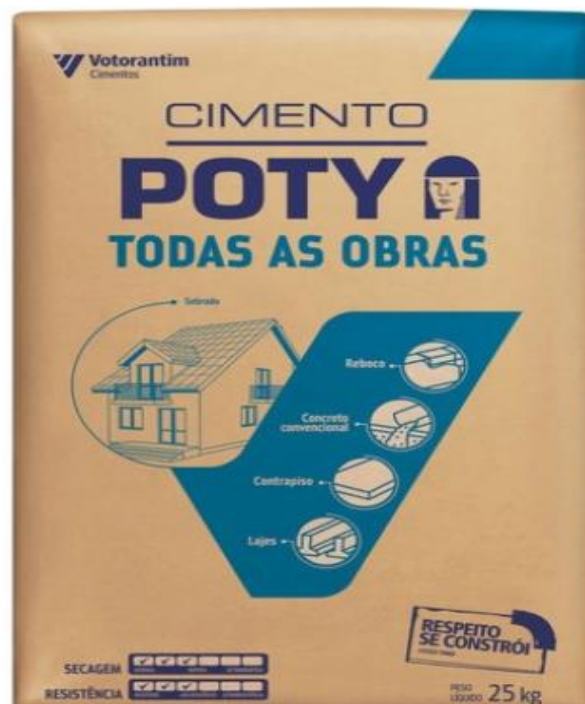
Foi desenvolvido o traço para o concreto a ser empregado na pesquisa, tomando por base o traço em massa obtido por Ozório (2016), com a parcela de EPS inserida em porcentagem de massa de 1:1:0,5:0,28 (cimento CP II Z 32: areia média: EPS: água), com adição de 1% de plastificante. O cimento utilizado foi o Portland Todas as Obras CP II Z 32 (Figura 28), especificado pela ABNT NBR 12655:2015, marca POTY, por possuir secagem rápida e alta resistência, agilizando a execução dos ensaios em laboratório.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Cimento

Todo o cimento utilizado pertenceu ao mesmo lote, e suas características físicas, químicas e mecânicas fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 1.

Figura 28 – Cimento utilizado CP II Z 32 - POTY



Fonte: Poty (2021).

Tabela 1 – Características do cimento CP II Z 32

Característica	Média
Massa Específica Absoluta	2,8 g/cm ³
pH em Solução Aquosa	Básico
Massa específica aparente	1,2 g/cm ³
Solubilidade em Água	até 1,5g/l a 20°C
Estado Físico	Sólido, pó cinza
Odor	Sem cheiro

Fonte: Poty (2021).

4.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo foi areia extraída de um dos rios de Teresina - PI, O rio Poti, que banha os estados do Ceará e Piauí com extensão total de 538 km da nascente à foz, sua bacia abrange uma área total de 52.370 km², dos quais 38.797 km² estão no Piauí e 135.73 no Ceará, e através de seu curso banha vinte e quatro municípios entre ambos os estados (CHAVES *et al.*, 2020).

4.1.3 EPS

O Poliestireno Expandido – EPS- sob formato esférico, denominado pérola de EPS, é produto da polimerização do estireno em água, que se destina à expansão, em que essas pérolas aumentam em até 50 vezes o seu tamanho original, apresentando em seu volume até 98% de ar e apenas 2% de poliestireno. O EPS é um material inerte, não contamina o solo, água e ar. O material utilizado foi do tipo T5F (T5 para construção civil, F – resistente a chama) de acordo com a ABNT NBR 11752:2007, com o diâmetro das pérolas inferior a 9,5mm, conforme mostrados na Figura 29.

Figura 29 – Preparação das pérolas de EPS para realização de gráfico da distribuição granulométrica



Fonte: Própria Autora (2019).

4.1.4 Aditivo Plastificante

O plastificante utilizado foi o Aditivo Superplastificante MC – PowerFlow 3100. Aditivo de alto desempenho e indicado para grandes reduções na quantidade de água, podendo ser aplicado em concreto pré-moldado, concreto aparente, concreto de alto desempenho, concreto de alta fluidez e concreto com alta resistência a agentes agressivos, possui vantagens como rápida dispersão no concreto, dosagens econômicas, boa compatibilidade com incorporadores de ar, bom funcionamento com uma grande variedade de cimentos. O EPS que será utilizado como agregado adicionado à argamassa tende a segregar deixando a mistura heterogênea, logo a inserção do aditivo pode ocorrer no decorrer do processo de mistura ou no final para ajustes da trabalhabilidade. Suas propriedades e características estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades e Características do Aditivo Plastificante

Característica	Informação
Densidade	1,07 g/cm ³
Estado	Líquido
Cor	Marrom
Dosagem recomendada	0,2 – 5,0% sobre o peso do cimento

Fonte: Ficha técnica do fabricante MC-Bauchemie.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Caracterização dos materiais

4.2.1.1 Agregados

A caracterização da areia e EPS foi realizada segundo a NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003). As Figuras 30e 31 ilustram o processo desenvolvido para o ensaio de granulometria da areia e EPS, respectivamente.

Figura 30 – Determinação da composição granulométrica da areia



Fonte: Própria Autora (2021).

Figura 31 – Determinação da composição granulométrica do EPS

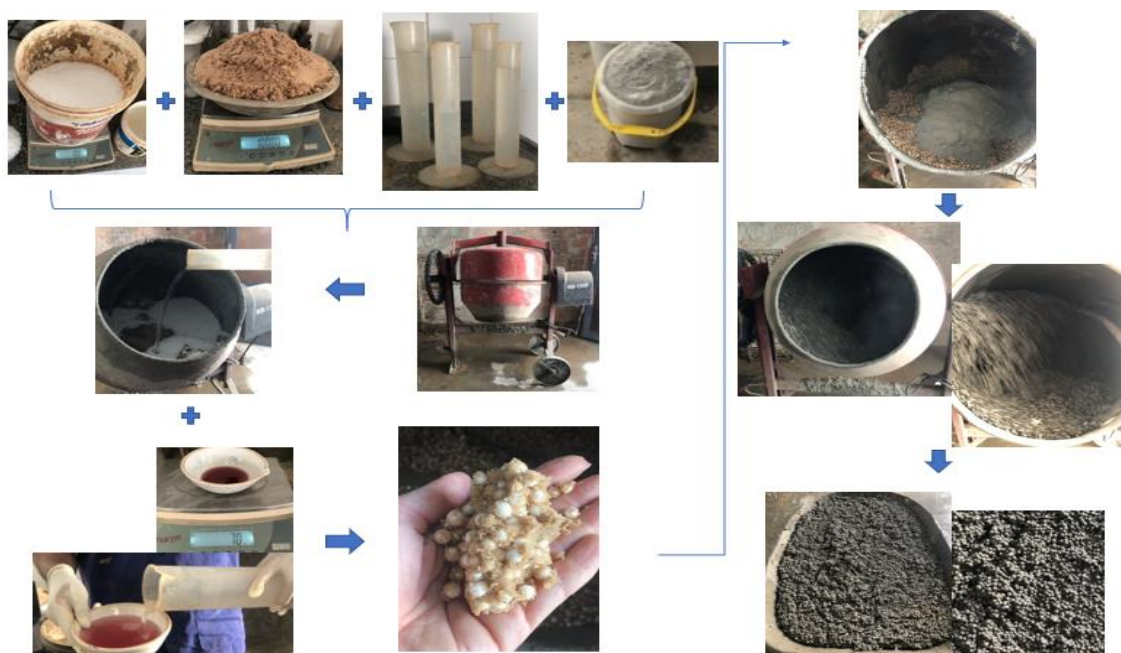


Fonte: Própria Autora (2021).

4.2.2 Preparação do concreto

A preparação do concreto foi executada de acordo com as especificações da NBR 12821 (ABNT, 1993) e seguindo a sequência utilizada por Moncayo (2017) que consiste em misturar areia, EPS e 50% de água, e em seguida acrescentar os outros materiais. Encerrada a adição dos materiais, o tempo de mistura de 10 minutos foi contado após a adição do aditivo. Esta sequência ajuda a manter a distribuição do EPS homogênea evitando a segregação, conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Ilustração da preparação do concreto



Fonte: Própria Autora (2021).

4.2.3 Corpos de Prova

Os corpos-de-prova foram moldados seguindo as recomendações normativas da ABNT NBR 5738. Ao todo foram 82 corpos de prova de diâmetro de 10cm e altura de 20cm, que passaram por um processo de cura úmida por 28 dias e serão pesados ao final da cura. Um grupo de 22 corpos de prova não serão expostos a elevadas temperaturas e constituirão o grupo de controle. Para cada tipo de queima utilizada (forno e gasolina) serão analisados 30 corpos de prova, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Quantidade de corpos de prova

	Controle	Forno					Gasolina				
		Dias imerso em água									
		0	7	14	21	28	0	7	14	21	28
fc	11	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
f _{ct,sp}	11	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Subtotal	22	30					30				
Total	82										

Fonte: Própria Autora (2021).

