

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**BIANCA PEREIRA MOREIRA OZÓRIO**

---

---

*Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de  
dosagens e de características mecânicas*

---

---

**São Carlos  
2016**



**BIANCA PEREIRA MOREIRA OZÓRIO**

---

---

*Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas*

---

---

**VERSÃO CORRIGIDA**

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Ciências, Programa de Engenharia Civil (Estruturas).

Orientador: Prof. Doutor Libânio Miranda Pinheiro.

**São Carlos  
2016**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE  
ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ozório, Bianca Pereira Moreira  
099c Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de  
dosagens e de características mecânicas / Bianca Pereira  
Moreira Ozório; orientador Libânio Miranda Pinheiro.  
São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de  
Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Concreto leve. 2. Concreto leve com EPS. 3.  
Dosagem. 4. Características mecânicas. 5. Durabilidade.  
I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **BIANCA PEREIRA MOREIRA OZÓRIO**.

Título da tese: "Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecônicas".

Data da defesa: 12.12.2016.

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

Prof. Dr. **Libânio Miranda Pinheiro**  
(Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Profa. Dra. **Alessandra Lorenzetti de Castro**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Dr. **Paulo Sergio dos Santos Bastos**  
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

Aprovada

Profa. Dra. **Fernanda Giannotti da Silva Ferreira**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovada

Prof. Dr. **Márcio Raymundo Morelli**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
(Engenharia de Estruturas);  
Prof. Titular **Humberto Breves Coda**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**



***À Sofia e Malu,  
com todo meu amor.***





# AGRADECIMENTOS

---

Chega o momento de redigir os agradecimentos e, primeiramente, surge a dúvida de como organizá-los, de modo a ser justa com todos que contribuíram para o desenvolvimento pleno deste trabalho. Então optei por escrever em ordem cronológica.

Agradeço aos meus pais, Sandra e Osni, por terem me tornado a pessoa que sou, pelos valores que me ensinaram, pelas alegrias com minhas conquistas e, principalmente, pelo apoio incondicional que me dão.

Ao meu esposo, Maikel, companheiro de toda vida, e minhas filhas, Sofia e Malu, pelo incentivo e parceria, entendendo e respeitando minhas ausências e restrições.

À Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande-RS, por ter possibilitado realizar este doutorado, especialmente aos meus colegas de trabalho, Agnese Camposilvan de Ataíde e Professor Doutor André Tavares da Cunha Guimarães que sempre me incentivaram a continuar, independente das adversidades encontradas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, por ter me aceito no curso. E a todos os funcionários do departamento de Engenharia de Estruturas.

Ao meu orientador, Professor Doutor Libânio Miranda Pinheiro, por ter me recebido como sua orientanda, entendendo minhas limitações técnicas e pessoais, sempre me auxiliando na condução dos estudos, sem nunca se negar a atender qualquer que fosse o questionamento.

Ao Engenheiro Milton José Kerbauy por dividir seu conhecimento sobre o material que estudei neste trabalho de pesquisa.

Ao Laboratório de Estruturas da EESC – USP e a todos seus funcionários pela colaboração no desenvolvimento da parte experimental.

Aos amigos que fiz em São Carlos, colegas de curso, que sempre se puseram à disposição para ajudar. Em especial à Margot Fabiana Pereira, pela ajuda desde o início, quando ainda cursava as disciplinas.

Certamente alguns nomes foram esquecidos, mas jamais esquecerei o apoio que recebi nesta etapa da minha vida.

A todos os meus mais sinceros agradecimentos.

Muito obrigada!



***“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”***

***Chico Xavier***



## RESUMO

---

OZÓRIO, B. P. M. *Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas*. 2016. 154 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento do concreto leve com pérolas de poliestireno expandido (*expanded polystyrene* – EPS), para posterior utilização em estruturas pré-moldadas constituídas, por exemplo, por painéis de paredes e lajes sujeitas a ações mecânicas. Também foram considerados parâmetros de durabilidade e mecanismos de redução da porosidade. Dentre um universo de solicitações a que as estruturas de concreto leve podem estar submetidas, analisaram-se, para diferentes dosagens: resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, absorção de água, resistência à tração na compressão diametral e na flexão. Foram incorporadas pérolas de EPS como componente para proporcionar redução do peso do concreto. Esse concreto leve pode, também, conter sílica ativa para reduzir a porosidade e melhorar a durabilidade das estruturas confeccionadas com esse material. As dosagens de concreto leve com EPS estudadas foram compostas basicamente por: cimento CPV-ARI, agregado miúdo (areia), pérolas de EPS, água e aditivo superplastificante. Ao final da pesquisa, após análise de 45 misturas, observaram-se ganhos de desempenho mecânico com a adição de sílica ativa, adição de fibras de aço, ajuste na granulometria do agregado miúdo e redução do teor de EPS nas misturas, obtendo-se resistência à compressão na ordem de 16 MPa e massa aparente de 1370 kg/m<sup>3</sup>, com fator de equivalência (FE) correspondente ou superior ao de um concreto convencional de 20 MPa e 2400 kg/m<sup>3</sup>. Deve-se ressaltar que o emprego de EPS no concreto reduz o peso dos elementos de construção, estruturais ou não, e o consumo de agregados (areia e brita ou seixo), do mesmo modo que o uso de adições minerais reduz o consumo de cimento.

**Palavras-chave:** Concreto leve. Concreto leve com EPS. Dosagem. Características Mecânicas. Durabilidade.



# ABSTRACT

---

---

Ozório, B. P. M. *Lightweight concrete with EPS beads: mix design and mechanical characteristics study*. 2016. 154 p. Thesis (PhD in Civil Engineering (Structures)) – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

This study aimed to analyse the lightweight concrete behavior with expanded polystyrene beads (EPS beads) for later use in precast structures made of walls panels and slabs, for example, structures under mechanical actions. Durability parameters and mechanisms of porosity reduction were also considered. Among a universe of requests which structures of lightweight concrete can be submitted, were analysed to different mix designs: compressive strength, modulus of elasticity, water absorption, tensile strength in the splitting and in the flexure tests. EPS beads were incorporate as raw material to provide weight reduction to the concrete. This lightweight concrete can also have silica fume to reduce its porosity and to improve durability of structures made with this material. The lightweight concrete mix designs studied were basically composed by: high initial strength cement, small aggregate (sand), EPS beads, water and superplasticizer additive. At the end of the research, after 45 mixtures analysis, mechanical performance gains were observed with the addition of silica fume, addition of steel fibers, adjusting in the fine aggregate's particle size and reducing of EPS content in the mixtures, obtaining compressive strength in the order of 16 MPa and apparent mass of 1370 kg/m<sup>3</sup>, with equivalence factor (EF) corresponding to or higher than that of an ordinary concrete of 20 MPa and 2400 kg/m<sup>3</sup>. It should be emphasized that the use of EPS in the concrete reduces the weight of the building members, whether structural or not, and the aggregates consumption (sand and gravel or pebble), in the same way as the employment of mineral additions reduces the consumption of cement.

**Keywords:** Lightweight concrete. Lightweight concrete with EPS. Mix design. Mechanical characteristics. Durability.





# LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1: Laje de concreto leve com EPS durante içamento (KERBAUY, 2011) .....	47
Figura 2: Painel de fechamento de Concreto Leve com EPS (PINHEIRO, 2016).....	47
Figura 3: Painel PI de Concreto Leve com EPS (KERBAUY, 2011) .....	48
Figura 4: Esquema do desenvolvimento da investigação experimental .....	51
Figura 5: Curva granulométrica da areia fina e da areia média.....	54
Figura 6: Pérolas de EPS-a.....	55
Figura 7: Pérolas de EPS-b.....	55
Figura 8: Curvas granulométricas das pérolas de EPS.....	55
Figura 9: Fibras de aço utilizadas no estudo .....	57
Figura 10: Fibras de polipropileno utilizadas no estudo .....	57
Figura 11: Traço confeccionado no misturador tipo argamassadeira com capacidade de 20 litros .....	59
Figura 12: Traço confeccionado no misturador com capacidade de 350 litros.....	60
Figura 13: Moldagem de corpos de prova com vibração manual .....	60
Figura 14: Moldagem dos corpos de prova com vibração mecânica – MESA VIBRATÓRIA.....	61
Figura 15: Cura dos corpos de prova com e sem retífica .....	61
Figura 16: Ensaio de abatimento do tronco de cone .....	63
Figura 17: Ensaio de espalhamento do concreto .....	63
Figura 18: Ensaio de resistência à compressão com instrumentação para leitura da deformação .....	65
Figura 19: Equipamento para leitura não-destrutiva do módulo de elasticidade por impulso SONELASTIC .....	65
Figura 20: Corpos de prova retificados e rompidos por compressão axial.....	65
Figura 21: Ensaio de compressão diametral .....	66
Figura 22: Ensaio de flexão em prismas de concreto leve e prismas após a ruptura.....	66
Figura 23: Secagem dos corpos de prova.....	69
Figura 24: Perfil de capilaridade de água no interior do corpo de prova cilíndrico ....	69
Figura 25: Vazios visíveis nos traços I e II .....	73

Figura 26: Resistência à compressão dos traços analisados nas idades de 24 h, 7 dias e 28 dias.....	76
Figura 27: Resistência à compressão versus massa específica.....	76
Figura 28: Variação da resistência com a alteração da quantidade de EPS .....	77
Figura 29: Variação da resistência com a alteração do tipo de aditivo .....	77
Figura 30: Variação da resistência com alteração do tipo de cimento .....	78
Figura 31: Variação da resistência com alteração da relação a/c.....	79
Figura 32: Variação da resistência com a alteração da granulometria do agregado.....	79
Figura 33: Evolução da resistência com a redução da quantidade de cimento .....	83
Figura 34: Crescimento da resistência à compressão com a idade.....	84
Figura 35: Dosagem com adição de fibras de polipropileno .....	86
Figura 36: Dosagens com adição de fibras de aço.....	87
Figura 37: Resistência à compressão das dosagens com adição de fibras de aço..	88
Figura 38: Resistência à tração por compressão diametral dos traços com adição de fibras de aço .....	88
Figura 39: Resistência à compressão por idade do concreto leve.....	92
Figura 40: Percentual da resistência remanescente do concreto leve.....	93
Figura 41: Concreto leve com EPS após avaliação da tensão remanescente.....	93
Figura 42: Absorção de água por capilaridade com curva de ajuste .....	95
Figura 43: Altura média de ascensão de água por capilaridade .....	96
Figura 44: Absorção de água por capilaridade por tempo de imersão .....	96
Figura 45: Absorção por capilaridade – TF-1.....	97
Figura 46: Absorção por capilaridade – TF-2.....	97
Figura 47: Absorção por capilaridade – TF-5.....	98
Figura 48: Absorção por capilaridade – TF-6.....	98
Figura 49: Absorção por capilaridade – TF-7.....	99
Figura 50: Absorção por capilaridade – TF-8.....	99
Figura 51: Absorção por capilaridade – TF-9.....	99
Figura 52: Absorção de água por corpo de prova para cada dosagem .....	102
Figura 53: Índice de vazios por corpo de prova para cada dosagem .....	102
Figura 54: Absorção de água e índice de vazios por dosagem .....	103
Figura 55: Massa específica seca, saturada e real por dosagem.....	103
Figura 56: Absorção de água e índice de vazios por dosagem a 50 °C e 105 °C ..	105

Figura 57: Interferência da elevação de temperatura na resistência à compressão .....	107
Figura 58: Perda de massa por temperatura de secagem .....	109
Figura 59: Resistência à compressão versus módulo de elasticidade dinâmico .....	110
Figura 60: Resistência à compressão versus resistência à tração .....	111
Figura 61: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-1 .....	114
Figura 62: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-2 .....	114
Figura 63: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-3 .....	115
Figura 64: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-4 .....	115
Figura 65: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-5 .....	116
Figura 66: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-7 .....	116
Figura 67: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-9 .....	117
Figura 68: Prismas com adição de 0,2% de fibras de polipropileno .....	118
Figura 69: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-8 .....	117
Figura 70: Prismas com adição de 0,6% de fibras de aço .....	118
Figura 71: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-6 .....	119
Figura 72: Prismas com adição de 0,3% de fibras de aço .....	120
Figura 73: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-10 .....	119
Figura 74: Prismas com adição de 0,9% de fibras de aço .....	120
Figura 75: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-11 .....	120
Figura 76: Resistência à compressão versus resistência à tração na flexão .....	122
Figura 77: Resistência à compressão versus módulo de elasticidade para os dois conjuntos de equipamentos de ensaio.....	126



## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1: Valores da massa específica aparente do concreto leve estrutural .....	41
Tabela 2: Especificações técnicas do cimento – CP V ARI Fácil Holcim .....	53
Tabela 3: Propriedades da sílica ativa .....	56
Tabela 4: Propriedades das fibras de polipropileno .....	58
Tabela 5: Massa específica, resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade - Traço I .....	72
Tabela 6: Massa específica, resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade - Traço II .....	72
Tabela 7: Traços analisados – Ajuste de dosagem – Parte I .....	74
Tabela 8: Resultados de massa específica, relação a/c e resistência à compressão .....	75
Tabela 9: Ajuste do EPS nos traços de concreto leve.....	81
Tabela 10: Redução do consumo de cimento .....	82
Tabela 11: Dosagens com sílica ativa.....	84
Tabela 12: Avaliação do índice de desempenho à compressão da sílica ativa.....	85
Tabela 13: Dosagens com fibras de polipropileno.....	86
Tabela 14: Dosagens com adição de fibras de aço.....	87
Tabela 15: Identificação e descrição das dosagens.....	90
Tabela 16: Características das dosagens no estado fresco e endurecido .....	90
Tabela 17: Resistência à compressão e resistência remanescente.....	91
Tabela 18: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade .....	94
Tabela 19: Absorção, índice de vazios e massa específica .....	101
Tabela 20: Absorção de água, índice de vazios e massa específica – ensaios a 50 °C .....	104
Tabela 21: Resistência à compressão e interferência da exposição a temperaturas elevadas .....	106
Tabela 22: Perda de massa após secagem .....	108
Tabela 23: Resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico por dosagem.....	109
Tabela 24: Resistência à compressão e resistência à tração.....	110

Tabela 25: Resistência à tração e fator de tenacidade no concreto leve sem fibras.....	112
Tabela 26: Resistência à tração e fator de tenacidade do concreto leve com fibras.....	113
Tabela 27: Resistência à compressão e resistência à tração do concreto leve com EPS.....	121
Tabela 28: Fator de eficiência.....	122
Tabela 29: Módulo de elasticidade dinâmico, carga de ruptura e resistência à compressão (ELE-Dinâmico).....	124
Tabela 30: Módulo de elasticidade estático, carga de ruptura e resistência à compressão (INSTRON-Estático).....	125

# LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

---

%	Percentual
°C	Graus Celsius
a.C.	Antes de Cristo
a/c	Relação água/cimento
cm <sup>2</sup> /g	Centímetro quadrado por grama
EPS	Poliestireno expandido (expanded polystyrene)
g	Grama
$\gamma$	Massa específica aparente
g/cm <sup>2</sup>	Grama por centímetro quadrado
g/cm <sup>3</sup>	Grama por centímetro cúbico
GPa	Gigapascal
h	Hora
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico
kN	Quilonewton
m <sup>2</sup> /kg	Metro quadrado por quilograma
mm	Milímetro
$\mu\text{m}$	Micrômetro
MPa	Megapascal
N.mm	Newton milímetro
$\rho_r$	Massa específica real
$\rho_s$	Massa específica seca
$\rho_{\text{sat}}$	Massa específica saturada





# SUMÁRIO

---

---

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>27</b>
1.1	<i>Breve histórico do concreto leve.....</i>	27
1.2	<i>Contexto e motivação.....</i>	28
1.3	<i>Etapas de execução e especificações.....</i>	29
1.4	<i>Objetivos.....</i>	30
1.5	<i>Justificativas.....</i>	30
1.6	<i>Organização da tese.....</i>	31
<b>2</b>	<b>Revisão bibliográfica .....</b>	<b>33</b>
2.1	<i>A sustentabilidade do concreto .....</i>	33
2.2	<i>Concreto com agregados reciclados.....</i>	34
2.3	<i>Concreto pré-fabricado.....</i>	35
2.4	<i>Concreto com polímeros.....</i>	36
2.5	<i>Concreto com adições minerais .....</i>	37
2.6	<i>Concreto reforçado com fibras .....</i>	38
2.7	<i>Concreto leve estrutural .....</i>	39
2.8	<i>Concreto leve com EPS.....</i>	41
2.9	<i>Propriedades e características do concreto leve com EPS .....</i>	43
2.10	<i>Concreto leve com EPS com adição de fibras de aço .....</i>	44
2.11	<i>Concreto leve com EPS com adição de fibras de polipropileno.....</i>	45
2.12	<i>Concreto leve com EPS com adições minerais (finos) .....</i>	45
2.13	<i>Aplicações do concreto leve com EPS .....</i>	46
2.14	<i>Panorama nacional da pesquisa do concreto leve com EPS.....</i>	48
2.15	<i>Considerações sobre a Revisão Bibliográfica.....</i>	49
<b>3</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>51</b>
3.1	<i>Considerações iniciais.....</i>	52

3.2	<i>Dosagens</i> .....	52
3.3	<i>Materiais utilizados</i> .....	53
3.3.1	Cimento.....	53
3.3.2	Agregado miúdo.....	53
3.3.3	EPS.....	54
3.3.4	Sílica ativa.....	56
3.3.5	Fibras de aço.....	56
3.3.6	Fibras de polipropileno.....	57
3.3.7	Aditivo.....	58
3.3.8	Outros materiais.....	58
3.4	<i>Dosagem</i> .....	59
3.5	<i>Mistura</i> .....	59
3.6	<i>Moldagem</i> .....	60
3.7	<i>Cura</i> .....	61
3.8	<i>Ensaíos</i> .....	62
3.8.1	Massa aparente no estado fresco.....	62
3.8.2	Trabalhabilidade.....	62
3.8.3	Massa aparente no estado endurecido.....	63
3.8.4	Módulo de elasticidade.....	64
3.8.5	Resistência à compressão.....	64
3.8.6	Resistência à tração por compressão diametral.....	66
3.8.7	Resistência à tração na flexão.....	66
3.8.8	Carga remanescente.....	67
3.8.9	Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	67
3.8.10	Comportamento do concreto leve com EPS exposto ao calor.....	68
3.8.11	Absorção de água por capilaridade.....	68

## **4 Resultados ..... 71**

4.1	<i>Dosagem inicial</i> .....	71
4.2	<i>Ajuste de dosagens</i> .....	73
4.2.1	Ajuste de dosagem – PARTE I.....	73
4.2.2	Ajuste de dosagem – PARTE II.....	80
4.2.3	Ajuste de dosagem – PARTE III.....	81
4.2.4	Ajuste de dosagens – PARTE IV.....	83
4.2.4.1	Sílica ativa.....	83

4.2.4.2	Fibras de polipropileno .....	85
4.2.4.3	Fibras de aço .....	87
4.3	<i>Dosagens finais</i> .....	89
4.3.1	Resistência à compressão e resistência remanescente .....	91
4.3.2	Absorção por capilaridade .....	93
4.3.3	Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica .....	100
4.3.4	Interferência da temperatura na resistência à compressão .....	106
4.3.5	Perda de massa após secagem por 72 h .....	108
4.3.6	Resistência à compressão versus módulo de elasticidade dinâmico .....	109
4.3.7	Resistência à compressão e à tração por compressão diametral .....	110
4.3.8	Resistência à tração na flexão e tenacidade .....	111
4.3.9	Resistencia à tração versus resistência à compressão .....	121
4.3.10	Fator de eficiência .....	122
4.4	<i>Interferência dos equipamentos de ensaio</i> .....	123
<b>5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>127</b>
5.1	<i>Considerações finais</i> .....	127
5.1.1	Traços com variação da granulometria do EPS (TF-1 e TF-2) .....	128
5.1.2	Traço com mistura de areia média e areia fina (TF-3) .....	128
5.1.3	Traços com redução do teor de EPS (TF-4 e TF-5) .....	129
5.1.4	Traço com fibras de aço (TF-6) .....	129
5.1.5	Traço com 10% de sílica ativa em substituição ao cimento (TF-7) .....	130
5.1.6	Traço com fibras de polipropileno (TF-8) .....	130
5.1.7	Traço composto (areia fina, sílica ativa e redução de EPS, TF-9) .....	131
5.2	<i>Sugestão para outras pesquisas</i> .....	132
<b>6</b>	<b>Referências .....</b>	<b>133</b>
	<b>Apêndice A – Ação do fogo .....</b>	<b>141</b>
	<b>Apêndice B – Resultados individuais .....</b>	<b>145</b>



# 1 Introdução

---

Concreto leve é um material que utiliza cimento Portland como aglomerante principal, com massa específica abaixo de  $2.000 \text{ kg/m}^3$ , sendo a baixa densidade decorrente do uso de agregados leves e/ou de incorporação de ar, e que pode ser obtida por meio de aditivos de base polimérica, agente espumífero ou outro processo, podendo conter adições minerais. Os materiais são misturados até formar um composto homogêneo e com fluidez adequada ao transporte, lançamento e adensamento.