O traço já citado foi desenvolvido para 82 corpos de prova (Figura 33). Tendo a massa específica ideal para concreto leve não estrutural atingida.

Figura 33 – Corpos de prova - Concreto Leve



Fonte: Própria Autora (2021).

4.2.4 Cura

Nos dias seguintes à moldagem dos corpos de prova, após aproximadamente 24 horas, dar-se-á as etapas de desmoldagem e identificação do material. Em seguida todos os corpos de prova foram acondicionados em tanques com água potável para cura de 28 dias até as datas de ensaio, de acordo com Figura 34.

Figura 34 – Corpos de Prova acondicionados em tanques com água potável para cura



Fonte: Própria Autora (2021).

4.2.5 Simulação de incêndio

Na primeira simulação de incêndio (Elevadas temperaturas), foi utilizado o forno cerâmico caseiro, mostrado na Figura 35, com parede circular que proporciona aberturas, de tal maneira que o fogo possa ser alimentado por baixo das peças e o calor sobe através da carga. Assim se introduz a ideia de circulação do calor; ao invés de se basear na transmissão do calor pela radiação das brasas ardentes para a cerâmica, os corpos de prova aquecem pelo fluxo de gases quentes ao seu redor.

Figura 35 – Forno Cerâmico Caseiro



Fonte: Autora (2021).

O aquecimento ocorreu de maneira gradativa e controlada com combustível de queima, além de ser verificado através de termômetro digital de longo alcance. Desse modo iniciou-se com a temperatura ambiente e foi proporcionado um aquecimento até cerca de 420 °C. Os corpos-de-prova foram mantidos em temperatura elevada durante 7h, conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 – Etapas da simulação de incêndio no forno cerâmico caseiro



Fonte: Própria Autora (2021).

Após a etapa de simulação de incêndio no forno cerâmico caseiro, ocorreu o resfriamento interno do material dentro do forno de maneira gradativa. Em aproximadamente 322 °C iniciou-se a retirada dos corpos de prova do forno com um auxílio de bastões. De maneira natural os corpos de prova foram perdendo calor para o meio, em aproximadamente 213 °C foi realizado o resfriamento rápido com água, simulando a ação dos órgãos competentes habilitados para fazer o resfriamento do local onde existe um incêndio. Após essa etapa a temperatura estabiliza em aproximadamente 36 °C e os corpos de provas foram condicionados para reidratação até o período proporcional de cada ensaio, todo esse processo é abordado na Figura 37.

Figura 37 – Processo de resfriamento dos corpos de prova após simulação de incêndio em forno cerâmico caseiro



Fonte: Própria Autora (2021).

Para segunda simulação de incêndio foram aquecidos os corpos de prova ao ar livre por meio da queima da gasolina, inicialmente houve um agrupamento dos corpos de prova, em seguida inseriu-se gasolina em contato com os materiais e proporcionou aquecimento para esse ambiente, a temperatura foi averiguada de maneira gradativa através de termômetro digital até atingir temperatura final de

aproximadamente 315 °C, após essa temperatura não se inseriu mais combustível e os materiais foram perdendo calor para o meio até a chama se apagar totalmente e iniciar o processo de resfriamento de maneira natural, após essa etapa os corpos de provas foram condicionados para reidratação até o período proporcional de cada ensaio, conforme processo ilustrado na Figura 38. Os corpos-de-prova foram mantidos em temperatura elevada durante 3h.

Figura 38 – Etapas da simulação de incêndio através da utilização de gasolina



Fonte: Própria Autora (2021).

4.2.6 Ensaaios

Os corpos de prova, após serem expostos a elevada temperatura e resfriamento rápido em água, foram pesados e divididos em 5 grupos iguais, um deles será ensaiado após resfriamento e os outros ficarão imersos em água por 0, 7, 14, 21 e 28 dias para que seja avaliada a possível recuperação da resistência devido a reidratação da pasta de cimento. Estes corpos de prova foram ensaiados para avaliar os efeitos do tipo de queima sobre a resistência à compressão axial (f_c) e Resistência à tração por compressão diametral (f_{ct} , sp).

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral foram realizados em uma Prensa Manual para Ensaios de Concreto - Contenco, modelo I-3001-C com capacidade de

100 Toneladas, leitura digital e resolução de 10 Kgf, conforme mostrado na Figura 39.

Figura 39 – Prensa Manual para Ensaios de Concreto - Contenco



Fonte: Contenco (2021).

Por fim, foram feitas as observações e comparações entre os resultados experimentais dos lotes submetidos a elevadas temperaturas e o de controle.

4.2.7 Massa Específica

As massas específicas foram determinadas de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2008). Onde, a determinação ocorre pela relação entre a massa de material e o seu volume após adensamento, incluindo neste volume o ar eventualmente retido ou propositadamente incorporado ao material.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ENSAIO GRANULOMÉTRICO

A distribuição de tamanho das partículas está diretamente ligada às variações no desempenho reológico de argamassas e concretos, portanto, é essencial o estudo da distribuição granulométrica do agregado para determinação de parâmetros fundamentais no processo de dosagem. São exemplos destes a determinação da dimensão máxima característica e do módulo de finura do agregado e a obtenção da curva granulométrica.

As Tabelas 4 e 5 apresentam as granulometrias da areia e do EPS, respectivamente, para o traço de concreto convencional. E a representação da curva granulométrica dos materiais citados está representada pelas Figuras 40 e 41, respectivamente.

Tabela 4 – Granulometria do agregado miúdo – areia

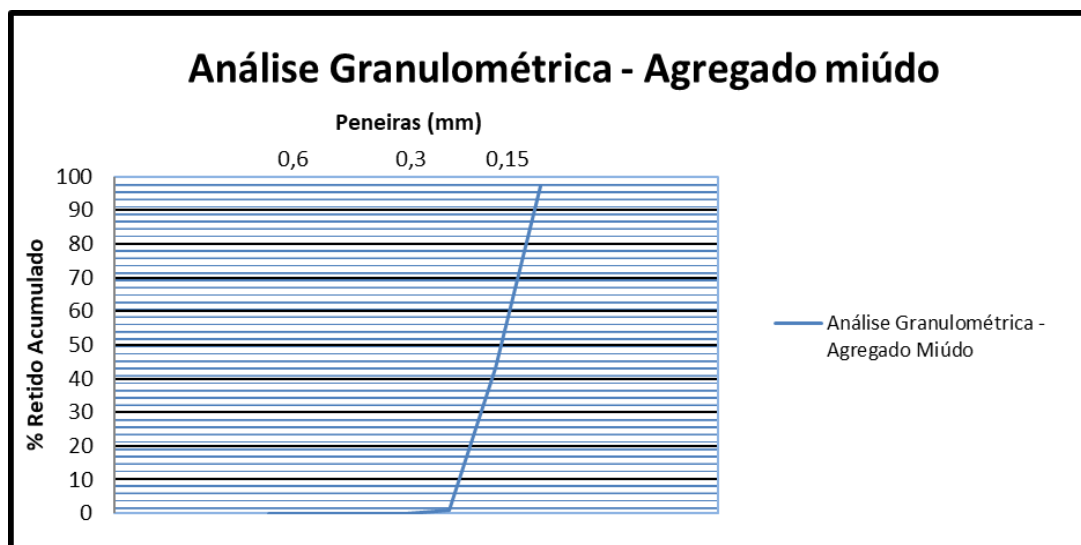
Peneira (mm)	Peso retido (g)	% retido	% retido acumulado
4,75	0,00	-	-
2,36	0,00	-	-
1,18	0,00	-	-
0,6	4	0,80	0,80
0,3	212	42,48	43,29
0,15	270	54,11	97,39
Resíduo	0,000	0,00	100,00
Somatório	500	100,00	
Diâmetro máximo do agregado (mm)			0,6

Fonte: Autora (2021).

Pode-se extrair da Tabela 4 as seguintes propriedades da amostra: Dimensão máxima característica igual a 0,6 mm e Módulo de finura igual a 1,4 de onde é possível caracterizar o agregado como areia fina.

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2008), a relação entre o módulo de finura e a granulometria do agregado é de igual proporção, ou seja, quanto menor o módulo de finura, mais fino é o agregado. É o que vemos para a areia, que apresenta um baixo módulo de finura ao mesmo tempo em que apresenta uma curva granulométrica dentro dos parâmetros.

Figura 40 – Curva Granulométrica da areia do traço



Fonte: Autora (2021).

Tabela 5 – Granulometria do Poliestireno Expandido

Peneira (mm)	Peso retido (g)	% retido	% retido acumulado
6,3	2	8,00	8,00
4,75	22	88,00	96,00
2,36	1	4,00	100,00
1,18	0	0,00	100,00
0,6	0	0,00	100,00
0,3	0	0,00	100,00
0,15	0	0,00	100,00
Resíduo	0	0,00	100,00
Somatório	25	100	
Diâmetro máximo do agregado (mm)			6,3

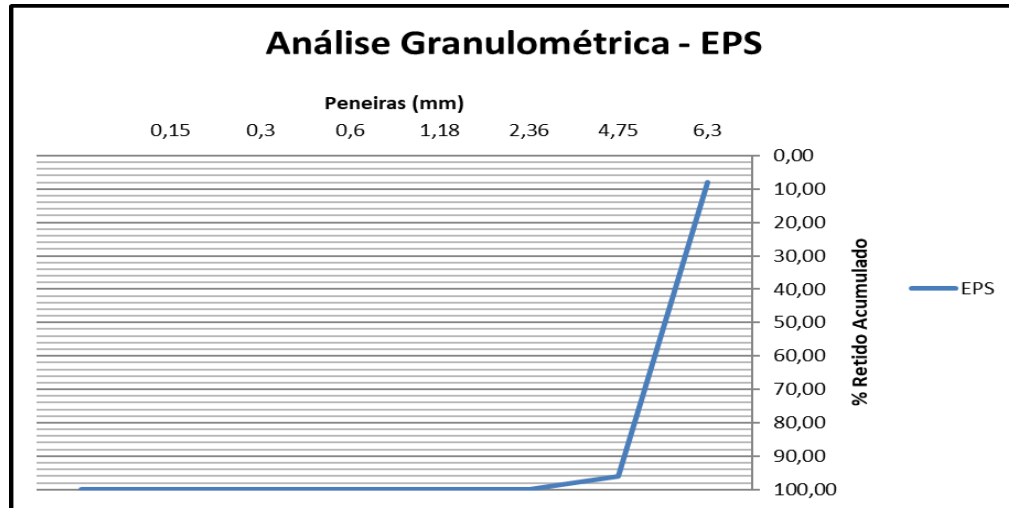
Fonte: Autora (2019).

Resíduos de poliestireno expandido foram escolhidos como matéria prima alternativa para a substituição parcial dos agregados miúdos na composição da argamassa, pois o material apresenta uma distribuição granulométrica semelhante ao do agregado miúdo, e propriedades físicas que atendem as características do agregado (areia), tornando assim viável a utilização do material (BUSSOLO *et al.*, 2020).

Após os ensaios realizados com a amostra de EPS, é observado que o módulo de finura do poliestireno expandido é superior ao da areia, devido a soma das porcentagens retidas nas peneiras da série normal serem maiores na amostra

de EPS ensaiada em comparação a areia.

Figura 41 – Curva Granulométrica do EPS



Fonte: Autora (2019).

Também é possível verificar na Figura 41 que o material apresenta massa distribuição uniforme, atendendo assim, os aspectos de agregado leve para a incorporação como matéria prima alternativa para a produção da argamassa.

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NORMAL

As Figuras 42 e 43 demonstram os corpos de prova submetidos a alta temperatura através do forno e gasolina sendo ensaiados por Compressão Normal, após reidratação durante 7, 14, 21 e 28 dias.

O comportamento resistente à compressão com EPS é diferente do relativo aos concretos comuns, que via de regra apresentam união de microfissuras, primariamente originárias na zona de transição entre o agregado e a matriz do concreto. Assim sendo, os concretos comuns tendem a ter a linha de ruptura contornando os agregados (HANAI, 2005).

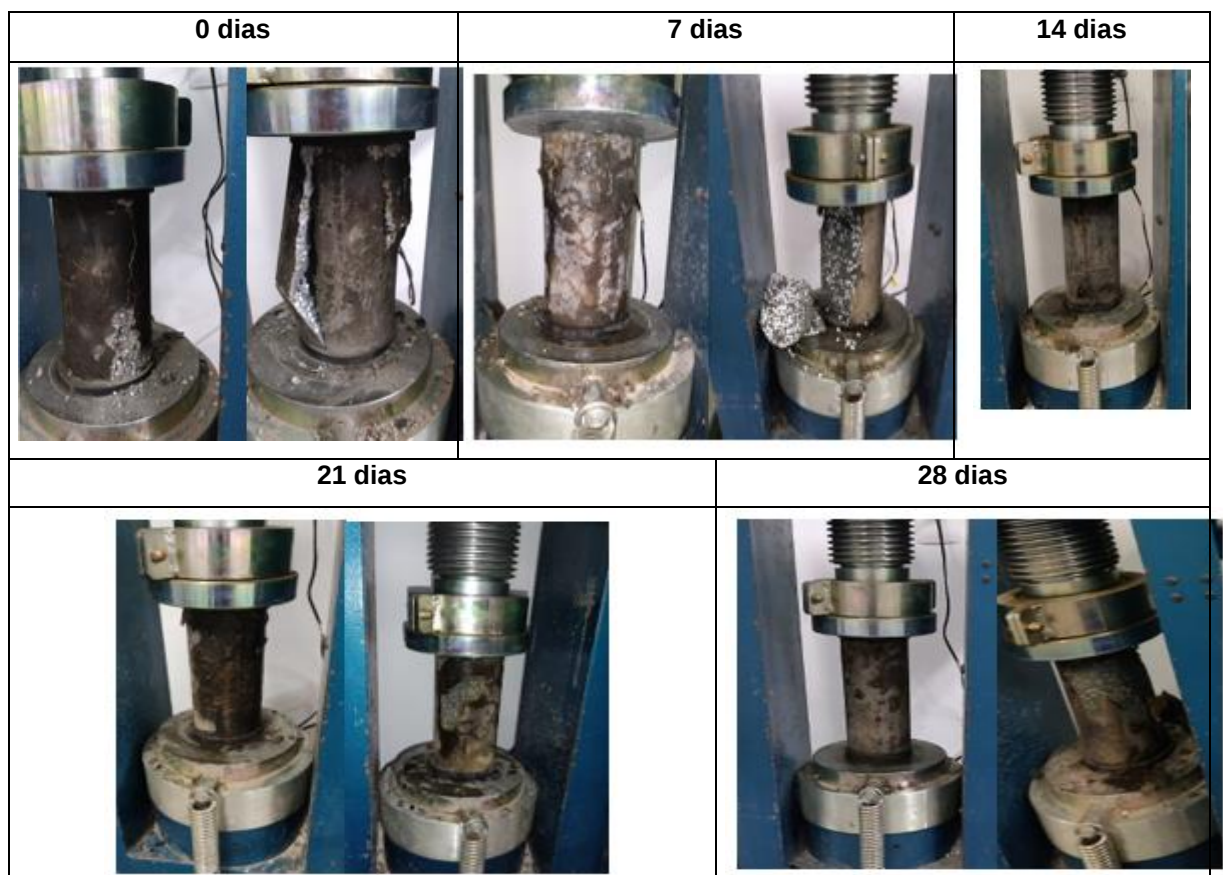
Nas Figuras 42 e 43 é possível perceber uma homogeneidade no tipo de fratura formada nos corpos de prova submetidos a alta temperatura através do forno e gasolina, vez que ocorre a formação inicialmente da trinca quando as tensões de compressão no concreto atingem o valor da resistência à compressão deste, que se fissa em direção paralela à força aplicada dando origem a fissura primária.

Ao longo do processo, com o aumento da força aplicada, a formação de

fissuras primárias é contínua, ou seja, nos diversos pontos onde a tensão de compressão do concreto superar a sua resistência à compressão de maneira análoga à descrita, surgirão fissuras primárias. Para o caso citado, a partir da fissuração primária central, pode-se analisar a peça rompida como dois novos elementos, e, portanto, novas fissuras surgirão no meio do comprimento destas novas peças, como mostra as Figuras 42 e 43, desde que o comprimento entre fissuras seja maior que o comprimento de ancoragem. No caso de peças maiores, pode-se ter múltiplas fissuras na primeira geração de fissuração.