## 1.1 Breve histórico do concreto leve

A aplicação dos concretos com agregados leves data de 1100 a.C., no México. Também se tem conhecimento histórico de 273 a.C., no Porto de Cosa, na Europa, sobre estruturas em concreto leve que resistiram às ações da natureza por mais de dois mil anos (ROSSIGNOLO, 2009).

Os romanos utilizaram concretos leves pozolânicos com massas específicas diferentes para construir a cúpula esférica do Panteão (AÏTCIN, 2000).

Em Roma, também foi utilizado concreto com agregados leves na estrutura de fundação e em diversas paredes do Coliseu. A aplicação de concreto leve pelos romanos também pode ser observada na Catedral de Santa Sofia, em Istambul. Após a queda do Império Romano, o uso de concreto com agregados leves foi limitado até o início do século XX, quando se iniciou a produção de agregados leves artificiais (ROSSIGNOLO, 2009).

O concreto leve pode ser confeccionado inteiramente com agregados leves ou associação de agregados leves com agregados normais. Em geral, utiliza-se areia natural como agregado miúdo. A massa específica dos agregados leves pode variar com a granulometria (METHA; MONTEIRO, 2008).

As primeiras aplicações dos agregados leves artificiais em concreto de cimento Portland ocorreram durante a Primeira Guerra Mundial, na construção de embarcações. Durante a Segunda Guerra Mundial, o uso desse material em embarcações foi mais intenso, permitindo economia de aço. Simultaneamente,

iniciaram-se pesquisas para aplicação desse material na construção civil. A primeira aplicação estrutural de concreto leve em edificações foi em 1922, e a primeira utilização em edifícios de múltiplos pavimentos ocorreu em 1929 (ROSSIGNOLO, 2009).

O fim da patente de produção dos agregados leves expandidos e a reconstrução do pós-guerra ajudaram a disseminar a tecnologia dos concretos leves pelo mundo em aplicações que se beneficiavam da redução da massa específica do concreto, tais como: edificações de múltiplos pavimentos, construções pré-fabricadas, estruturas especiais flutuantes, pontes e coberturas de grandes vãos (ROSSIGNOLO, 2009).

No Brasil, no final da década de 1960, iniciou-se a produção de argila expandida, com o intuito de utilizar concreto leve nos elementos pré-fabricados, facilitando o transporte e a montagem das peças para habitações, podendo melhorar o desempenho do processo produtivo. Desde então, a argila expandida encontra aplicação em diversos setores da construção civil nacional, e a tecnologia do concreto leve estrutural tem sido motivo de pesquisas em diversas universidades do Brasil (ROSSIGNOLO, 2009).

## **1.2 Contexto e motivação**

O concreto leve com EPS é um material em que a mistura de cimento e agregado miúdo envolve as pérolas de EPS, proporcionando um concreto de baixa densidade aparente. Na maioria das vezes, é utilizado em componentes da construção civil que não exigem grandes esforços (ABRAPEX, 2006).

Este trabalho é parte de um estudo da tecnologia de construção com concreto leve estrutural com o uso de poliestireno expandido (EPS) na mistura. Esse concreto é composto basicamente por cimento, agregado miúdo (areia), água, aditivos e pérolas de EPS, podendo conter sílica ativa ou adição de fibras.

O poliestireno expandido (EPS) é um material granular, inerte, com massa específica baixa, que entra na composição dos concretos e argamassas como agente incorporador de vazios, em forma pulverulenta, distribuídos de maneira uniforme e estável no interior da pasta de cimento, que resiste aos esforços decorrentes da mistura, lançamento ou bombeamento do material, permanecendo

estável até o início da pega normal do cimento. Deve ser armazenado até o instante do seu uso, mantendo-se em estado seco e isento de contaminação por outros materiais.

Devido aos benefícios promovidos pela redução da massa específica do concreto leve, boa isolamento térmica e acústica, aliados à considerável resistência mecânica, o emprego do concreto leve com EPS permite economia no custo final da obra, seja pela melhoria no dimensionamento estrutural, seja pela facilidade de manuseio e transporte (ABRAPEX, 2006).

Sua utilização proporciona menores esforços nas estruturas, economia com fôrmas e cimbramento e diminuição dos custos com transporte e montagem de construções pré-fabricadas.

### **1.3 Etapas de execução e especificações**

As etapas de execução do concreto leve são: caracterização dos materiais componentes, estudo de dosagem, ajuste e comprovação do traço e preparo do concreto leve. As operações de execução do concreto leve consistem no armazenamento dos materiais, medição e verificação das quantidades utilizadas e mistura desses materiais.

As especificações dos requisitos correspondentes à durabilidade da estrutura e de propriedades especiais do concreto leve, como consumo mínimo de cimento, relação água/cimento, módulo de elasticidade estático e outras propriedades necessárias à estabilidade e durabilidade da estrutura, durante a fase construtiva e durante sua vida útil, devem ser apresentadas na etapa de projeto das estruturas.

O concreto leve deve apresentar massa específica que não ultrapasse 2000 kg/m<sup>3</sup>. O desempenho acústico, térmico e a resistência ao fogo dos elementos a serem construídos devem ser especificados no projeto da mistura. O concreto leve deve apresentar uma massa fresca trabalhável para que depois de endurecido se torne um material homogêneo e compacto.

## 1.4 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral estudar o comportamento mecânico do concreto leve com EPS, para posterior aplicação do material em elementos estruturais pré-moldados, principalmente.

Como objetivos específicos, pretende-se otimizar as dosagens, melhorar seu desempenho mecânico e reduzir o consumo de cimento, visando tornar o concreto leve com pérolas de EPS mais sustentável e economicamente competitivo no mercado.

## 1.5 Justificativas

O concreto leve possibilita diminuição da armadura, do volume total de concreto e da energia utilizada no transporte e no processo construtivo. Porém, torna-se necessário aliar o desempenho mecânico com sua durabilidade, haja vista que as estruturas de concreto estão sujeitas a ações climáticas e necessitam desempenhar eficientemente sua capacidade de suporte conforme o projeto e se manterem íntegras durante toda sua vida útil.

A aplicação de concretos leves no Brasil geralmente utiliza a argila expandida como agregado leve em elementos pré-fabricados (ROSSIGNOLO, 2009).

A utilização de concreto leve, principalmente com EPS, torna o material mais sustentável ambiental e economicamente. Dessa forma, é necessário conhecer todas as variáveis de desempenho do produto, pois surge como uma alternativa para a execução na forma pré-moldada em obras de interesse social ou em edificações com sistemas construtivos não tradicionais.

Em uma edificação, entre as ações a que a estrutura está sujeita, destaca-se o peso próprio, que representa parte dos esforços que a estrutura deve resistir.

Fracionando a estrutura em três grupos de elementos, pilares, vigas e lajes, identifica-se que as lajes, na maioria das vezes, possuem baixos estados de tensão em serviço, pouca rigidez devida à inércia reduzida e, muitas vezes



necessitam ter suas dimensões aumentadas, para conferir estabilidade ao conjunto. Isso acarreta em uma elevação do peso próprio da estrutura.

Outra contribuição para elevação do peso próprio das estruturas está associada aos elementos de vedação (alvenarias).

A possibilidade de utilização de concreto leve estrutural com pérolas de EPS mostra-se como alternativa vantajosa para reduzir o peso próprio das peças em que ele é empregado. Cabe salientar que a utilização de alvenarias leves reduz em aproximadamente 20% a carga nos pilares e o consumo de aço (ABRAPEX, 2006).

Outra vantagem associada ao concreto leve com EPS é sua baixa capacidade de absorção de água no estado endurecido. O EPS não absorve a água disponível para hidratação dos compostos cimentícios pelo fato de ser uma esfera fechada e impermeável.

Dessa forma, a busca de um material que proporcione redução do peso próprio das edificações, aliada com a durabilidade da construção, justifica o estudo de concretos com peso específico reduzido.

Neste contexto, o concreto leve com EPS é uma alternativa, pois é possível obter um peso específico da ordem de  $12 \text{ kN/m}^3$ , 50% menor que o do concreto convencional, em média (CATOIA, 2012). A aplicação de um material pouco estudado, como o concreto leve estrutural com pérolas de EPS, justifica o estudo das diferentes dosagens e de suas propriedades mecânicas, foco principal desta pesquisa.

## 1.6 Organização da tese

O corpo da tese foi organizado em cinco capítulos. Neste primeiro são apresentados o histórico de utilização do concreto leve, o contexto e a motivação da pesquisa, as etapas de execução e especificações sobre o concreto leve com pérolas de EPS, bem como os objetivos e as justificativas do estudo.

O *Capítulo 2* é denominado “Revisão Bibliográfica” e foi elaborado a partir da coleta de estudos já realizados, com o objetivo de compreender o comportamento do concreto leve com EPS sobre aspectos de características mecânicas e de aplicabilidade do material, além de avaliar resultados de estudos já realizados.

O *Capítulo 3* aborda a metodologia desenvolvida durante o trabalho experimental, bem como as variáveis investigadas para caracterizar o concreto leve com EPS.

O *Capítulo 4*, denominado “Resultados”, apresenta o programa experimental e os resultados obtidos para diferentes dosagens de concreto leve com EPS. Com base nas análises e nos estudos comparativos desenvolvidos neste item, foram elaboradas as conclusões possíveis e pertinentes ao assunto em questão.

Finalmente o *Capítulo 5* traz as considerações finais do trabalho, de acordo com a análise dos resultados, e sugestões para novas pesquisas sobre o assunto.

## **2 Revisão bibliográfica**

---

Sendo o concreto o material artificial mais consumido no planeta, vários são os estudos que avaliam seu comportamento mecânico, variações de dosagens e incorporação de materiais alternativos, buscando racionalizar seu desempenho frente a parâmetros de sustentabilidade e otimizar o consumo de matérias-primas. Neste universo, é impossível imaginar a vida sem produtos à base de cimento.

O consumo elevado de concreto pelos humanos é o resultado de qualidades inerentes a esse produto, pois continua sendo um material de construção barato, com 85% de seu volume resultante de materiais locais de baixo custo (água e agregados), boa capacidade resistente às solicitações mecânicas e ao fogo, além de não se deteriorar facilmente e ser durável em muitos ambientes. Sua produção não requer tecnologia sofisticada para a maior parte de sua produção (AİTCIN, 2000).

O desenvolvimento sustentável traz enormes desafios para a indústria e para os profissionais. Uma maior racionalização da construção pode ser proporcionada pelo processo industrial, resultando em maior economia, melhor controle de qualidade e maior sustentabilidade.

O controle da origem e da forma de extração de matérias-primas para produção de agregados naturais é importante para a redução dos impactos ambientais, envolvidos tanto na atividade extrativa quanto na emissão de poluentes da etapa de transporte. O impacto do transporte depende das distâncias entre a extração e o consumo. Sendo assim, os agregados produzidos localmente ou transportados por vias férreas ou navegáveis contribuem de modo eficiente para a redução de impactos ambientais (JOHN, 2011).

### **2.1 A sustentabilidade do concreto**

O impacto ambiental é agravado pela informalidade nos processos de extração de agregados e de madeira, ao provocar a destruição descontrolada de áreas protegidas e o desperdício de matérias-primas. O controle direto da origem do

material e o licenciamento ambiental de fornecedores é uma necessidade para a produção de concreto sustentável (JOHN, 2011).

Para cada grupo de materiais como clínquer, adições, aditivos, fílers e agregados, existe um limite de desempenho que somente poderá ser ultrapassado por novas tecnologias ou por matérias-primas alternativas. No entanto, soluções sustentáveis precisam ter impacto significativamente inferior para justificar sua utilização (JOHN, 2011).

A busca por um material mais resistente, mais durável e que utilize menos matérias-primas de alto consumo energético, como por exemplo o clínquer, é sem dúvida um material mais sustentável (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Desde a segunda metade do século XX, parte do cimento está sendo substituída por uma ou mais adições minerais, cujo conhecimento, domínio da tecnologia e utilização se aprimoraram ao longo desse período. As vantagens dessa substituição são significativas tecnicamente, economicamente e ambientalmente, pois proporcionam melhoria da durabilidade das estruturas de concreto, redução dos custos de produção e redução das emissões de CO<sub>2</sub>, associadas à utilização de material residual (ISAIA; GASTALDINI, 2004).

Para reduzir a emissão de carbono associada à produção de cimento, é necessário diminuir o consumo de clínquer no produto final. Para tanto, por meio do emprego das adições minerais na indústria de produção de cimento e da popularização desse material na construção, com viabilidade técnica já comprovada, obtém-se um processo de ecologia industrial em que o impacto ambiental é reduzido de duas formas, a primeira no consumo de resíduos e a segunda na redução de emissão de CO<sub>2</sub> (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

## **2.2 Concreto com agregados reciclados**

No concreto convencional, os agregados apresentam baixíssima porosidade e são oriundos de rochas britadas, seixos e areias lavadas de rio, sendo a resistência, a durabilidade e a porosidade do material controladas pela pasta de cimento.

No entanto, quando parte desses agregados convencionais é substituída por agregados reciclados britados oriundos de resíduos de construção, o

concreto produzido é mais poroso, sendo a resistência mecânica e a durabilidade do material afetadas pela porosidade do agregado (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011).

Devido ao aquecimento do setor imobiliário e à restrição de áreas para deposição de resíduos da construção, a reciclagem apresenta-se como uma alternativa de redução de impactos e sustentabilidade. Porém, para maior eficiência, é necessário um acondicionamento adequado e a reutilização no próprio canteiro de obra onde o resíduo foi gerado. E, como a reciclagem e a utilização de agregados reciclados enfrentam deficiência de tecnologia, essas práticas não são muito difundidas nos municípios brasileiros (EVANGELISTA *et al.*, 2010).

Cabe salientar que existem resultados de pesquisas que apontam viabilidade técnica e econômica para a utilização de agregados reciclados no concreto, assim como apontam resultados de caracterização satisfatórios comparados ao concreto convencional, impulsionando a tecnologia para um emprego futuro. O uso de agregados reciclados será melhor difundido quando a necessidade de seu emprego sobrepuser as vantagens tecnológicas, seja por indisponibilidade de aterros, imposição governamental ou carência de matérias-primas. Cerca de 80% do resíduo da construção civil pode ser convertido em agregado reciclado, repercutindo em uma excelente redução do impacto ambiental e redução no custo de aquisição de materiais (EVANGELISTA *et al.*, 2010).

### **2.3 Concreto pré-fabricado**

As estruturas pré-fabricadas de concreto tornam-se sustentáveis devido à maior racionalização da construção, pois proporcionam economia de matérias primas naturais, minimização da produção de resíduos, utilização de materiais locais e materiais reciclados, preservação do patrimônio devido à flexibilidade e a adaptabilidade das edificações pré-fabricadas, redução de custos com manutenção e maior longevidade (DONIAK; GUTSTEIN, 2011).

O controle de qualidade na produção de elementos pré-fabricados de concreto, garantindo a resistência característica do concreto, melhorando sua eficiência energética e proporcionando racionalização da construção, indiretamente reduz o consumo de cimento quando comparado ao concreto produzido em canteiro de obra.

O emprego de concretos com alta resistência mecânica, elevada durabilidade e autoadensáveis na produção de peças pré-moldadas e pré-fabricadas promove a produção de estruturas mais sustentáveis, seja pela redução das dimensões das peças, pela redução de consumo de matérias-primas, redução de resíduos, redução de energia para confecção das estruturas de concreto e melhorias nos desempenhos térmico e acústico.

Com relação à sustentabilidade, as estruturas pré-fabricadas apresentam outros benefícios, tais como redução de fôrmas e andaimes nas obras, reutilização das peças, que podem ser montadas e desmontadas, e redução do peso próprio da estrutura sem perda de resistência mecânica.

A utilização de peças pré-moldadas, industrializando a construção, proporciona qualidade no canteiro de obras, com controle mais eficiente dos materiais e da produção, seja pela seleção de fornecedores, seja pela necessidade de qualificação da mão de obra.

## **2.4 Concreto com polímeros**

O concreto originalmente utilizou os polímeros como material ligante, substituindo ou trabalhando em conjunto com o cimento, resultando em concretos com alto desempenho mecânico, utilizados principalmente em casos de reparo e de manutenção das estruturas.

O concreto com polímeros apresenta, em geral, alta resistência mecânica, alto módulo de elasticidade, alta resistência química, além de permitir produção de componentes com formas rebuscadas e complexas, vantagens que favorecem a aceitação e a utilização do material na construção civil (GORNINSKI, 2011).

O concreto polimérico pode ser classificado como: concreto de polímero, concreto impregnado com polímero e concreto modificado com látex.

O primeiro é o resultado de uma mistura de agregados com um polímero como único aglomerante, não contém cimento e suas características mecânicas são semelhantes às do concreto convencional.

O segundo é um concreto impregnado com polímero que, após a secagem, preencherá totalmente ou parcialmente os poros, garantindo ao concreto baixa porosidade com elevada resistência mecânica e maior durabilidade.

Por fim, o concreto modificado com látex é proveniente da combinação de cimento Portland e uma dispersão polimérica utilizada na forma líquida como aditivo. A polimerização ocorre naturalmente por perda de água ou secagem, sem influenciar a hidratação. Apresenta aumento da trabalhabilidade e redução da permeabilidade, devido ao preenchimento dos poros por polímeros.

Atualmente, os materiais de origem polimérica também estão sendo utilizados junto com os agregados convencionais, de forma inerte na mistura, produzindo concreto leve.