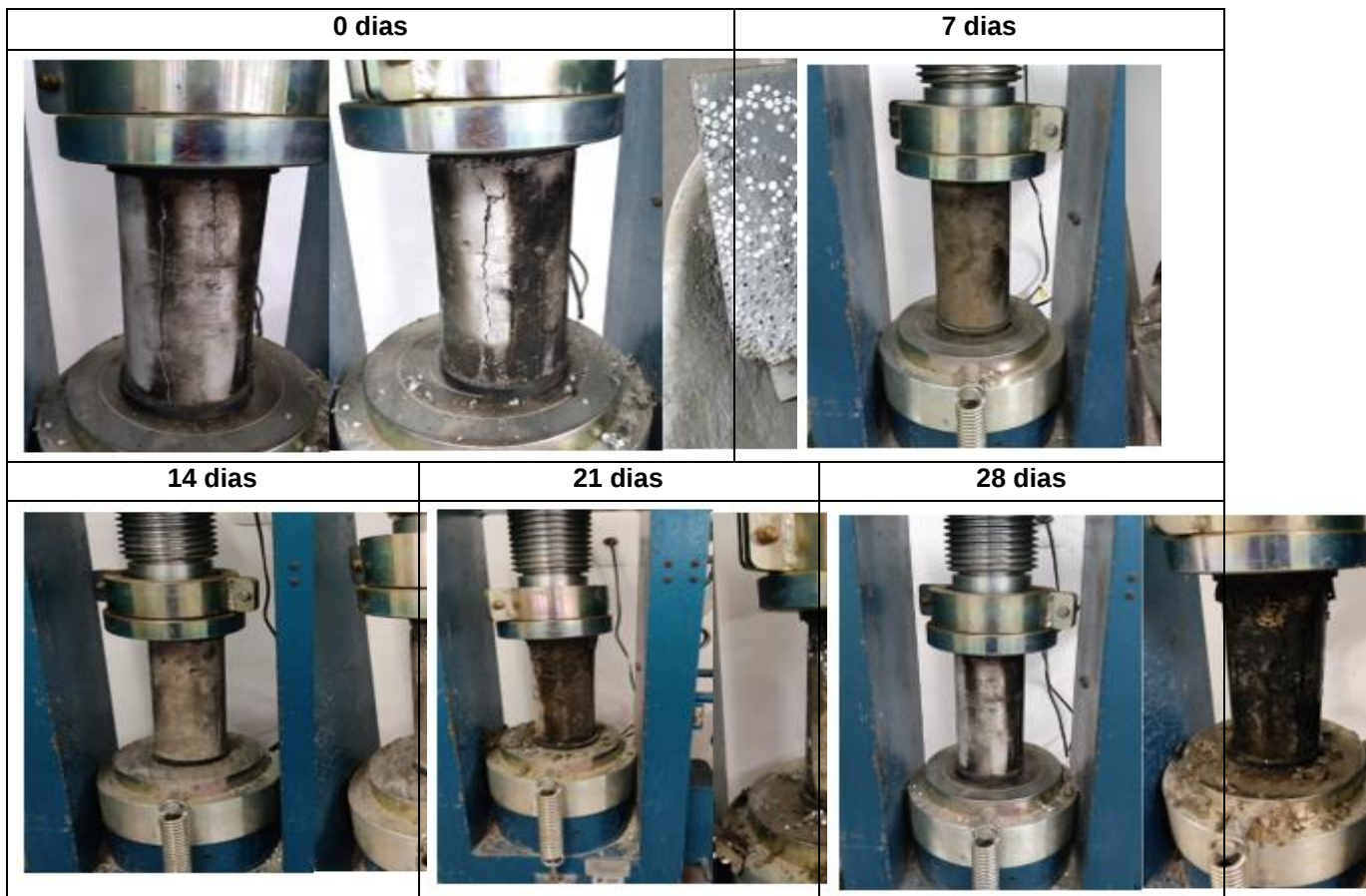
Nas proximidades das fissuras primárias, é comum o surgimento de fissuras secundárias (Figuras 42 e 43). De acordo com Ingraffea *et al.* (1984), estas fissuras, em geral, são radiais, possuem abertura, bem como comprimento, inferior em relação as fissuras primárias e podem surgir devido a efeitos como concentração de tensões.

Figura 42 – Ensaio de Compressão Normal para corpos de prova submetidos a alta temperatura através do forno e reidratados



Fonte: Autoria Própria (2021).

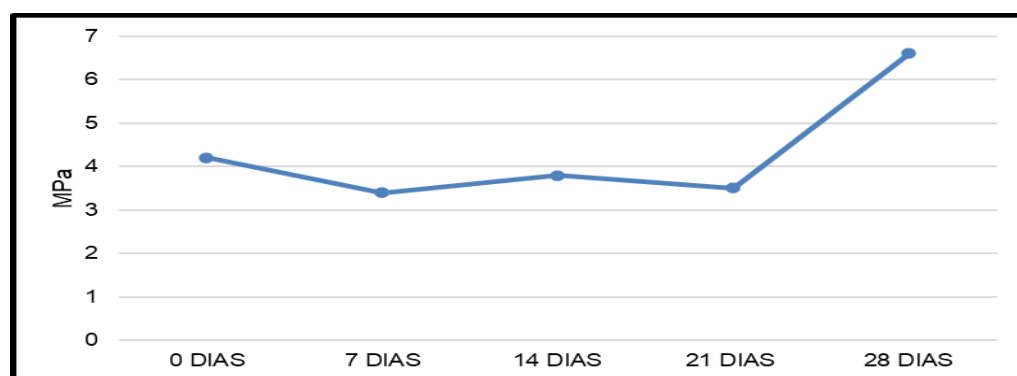
Figura 43 – Ensaio de Compressão Normal para corpos de prova submetidos a alta temperatura através da gasolina e reidratados



Fonte: Autoria Própria (2021).

Os resultados do ensaio de compressão normal dos corpos de prova submetidos a alta temperatura através do forno e gasolina estão ilustrados nas Figuras 42 e 43 juntamente com a Tabela 8.

Figura 44 – Resistência à compressão corpos de prova submetidos a alta temperatura através do forno

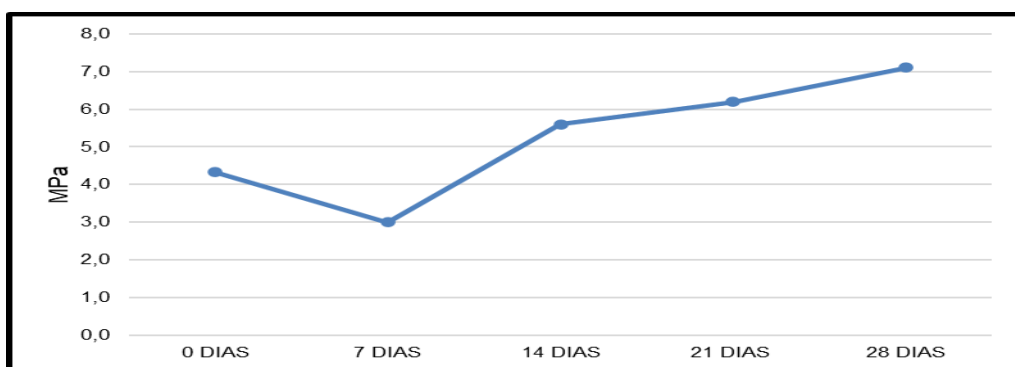


Fonte: Autoria Própria (2021).

Considerando que a resistência à compressão do concreto é um fator determinante para sua utilização, tanto para função estrutural e não estrutural, pode-se perceber que após submeter os corpos de prova a alta temperatura através do forno a carga máxima de ruptura do material sem hidratação foi 4,3 MPa, após 7 dias de hidratação ocorreu um decréscimo na resistência à compressão do material, tendo cerca de 3 MPa, porém com o aumento da hidratação o compósito cerâmico/polimérico iniciou um aumento significativo na carga máxima suportada em cerca de 5,6 MPa com 14 dias; 6,2 MPa com 21 dias e 7,1 MPa com 28 dias, demonstrando a importância da hidratação do material após submetê-lo em alta temperatura para atenuar sua resistência à compressão.

Nos concretos com agregados leves, a resistência à compressão é ditada pela resistência do agregado leve. Devido à porosidade elevada, e quando existe a pré-saturação, a zona de transição entre o agregado leve e a matriz do concreto é fortalecida, e em consequência da proximidade entre os módulos de deformação (agregado e matriz), a linha de ruptura passa pelo agregado leve. Portanto, existe um limite ótimo de resistência da matriz, que além desse determinado valor, não estará sendo utilizada com a capacidade máxima, pois o fator limitante será a resistência do agregado.

Figura 45 – Resistência à compressão corpos de prova submetidos a alta temperatura através da gasolina



Fonte: Autoria Própria (2021).

Tabela 6 – Comparação da Resistência à compressão Normal dos Corpos de Prova aquecidos no Forno e Gasolina

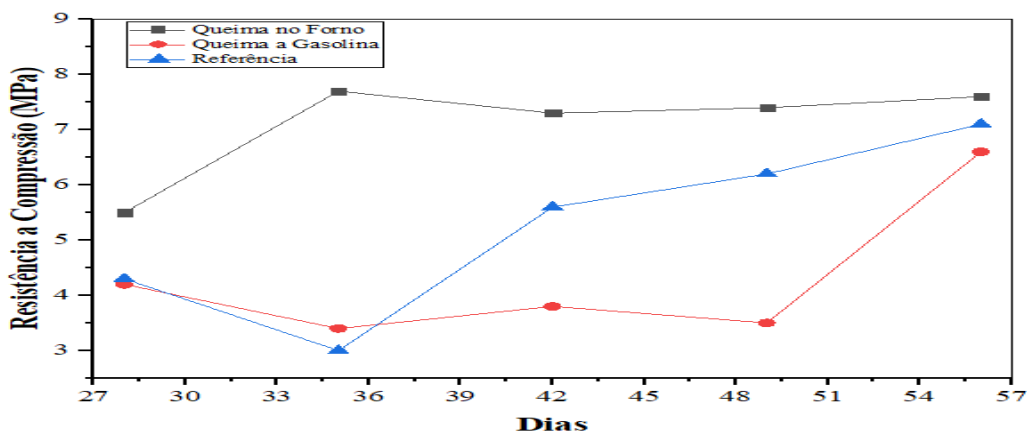
Resistência à compressão Normal (MPa)		
Dias	Forno	Gasolina
0	4,2	4,3
7	3,4	3,0
14	3,8	5,6
21	3,5	6,2
28	6,6	7,1

Fonte: Autoria Própria (2021).