## **2.5 Concreto com adições minerais**

Para que sejam utilizadas em concreto estrutural, as cinzas de origem residual, como a cinza da casca de arroz, a cinza volante e a cinza do bagaço de cana, necessitam de queima com temperatura controlada e de moagem prévia, com a intenção de aumentar a finura e incrementar o desempenho das propriedades mecânicas e da durabilidade (ISAIA *et al.*, 2010).

O emprego de adições minerais no concreto proporciona melhor resistência à fissuração térmica, aumento da resistência final e redução da permeabilidade devida ao refinamento dos poros, fortalecendo a zona de transição (pasta – agregado) e uma maior resistência ao ataque químico, aumentando a durabilidade das estruturas de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A cinza volante e a escória granulada de alto forno são resíduos com grande disponibilidade e podem ser utilizadas em substituição ao cimento, em elevados teores, apresentando vantagens significativas ao concreto produzido. O emprego associado dessas adições em percentuais que podem chegar a 90% de substituição ao cimento pode representar redução no custo de produção do concreto, redução no consumo de energia e na emissão de CO<sub>2</sub> e aumento do índice de durabilidade do material (ISAIA; GASTALDINI, 2004).

Com relação à cinza da casca de arroz, seu descarte ocorre em condições não sustentáveis na maioria das vezes, porque os engenhos de arroz não

têm interesse no beneficiamento, descartando a cinza como resíduo poluidor do ambiente. No entanto, é possível dar um destino mais sustentável à cinza de casca de arroz, com sua utilização, na situação “*in natura*”, como é obtida após a queima, mesmo sem moagem, adicionando o material diretamente na mistura de concreto, aumentando seu potencial de utilização em obras de pequeno e médio porte, em regiões próximas às zonas produtoras do material residual, minimizando o transporte e proporcionando um destino mais adequado e sustentável à cinza e reduzindo o consumo de clínquer (ISAIA *et al.*, 2010).

Cabe salientar que a utilização de cinzas na produção do concreto, em substituição ao cimento, requer que o teor de utilização empregado seja compatível com a origem da cinza, ou seja, para o caso de cinza de casca de arroz, sem beneficiamento, o percentual de substituição está em aproximadamente 15%, possibilitando produzir estruturas de concreto com capacidade mecânica semelhante à do concreto convencional e com vantagens expressivas sobre questões de durabilidade (ISAIA *et al.*, 2010).

A utilização de sílica ativa é recomendada quando se deseja aumentar a resistência à compressão e também reduzir a segregação, uma vez que seu emprego torna a argamassa mais viscosa. Sua introdução nas dosagens de concreto está na ordem de 7% a 10% da massa de aglomerantes das dosagens de concreto (AİTCIN, 2000).

Os benefícios da utilização de sílica ativa estão relacionados à sua finura, que preenche os vazios entre as partículas maiores de cimento, sua rápida reação pozolânica e ao aumento da fluidez do concreto. A combinação desses efeitos benéficos resulta em uma microestrutura densa, reduzindo a porosidade da pasta de cimento, aumentando a resistência do concreto à compressão e reduzindo sua permeabilidade (AİTCIN, 2000).

## **2.6 Concreto reforçado com fibras**

O tipo de fibra (aço, plástico, vidro e matérias naturais), sua forma e tamanho, e sua fração volumétrica (baixa, moderada e alta) na dosagem têm efeito significativo nas propriedades do concreto reforçado com esse material. A incorporação de fibras no concreto aumenta a resistência à flexão. Elas atuam,



principalmente, na melhoria da tenacidade do concreto proporcionada pela resistência das fibras ao arrancamento (FIGUEIREDO, 2011).

Com relação ao comprimento das fibras, quanto maior, mais reduzem a trabalhabilidade da mistura. As fibras longas diminuem, também, as microfissuras, nos casos de carregamentos de maior intensidade. As fibras curtas com distribuição uniforme no compósito tendem a aumentar a resistência e a ductilidade.

Com relação à fração volumétrica, o comportamento é análogo ao do comprimento, pois quanto maior o volume de fibras na mistura, menor a trabalhabilidade do concreto. Em geral, para fibras de aço, elas ficam limitadas a 2% do volume de concreto (FIGUEIREDO, 2011).

Os concretos reforçados com fibras, apesar da redução da trabalhabilidade, apresentam aumento da tenacidade, impacto e resistência à fadiga.

## **2.7 Concreto leve estrutural**

Com a necessidade de reconstrução da Europa no período pós-guerra, houve um aumento do estudo e da aplicação de concreto leve estrutural. Porém, somente após a década de 1960, importantes edifícios de múltiplos pavimentos foram executados com concreto leve estrutural. Essa tecnologia também foi aplicada em diversas construções pré-fabricadas (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011).

Por serem obtidos em processos industriais, os agregados leves são classificados com base na matéria-prima de origem e no processo de fabricação, com massa unitária variando entre  $650 \text{ kg/m}^3$  e  $900 \text{ kg/m}^3$  (ROSSIGNOLO, 2009).

Em relação ao concreto convencional, o concreto leve caracteriza-se pela redução da massa específica através da substituição de parte sólida da mistura por ar (ROSSIGNOLO, 2009).

Para assegurar os níveis mínimos de trabalhabilidade, de proteção das armaduras e de sua ancoragem no concreto leve, é indicada a utilização de consumos de cimento acima de  $300 \text{ kg/m}^3$ . No entanto, com ajuste granulométrico de agregados graúdos leves e agregados tradicionais miúdos, é possível otimizar a dosagem, aumentando a coesão, a segregação e a resistência à compressão do concreto leve (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011).

Nas dosagens de concretos leves, a resistência à compressão em geral está relacionada ao consumo de cimento, enquanto nos concretos convencionais associa-se ao fator água/cimento. A trabalhabilidade, em misturas de alta fluidez, merece atenção especial para a mistura não segregar e fazer com que o agregado leve flutue. Outras causas da sedimentação da argamassa estão associadas a um abatimento elevado e vibração excessiva (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os parâmetros mais utilizados na caracterização dos concretos leves estruturais são a resistência à compressão, a massa específica e o fator de eficiência (FE) do material. Essas propriedades estão relacionadas, diretamente, com o tipo e a granulometria do agregado utilizado. O fator de eficiência ( $\text{MPa}\cdot\text{dm}^3/\text{kg}$ ) relaciona a resistência à compressão (MPa) com a massa específica aparente do concreto ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ) (ROSSIGNOLO, 2009).

O custo final de estruturas com concreto leve é mais baixo que em uma estrutura convencional, mesmo o custo isolado do concreto leve sendo maior que o do concreto convencional. Essa economia é resultado da redução de peso e do menor custo com as fundações (FERREIRA, 2013).

O uso de poliestireno expandido (EPS) na produção de concreto leve pode viabilizar o emprego de resíduos de materiais dessa natureza e tornar possível usufruir da baixa massa específica do material resultante em aplicações estruturais, uma vez que é possível encontrar características compatíveis com o concreto convencional (CATOIA, 2012).

As principais aplicações do concreto leve são na produção de elementos estruturais pré-moldados e painéis pré-fabricados, devido à redução de custos com moldagem, transporte e manuseio (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A viabilidade técnica e econômica do concreto leve para aplicação em diferentes setores da construção civil é mais evidenciada em estruturas em que grande parte das solicitações é decorrente do peso próprio e em construções que envolvem grande volume de transporte de componentes pré-fabricados. Outra viabilidade do concreto leve está relacionada ao estado fresco, em que proporciona menor desgaste das fôrmas, facilidade de adensamento, boa coesão e homogeneidade da mistura. (ROSSIGNOLO, 2009).

No sistema construtivo com concreto leve pré-fabricado é possível conseguir uma redução de 20% a 50% com custos de transporte e de tempo de montagem (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005).

Quando comparado ao concreto convencional, o concreto leve utilizado em vedação reduz o consumo de energia para condicionamento térmico das edificações, pois a utilização de concretos leves em fachadas e coberturas reduz a absorção e a transferência de calor para o interior da construção (ROSSIGNOLO, 2009).

O concreto leve estrutural, em geral, apresenta massa específica aparente abaixo de 2000 kg/m<sup>3</sup>. A Tabela 1 apresenta as indicações das principais normalizações de referência.

Tabela 1: Valores da massa específica aparente do concreto leve estrutural

Referência	Massa específica aparente $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )
ABNT NBR NM 35 (1995)	1680 < $\gamma$ < 1840
ACI 213R-03 (2003)	1120 < $\gamma$ < 1920
EUROCODE 2 (2007)	900 $\leq \gamma \leq$ 2000
NS 3473 E (1998)	1200 < $\gamma$ < 2200
CEB-FIP (1977)	< 2000
RILEM (1975)	< 2000

Fonte: ROSSIGNOLO, 2009.

Para os concretos leves, tanto os valores encontrados para a resistência à compressão diametral quanto para a resistência à flexão, em termos absolutos, são inferiores aos observados nos concretos convencionais com mesma resistência à compressão. Isso pode ser decorrente do elevado volume de vazios do concreto leve (ROSSIGNOLO, 2009).

## 2.8 Concreto leve com EPS

O concreto leve com EPS é obtido pela mistura em proporções adequadas e numa sequência específica e pré-fixada, usando pérolas de poliestireno expandido (EPS) com cimento, areia natural, água, aditivo (opcional), adições minerais (opcionais) e fibras (opcionais). É desenvolvido com o objetivo de melhorar a utilização e a eficiência em relação às atuais composições para obtenção de concretos leves, utilizados em construções (KERBAUY, 2011).

O poliestireno expandido, cuja sigla internacional é EPS, no Brasil é conhecido comercialmente como “Isopor<sup>®</sup>”. Trata-se de um plástico rígido, resultante da polimerização do estireno em água. No processo de expansão, aumenta até 50 vezes o tamanho original. As pérolas de EPS, já expandidas, estão disponíveis comercialmente, independentes de condições regionais, e têm uma estrutura de célula fechada que consiste em 98% de ar e apenas 2% de poliestireno. Sendo assim, apresentam baixa permeabilidade, não absorvem a água de amassamento do concreto, não contaminam o meio ambiente e são totalmente reaproveitáveis e recicláveis (ABRAPEX, 2006).

A NBR 11752:2007 (ABNT, 2007) define o poliestireno expandido (EPS) como um material plástico celular rígido, originalmente de cor branca, produzido pela expansão de pérolas pré-expandidas de poliestireno, podendo ser fabricado nas condições de não retardante à chama (classe P) e de retardante à chama (classe F).

O EPS tem inúmeras aplicações, porém na construção civil sua utilização é mais difundida. Apresenta como principais vantagens a baixa condutividade térmica, o baixo peso, boa resistência mecânica, baixo índice de absorção de água, facilidade de manuseio, versatilidade, durabilidade e boa absorção de impactos (ABRAPEX, 2006).

Os sistemas construtivos utilizando o concreto leve estrutural com EPS favorecem aspectos como racionalização e industrialização da construção, rapidez e segurança, redução do consumo de materiais extrativos (areia e brita), redução do consumo de energia com produção, manuseio, transporte e instalação. Devido ao seu elevado nível de isolamento térmico, reduz o consumo de energia pós-ocupação, em qualquer região (ABRAPEX, 2006 e KERBAUY, 2011).

A técnica convencional de preparo do concreto leve com EPS, além de considerar a finalidade e o objetivo de utilização, sugere que ao misturar os materiais seja associado à água de amassamento um material adesivo (tipo cola branca) com a finalidade de agregar o cimento ao EPS (ABRAPEX, 2006).

A utilização de um látex polimérico (cola) melhora a ligação do EPS com a pasta de cimento. Essa melhoria também pode ser percebida com a adição de nanossílica (CHEN; LIU, 2007).

As vantagens econômicas da utilização de peças pré-moldadas de concreto estrutural leve estão diretamente relacionadas à redução de mão de obra,

redução dos custos de transporte, equipamentos de içamento e colocação, em relação às paredes de concreto usual, redução nas cargas na fundação, redução de armaduras e redução do prazo de colocação (KERBAUY, 2011).

Uma característica do concreto leve com EPS está relacionada ao fato do EPS não absorver calor e, no estado fresco, o calor de hidratação do cimento não se dissipa, acelerando a pega. Assim, pode ser considerada uma propriedade vantajosa, permitindo a concretagem de peças de grande volume sem necessidade de cura a vapor (ABRAPEX, 2006).

## **2.9 Propriedades e características do concreto leve com EPS**

Como o concreto leve com EPS não possui agregados graúdos na sua composição, normalmente apresenta uma maior fluidez que o concreto convencional. Por isso, a medida de consistência pode não ser possível de determinar pelo ensaio de abatimento prescrito pela NBR NM 67:96 (ABNT, 1996), e sim pelo ensaio de espalhamento da NBR 15823-2:2010 (ABNT, 2010), com o qual se observa a homogeneidade da mistura, a ausência de segregação e a coesão da mistura, mantendo-se, de preferência, o formato arredondado do espalhamento.

Segundo CATOIA (2012), o concreto leve com EPS é um material inovador, por isso não existem normas específicas que certifiquem sua utilização como material estrutural. Para isso, é necessário que as características de desempenho do material sejam comprovadas e adequadas ao tipo de utilização, uma vez que reúne condições viáveis para emprego em diversos tipos de construção.

A aplicação de pérolas de EPS, que podem diminuir as propriedades de resistência, proporciona efeito benéfico nas questões relacionadas ao conforto térmico (CHEN; LIU, 2007), acompanhado por melhoria na resistividade elétrica do compósito (SADRMOMTAZI *et al.*, 2012).

Quando o teor de EPS na dosagem de concreto leve é aumentado, sua massa específica e sua resistência à compressão são reduzidas (MADANDOUST; RANJBAR; MOUSAVI, 2011) e a absorção é aumentada (BABU; BABU, 2004), porque a proporção de matriz cimentícia aumenta e é a responsável pela absorção de água.

Para concretos com tamanho maior de pérolas de EPS, a resistência à compressão e a massa específica são reduzidas (BABU; BABU, 2004 e MILED; SAB; LE ROY, 2007).

O concreto leve com EPS, além de apresentar vantagens relacionadas à redução de peso próprio, apresenta melhorias nas propriedades térmicas se comparado ao concreto convencional (BABU; BABU, 2004). Com o aumento do teor de EPS, a condutividade térmica do concreto leve com EPS diminui (XU *et al.*, 2016).

O concreto com EPS é capaz de reter a carga após a ruptura, sem desintegração. Mesmo após a ruptura, o EPS não se solta da matriz cimentícia (BABU; BABU; WEE, 2006).

O EPS no interior do concreto leve pode reduzir a permeabilidade e aumentar a resistência ao ataque químico devido à natureza celular, fechada e inerte das pérolas de poliestireno expandido (BABU; BABU, 2004)

O concreto leve com EPS apresenta um bom comportamento no desempenho de aderência das barras de aço, favorecendo a perspectiva para aplicações estruturais (PECCE *et al.*, 2015).

Em geral, os concretos leves com agregados leves têm índice de absorção de água superior a 8%. O concreto com EPS apresenta absorção entre 2,8% e 6,9%, indicando a boa qualidade do concreto (RANJBAR; MOUSAVI, 2015).

## **2.10 Concreto leve com EPS com adição de fibras de aço**

A adição de fibras de aço melhora significativamente a resistência à tração e o comportamento pós-fissuração. As fibras de aço atenuam a retração por secagem, indicando um benefício significativo na ductilidade do concreto leve (CHEN; LIU, 2004 e CHEN; FANG, 2009).

A adição de fibras ao concreto leve com EPS, durante a mistura, reduz a sedimentação das pérolas de EPS e melhora a uniformidade do material, apesar de reduzir a trabalhabilidade, em comparação com o concreto com EPS sem fibras (CHEN; FANG, 2009).

As fibras de aço permitem que a ruptura do concreto seja gradual ao aumento de carga, evitando a ruptura brusca (CHEN; LIU, 2004).

## 2.11 Concreto leve com EPS com adição de fibras de polipropileno

O concreto leve estrutural com EPS pode ser reforçado com fibras, que muitas vezes podem não só incrementar a resistência à compressão, mas proporcionar boas características de absorção de energia.

As fibras de polipropileno melhoram o desempenho frente à retração plástica, aumentam a resistência à tração e não afetam significativamente as outras propriedades mecânicas do concreto leve estrutural com pérolas de EPS. Também evitam a ruptura frágil na flexão, mantendo a carga e a deformação sem desintegração (SADRMOMTAZI et al., 2012).

## 2.12 Concreto leve com EPS com adições minerais (finos)

O comportamento do concreto leve com EPS contendo adições minerais como material suplementar ao cimento, como por exemplo sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz, foi pesquisado por BABU e BABU (2003 e 2004), BABU, BABU e WEE (2005) e SADRMOMTAZI *et al.* (2012), com o objetivo principal de estudar sua resistência, seu desempenho e sua durabilidade.

A necessidade de autoadensabilidade do concreto leve com EPS é muitas vezes necessária devido ao adensamento mecânico facilitar a segregação da mistura. No estado fresco existe a tendência de segregação do concreto leve com EPS, pois, para viabilizar a moldagem utilizam-se aditivos superplastificantes que podem permitir que as pérolas de EPS migrem para a superfície. Visando minimizar esse efeito deletério, a adição de sílica ativa ou nanossílica é uma alternativa, além de proporcionarem ganho no desempenho mecânico do produto final (MANDADOUST; RANJBAR; MOUSAVI, 2011).

Quando o concreto leve com EPS é produzido com substituição do cimento por sílica ativa e cinza da casca de arroz, o comportamento do material mostra aceitável resistência e densidade para utilização estrutural (SADRMOMTAZI *et al.*, 2012).

A resistência à compressão dos concretos leves com EPS, contendo cinzas volantes, apresenta um ganho contínuo no comportamento estrutural. Esse

concreto também proporciona menor absorção e melhor resistência química (BABU; BABU; WEE, 2006).

A permeabilidade aos íons cloreto dos concretos leves tende a ser menor, em comparação com a dos concretos convencionais, reduzindo diretamente as taxas de corrosão do concreto leve (BABU; BABU, 2004).

Segundo BABU e BABU (2003), o crescimento da porcentagem de sílica ativa leva a um aumento da resistência à compressão. Os resultados de absorção, em 30 minutos e a absorção final, mostram que misturas feitas com areia e EPS têm níveis mais baixos de absorção, em comparação com as misturas que contêm agregados tradicionais. O desempenho do concreto leve com EPS e sílica ativa pode ser considerado bom, em termos da sua permeabilidade e resistência a penetração de íons cloreto.

A utilização de sílica ativa pode aumentar a resistência do concreto leve em 15%, melhorando a homogeneidade da mistura e a ligação das pérolas de EPS com a pasta de cimento (CHEN; LIU, 2004).

## 2.13 Aplicações do concreto leve com EPS

O concreto com pérolas de EPS pode ser utilizado em painéis de revestimento, divisórias, sistemas de pavimentação como material de sub-base de pavimentos e lastro de vias férreas, material de construção para estruturas marítimas (fundos e cercas flutuantes) e contenção de impacto em plataformas petrolíferas (BABU; BABU, 2003).

Devido a suas boas características de absorção de energia, o concreto leve com EPS pode ser utilizado na camada de proteção de uma estrutura a fim de contribuir na resistência ao impacto (CHEN; LIU, 2004).

A procura de concreto leve em construções modernas, tais como edifícios altos, estruturas *off-shore* e pontes longas está em ascensão. Esse interesse surge a partir da necessidade de reduzir o volume de muitos elementos estruturais, como por exemplo, a redução das fundações por limitação de espaço, aliado à procura de melhorias das propriedades térmicas para beneficiar melhoras de conforto térmico e durabilidade. Sendo assim, o concreto leve com EPS torna-se um material promissor para atender esses interesses (LIU; CHEN, 2014).