Na Figura 45 a resistência à compressão dos corpos de prova submetidos a alta temperatura através da gasolina a carga máxima de ruptura do material sem hidratação foi 4,2 MPa, após 7 dias de hidratação ocorreu um decrescimento na resistência à compressão do material, tendo cerca de 3,4 MPa, com 14 dias de hidratação a carga máxima suportada foi 3,8 MPa, porém com o aumento da hidratação o compósito cerâmico/polimérico iniciou um aumento significativo na carga máxima suportada em cerca de 6,6 MPa com 28 dias, demonstrando a importância da hidratação do material após submetê-lo em alta temperatura para atenuar sua resistência à compressão.

A Figura 46 ilustra as curvas de Resistência à compressão dos corpos de prova curados durante 28 dias e sem o processo de queima, juntamente com os corpos de prova queimados no forno e a gasolina após etapas de reidratação durante 0, 7, 14, 21 e 28 dias.

Figura 46 – Resistência à compressão de Corpos de Prova Referência e Curados durante 28 dias e reidratados após queima no forno e a gasolina



Fonte: Autoria Própria (2021).

Inicialmente os corpos de prova tiveram uma média de resistência à compressão cerca de 5,5 MPa, sendo importante mensurar que após o processo de queima ocorre uma queda no valor médio para cerca de 4,2 MPa, identificando que o processo de simulação de incêndio causa perda na resistência à compressão do material, podendo interferir na estruturação da construção no qual tem a aplicação deste material. Porém, observa-se que após etapas de reidratação durante 7, 14, 21 e 28 dias ambos os materiais (queimados no forno e gasolina) segue caminho de aumento significativo da resistência à compressão, cerca de 3; 5,6; 6,2 e 7,1 para o material queimado a gasolina e 3,4; 3,8; 3,5 e 6,6 para o material queimado no forno. Demonstrando a relação direta da etapa de reidratação com o aumento da resistência à compressão dos corpos de prova. Ainda é possível mensurar que após reidratação durante 28 dias os corpos de prova queimados a gasolina e no forno apresentaram resistência à compressão superior se comparado com os corpos de prova apenas curados durante 28 dias.

5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Tabela 8 e a Figura 48 demonstram os corpos de prova submetidos a alta temperatura através do forno e gasolina sendo ensaiados à Tração por Compressão Diametral, após reidratação durante 7, 14, 21 e 28 dias.

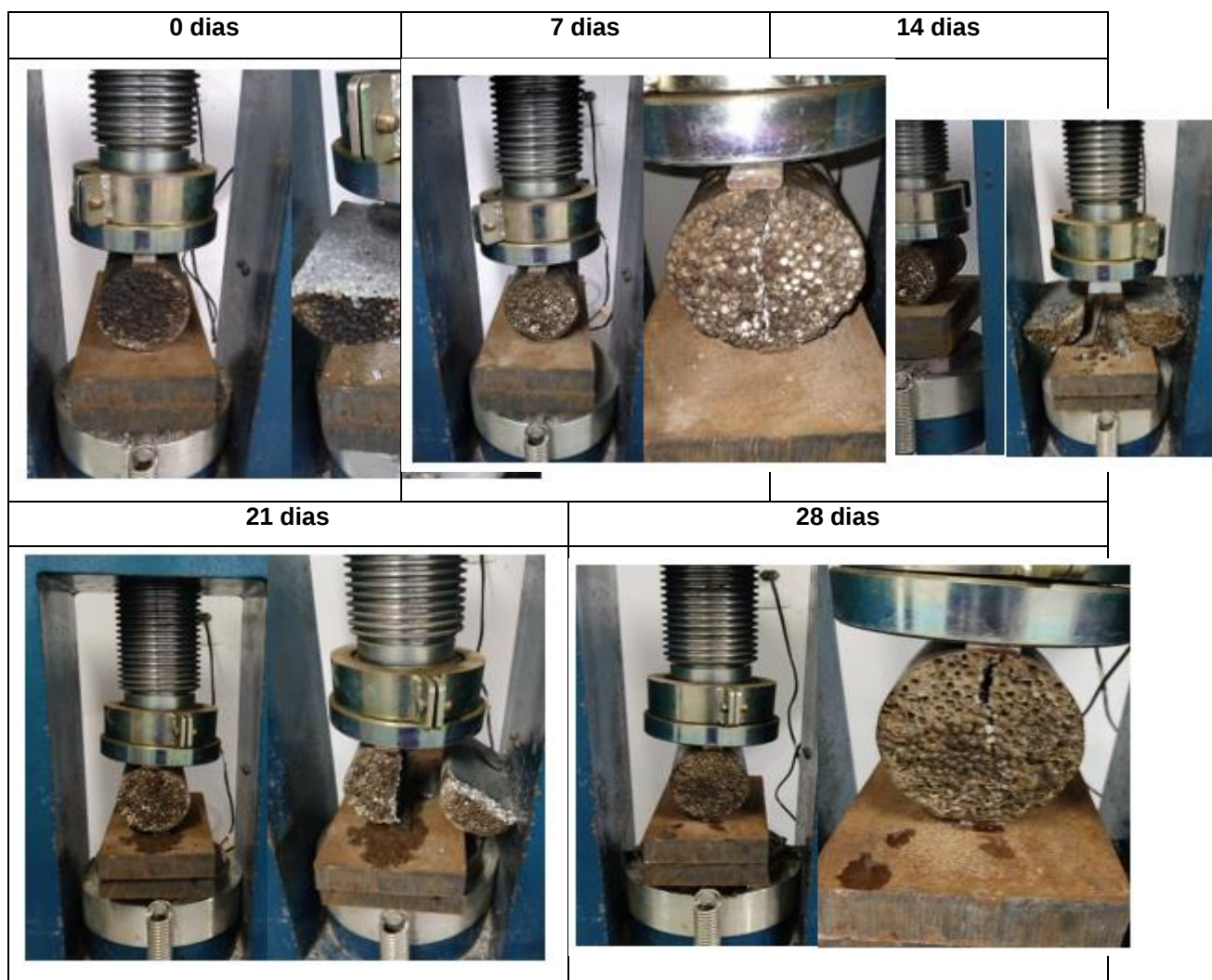
O ensaio de tração por compressão diametral (Brazilian Test) consistiu na aplicação de uma carga na direção vertical sobre o corpo de prova entre duas placas (Tabela 8 e a Figura 48) a fim de se obter a resistência à tração por meio de uma compressão no plano diametral, ou seja, o plano de ruptura vertical de simetria da peça cilíndrica (CLAESSON; BOHLOLI, 2002).

A tensão de compressão máxima ocorre na superfície da amostra, imediatamente abaixo da aplicação das cargas. A distribuição de carga aplicada é um fator muito importante para o sucesso do ensaio. A carga deve ser igualmente distribuída ao longo de todo o comprimento do corpo de prova. Se a área de contato entre os pratos da máquina de ensaio e a superfície do corpo de prova for muito pequena – geralmente causada por irregularidades na superfície do corpo de prova – a carga aplicada será muito concentrada, levando a uma compressão máxima localizada, podendo ocorrer uma falha causada por tensões de cisalhamento.