MORHAMMED e ZAIN (2016) estudaram a aplicação do concreto leve com EPS e sílica ativa em barreiras de separação de pistas de rolamento. Os resultados demonstraram que apenas a parte externa de frente para o impacto apresentou falha. A flexibilidade das pérolas de EPS facilita a melhoria de dissipação de energia, por isso não foram observadas falhas nas outras partes da barreira.

A Figura 1, a Figura 2 e a Figura 3 apresentam exemplos de elementos estruturais confeccionados em concreto leve com pérolas de EPS.



Figura 1: Laje de concreto leve com EPS durante içamento (KERBAUY, 2011)



Figura 2: Painel de fechamento de Concreto Leve com EPS (PINHEIRO, 2016)



Figura 3: Painel PI de Concreto Leve com EPS (KERBAUY, 2011)

## 2.14 Panorama nacional da pesquisa do concreto leve com EPS

CATOIA (2012) estudou a caracterização de concreto leve com pérolas de EPS e sua aplicação em lajes maciças pré-moldadas. Seu estudo apontou a viabilidade do material, em especial pela redução da massa específica. Os valores encontrados para a resistência mecânica e as características do material são compatíveis com a produção e aplicação em lajes pré-moldadas e em demais peças submetidas a moderadas tensões de compressão.

FERREIRA (2013) estudou o projeto de um edifício com elementos pré-moldados de concreto leve com EPS e de concreto autoadensável com peso normal. Verificou que os custos com produção e transporte apontam vantagens do concreto com EPS no custo global do empreendimento.

SCHACKOW (2014) observou vantagens na redução do peso das estruturas quando se emprega concreto leve com EPS, com massa específica entre  $1070 \text{ kg/m}^3$  e  $1250 \text{ kg/m}^3$ , além de boa capacidade de isolamento térmico e durabilidade satisfatória do material. Comparado com concreto leve com vermiculita de mesma ordem de massa específica, o concreto leve com isopor apresentou maior resistência.

SILVA, FREITAS e CESAR (2014) estudaram a capacidade de aderência de barras de aço ao concreto leve com EPS e observaram que, apesar de encontrarem valores menores que a do concreto convencional, devido à menor tenacidade, a utilização desse material não é inviabilizada. No entanto, os resultados encontrados são inferiores aos do concreto convencional, o que era de se esperar, e são necessários controles mais rígidos nas etapas de escolha da dosagem e de execução do concreto leve com EPS.

SARTORTI (2015) estudou o comportamento dinâmico de lajes de concreto leve com pérolas de EPS, e o material apresentou resultados satisfatórios para a aplicação em elementos estruturais.

## **2.15 Considerações sobre a Revisão Bibliográfica**

Alguns aspectos são relevantes nos estudos de concreto leve com pérolas de EPS. Ressalta-se que para concreto leve com mesma massa específica, quanto maior o tamanho das pérolas, menor será a resistência à compressão. Quanto maior o percentual de EPS, menor a densidade do concreto e menor a resistência à compressão.

A dosagem adequada de um concreto leve é regida pelas propriedades desejadas, tais como: densidade, resistência, comportamento térmico e custo. O uso de materiais finos reativos, como escória de alto-forno, cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, melhoram o desempenho mecânico do material.

A adição de fibras nas misturas de concreto leve com EPS beneficia o desempenho mecânico do material e mantém a homogeneidade no estado fresco, evitando a segregação, porém interfere na trabalhabilidade.

Atualmente, o concreto leve com EPS pode ser utilizado em painéis de revestimentos, divisórias, sub-base de pavimentação, estruturas marítimas flutuantes e material para absorção de energia (BABU; BABU, 2003; CHEN; LIU, 2004 e LIU; CHEN, 2014).

Pode ser utilizado, também, em edifícios de múltiplos pavimentos, em lajes e em paredes, estruturais ou não, e em várias outras aplicações, arquitetônicas ou estruturais.

A utilização de uma alvenaria leve com EPS, que pode ser de painéis de concreto leve, por exemplo, em substituição ao tijolo furado em edifícios de múltiplos pavimentos, tende a reduzir a carga nos pilares em aproximadamente 20%, repercutindo em uma redução no consumo de aço na ordem de 18%, considerando que seja mantido o volume de concreto nos pilares (ABRAPEX, 2006)

É possível que no futuro existam mais estruturas de engenharia civil em que se utilize concreto leve, pois a massa unitária reduzida pode tornar-se uma vantagem fundamental e econômica. No entanto, o custo de produção será mais

elevado, a etapa de produção mais precisa e o concreto leve, ainda assim, não será mais resistente que o convencional de massa unitária normal e mesma relação água/aglomerante (AÏTCIN, 2000).

### 3 Metodologia

---

Neste capítulo é indicada a metodologia adotada para realizar a pesquisa experimental desta tese. São apresentados os ensaios realizados, assim como os procedimentos adotados para dosagem e mistura.

A investigação experimental deste trabalho foi dividida em três etapas: dosagem inicial, ajuste de dosagens e dosagens finais, conforme apresentado na Figura 4. Os traços do concreto leve estudados contém cimento, agregado miúdo, água, aditivo superplastificante e EPS em pérolas.

O poliestireno expandido utilizado na forma de esferas foi empregado nas misturas como agente incorporador de vazios e, conseqüentemente, proporcionou redução do peso do concreto.

Para melhorar o desempenho mecânico utilizaram-se fibras de aço, e para reduzir a porosidade e beneficiar questões relacionadas à durabilidade das estruturas confeccionadas com esse material foi empregada sílica ativa. Em todos os traços foi utilizado aditivo superplastificante para melhorar a trabalhabilidade da mistura.

Para contemplar esta pesquisa, analisaram-se resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, massa específica, resistência à tração na compressão diametral e na flexão, absorção de água por imersão e capilaridade e comportamento do EPS submetido a calor, para concretos de diferentes dosagens. Com relação ao estudo pontual de cada variável, foi necessário confeccionar corpos de prova padronizados para análise conforme normalização vigente.

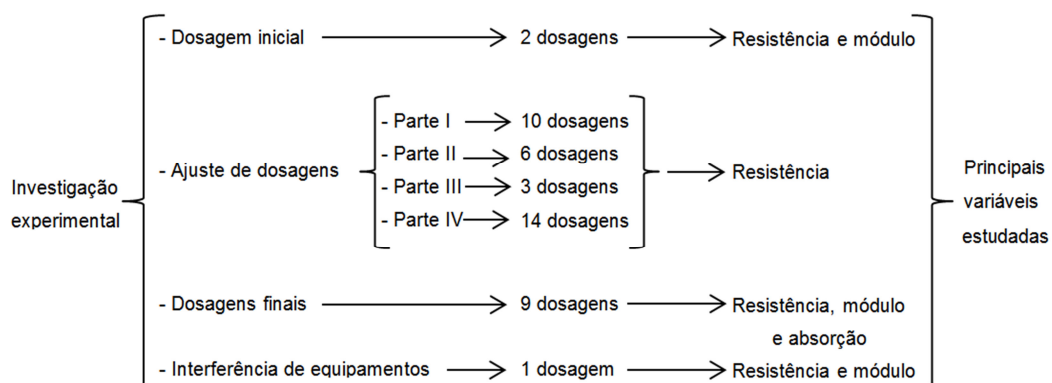


Figura 4: Esquema do desenvolvimento da investigação experimental

### 3.1 Considerações iniciais

Considerando-se a definição de argamassa como sendo uma mistura homogênea de aglomerante, agregado miúdo e água, podendo conter adições e aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, pode-se entender que este estudo trata da avaliação de argamassa leve com EPS.

No entanto, a definição de concreto o considera como resultado da mistura de aglomerante, agregado miúdo, agregado graúdo e água, podendo conter adições e aditivos, com razoável resistência à compressão e durabilidade. Levando em conta, ainda, que o concreto deve ter uma boa distribuição granulométrica a fim de preencher todos os vazios, pois a porosidade tem influência na permeabilidade e na resistência das estruturas de concreto, as finalidades deste trabalho estão mais fundamentadas numa pesquisa sobre concreto leve com EPS.

Salientando que as referências internacionais sobre o assunto também tratam o objeto de estudo como um tipo de concreto, escolheu-se por manter a indicação de “CONCRETO LEVE COM EPS”, visto que se pode considerar o material como um concreto especial, para o qual existe a possibilidade de utilização de agregados graúdos, que não foram contemplados nesta pesquisa.

### 3.2 Dosagens

Os traços de concreto leve com EPS estudados foram considerados em massa, com a parcela de EPS inserida em volume. Para assegurar condições satisfatórias de resistência e durabilidade, conforme indicado na literatura, o consumo de cimento foi acima de  $300 \text{ kg/m}^3$  de concreto leve, atendendo também a NBR 12655:2015 (ABNT, 2015), que especifica consumo mínimo de cimento de  $280 \text{ kg/m}^3$ , para uma classe de agressividade moderada.

No primeiro estágio da pesquisa foi realizado um estudo-piloto que partiu de uma dosagem inicial contemplada por duas misturas diferentes, visando identificar o comportamento do material no estado fresco, no misturador, e posteriormente foram determinadas suas propriedades mecânicas.

Para continuidade do estudo, baseado nas duas dosagens iniciais e nos resultados encontrados, partiu-se para um estudo refinado da variação dos

componentes dos traços de concreto leve com EPS, buscando melhorar o desempenho mecânico do material e encontrar um concreto com massa específica aparente aproximada de  $1250 \text{ kg/m}^3$ . Esse estudo contemplou um conjunto de traços que nortearam a etapa final deste trabalho, na qual foi avaliado um conjunto de propriedades do concreto.

No capítulo em que os resultados são apresentados, as diferentes etapas de dosagem são identificadas por dosagem inicial, ajuste de dosagens e dosagens finais, onde foi avaliado desempenho do concreto leve com pérolas de EPS para diferentes misturas.

### 3.3 Materiais utilizados

Nos traços de concreto leve com EPS estudados foram usados materiais previamente caracterizados e especificados.

Nos itens que seguem são apresentadas as características de cada material utilizado no desenvolvimento deste trabalho. Cabe salientar que a água em condições de potabilidade utilizada em todas as misturas foi proveniente da rede de distribuição.

#### 3.3.1 Cimento

Em todo o estudo foi utilizado cimento CP V – ARI da marca Holcim, comercializado pelo rótulo “CPV ARI Fácil”. Cabe salientar que as principais especificações fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Especificações técnicas do cimento – CP V ARI Fácil Holcim

Características	Valor
Resistência à compressão aos sete dias	46 MPa
Início de pega	120 min
Fim de pega	180 min
Blaine	4700 $\text{cm}^2/\text{g}$

Fonte: LafargeHolcim

#### 3.3.2 Agregado miúdo

Para todo o estudo foram utilizados dois tipos de agregado miúdo: uma areia média, que esteve presente em todas as dosagens, e uma areia fina, usada

em dosagens específicas. As curvas granulométricas, de acordo com a NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003), são apresentadas na Figura 5.

Cabe salientar que todo o material retido na peneira de abertura 4,8 mm foi descartado. A parcela referente a agregado nas dosagens foi inserida em peso, e o agregado encontrava-se seco. Para a areia fina, o diâmetro máximo do agregado foi 0,6 mm e o módulo de finura, 2,3. Para a areia média, o diâmetro máximo do agregado foi 4,8 mm e o módulo de finura, 3,0.

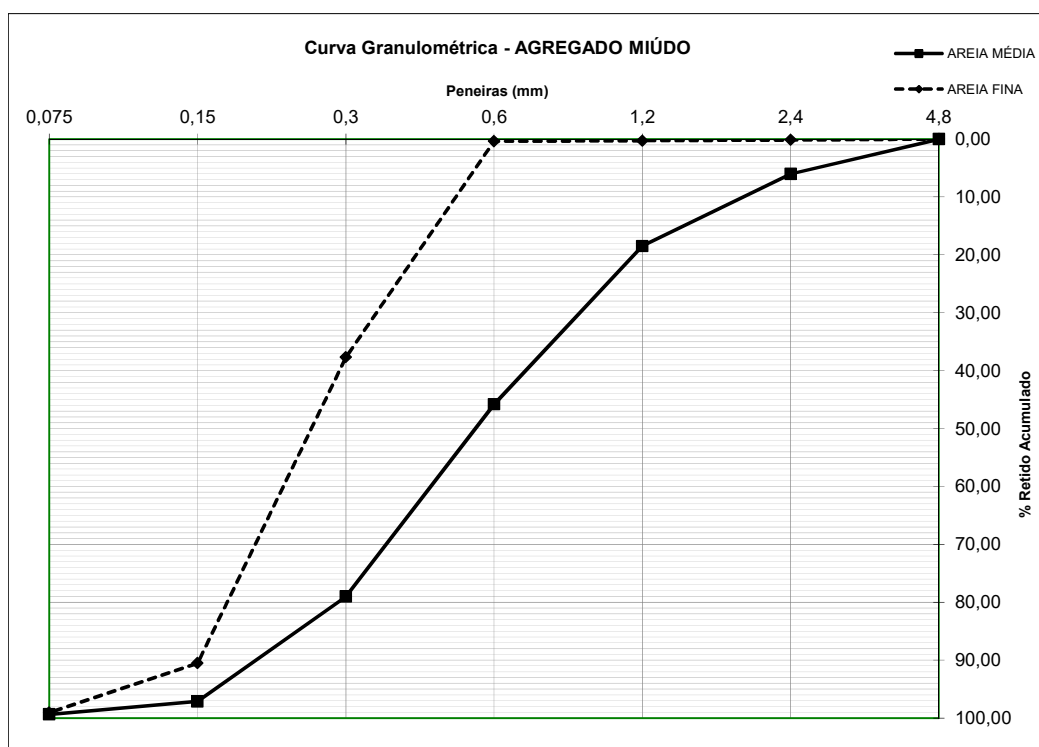


Figura 5: Curva granulométrica da areia fina e da areia média

### 3.3.3 EPS

O poliestireno expandido –EPS– sob formato esférico, conhecido por pérolas de EPS, é resultado 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. Os produtos finais de EPS são inertes, não contaminam o solo, água e ar. São 100% reaproveitáveis e podem ser reciclados infinitas vezes sem perder as propriedades mecânicas (ABIQUIM, 2016).



Neste estudo as pérolas de EPS apresentavam diâmetro inferior a 4,8 mm. Elas foram fornecidas por duas empresas, o EPS-a (Figura 6), com grãos de tamanho maior, e o EPS-b (Figura 7), de tamanho menor.

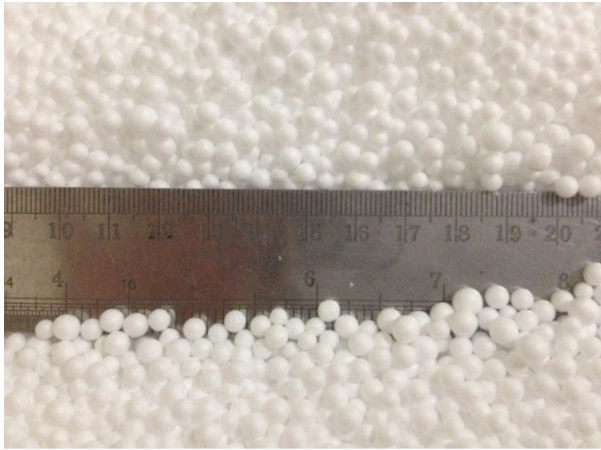


Figura 6: Pérolas de EPS-a

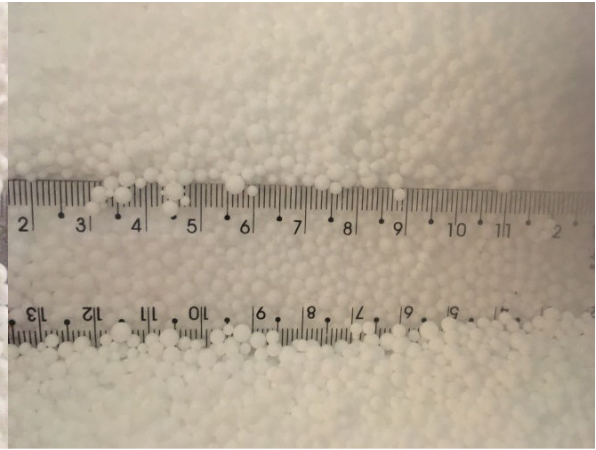


Figura 7: Pérolas de EPS-b

No entanto, diferiam apenas no tamanho, pois sempre foi utilizado o mesmo tipo T5F (T5 para construção civil, F – resistente à chama) para todos os concretos. Para melhor esclarecer, seguem as curvas granulométricas do material (Figura 8).

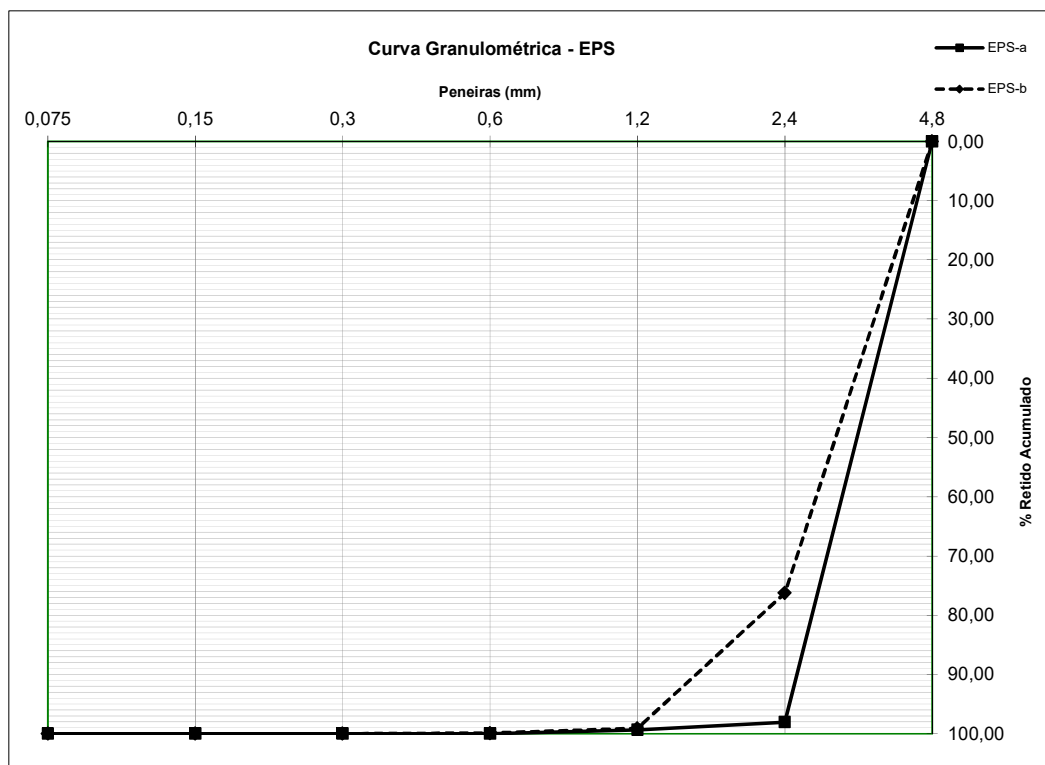


Figura 8: Curvas granulométricas das pérolas de EPS

### 3.3.4 *Sílica ativa*

A sílica ativa foi inserida nos traços de concreto leve em substituição ao cimento, em volume. Cabe salientar que, para as dosagens com sílica ativa, o somatório com a parcela de cimento corresponde ao valor dos materiais aglomerantes, e sobre esse valor foi calculada a quantidade de água e de aditivo.