Quando a carga é aplicada, a falha inicia-se no centro da peça, conforme

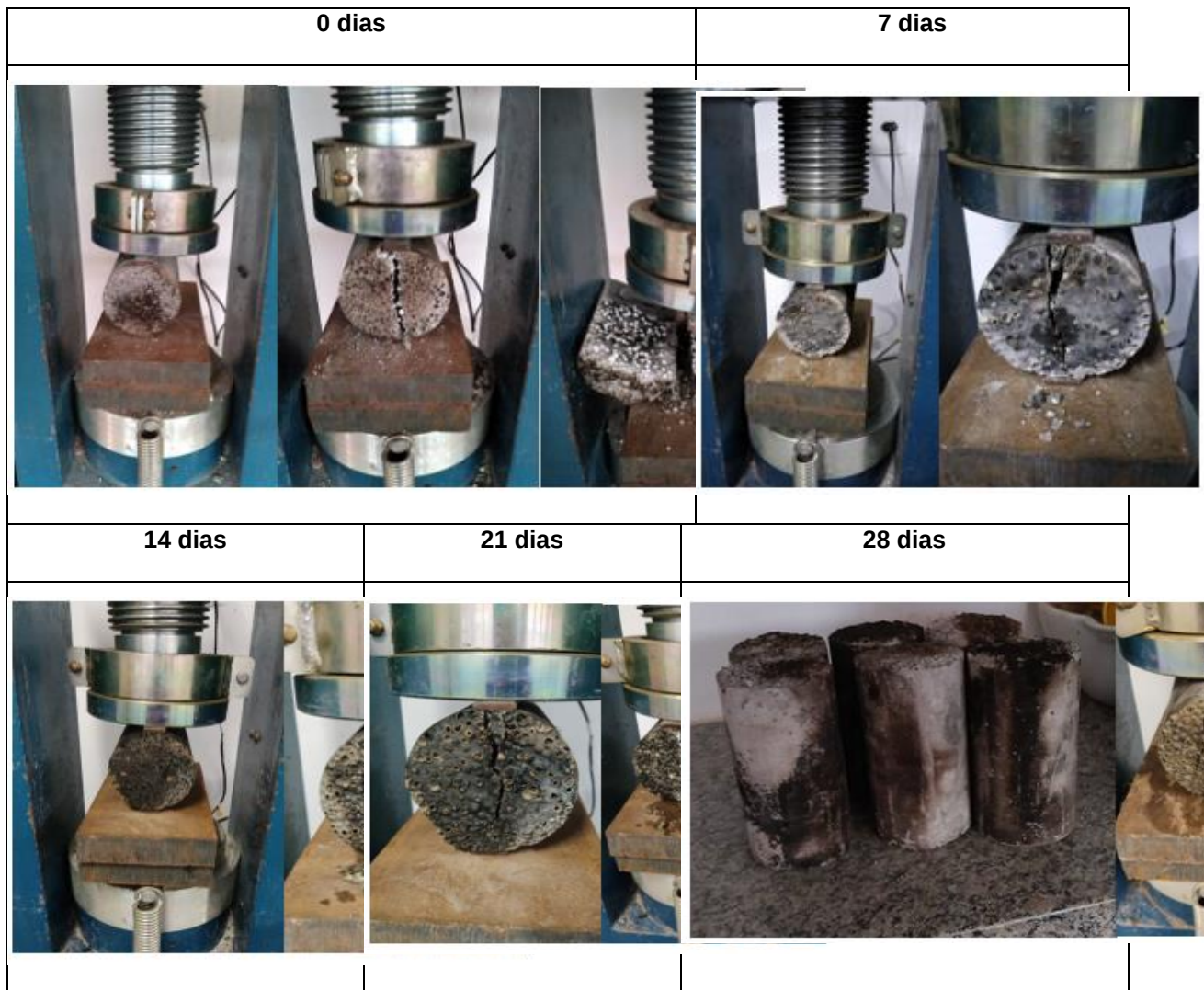
demonstrado nas Figuras 47 e 48. Neste local, a proporção entre tensão de compressão e tensão de tração é de aproximadamente igual a três ($\sigma_y = 3\sigma_x$) e se propaga para fora, ao longo da direção de aplicação da carga (WALSRI; FUENKAJORN, 2011). Embora a tensão de compressão seja três vezes maior do que a de tração, a cerâmica tende a fraturar por tração, pois resiste bem a tensões de compressão.

Figura 47 – Ensaio de Tração por Compressão Diametral para corpos de prova submetidos à alta temperatura através do forno e reidratados



Fonte: Autoria Própria (2021).

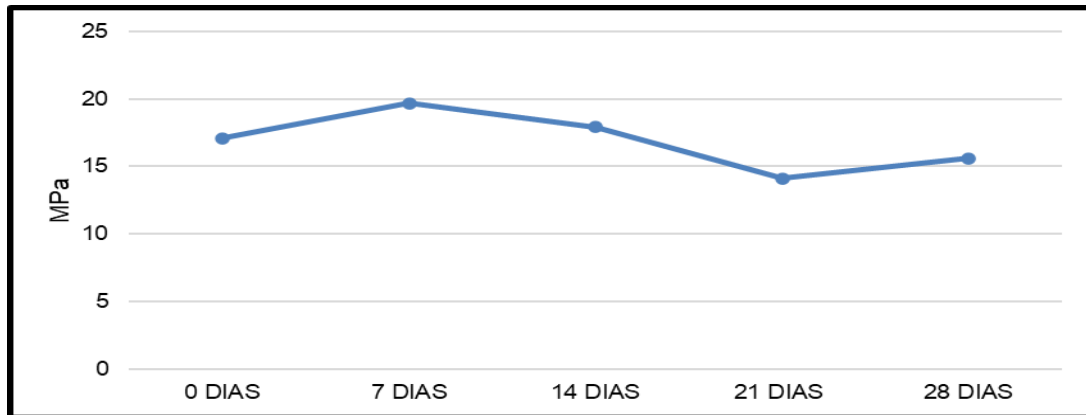
Figura 48 – Ensaio de Tração por Compressão Diametral para corpos de prova submetidos à alta temperatura através da gasolina e reidratados



Fonte: Autoria Própria (2021).

Os resultados do ensaio de tração por compressão diametral para determinação da resistência à tração dos corpos de prova submetidos a alta temperatura através do forno e gasolina estão ilustrados nas Figuras 49 e 50 juntamente com Tabela 7.

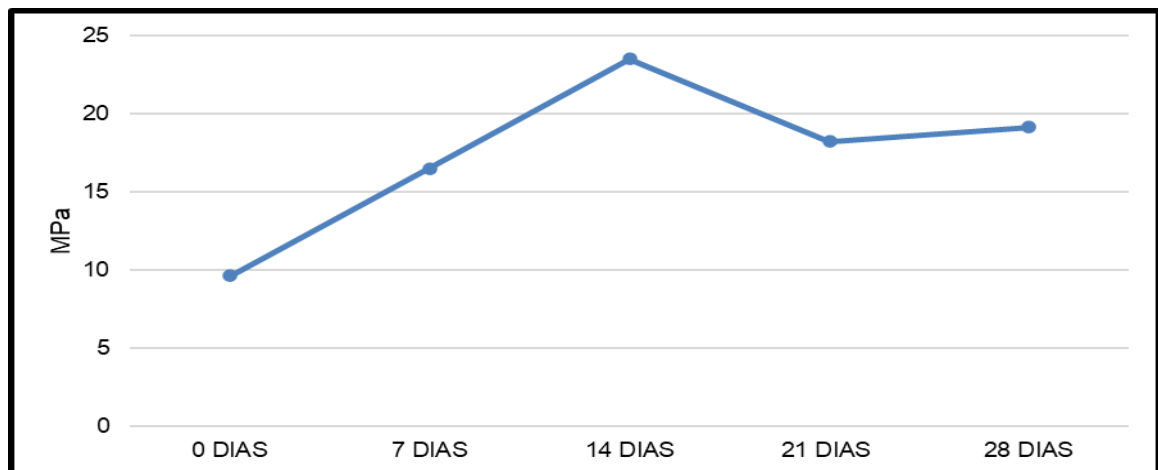
Figura 49 – Resistência à tração dos corpos de prova submetidos à alta temperatura através do forno



Fonte: Autoria Própria (2021).

Nota-se que a resistência à tração dos corpos de prova sem e com hidratação não segue um padrão teórico de ganho ou perda total com o passar dos dias, tendo como carga máxima suportada sem período de hidratação cerca de 17,1 MPa, porém se comparado apenas com esse requisito a propriedade foi significativamente elevada, pois em 7 dias obteve-se 19,7 MPa; 14 dias com 17,9 MPa; 21 dias com 14,1 MPa e 28 dias com 15,6 MPa.

Figura 50 – Resistência à tração dos corpos de prova submetidos à alta temperatura através da gasolina



Fonte: Autoria Própria (2021).

Tabela 7 – Comparação da Resistência à Tração por Compressão Diametral dos Corpos de Prova aquecidos no Forno e Gasolina

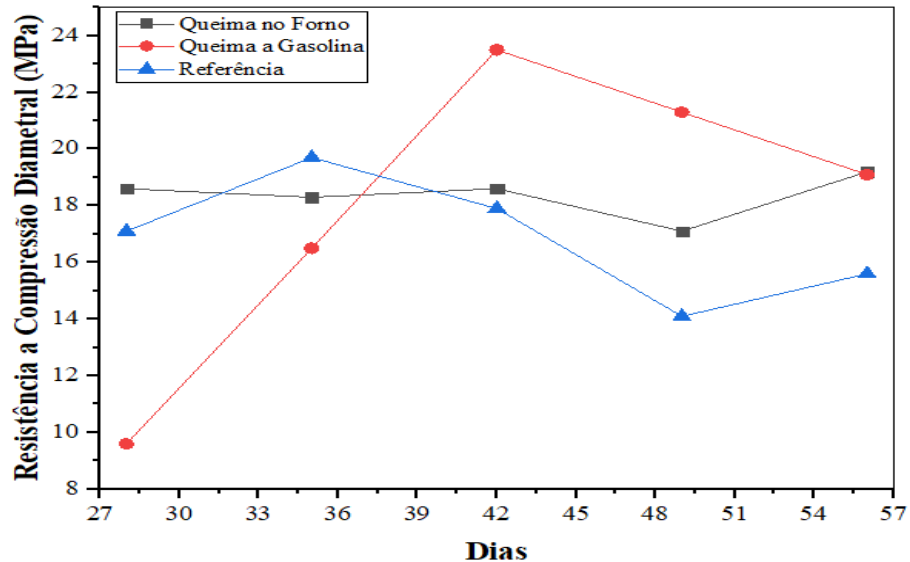
Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)		
Dias	Forno	Gasolina
0	17,1	9,6
7	19,7	16,5
14	17,9	23,5
21	14,1	18,2
28	15,6	19,1

Fonte: Autoria Própria (2021).