As especificações técnicas fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 3, na qual a área específica foi determinada pelo método B.E.T., também conhecido por teoria da adsorção multimolecular.

Tabela 3: Propriedades da sílica ativa

Característica	Valor
Diâmetro médio	0,40 $\mu\text{m}$
Resíduo na peneira 45 $\mu\text{m}$	$\leq 10 \%$
Cor	Cinza claro e cinza escuro, dependendo do teor de sílica
Odor	Sem odor
Aparência	Pó de dimensões micrométricas
pH	$\leq 10$
Ponto de fusão	1550 °C a 1570 °C
Perda ao Fogo	$\leq 6 \%$
Densidade aparente	150 $\text{kg/m}^3$ a 700 $\text{kg/m}^3$
Área específica B.E.T.	$\geq 15.000 \text{ m}^2/\text{kg}$ e $\leq 30.000 \text{ m}^2/\text{kg}$
Densidade	2,22

Fonte: Dow Corning

### 3.3.5 *Fibras de aço*

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas fibras de aço que estavam disponíveis no Laboratório de Estruturas da EESC-USP, oriundas de doação para outros trabalhos de pesquisa. A fibra utilizada foi da empresa Maccaferri, FS8-Wirand (Figura 9), com diâmetro de 0,75 mm, 25 mm de comprimento, ganchos nas extremidades e fator de forma 33 (comprimento dividido pelo diâmetro).

As fibras foram inseridas no concreto leve em percentual sobre o volume de concreto produzido, conforme apresentado no capítulo seguinte.



Figura 9: Fibras de aço utilizadas no estudo

### 3.3.6 Fibras de polipropileno

Assim como as fibras de aço, as fibras de polipropileno utilizadas nesta pesquisa estavam disponíveis no laboratório e foram as mesmas utilizadas por DITZ (2015) em seu trabalho de mestrado, em que estudou a aplicação desse material em placas de argamassa.

Essas fibras foram doadas pela empresa BRASILIT (Figura 10) e apresentavam as características indicadas na Tabela 4, que foi fornecida pelo fabricante. Seu consumo também foi calculado sobre o volume de concreto leve com pérolas de EPS produzido para o estudo.



Figura 10: Fibras de polipropileno utilizadas no estudo

Tabela 4: Propriedades das fibras de polipropileno

Característica	Valor
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	0,91
Diâmetro (µm)	12
Comprimento (mm)	10
Alongamento (%)	21
Ponto de fusão (°C)	170

Fonte: Brasilit – Saint Gobain

### 3.3.7 Aditivo

Foi utilizado o Aditivo Superplastificante tipo II - PLASTOL® 4685 da empresa Viapol, composto por solução de policarboxilatos em meio aquoso, compatível com todos os tipos de cimento Portland, cuja ação secundária é reduzir a água de amassamento, com massa específica de aproximadamente 1,1 g/cm<sup>3</sup>, isento de cloretos, conforme informação do fabricante.

Para a investigação experimental da segunda fase de estudo, foram utilizados, além do aditivo PLASTOL® 4685 – Viapol, os aditivos ADV CAST 500 – Grace e GLENIUM 51 – Basf, devido a essa fase do estudo identificar os materiais que melhor se comportavam nas dosagens de concreto leve com pérolas de EPS.

Adiantando as considerações, optou-se pelo aditivo da Viapol por apresentar, para este estudo, as melhores condições de trabalhabilidade do concreto, independente do tipo de misturador utilizado.

A quantidade de aditivo inserida em todas as dosagens foi um percentual sobre a fração de materiais cimentícios de cada traço, conforme é apresentado na descrição dos traços no capítulo seguinte.

### 3.3.8 Outros materiais

Cabe salientar que no desenvolvimento da investigação foram utilizados outros materiais que estavam disponíveis no laboratório, porém, não foram caracterizados nem fornecidas informações técnicas pelos fabricante.

No entanto, como sua utilização não progrediu para a etapa final de dosagens, apenas serão citados, tais como: cimento CII F-32, pó de quartzo e brita zero.

### 3.4 Dosagem

A etapa de dosagens está descrita em conjunto com os resultados, visando melhor contextualizar as diferentes fases da pesquisa.

### 3.5 Mistura

Para todas as dosagens foi utilizado misturador de eixo vertical para homogeneizar a mistura. No entanto, para a primeira etapa da pesquisa e para a etapa de comparação das diferentes dosagens (dosagens finais), utilizou-se misturador planetário com capacidade para 350 litros. Para a etapa de variação das dosagens, que antecedeu os traços de comparação, utilizou-se um misturador pequeno, tipo argamassadeira (batedeira), com capacidade de 20 litros (Figura 11), a fim de evitar o desperdício de materiais.



Figura 11: Traço confeccionado no misturador tipo argamassadeira com capacidade de 20 litros

Em ambos os equipamentos, a colocação dos materiais obedeceu a mesma sequência: o agregado miúdo e o EPS são misturados com 50% da água do traço, depois é inserido o cimento, o restante da água e o aditivo superplastificante. Nos traços com fibras, essas foram adicionadas antes do aditivo, e no traço com sílica, essa foi adicionada na sequência do cimento. O tempo de mistura após ser inserido o aditivo foi de aproximadamente 10 min.

Para o estudo completo dos traços, eles foram reproduzidos no misturador planetário de 350 litros (Figura 12), para que todo o material a ser analisado tivesse o mesmo lote de mistura.





Figura 12: Traço confeccionado no misturador com capacidade de 350 litros

### 3.6 Moldagem

A moldagem dos corpos de prova, de acordo com a NBR 5738: 2015 (ABNT, 2015), foi realizada por adensamento manual (Figura 13) para os corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura (5 cm x 10 cm). Para os corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura (10 cm x 20 cm) e para os corpos de prova prismáticos com 15 cm de largura, 15 cm de altura e 50 cm de comprimento (15 cm x 15 cm x 50 cm), realizou-se o adensamento por vibração mecânica (em mesa vibratória, Figura 14).



Figura 13: Moldagem de corpos de prova com vibração manual

No caso da vibração mecânica (Figura 14), foi utilizado um baixo nível de vibração para evitar a segregação, uma vez que o EPS é muito leve e tende a ficar na parte superior dos corpos de prova.



Figura 14: Moldagem dos corpos de prova com vibração mecânica – MESA VIBRATÓRIA

### 3.7 Cura

Em todas as misturas analisadas, no dia seguinte à moldagem dos corpos de prova, após aproximadamente 24 horas, ocorreram as etapas de desmoldagem e de identificação do material. Posteriormente todos os corpos de prova foram acondicionados em câmara úmida, conforme apresentado na Figura 15, até a data de ensaio, excetuando-se apenas a retirada desse local para o procedimento de retificação.



Figura 15: Cura dos corpos de prova com e sem retifica

## 3.8 Ensaios

Os ensaios realizados para os diferentes traços de concreto estudados seguiram as recomendações da normalização vigente, conforme descrito na sequência deste texto.

### 3.8.1 *Massa aparente no estado fresco*

A massa do concreto leve no estado fresco foi determinada após a mistura, seguindo os procedimentos para o ensaio descritos na NBR 12644:2014 (ABNT, 2014).

No entanto, vale ressaltar que no laboratório não havia um recipiente que atendesse as especificações da norma citada e optou-se por realizar o ensaio com um recipiente cilíndrico com volume inferior ao indicado. Por esse motivo, os valores encontrados podem divergir um pouco do valor medido conforme a norma.

### 3.8.2 *Trabalhabilidade*

A trabalhabilidade do concreto leve com EPS, para alguns traços, foi realizada através do ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, o *Slump Test*, conforme a NBR NM 67:96 (ABNT, 1996) e, para outros traços, pelo ensaio de espalhamento, também conhecido por “Slump Flow”, conforme prescrito pela NBR 15823-2:2010 (ABNT, 2010).

A diferença entre o tipo de ensaio foi devida às características do concreto no momento da execução, pois para alguns traços não foi possível realizar o ensaio de espalhamento, e a trabalhabilidade foi determinada pelo ensaio de abatimento (Figura 16).

Outros estudos de concreto leve com EPS indicaram que o ensaio de espalhamento (Figura 17) era mais recomendado ao estudo, devido ao concreto não apresentar agregados graúdos na mistura e as pérolas proporcionarem uma maior fluidez (BABU; BABU; WEE, 2005 e MADANDOUST; RANJBAR; MOUSAVI, 2011).

O ensaio de espalhamento apresenta melhores resultados que o ensaio de abatimento no tronco de cone, realizado em concretos convencionais. No



entanto, durante a realização dos traços, nem sempre foi possível encontrar resultados de trabalhabilidade pelo ensaio de espalhamento.

Essa variação do ensaio é imposta por não se fazer ajuste da trabalhabilidade com alteração da quantidade de aditivo durante a etapa de mistura, uma vez que manter a trabalhabilidade constante não era o objetivo do estudo.



Figura 16: Ensaio de abatimento do tronco de cone



Figura 17: Ensaio de espalhamento do concreto

### **3.8.3 Massa aparente no estado endurecido**

Os corpos de prova cilíndricos, após secagem em temperatura ambiente, foram pesados e sua altura foi determinada após a retífica. Com essas informações, a massa aparente do concreto endurecido foi calculada pela divisão da massa em quilogramas pelo volume em metro cúbico.

### **3.8.4 Módulo de elasticidade**

Em geral, os concretos leves possuem módulo de elasticidade menor que o dos concretos convencionais.

O módulo de elasticidade estático foi obtido através de um atuador servo-hidráulico da marca Instron, modelo 5595 HVL, com capacidade de 1500 kN, no qual os corpos de prova cilíndricos foram submetidos à compressão, com velocidade de deslocamento controlada de 0,01 mm/s.

Dessa forma, o módulo de elasticidade estático é basicamente o resultado da divisão da tensão de cada corpo de prova por sua deformação, determinada com auxílio de transdutores (Figura 18), conforme os critérios de cálculo indicados pela NBR 8522:2008 (ABNT, 2008).

Como alternativa não destrutiva, foi determinado o módulo de elasticidade pela técnica da excitação por impulso, que é calculado por equipamento e software específico, após submeter um corpo de prova a um golpe mecânico de baixa intensidade (Figura 19). A resposta acústica dessa ação é composta pelas frequências naturais da vibração, que combinadas com as dimensões e a massa do corpo de prova permitem que seja calculado o módulo de elasticidade dinâmico do material (ATCP – Sonelastic).

### **3.8.5 Resistência à compressão**

O ensaio de resistência à compressão foi executado conforme as orientações prescritas na NBR 5739:2007 (ABNT, 2007), em corpos de prova cilíndricos moldados, curados e retificados conforme a NBR 5738:2015 (ABNT, 2015).

A ruptura do concreto leve, em geral, ocorre devido ao colapso da argamassa. Para o caso de concretos leves com EPS, a fratura atravessa as pérolas de EPS de forma similar ao que ocorre na ruptura de concretos de alta resistência, nos quais a fratura secciona o agregado gráudo natural, mantendo-se aderidos o agregado e a pasta de cimento, e no concreto leve, as pérolas de EPS e a pasta de cimento (Figura 20).

A resistência à compressão e a massa específica são as propriedades mais referenciadas na caracterização dos concretos leves, estruturais ou não.

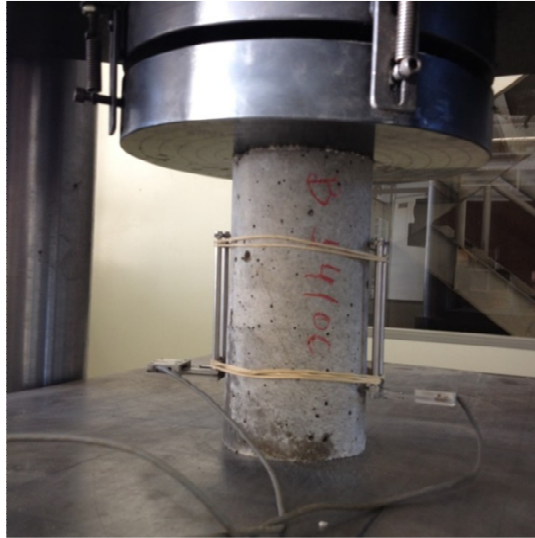


Figura 18: Ensaio de resistência à compressão com instrumentação para leitura da deformação

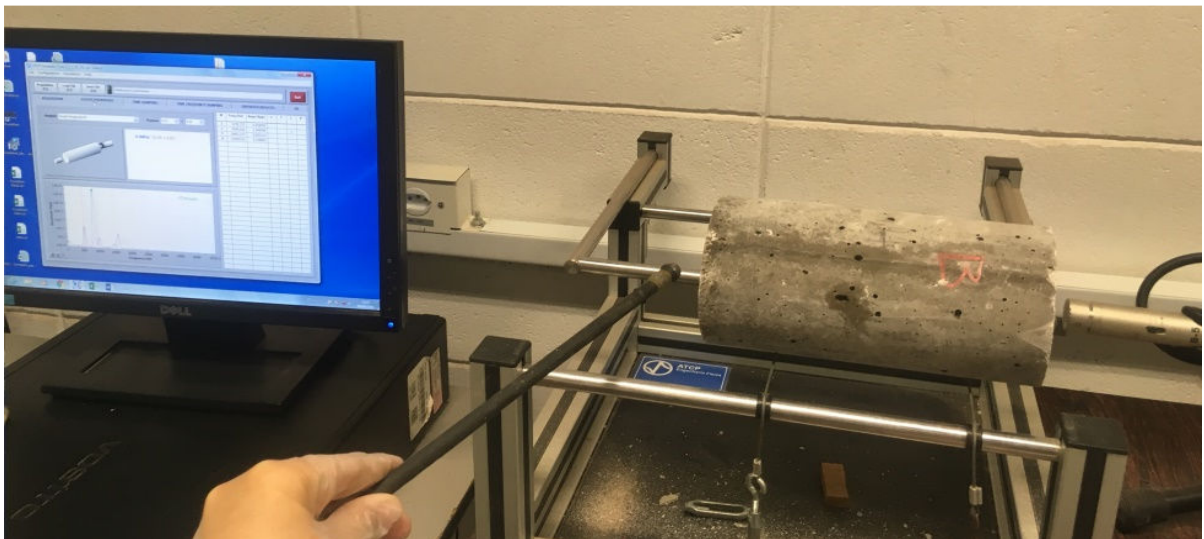


Figura 19: Equipamento para leitura não-destrutiva do módulo de elasticidade por impulso SONELASTIC



Figura 20: Corpos de prova retificados e rompidos por compressão axial



### 3.8.6 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência do concreto à tração por meio do ensaio de compressão diametral de corpos de prova cilíndricos foi determinada conforme orientações da NBR 7222:2011 (ABNT, 2011). O objetivo de realizar esse ensaio (Figura 21) foi correlacionar esses resultados com a resistência à compressão axial e com a resistência à tração por flexão, verificando o comportamento do concreto leve com EPS frente a essa variável.



Figura 21: Ensaio de compressão diametral

### 3.8.7 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão foi determinada também para ser um parâmetro direcionador das propriedades do concreto leve com EPS. Para tanto, foram seguidas as recomendações da NBR 12142:2010 (ABNT, 2010). Esse procedimento também é conhecido como ensaio de flexão em quatro pontos (Figura 22), pois num corte longitudinal há dois pontos de apoio e dois de carregamento.



Figura 22: Ensaio de flexão em prismas de concreto leve e prismas após a ruptura

Com os resultados obtidos pelo ensaio de flexão, foi determinado o fator de tenacidade do concreto leve estudado conforme a norma japonesa JSCE-SF4: 1984. Para isso, o ensaio foi instrumentado e realizado em máquina de ensaio universal (INSTRON), com capacidade de 2500 kN e velocidade de carregamento aproximadamente de 0,005 mm/min. O deslocamento no meio do vão foi medido por transdutor de deslocamento, e a distância entre apoios era constante, de 450 mm, conforme normalização vigente.

### **3.8.8 Carga remanescente**

Ao revisar a literatura referente a estudos de concreto leve com EPS, observou-se que existe um desempenho mecânico do material mesmo após sua ruptura, como indicado por CHEN e LIU (2004). Para tanto, foi avaliada a carga suportada pelo concreto leve com EPS após determinada sua resistência mecânica.

O ensaio foi realizado de maneira idêntica à da determinação da resistência à compressão, diferenciando-se apenas pelo fato dos corpos de prova já terem sido submetidos à primeira ruptura.

### **3.8.9 Absorção de água, índice de vazios e massa específica**

Os ensaios de absorção de água por imersão no concreto leve com EPS, após o endurecimento, foram conduzidos conforme as orientações da NBR 9778:2005 (ABNT, 2005).

Para tanto, como a recomendação de secagem com aquecimento dos corpos de prova é a 105 °C, não se podia prever se essa etapa iria influenciar nas características de absorção do concreto leve com EPS, devido a uma possibilidade de alteração da forma do EPS pelo aquecimento.

Sendo assim, foi reproduzido o ensaio reduzindo-se a temperatura de secagem dos corpos de prova e a temperatura de imersão aquecida para 50 °C, buscando não afetar o EPS.

Os resultados de absorção de água com secagem nas temperaturas de 105 °C e 50 °C estão apresentados no capítulo seguinte.

### **3.8.10 Comportamento do concreto leve com EPS exposto ao calor**

Para avaliar a interferência da temperatura no concreto leve com EPS após o ensaio de absorção por imersão nos corpos de prova, foi realizado o ensaio de resistência à compressão para verificar se houve comprometimento do material na etapa de secagem em temperatura controlada de 105 °C, pois o poliestireno expandido (EPS) é um material sensível ao calor, que retorna à sua forma primária quando exposto a temperaturas elevadas.

Como comparação da interferência da temperatura de secagem nos corpos de prova, os ensaios de absorção por imersão foram feitos, também, com uma temperatura de secagem de 50 °C, inferior à indicada na normalização vigente.

Como a amplitude de variação da temperatura da estufa utilizada variava de 50 °C a 300 °C, foi definida uma nova temperatura de secagem dos corpos de prova e avaliada novamente a resistência do concreto à compressão.

Dessa forma, para verificar o comportamento em temperaturas elevadas, o material foi submetido à secagem por 72 h a 250 °C, resfriado para temperatura ambiente, e avaliada novamente sua resistência à compressão.

Como havia corpos de prova disponíveis relativos a outra pesquisa sobre concreto leve com pérolas de EPS, e como seriam realizados no mesmo laboratório ensaios de estruturas em situação de incêndio, em forno com temperatura controlada, dois conjuntos de corpos de prova foram submetidos à queima em temperaturas elevadas.

Para o concreto leve com EPS submetido à situação de incêndio, puderam ser determinadas apenas as resistências à compressão na condição in natura e após a queima, cujos resultados são apresentados no APÊNDICE A.