Para os corpos de prova submetidos a alta temperatura através da gasolina percebeu-se a mesma heterogeneidade de carga máxima suportada em todo o período de estudo conforme observado nos materiais submetidos a alta temperatura através do forno. Os materiais sem hidratação obtiverão resistência à tração cerca de 9,6 MPa; com 7 dias de hidratação observou-se um aumento para 16,5 MPa, porém com 14, 21 e 28 dias as resistências a tração foram 23,5; 18,2 e 19,1, respectivamente. Mesmo havendo perdas de carga máxima durante o período do estudo é importante frisar que após a hidratação a evolução no período final (28 dias) é superior a 100% da carga inicial sem hidratação.

A Figura 51 ilustra as curvas de Resistência à Tração por Compressão Diametral dos corpos de prova curados durante 28 dias e sem o processo de queima, juntamente com os corpos de prova queimados no forno e a gasolina após etapas de reidratação durante 0, 7, 14, 21 e 28 dias.

Figura 51 – Resistência à tração por compressão Diametral de Corpos de Prova Referência e Curados durante 28 dias e reidratados após queima no forno e a gasolina



Fonte: Autoria Própria (2021).

Os corpos de prova após etapa de cura durante 28 dias tiveram uma média de resistência à tração por compressão diametral cerca de 18,6 MPa, sendo importante mensurar que após o processo de queima ocorre uma queda no valor médio para cerca de 9,6 MPa para corpos de prova queimados a gasolina e 17,1 com queima no forno, identificando que o processo de simulação de incêndio causa perda na resistência à tração do material, podendo interferir na estruturação da construção no qual tem a aplicação deste material. Porém, observa-se que após etapas de reidratação durante 7, 14, 21 e 28 dias ambos os materiais (queimados no forno e gasolina) segue caminho de aumento significativo da resistência à compressão, cerca de 16,5; 23,5; 18,2 e 19,1 para o material queimado a gasolina e 19,7; 17,9; 14,1 e 15,6 para o material queimado no forno.

Demonstrando a relação direta da etapa de reidratação com o aumento da resistência à tração dos corpos de prova. Ainda é possível mensurar que após reidratação durante 28 dias os corpos de prova queimados a gasolina apresentaram resistência à tração superior se comparado com os corpos de prova apenas curados durante 28 dias.

5.3 MASSA ESPECÍFICA

Os resultados mostraram que a massa específica dos materiais queimados a gasolina e forno foram menores em relação ao material não queimado, conforme indicado na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da determinação da massa específica dos materiais

Material	Massa Específica (g/cm ³)
Controle	1,65
Gasolina	1,47
Forno	1,51

Fonte: Autoria Própria (2021).

No Brasil, de acordo com a ABNT, a definição e determinação normativa oficial do concreto leve pode ser caracterizada em teste quando endurecido e seco em estufa, apresente massa específica entre 0,8 e 2,0 g/cm³ (NBR 12655) (ABNT, 2015). Neste sentido, os materiais podem ser utilizados em aplicações não estrutural, além da identificação da diminuição de massa ocasionada no processo de aquecimento.

6 CONCLUSÃO

Por meio dos resultados encontrados, pode-se concluir que:

- Os resultados obtidos evidenciam ganhos da resistência à compressão e à tração após períodos de hidratação das amostras aquecidas no forno e gasolina.
- Durante o aquecimento não foi verificado em nenhum dos corpos de provas algum tipo de deslocamento explosivo.
- Acredita-se que a quantidade de poros existentes na matriz permitiu a migração do vapor para a superfície com relativa facilidade, e que o fato das amostras apresentarem baixa umidade em função do tempo de cura ao ar livre reduziu a possibilidade do *spalling*.
- Porém, a resistência à tração dos corpos de prova sem e com hidratação não segue um padrão teórico de ganho ou perda total com o passar dos dias.
- Os concretos com EPS leves estão dentro do preconizado pela legislação - NM 35 (ABNT, 1995) - e podem ser utilizados em aplicações não estruturais, com valores médios de resistência à compressão de 7 MPa após queima no forno e gasolina juntamente com reidratação;
- Os resultados deste trabalho reforçam a importância em se estudar o comportamento do concreto perante as elevadas temperaturas provenientes de um incêndio e contribuem para esta área de pesquisa, visto que muitas respostas ainda carecem ser descobertas e que se deve procurar padronizar os ensaios experimentais de modo que se obtenham parâmetros que possam ser comparados.
- Os resultados mostraram que a massa específica dos materiais queimados a gasolina e forno foram menores em relação ao material não queimado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desta forma, novos estudos deverão esclarecer alguns pontos que merecem ser melhores avaliados, tais como:

- padronização de ensaios experimentais que permitam a avaliação de uma estrutura atingida por um incêndio real;
- realização de estudos comparativos com concretos constituídos por diferentes agregados mas com propriedades mecânicas similares à temperatura ambiente;
- avaliação da recuperação das propriedades mecânicas de concretos submetidos a elevadas temperaturas com a reidratação após ciclo de aquecimento-resfriamento.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas **ABNT NBR 12821**: Preparação do concreto em laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 35**: Agregados leves para concreto estrutural – Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ABRAMS, M. S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600°F. **Temperature and Concrete**, ACI SP-25, pp. 33-50, 1973.

ABRAPEX. Associação Brasileira do Poliestireno Expandido. **Manual de utilização do EPS na construção civil**. São Paulo: Pini, 2006.

ACI. American Concrete Institute. **ACI 213R-03**: Guide for Structural Lightweight aggregate concrete. Michigan, EUA: ACI, 2003.

ACI. American Concrete Institute. Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. **ACI 213R-87**. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1. Michigan, EUA: ACI, 1999.

AHMAD, A.; SINGH, Y. In-plane behaviour of expanded polystyrene core reinforced concrete sandwich panels. **Construction and Building Materials**, v. 269, n. 1, p. 1-12, 2021.

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de SERRA, G. G. São Paulo: Pini, 2000.

AITCIN, P. C. **High-performance concrete**. United States: Spon's Architecture Price

Book, 1998.

ALI, T. K. M. *et al.* Properties of eco-friendly pervious concrete containing polystyrene aggregates reinforced with waste PET fibers. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 5, n. 3, p. 1-16, 2020.

ANDERSSON, A. Apropos a Swedish Library on Fire: the Salamander and the Parrot. **The Art Bin**, p. 1-2, 1996.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM C330**: Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete. Philadelphia: ASTM, 1989.

BABAVALIAN, A.; RANJBARAN, A. H.; SHAHBEYK, S. Uniaxial and triaxial failure strength of fiber reinforced EPS concrete. **Construction and Building Materials**, v. 247, n. 1, p. 1-12, 2020.

BAUER, L. A. F.; TOLEDO, E. **Características do concreto leve de styropor**. São Paulo: IBRACON, 1973.

BICER, A. Investigation of Waste EPS Foams Modified by Heat Treatment Method as Concrete Aggregate. **Journal of Building Engineering**, v. 42, n. 1, p. 1-12, 2021.

BLOG MEMÓRIA VIVA. Incêndio no edifício Andraus em 1972, 2011.

BOUVARD, D. *et al.* Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete. **Cement and concrete research**, v. 37, n. 12, p. 1666-1673, 2007.

BUSSOLO, C. D. S. **Influência do uso de poliestireno expandido (EPS) como agregado em argamassa**, 2020.

CARBONARI, G. *et al.* Flexural behaviour of light-weight sandwich panels composed by concrete and EPS. **Construction and Building Materials**, v. 35, n. 1, p. 792-799, 2012.

CATOIA, T. **Concreto Ultraleve® estrutural com pérolas de EPS**: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes. 2012. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

CHAVES, F. A. O. *Et al.* Analise da influência do massará no processo de fabricação do concreto na região de Teresina–PI. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 2, p. 8116-8127, 2020.

CHEN, B.; LIU, J. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 7, p. 1259-1263, 2004.

CLAESSON, J.; BOHLOLI, B. Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution. **International Journal of Rock**

Mechanics & Mining Sciences, v. 39, n. 8, p. 991-1004, 2002.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

DISSANAYAKE, D. M. K. W.; JAYASINGHE, C.; JAYASINGHE, M. T. R. A comparative embodied energy analysis of a house with recycled expanded polystyrene (EPS) based foam concrete wall panels. **Energy and Buildings**, v. 135, n. 1, p. 85-94, 2017.

FERNANDO, P. L. N.; JAYASINGHE, M. T. R.; JAYASINGHE, C. Structural feasibility of Expanded Polystyrene (EPS) based lightweight concrete sandwich wall panels. **Construction and building materials**, v. 139, n. 1, p. 45-51, 2017.