### **3.8.11 Absorção de água por capilaridade**

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram baseados na NBR 9779:2012 (ABNT, 2012). Os corpos de prova cilíndricos foram submetidos a secagem em temperatura de 105 °C, com variação de até 5 °C. O período empregado na secagem era determinado pela estabilização da massa em leituras sucessivas, com intervalo de duas horas. Após a estabilização da massa dos corpos de prova, eles foram resfriados à temperatura ambiente.



Figura 23: Secagem dos corpos de prova

Na etapa seguinte do ensaio, os corpos de prova foram inseridos em um recipiente e ficaram com a parte inferior imersa até uma altura de água de 5 mm, com variação de 1 mm. Durante a realização do ensaio, os corpos de prova foram pesados e suas massas registradas nos tempos de 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h após o início da imersão. Nesses tempos, também foi verificada a profundidade de percolação de água, uma vez que a continuidade do ensaio somente poderia ocorrer se a ascensão capilar não atingisse a altura total do corpo de prova.

Na etapa final do ensaio foi realizada a pesagem às 72 h, e na sequência os corpos de prova foram submetidos à ruptura à tração por compressão diametral, para que o perfil de percolação de água no interior pudesse ser determinado, conforme indicado na Figura 24.



Figura 24: Perfil de capilaridade de água no interior do corpo de prova cilíndrico





## 4 Resultados

---

Neste capítulo é relatada a investigação experimental acerca dos diferentes traços de concreto leve estrutural com pérolas de EPS realizados no âmbito deste estudo. São apresentados, descritos e analisados os resultados encontrados.

### 4.1 Dosagem inicial

A investigação experimental partiu de uma dosagem inicial, fornecida pelo Engenheiro Milton José Kerbauy, que também forneceu o material de estudo para a pesquisa de CATOIA (2012). Foram contempladas duas misturas diferentes, visando identificar o comportamento do material no estado fresco, no misturador planetário com capacidade de 350 litros.

Os resultados encontrados para massa específica, resistência à compressão, resistência à tração na compressão diametral e módulo de elasticidade, das duas misturas, estão apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6, para os traços identificados como TRAÇO I e TRAÇO II, respectivamente.

Ao se observar a Tabela 5 e a Tabela 6, verifica-se que a resistência à compressão aos 37 dias é inferior à encontrada aos 28 dias, para ambos os traços. Essa diferença pode ter sido provocada pelo fato dos corpos de prova terem sido submetidos primeiro ao ensaio para determinar o módulo de elasticidade estático e, após as leituras de deformação, terem sido rompidos em prensa diferente, que permite usar instrumentação para determinar a deformação.

No estado fresco, a observação visual permitiu identificar que o TRAÇO I apresentou menos trabalhabilidade que o TRAÇO II, no entanto, como era a primeira dosagem realizada, não foi previsto mensurar essa variável através de ensaio normalizado.

No estado endurecido, a observação visual dos corpos de prova moldados permitiu identificar que em ambos os traços havia um grande volume de vazios, porém, no TRAÇO I, o tamanho dos vazios era maior que no TRAÇO II, podendo ser decorrente da trabalhabilidade da mistura (Figura 25).

Tabela 5: Massa específica, resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade - Traço I  
 Proporção - 1:1:1:0,28:0,7% (cimento, agregado miúdo, EPS, relação água/cimento e aditivo: Viapol – Plastol 4685)

TRAÇO I	Proporção - 1:1:1:0,28:0,7% (cimento, agregado miúdo, EPS, relação água/cimento e aditivo: Viapol – Plastol 4685)				
CP	Massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	
1	1457,5	114,8	14,6	Dinâmico	Estático
Resistência à compressão: 1 dia	1457,5	114,8	14,6		
2	1451,9	138,5	17,6		
3	1456,8	137,6	17,5		
Resistência à compressão: 7 dias	1454,3	138,1	17,6		
4	1469,3	150,7	19,2	15,1	---
5	1431,4	163,9	20,9	13,8	---
Resistência à compressão: 28 dias	1450,4	157,3	20,0	14,5	---
6	1464,8	146,1	18,6	15,0	16,8
7	1475,4	144,4	18,4	15,0	14,6
Resistência à compressão: 37 dias	1470,1	145,2	18,5	15,0	15,7
8	1473,8	38,9	1,2	14,6	---
9	1436,8	49,4	1,6	14,2	---
10	1447,1	52,5	1,7	14,1	---
Compressão DIAMETRAL: 28 dias	1452,6	46,9	1,5	14,3	---

Tabela 6: Massa específica, resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade - Traço II  
 Proporção - 1:1:1,15:0,31:0,8% (cimento, agregado miúdo, EPS, relação água/cimento e aditivo: Viapol – Plastol 4685)

TRAÇO II	Proporção - 1:1:1,15:0,31:0,8% (cimento, agregado miúdo, EPS, relação água/cimento e aditivo: Viapol – Plastol 4685)				
CP	Massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	
1	1358,4	64,1	8,2	Dinâmico	Estático
Resistência à compressão: 1 dia	1358,4	64,1	8,2		
2	1180,3	88,0	11,2		
3	1407,1	96,8	12,3		
Resistência à compressão: 7 dias	1293,7	92,4	11,8		
4	1251,4	96,6	12,3	10,0	---
5	1256,8	96,5	12,3	10,2	---
6	1193,5	97,4	12,4	9,7	---
Resistência à compressão: 28 dias	1233,9	96,8	12,3	10,0	---
7	1222,6	87,4	11,1	9,6	11,6
8	1206,5	93,8	11,9	9,2	10,8
Resistência à compressão: 37 dias	1214,5	90,6	11,5	9,4	11,2
9	1231,5	36,8	1,2	9,9	---
10	1195,2	43,7	1,4	9,2	---
11	1187,9	42,4	1,4	9,2	---
12	1198,5	44,5	1,4	9,3	---
Compressão DIAMETRAL: 28 dias	1203,3	41,9	1,4	9,4	---



Figura 25: Vazios visíveis nos traços I e II

Com os resultados apresentados na Tabela 6, foi possível iniciar uma pesquisa de dosagem, para um primeiro traço de referência a ser utilizado.

No item que segue, apresenta-se a primeira investigação de dosagens realizadas buscando encontrar um traço com massa específica aparente de aproximadamente  $1250 \text{ kg/m}^3$ , homogeneidade no estado endurecido e com resistência à compressão próxima a 12 MPa.

## 4.2 Ajuste de dosagens

A dosagem do concreto é um processo em que se procura obter a combinação de cimento, agregados, água, adições, aditivos e fibras que atendam às especificações de projeto, considerando seus efeitos no custo de produção e no comportamento mecânico do material (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Esta etapa da pesquisa está apresentada em quatro partes, descritas a seguir.

### 4.2.1 Ajuste de dosagem – PARTE I

Nesta etapa do trabalho foram pesquisados dez traços de concreto leve com EPS, em diferentes proporções, e, também, houve variação do agregado, do tipo de cimento, do aditivo utilizado e da relação água/cimento, conforme pode ser observado na Tabela 7, na qual consta o traço, o consumo de cimento para cada dosagem e a principal diferença da dosagem. Cabe salientar que foi considerado o

cimento CPV/ARI, o aditivo ADVA CAST (GRACE) e o agregado miúdo médio como os materiais de referência nas dosagens, para que se pudessem avaliar as modificações de cada alteração de material. Todas as amostras foram realizadas no misturador com eixo vertical, tipo bateadeira ou argamassadeira, com capacidade de 20 litros.

Tabela 7: Traços analisados – Ajuste de dosagem – Parte I

Identificação do traço	Proporção de materiais (cimento, agregado(s), EPS, relação a/c e aditivo)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Diferença de dosagem
T01	1:1:1:0,25:1%	745	Quantidade de EPS (relação 1)
T02	1:1:1,5:0,3:0,8%	614	Quantidade de EPS (relação 1,5)
T03	1:1:1,75:0,275:1%	574	Quantidade de EPS (relação 1,75)
T04	1:1:2:0,275:1%	558	Quantidade de EPS (relação 2)
T05	1:1:2:0,275:1%	558	Alteração do aditivo (Glenium)
T06	1:1:2:0,275:1%	565	Alteração do cimento (CPII/F 32)
T07	1:1:2:0,3:1%	565	Alteração da relação a/c
T08	1:0,5:0,5:2:0,275:1%	558	Agregado miúdo médio e fino
T09	1:1:2:0,275:1%	558	Agregado miúdo fino
T10	1:0,33:0,33:0,33:2:0,275:1%	565	Agregado miúdo fino, médio e brita 0

Para cada um dos traços indicados na Tabela 7, houve variação principal de um componente, para que se fizesse a análise do efeito da alteração na dosagem, quando comparada com o conjunto de traços. Por exemplo, para os traços T01, T02, T03 e T04, a alteração principal foi na quantidade de EPS, buscando reduzir o consumo de cimento e a massa específica do concreto. Para essas dosagens, também pode ser observada a variação na relação a/c, que, no entanto, ocorreu apenas para facilitar a moldagem e ajustar simultaneamente o percentual de aditivo.

Após uma análise preliminar dos resultados, o traço T04 foi considerado base para os demais traços. Sendo assim, para o traço T05, foi alterado o aditivo para GLENIUM (BASF); para o traço T06, o tipo de cimento foi alterado para CPII/F 32 e, para o traço T07, aumentou-se a relação a/c, com a finalidade de se obter uma mistura com mais facilidade de moldagem.

Nos casos dos traços T08, T09 e T10, apenas os agregados variaram, mantendo-se a proporção cimento/agregado constante em todas as dosagens.

Após a mistura, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm, que foram desenformados em 24 h. Esses corpos de prova foram mantidos em câmara úmida até a data de ensaio, exceto os que foram analisados

após 24 h. As resistências à compressão foram analisadas nas idades de 24 h, 7 dias e 28 dias.

A Tabela 8 apresenta, para cada traço analisado, a massa aparente média no estado endurecido, a relação água/cimento (a/c) e os valores médios da resistência à compressão.

Cabe salientar que para o traço T06, em que se utilizou cimento CPII/F 32, os ensaios foram realizados aos 7 dias e aos 28 dias. E, para os traços T07 e T10, foram feitos apenas ensaios aos 7 dias. Os resultados dos demais traços indicaram que não houve aumento significativo da resistência à compressão dos 7 dias para os 28 dias.

Tabela 8: Resultados de massa específica, relação a/c e resistência à compressão

Traço	Massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Relação a/c	Resistência à compressão (MPa)		
			24 h	7 dias	28 dias
T01	1.623	0,250	14,7	19,4	19,7
T02	1.340	0,300	8,1	12,7	13,2
T03	1.276	0,275	8,3	11,2	11,4
T04	1.239	0,275	6,7	9,2	9,5
T05	1.205	0,275	7,6	10,1	10,9
T06	1.194	0,275	---	6,6	7,3
T07	1.196	0,300	5,4	6,7	---
T08	1.219	0,275	7,7	10,3	10,9
T09	1.226	0,275	9,1	11,4	12,4
T10	1.230	0,275	5,6	6,9	---

A Figura 26 apresenta o comportamento da resistência à compressão dos traços nas diferentes idades de análise.

Na Figura 27 encontra-se a relação entre a resistência à compressão e a massa específica do concreto leve. Como era esperado, pode-se verificar a perda de resistência à compressão do concreto leve com EPS com a redução da massa específica.

A influência da alteração da quantidade de EPS na dosagem é ilustrada na Figura 28. Essa alteração foi feita nos traços T01, T02, T03 e T04. Como era esperado, observa-se que quanto maior o teor de EPS na mistura, menor a resistência à compressão do concreto leve. O aumento da quantidade de EPS é feito com o objetivo de reduzir a massa específica do concreto, mesmo sabendo que isto provoca perda de resistência.

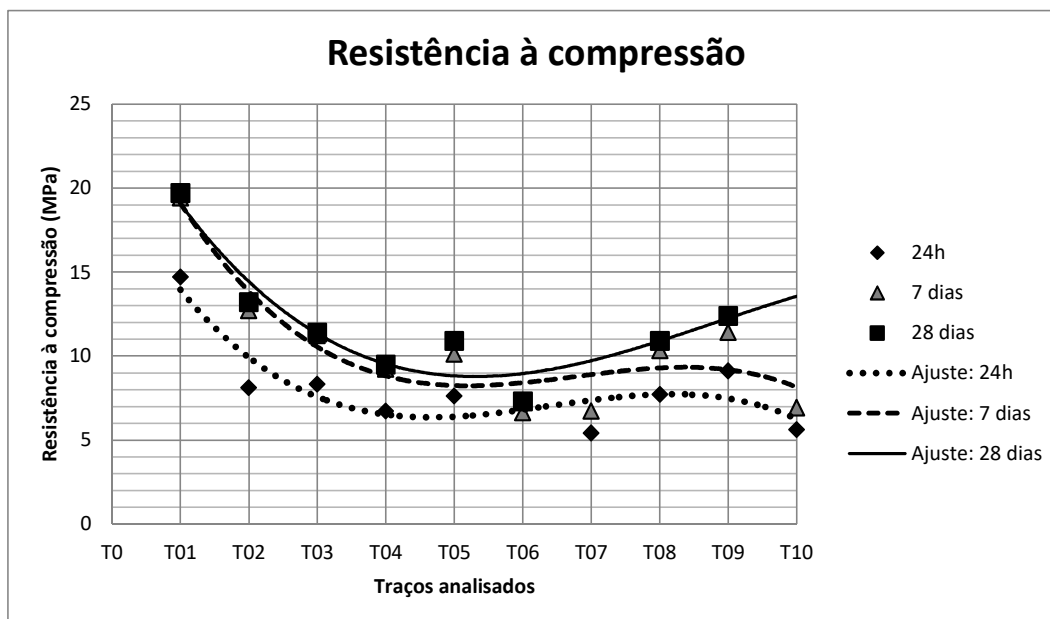


Figura 26: Resistência à compressão dos traços analisados nas idades de 24 h, 7 dias e 28 dias

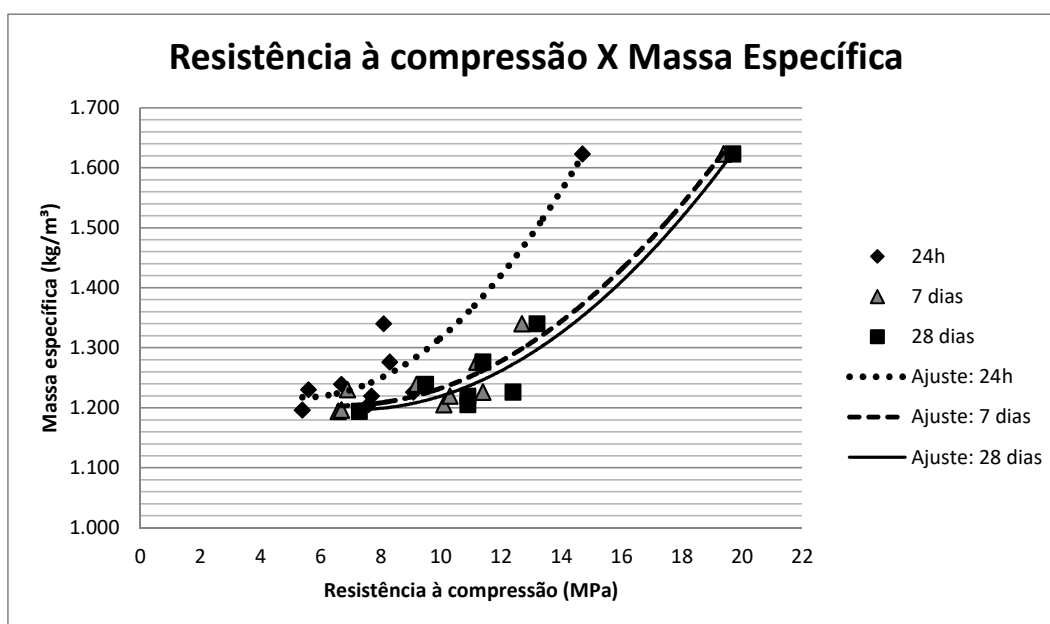


Figura 27: Resistência à compressão versus massa específica

Cabe salientar que, para um acréscimo de 50% na quantidade de EPS, comparando os traços T01 e T02, houve uma redução de 33% na resistência à compressão. Quando se faz um aumento de 75% na quantidade de EPS (traços T01 e T03), a redução da resistência aumenta para 42%. E, para o dobro da quantidade inicial de EPS, ou seja, comparando-se os traços T01 com T04, a redução da resistência à compressão do concreto leve aos 28 dias é de 52%.

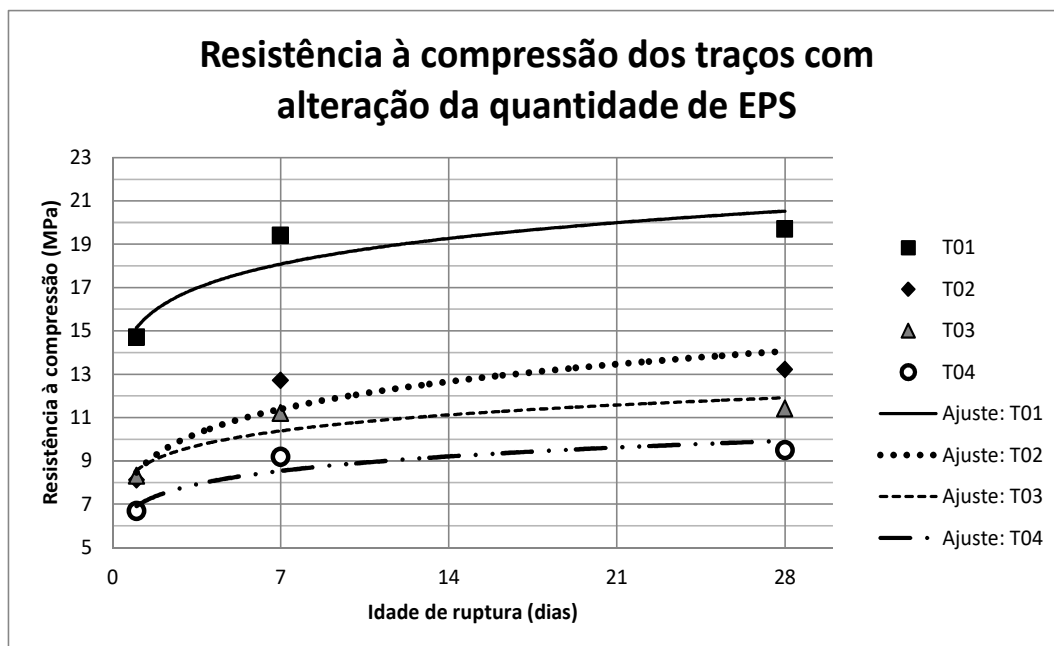


Figura 28: Variação da resistência com a alteração da quantidade de EPS

A alteração do tipo de aditivo é considerada na Figura 29. Verifica-se que o traço com o aditivo GLENIUM – BASF apresentou um aumento de 14% na resistência à compressão aos 28 dias, se comparado ao traço com o aditivo padrão deste estudo (ADVA CAST – GRACE). Essa melhora no comportamento resistente pode tornar-se um parâmetro relevante a ser considerado na continuidade do estudo, adotando-se o GLENIUM – BASF como aditivo padrão em pesquisas futuras.

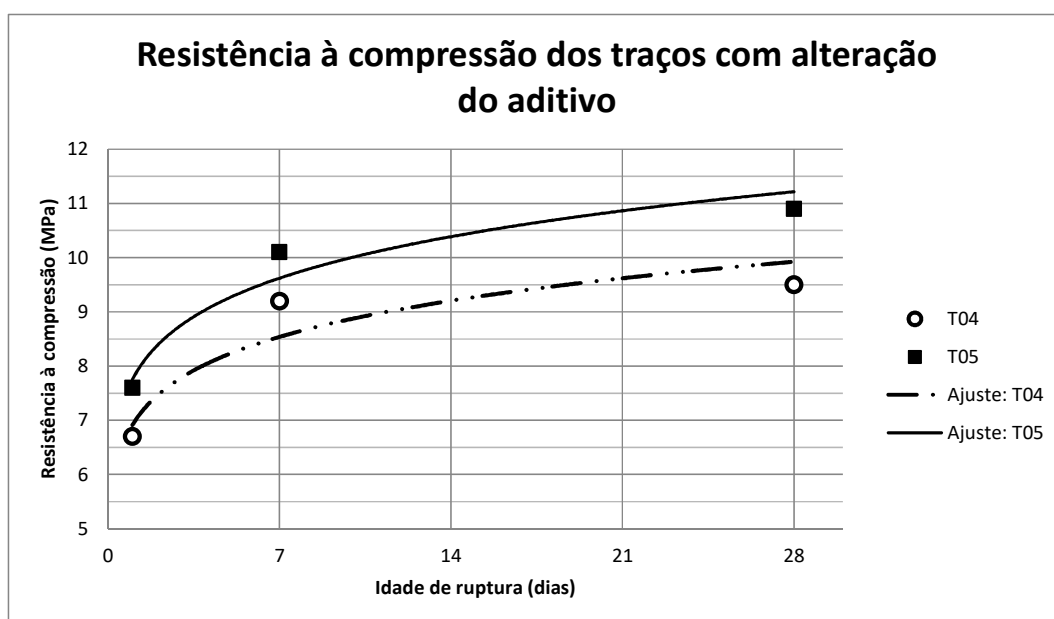


Figura 29: Variação da resistência com a alteração do tipo de aditivo

A Figura 30 mostra que a utilização de CII/F 32, além de comprometer o tempo de desforma, devido à baixa resistência para pequenas idades, também provocou uma redução de 23% na resistência à compressão aos 28 dias, quando comparados os traços T04 (CPV/ARI) e T06 (CII/F 32).

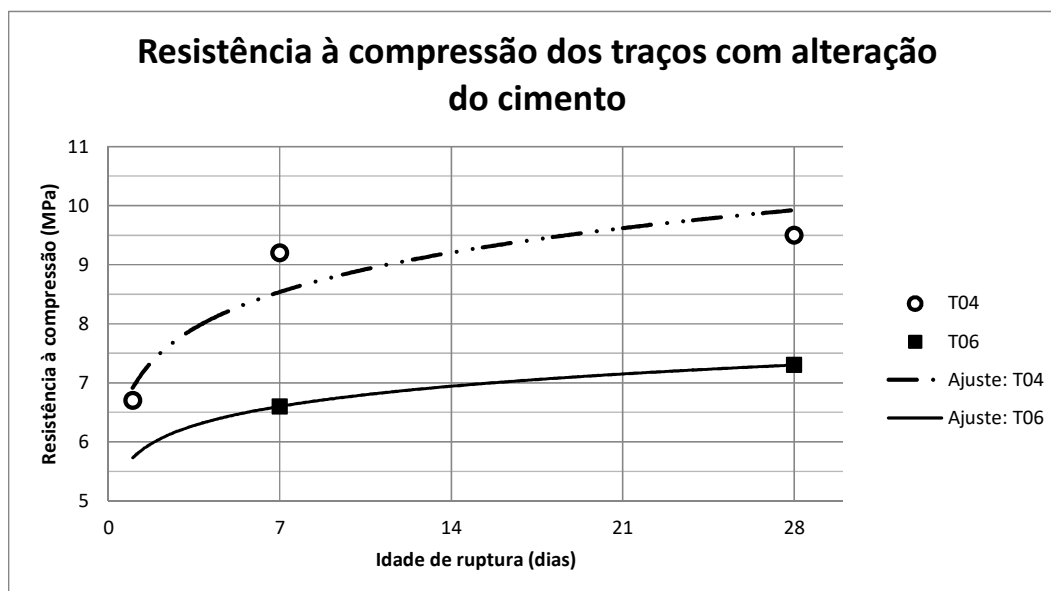


Figura 30: Variação da resistência com alteração do tipo de cimento

Na Figura 31 é considerada a variação da resistência à compressão com a alteração da relação água/cimento. O objetivo é melhorar a trabalhabilidade do concreto com EPS. No traço T07 foi considerada a relação a/c igual a 0,3, 9% maior que a relação 0,275, relativa ao traço T04. Cabe salientar que, aos 7 dias, a resistência à compressão do concreto T07, com maior relação a/c, é 27% menor que a do concreto relativo ao traço T04.

A Figura 32 considera a variação da resistência com a alteração da granulometria do agregado. São apresentados os traços em que a granulometria do agregado foi alterada, e as respectivas resistências à compressão. O traço T04, com agregado miúdo médio, foi o traço considerado padrão para a comparação.

Analisando o comportamento dos resultados, observa-se que quanto maior a granulometria do agregado, menor a resistência do concreto.

O traço T09, dosado apenas com agregado miúdo fino, apresentou a maior resistência à compressão, seguido pelo traço T08, no qual foi utilizado 50% do agregado composto por agregado miúdo fino e os outros 50% por agregado miúdo médio.



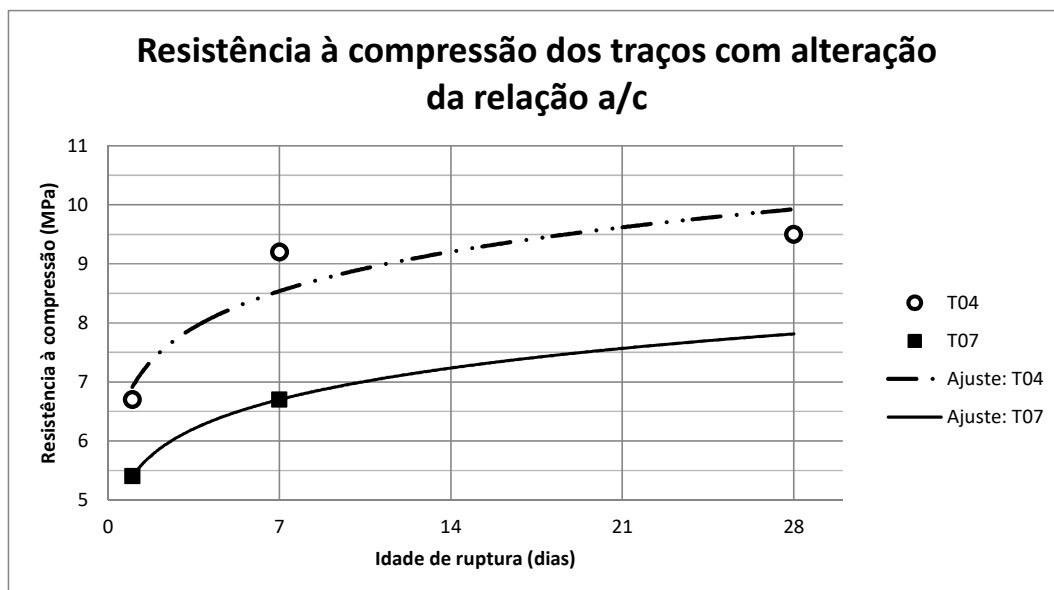


Figura 31: Variação da resistência com alteração da relação a/c

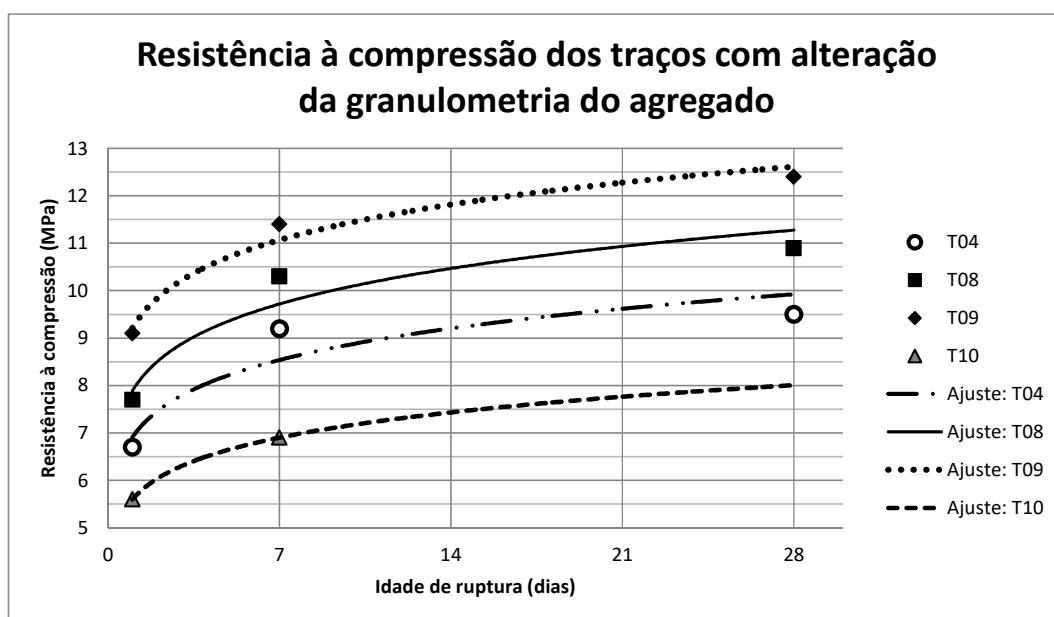


Figura 32: Variação da resistência com a alteração da granulometria do agregado

Para o traço em que a fração correspondente aos agregados incluía 33,3% de agregado miúdo fino, 33,3% de agregado miúdo médio e 33,3% de brita 0, observou-se redução da resistência à compressão, confirmando que, no caso do concreto leve com EPS, quanto maior a dimensão dos grãos (agregados ou EPS), menor a resistência do material à compressão.

Considerando os resultados apresentados para esse conjunto de dez traços, observou-se que o acréscimo da quantidade de EPS reduz a massa específica do material, reduzindo também sua resistência à compressão.

O traço T04, com o aditivo padrão do estudo (ADVA CAST – GRACE), apresentou menor resistência que o traço T05, em que houve alteração do aditivo para o GLENIUM – BASF. Portanto, o tipo de aditivo pode influir na resistência do concreto leve.

A alteração do tipo de cimento em T06 e do fator a/c em T07 conduziram à redução da resistência à compressão, o que foi observado ao se compararem esses traços com o traço padrão T04.

A granulometria do agregado indica que quanto menor for o tamanho das partículas, maior será a resistência à compressão, para os traços de concreto leve estudados.

#### **4.2.2 Ajuste de dosagem – PARTE II**

Nesta etapa da investigação experimental, foi realizado um novo estudo de dosagem buscando equalizar a quantidade de EPS para dois diferentes misturadores. Isto foi necessário porque, para o misturador planetário com eixo vertical, a quantidade de EPS que conduz a um concreto com aproximadamente  $1250 \text{ kg/m}^3$  é 25% menor do que para as misturas realizadas em equipamento tipo batedeira, para pequenos volumes, no qual foram realizadas as dez misturas apresentadas no item anterior. Essa redução foi obtida com base nos resultados encontrados para os traços T14, T15 e T16, apresentados na Tabela 9.

Novamente, a direcionadora do estudo foi uma dosagem do concreto pré-definida pelo Engenheiro Milton José Kerbauy, com a qual foram confeccionadas lajes de concreto leve estrutural para análise do comportamento dinâmico do material, objeto de estudo de SARTORTI (2015), em sua tese de doutorado. Cabe salientar que o Eng. Kerbauy estuda o concreto leve com EPS há muito tempo, tem publicações sobre o assunto desde 2010 (KERBAUY, 2010 e KERBAUY, 2011) e também havia fornecido material para o estudo de CATOIA (2012).

Aproveitando a experiência do Eng. Kerbauy, nesta etapa se passou a trabalhar com o aditivo PLASTOL 4685 da marca VIAPOL, descrito no capítulo anterior.

A opção por esse aditivo se fez em virtude da sua utilização no material confeccionado para os estudos de SARTORTI (2015). Verificou-se que, no estado fresco, o concreto leve apresentava maior facilidade de moldagem que as dosagens

anteriores, com os aditivos ADVA-CAST e GLENIUM, evitando a segregação do concreto leve com EPS.

Os traços identificados por T11, T12, T13 e T14 foram confeccionados no misturador pequeno tipo bateadeira. Com os resultados do traço T14, foram projetados os traços T15 e T16, com redução de 25% do EPS, confeccionados em misturador com eixo vertical, de maior capacidade. A principal diferença entre essas misturas foi a quantidade de materiais utilizados para fins de verificação de volume no misturador.

Tabela 9: Ajuste do EPS nos traços de concreto leve

Identificação	Dosagem	Massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa)		Tração na compressão diametral (MPa)
			7 dias	28 dias	
T11	1:1:1,35:0,28:1%	1525,2	16,4	18,4	1,7
T12	1:1:1, 5:0,28:1%	1474,6	11,0	13,9	2,0
T13	1:1:1,75:0,28:1%	1417,7	10,8	13,9	1,7
T14	1:1:2:0,28:1%	1267,5	7,1	7,3	---
T15	1:1:1,5:0,28:1%	1244,2	10,5	11,5	---
T16	1:1:1,5:0,28:1%	1203,6	10,0	10,8*	---

\*Ruptura aos 21 dias

Quando comparados os resultados da resistência à compressão dos traços T14 com T15 e T14 com T16, observa-se que o misturador grande proporciona ao concreto no estado fresco melhor homogeneidade e trabalhabilidade, e, conseqüentemente, melhor desempenho mecânico, ou seja, a resistência à compressão dos traços T15 e T16 é aproximadamente 50% maior que a resistência do traço T14. Os dois traços apresentam massa aparente próxima ao objetivo inicial de 1250 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.2.3 Ajuste de dosagem – PARTE III

Com base nos resultados encontrados nas etapas anteriores e na análise visual das misturas no estado fresco, partiu-se para uma nova etapa de dosagens, em que foi alterada a relação água/cimento, para facilitar a moldagem. Com esse novo traço, identificado por T17, inicia-se a investigação de redução do consumo de cimento, com substituição de parte dele por sílica ativa (T18) e aumento

da proporção de agregado com 10% de pó de quartzo (T19), conforme apresentado na Tabela 10, sendo todos confeccionados no misturador de 20 ℓ.

Cabe salientar que houve ajuste no percentual de aditivo e na relação água/aglomerante nos traços T18 e T19 para manter a proporção de água sobre os aglomerantes nas duas misturas. O percentual de aditivo incide sobre a quantidade de aglomerante.

Comparando os resultados encontrados para os traços T14 (Tabela 9) e T17 (Tabela 10), observa-se que a relação água/cimento foi aumentada para melhorar a trabalhabilidade da mistura. No entanto, como o volume de materiais utilizados é pequeno, esse acréscimo beneficiou a trabalhabilidade e a moldagem dos corpos de prova, proporcionando ganho no desempenho mecânico.

Tabela 10: Redução do consumo de cimento

Dosagem	Proporção (aglomerante(s), agregado(s), relação água/aglomerante, aditivo)	Aglomerante	Massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa)	
				7 dias	28 dias
T17	1:1:2:0,29:1%	100% cimento	1236,1	7,8	8,5
T18	0,9:0,1:1:2:0,29:1%	90% cimento e 10% sílica ativa	1251,4	8,0	9,9
T19	0,9:0,1:1:2:0,29:1%	90% cimento e 10% pó de quartzo	1254,2	5,8	7,8

Com essa nova realidade, entende-se que, para as pesquisas de dosagem no misturador pequeno, é possível realizar a dosagem com uma quantidade maior de água, e quando for se reproduzir o traço no misturador de maior volume, ajusta-se a água de maneira similar ao que já se fez com a quantidade de EPS.

A substituição de parte do cimento por sílica ativa apontou um ganho de resistência de 16% aos 28 dias, conforme resultados apresentados para os traços T17 e T18 (Figura 33).

Para o traço T19, com pó de quartzo atuando como adição de agregados finos sobre o traço padrão T17, não se verificaram benefícios no desempenho mecânico.

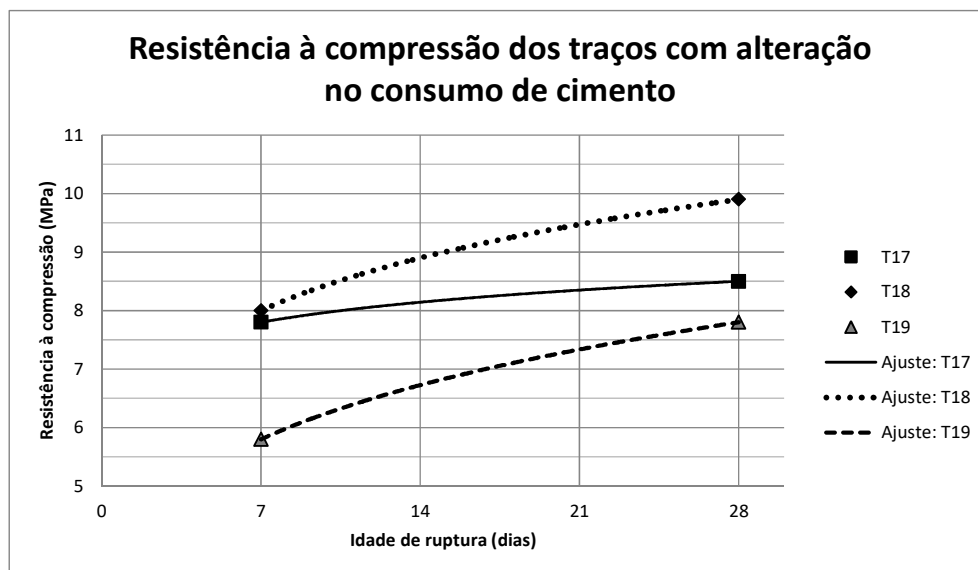


Figura 33: Evolução da resistência com a redução da quantidade de cimento

#### 4.2.4 Ajuste de dosagens – PARTE IV

Em continuidade com a investigação experimental de dosagens, foi avaliada a contribuição de sílica ativa, fibras de polipropileno e fibras de aço nos traços de concreto leve com pérolas de EPS.

##### 4.2.4.1 Sílica ativa

Num primeiro momento, foi investigada a contribuição da sílica ativa sob a forma de adição e substituição ao cimento, conforme indicado na Tabela 11.

A massa aparente para todos os traços se mantém próxima a  $1150 \text{ kg/m}^3$ , identificando que o emprego de sílica não altera significativamente a massa aparente do concreto.

Comparando o traço com 5% de adição de sílica ativa (5% A) com o traço padrão, os valores de resistência encontrados aos 7 dias e 28 dias corresponderam a 81% dos resultados do traço padrão.

O traço com 10% de adição (10% A) aos 7 dias correspondeu a 83% da resistência do traço padrão, e aos 28 dias, 95%.

Para o traço em que houve 5% de substituição do cimento por sílica ativa em massa (5% S), aos 7 dias, a resistência encontrada resultou 76% da resistência relativa ao traço padrão, e aos 28 dias, 73%.