FEUERWEHRVEREIN HINWIL, Estacionamento subterrâneo, em Gretzenbach (Suíça), 2004.

GUNAVEL, M. *et al.* Proportioning of Lightweight Concrete by the Inclusion of Expanded Polystyrene (EPS). **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 9, n. 2, p. 1-12, 2020.

HANAI, J. B de. **Fundamentos do Concreto Protendido**. E-book Curso de Engenharia Civil. São Carlos: E-book, 2005.

HOPKINS, D.; VAN COILE, R.; LANGE, D. **Certain Uncertainty-Demonstrating safety in fire engineering design and the need for safety targets**. Europe: SFPE Europe, 2017.

INGRAFFEA, A. R. *et al.* Fracture Mechanics of Bond in Reinforced Concrete. **Journal of Structural Engineering**, v. 111, n. 5, p. 1-12, 1984.

ISOFÉRES. **Comportamento do Poliestireno Expandido EPS ao fogo**. Belo Horizonte: Comércio e Representação, 2012.

JORNAL ESTADO DE SÃO PAULO. Colapso parcial do edifício Sede II da CESP em São Paulo – Brasil, 1987, 2010.

KARLE, S. R.; GAWATRE, D. W.; GAWALI, N. D. Experimental Study on properties of Lightweight Sandwich Concrete Blocks using EPS Sheet. **International research journal of science and technology**, v. 7, n. 6, p. 2395-56, 2020.

KHATIB, J. M.; HERKI, B. A.; ELKORDI, A. Characteristics of concrete containing EPS. **Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete**, v. 21, n. 11, p. 137-165, 2019.

KIM, T. K. *et al.* Ductility and durability enhancement of concrete EPS by new reinforcement arrangements and polypropylene FRC utilization. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 48, n. 4, p. 377-388, 2021.

- KOBES, M. *et al.* Building safety and human behaviour in fire: A literature review. **Fire Safety Journal**, v. 45, n. 1, p. 1-11, 2010.
- KUMAR, K. N. *et al.* An experimental investigation on light-weight concrete blocks using vermiculite. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 987-991, 2020.
- LAM, T. V. *et al.* Properties and thermal insulation performance of light-weight concrete. **Magazine of Civil Engineering**, v. 84, n. 8, p. 1-12, 2018.
- LARANJEIRAS, A. C. R. **Colapso progressivo dos edifícios**. TQS News, Edição 33, 2011.
- LI, C. *ET AL.* Experimental Investigation on the Bond Behavior of Deformed Bars in a Class of Structural Expanded Polystyrene (EPS) concrete. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 24, n. 12, p. 3797-3809, 2020.
- LIMA, R.C.A. **Investigação do Comportamento de Concretos em Temperaturas Elevadas**. Tese (Doutorado em Construção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- LIU, N.; & CHEN, B. Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 227-232, 2014.
- MENDONÇA, F. B. *et al.* EPS foam blast attenuation in full-scale field test of reinforced concrete slabs. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 42, p. 1-12, 2020.
- MOMTAZI, A. S.; LANGRUDI, M. A. M.; KHODAPARAST, A. Durability of lightweight concrete containing EPS in salty exposure conditions. In: International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2., 2010, Ancona. **Proceedings...** Ancona: Università Politecnica delle Marche, 2010. p.1-10.
- MONCAYO, W. J. Z. **Comportamento residual do concreto leve com pérolas de EPS após situação de incêndio**. 2017. Tese (Doutorado em Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- MOON, A. S.; PATEL, A. Sustainable Construction Using EPS Beads in Light Weight Blocks to form Innovative Foam Concrete as a Green Building Material. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **IOP Publishing**, v. 1017, n. 1, p. 1-12, 2021.
- MUCKETT, M.; FURNESS, A. **Introduction to fire safety management**. Routledge, 2007.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.
- OZÓRIO, B. P. M. **Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas**. 2016. Tese (Doutorado em Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

PORTO, V. K. J. **Análise experimental de concreto leve estrutural em função dos agregados graúdos**. 2010. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário Adventista de São Paulo, Engenheiro Coelho, 2010.

PRIYANKA, E.; SATHYAN, D.; & MINI, K. M. Functional and strength characteristics of EPS beads incorporated foam concrete wall panels. **Materialstoday:Proceedings**, v. 46, n. 10, p. 5167-5170, 2021.

RODRIGUES, J. P. C.; OLIVEIRA, R. L. G. de. **Dimensionamento de estruturas em situação de incêndio**. 1 ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2021.

ROJAS-ARIAS, N. *et al.* Recovery and Incorporation of expanded polystyrene Solid Waste in Light-weight concrete. **Ingeniería**, v. 25, p. 3, p. 1-12, 2020.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural**: produção, propriedades, microestrutura e aplicações. 1. ed. São Paulo: Pini, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Concreto estrutural leve. *In*: ISAIA, G. C. **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. p.1333-1362.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Concreto leve estrutural. *In*: ISAIA, G. C. **Concreto**: ciência e tecnologia. v. 2. 1.ed. São Paulo: Ibracon, 2011. p.1531-1568.

RUIZ, M. F.; MUTTONI, A.; KUNZ, J. Strengthening of Flat Slabs against Punching Shear Using Post-Installed Shear Reinforcement. **ACI Structural Journal**, v. 107, n. 4, p. 434-442, 2010.

SAHEED, S. *et al.* A. Structural Performance of Shear Loaded Precast EPS-Foam Concrete Half-Shaped Slabs. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 1-12, 2020.

SAHEED, S. *et al.* Structural behavior of out-of-plane loaded precast lightweight EPS-foam concrete C-shaped slabs. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 1-12, 2021.

SANT'HELENA, M. **Estudo para aplicação de poliestireno expandido (EPS) em concretos e argamassas**. 2009. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, Santa Catarina, 2009.

SANTOS, T. L. D.; PORTO, F. H. F. D. S.; SILVA, A. S. Análise da correlação entre conforto e desempenho térmico em habitações de interesse social por simulação computacional. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 211-229, 2020.

SARRA, S. R.; MÜLFARTH, R. C. K. Importância da percepção dos usuários na avaliação de conforto térmico e qualidade do ar. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 12529-12548, 2021.

SARTORTI, A. L. **Comportamento Dinâmico de Lajes Maciças de Concreto Leve com Pérolas de EPS**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos,

2015.

SBRIGHI NETO, C. Agregados naturais, britados e artificiais para concreto. *In*: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. v.1. 1.ed. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 231-260.

SILVA, M. A. M. **Dosagem experimental de concreto autoadensável com a adição de pérolas de poliestireno expandido**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal do Piauí, Tersina, Piauí, 2018.

SILVA, T. C. P. D. **Caracterização mecânica e física de concreto leve com pérolas de poliestireno expandido modificado com látex estireno-butadieno e estireno-butadieno carboxilado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal do Piauí, Tersina, Piauí, 2018.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Proposta de revisão da NBR 15200:2004**. São Paulo: ABECE, 2010.

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

SOUSA, R. C. R. *et al.* Avaliação de desempenho de concreto leve com adição de Poliestireno Expandido (EPS): revisão de literatura. **Engineering Sciences**, v. 8, n. 3, p. 45-52, 2020.

SOUZA, A. A. A. **Influência do tipo de agregado nas propriedades mecânicas do concreto submetido ao fogo**. 2005. Dissertação (Estruturas) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.

SOUZA, A. A. A. **Procedimento para verificação em laboratório da tendência ao lascamento do concreto em situação de incêndio**. 2010. Tese (Doutorado em Estruturas) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2010.

SOUZA, L. M. *et al.* **Compósito a base de gesso e EPS para fabricação de casas populares** - 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, 2006.

STOCCO, W. RODRIGUES, D.; CASTRO, A. P. A. S. **Concreto Leve com Uso de EPS**. Recife: COBENGE, 2009.

VIJAYAN, D. S. *et al.* Natural aggregates used for Light weight concrete—A Review. *In*: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **IOP Publishing**, v. 993, n. 1, p. 1-12, 2020.

WALSRI, K.; FUENKAJORN. **Transition from compressive to tensile strengths of intact rocks**. Thailand: University of Technology, 2011.

WHITE, R. H.; DIETENBERGER, M. A. Fire safety. **Wood handbook**: wood as an

engineering material. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999.

YASSIN, N. I. M. *et al.* Concrete Brick Properties Incorporating EPS and POFA as Replacement Materials. **Journal of Advanced Research in Materials Science**, v. 77, n. 1, p. 14-25, 2021.

YE, X. *et al.* Blast behaviors of precast concrete sandwich EPS panels: FEM and theoretical analysis. **Engineering Structures**, v. 226, p. 111345, 2021.

ZHANG, H. *et al.* Dynamic thermal performance of ultra-light and thermal-insulative aerogel foamed concrete for building energy efficiency. **Solar Energy**, v. 204, p. 569-576, 2020.