Tabela 11: Dosagens com sílica ativa

Dosagem	Proporção (cimento, sílica – exceto Padrão, agregado miúdo, EPS, água e aditivo)	Massa aparente	Resistência à compressão (MPa)		
			7 dias	28 dias	56 dias
Padrão	1:1:2:0,3:1%	1164	8,9	9,6	---
5% A	1:0,05:1:2:0,3:1%	1175	7,2	7,8	8,9
10% A	1:0,1:1:2:0,3:1%	1173	7,4	9,1	9,4
5% S	1:0,053:1,053:2,105:0,316:1,053%	1132	6,8	7,0	7,2

Como pode ser observado na Figura 34, para todas as dosagens analisadas, houve crescimento da resistência à compressão com a progressão da idade. No entanto, para os traços que continham sílica ativa, mesmo com um acréscimo de resistência até os 56 dias de idade, o traço padrão aos 28 dias ainda mantém um valor maior que o melhor resultado das dosagens com sílica.

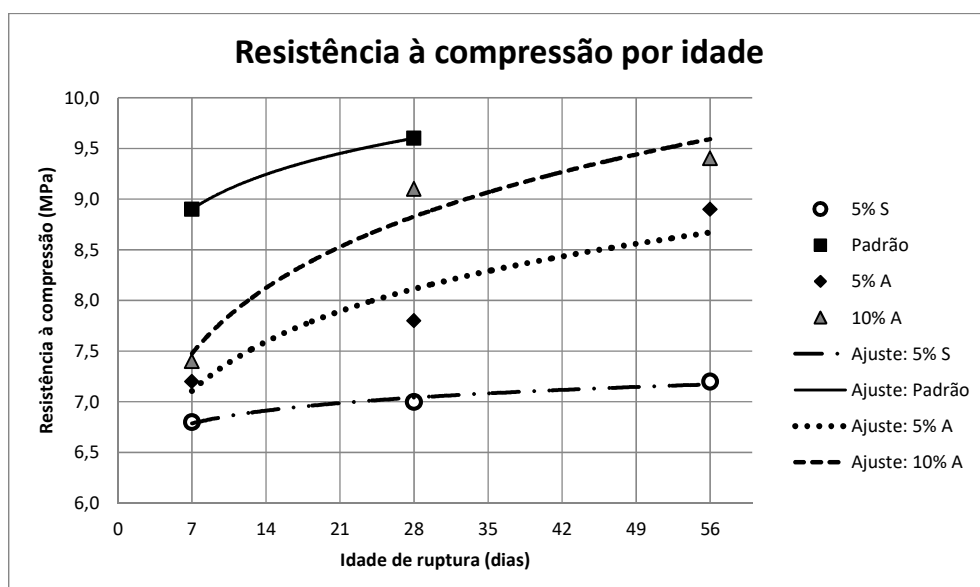


Figura 34: Crescimento da resistência à compressão com a idade

Visando identificar se a sílica ativa apresentava reatividade, realizou-se um estudo conforme a NBR 13956-3:2012 (ABNT, 2012), no qual foi avaliado o índice de desempenho da sílica quando utilizada com cimento Portland, aos 7 dias. O índice de desempenho foi calculado através da média de resistência da Argamassa B dividida pela média da resistência da Argamassa A, multiplicando o resultado por 100. Esse estudo revelou que a Argamassa B apresentou melhor desempenho que a Argamassa A, e o índice de desempenho foi de 105,3% (Tabela 12). Portanto, a reatividade da sílica ativa foi comprovada.

Assim, verificou-se não haver problemas com a continuidade de utilização dessa sílica ativa. Os baixos desempenhos anteriormente encontrados podem estar relacionados com a dificuldade de dispersão das partículas e homogeneização no misturador tipo bateadeira de pequena capacidade (20 ℓ), e posterior hidratação dos finos ao se utilizar a sílica.

Tabela 12: Avaliação do índice de desempenho à compressão da sílica ativa

Argamassa A com CII/F 32	Resistência à Compressão aos 7 dias (MPa)
Corpo de prova 1	38,6
Corpo de prova 2	37,9
Corpo de prova 3	38,8
Corpo de prova 4	36,9
Corpo de prova 5	36,5
Corpo de prova 6	37,5
Média	37,7
Argamassa B com 10% em massa de sílica ativa em substituição ao CII/F 32	Resistência à Compressão aos 7 dias (MPa)
Corpo de prova 7	38,5
Corpo de prova 8	41,2
Corpo de prova 9	38,2
Corpo de prova 10	40,0
Corpo de prova 11	41,2
Corpo de prova 12	38,8
Média	39,7

Baseado nos resultados encontrados com o uso da sílica ativa, na Parte III e na Parte IV do estudo, escolheu-se o percentual de 10% de substituição de cimento por sílica ativa, sendo essa substituição em volume, para manter equalizado o teor de finos no concreto.

#### 4.2.4.2 Fibras de polipropileno

Nessa etapa da investigação experimental, foram adicionadas fibras de polipropileno ao concreto leve com pérolas de EPS, nos teores de 0,50%, 0,25% e 0,15%, identificadas na Tabela 13 por P+0,50%, P+0,25% e P+0,15%, para comparação ao traço Padrão.

Pode-se observar que, para todos os traços em que foram adicionadas fibras de polipropileno, os valores da resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico foram menores que os do traço padrão.

Esse desempenho não satisfatório pode ser decorrente da dificuldade de conseguir homogeneizar o concreto. As fibras não se incorporam à mistura, como pode ser visto na Figura 35, ao se utilizar o misturador tipo bateadeira.

Tabela 13: Dosagens com fibras de polipropileno

Dosagem	Proporção	Massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
Padrão	1:1:2:0,3:1%	1192	9,6	9,8
P+0,50%	1:1:2:0,3:1% + 0,50%	1196	6,4	8,4
P+0,25%	1:1:2:0,3:1% + 0,25%	1189	6,6	9,4
P+0,15%	1:1:2:0,3:1% + 0,15%	1131	5,1	6,8

Cabe salientar que, para os percentuais utilizados, o melhor desempenho encontrado foi para a dosagem P+0,25%, para a qual a resistência à compressão correspondeu a 69% da resistência relativa ao traço padrão, e o módulo de elasticidade dinâmico, a 96%.



Figura 35: Dosagem com adição de fibras de polipropileno

Pela dificuldade de mistura e pelos valores encontrados, estimou-se que o teor de fibras de polipropileno a ser estudado em uma dosagem de maior volume estava próximo a 0,25%, porém a mistura com o teor 0,15% apresentou melhor homogeneidade. Assim, foi escolhido o percentual intermediário de 0,20% para reproduzir a dosagem no misturador planetário, com maior volume.



#### 4.2.4.3 Fibras de aço

Para finalizar a investigação das dosagens, foram adicionadas fibras de aço nos percentuais de: 0,25%, 0,50%, 0,75%, 1,0% e 1,5%. Identificados na Tabela 14 por: A+0,25%, A+0,50%, A+0,75%, A+1,0% e A+1,5%, visando encontrar o percentual que melhor atenderia ao material estudado, ou seja, qual poderia apresentar melhor desempenho quando comparado com o traço padrão.

Na Figura 36 é possível verificar que a adição das fibras de aço ocorreu de forma uniforme em toda a mistura, viabilizando sua utilização.

Tabela 14: Dosagens com adição de fibras de aço

Dosagem	Proporção	Massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)		Resistência à compressão (MPa)		Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
			7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	
Padrão	1:1:2:0,3:1%	1160	0,9	0,9	5,4	6,1	8,0
A+0,25%	1:1:2:0,3:1% + 0,25%	1183	0,9	1,0	6,2	6,3	8,7
A+0,50%	1:1:2:0,3:1% + 0,50%	1214	1,3	1,3	7,7	8,3	8,9
A+0,75%	1:1:2:0,3:1% + 0,75%	1241	0,9	1,1	4,1	4,6	7,0
A+1,0%	1:1:2:0,3:1% + 1,0%	1250	1,4	1,6	6,9	8,7	10,1
A+1,5%	1:1:2:0,3:1% + 1,5%	1330	1,2	1,5	7,7	8,2	9,1



Figura 36: Dosagens com adição de fibras de aço

Ao se observar a Figura 37 e o módulo de elasticidade dinâmico na Tabela 14, para a adição de 0,75% de fibras de aço, os resultados encontrados não apresentaram um comportamento coerente com os demais teores de adição. Com

relação à resistência à tração por compressão diametral (Figura 38), os ganhos de desempenho mecânico se mantiveram aos 7 dias e apresentaram acréscimo de 22% aos 28 dias. No entanto, por apresentarem divergência no conjunto de variáveis analisadas, o teor de 0,75% não foi considerado para a escolha do percentual a ser reproduzido em dosagem com maior volume de material.

Para os teores de adição de 0,25%, 0,50% e 1,0%, verificou-se que quanto maior a quantidade de fibras, maior é o módulo de elasticidade dinâmico, a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral.

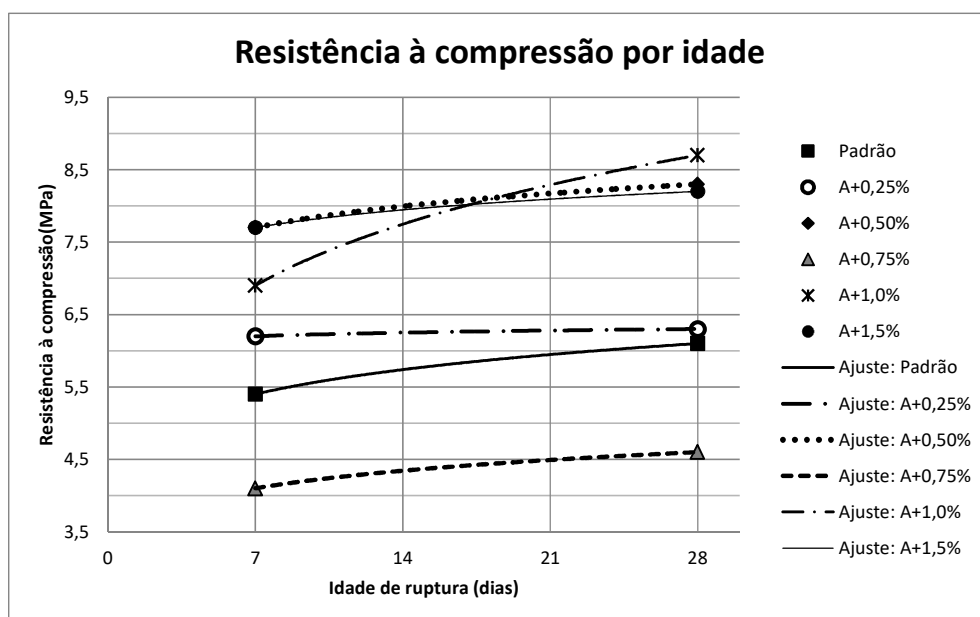


Figura 37: Resistência à compressão das dosagens com adição de fibras de aço

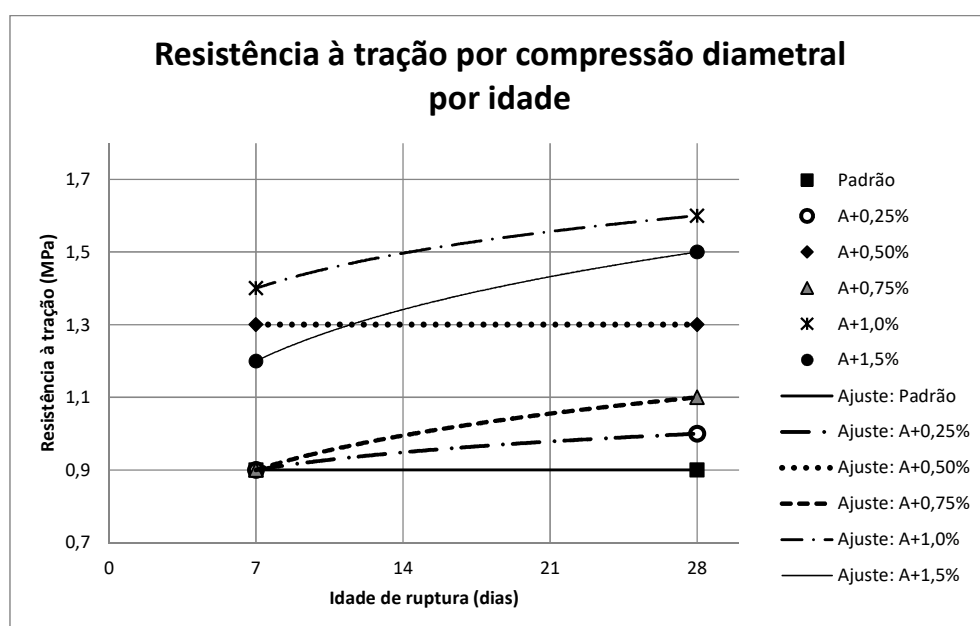


Figura 38: Resistência à tração por compressão diametral dos traços com adição de fibras de aço

Para o teor de 1,5% de adição de fibras de aço sobre o volume de concreto, também se observam ganhos no desempenho mecânico em relação ao traço padrão. No entanto, essa melhoria não supera os valores encontrados para o teor de adição de 1,0%. Sendo assim, aponta-se que o teor ideal de adição de fibras de aço está abaixo de 1% do volume de concreto.

### 4.3 Dosagens finais

Para a continuidade do desenvolvimento da pesquisa, foi definido um conjunto de traços finais com as seguintes variações na dosagem: traço padrão, traço com sílica ativa, traço com fibras de aço, traço com fibras de polipropileno, traço com ajuste de granulometria da areia e traço com redução do volume de EPS.

O estudo de nove diferentes dosagens de concreto leve com EPS em formato esférico (pérolas) atuando como agente incorporador de vazios avaliou a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral, a resistência à tração na flexão, o módulo de elasticidade por impulso dinâmico, a absorção e o índice de vazios, a massa do concreto e a perda de massa quando o material foi exposto a uma temperatura constante de 250 °C por 72 h, além da resistência do material após estar submetido a essa temperatura elevada.

Cabe salientar que os nomes atribuídos a cada dosagem obedecem à ordem de execução do estudo. Na Tabela 15: Identificação e descrição das dosagens, a Tabela 15 é identificada a proporção de materiais de cada traço final (TF) e o elemento diferencial em cada mistura, bem como o lote do EPS utilizado. A sequência de materiais na proporção das dosagens é: aglomerante (cimento e sílica ativa em TF-7 e TF-9), agregado miúdo (médio e fino em TF-3), EPS, relação água/aglomerante, teor de aditivo sobre a quantidade de aglomerante e teor de fibras.

Para cada traço no misturador com capacidade de 350 l, de eixo vertical, foram consumidos aproximadamente 100 litros de pérolas de EPS (em torno de 2 kg), 60 kg de cimento, 60 kg de areia, 17 litros de água e 600 g de aditivo (VIAPOL – Pastol 4685).

No estado fresco foram determinadas a massa aparente do concreto leve (ABNT NBR 12644:2014, 2014) e a trabalhabilidade (NBR NM 67:96, 1996 e

ABNT NBR 15823-2:2010, 2010). No estado endurecido foi determinada a massa aparente pela divisão simples da massa do corpo de prova pelo seu volume (Tabela 16).

As dosagens identificadas por TF-1 e TF-2 se referem ao traço padrão do estudo, ou seja, em sua composição não existe elemento específico, apenas cimento, areia média, EPS (TF-1 com EPS-a e TF-2 com EPS-b), água e aditivo.

Tabela 15: Identificação e descrição das dosagens

Identificação da dosagem	Proporção de materiais	Característica do traço	EPS utilizado
TF-1	1:1:1,5:0,28:1%	Padrão	EPS-a
TF-2	1:1:1,5:0,28:1%	Padrão	EPS-b
TF-3	1:0,5:0,5:1,5:0,28:1%	Substituição de 50% do agregado por areia fina	EPS-b
TF-4	1:1:1,35:0,28:1%	Redução de 10% no teor de EPS	EPS-a
TF-5	1:1:1,2:0,28:0,8%	Redução de 20% no teor de EPS	EPS-a
TF-6	1:1:1,5:0,28:1,1%+0,6%	Adição de 0,6% de fibras de aço	EPS-b
TF-7	1:0,11:1,11:1,66:0,28:1,1%	Substituição de 10% do cimento por sílica ativa	EPS-b
TF-8	1:1:1,5:0,28:1,1%+0,2%	Adição de 0,2% de fibras de polipropileno	EPS-b
TF-9	1:0,11:0,555:0,555:1,33:0,28:0,9%	Composto (redução de 20% de EPS, areia fina e sílica ativa)	EPS-b

Tabela 16: Características das dosagens no estado fresco e no endurecido

Dosagem	Massa fresca (kg/m <sup>3</sup> )	Abatimento (cm)	Espalhamento (cm)	Massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
TF-1	1263	-	64	1220	630
TF-2	1258	18,2	38	1170	630
TF-3	1218	-	38,5	1150	630
TF-4	1584	-	67	1290	700
TF-5	1606	-	39	1320	780
TF-6	1562	23,5	47	1330	630
TF-7	1268	18,5	-	1230	570
TF-8	1195	13,5	-	1130	630
TF-9	1401	-	45	1370	700

### 4.3.1 Resistência à compressão e resistência remanescente

Na Tabela 17 são apresentados os resultados médios da resistência à compressão dos nove traços finais nas idades de 7 dias e 28 dias, com a finalidade de caracterizar os concretos leves estudados. Para os traços com sílica ativa, considerando a continuidade de aumento da resistência, foi avaliada também a idade de 56 dias.

Buscando avaliar o comportamento de resistência do concreto leve após a primeira ruptura, conforme indicado por CHEN e LIU (2004), foi avaliada a capacidade resistente do concreto leve após a ruptura, indicada na Tabela 17 por “resistência remanescente”, e verificado seu percentual relativo à resistência média à compressão.

Tabela 17: Resistência à compressão e resistência remanescente

Dosagem	Resistência à compressão (MPa)			Resistência remanescente (MPa)		% Remanescente	
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
TF-1	10,0	10,3	---	4,8	5,2	48%	50%
TF-2	9,1	10,3	---	4,6	5,4	51%	52%
TF-3	10,4	11,8	---	4,7	4,8	45%	41%
TF-4	11,5	12,1	---	5,6	5,9	49%	49%
TF-5	10,6	14,2	---	5,6	5,1	53%	36%
TF-6	10,5	11,7	---	7,0	6,0	67%	51%
TF-7	11,2	11,5	13,6	5,2	7,2	46%	63%
TF-8	8,2	8,7	---	4,9	4,8	60%	55%
TF-9	15,4	16,7	18,4	5,2	8,4	34%	50%

Cabe salientar que os resultados individuais por dosagem estão apresentados no APÊNDICE B.

Analisando a Figura 39, verifica-se que para todas as nove dosagens estudadas nesta etapa houve crescimento da resistência dos 7 para os 28 dias. Para as dosagens com sílica ativa, também se verifica o aumento de resistência dos 28 para os 56 dias, correspondendo a 18% para o traço TF-7 e 10% para o traço TF-9.

A resistência do traço TF-3, com ajuste da granulometria do agregado miúdo, é 14% maior que a do traço padrão TF-2.

A redução de 10% no teor de EPS (TF-4) aponta um aumento de 18% na resistência à compressão, e a redução de 20% no teor de EPS (TF-5) indica um

aumento de 38% na resistência à compressão, quando comparadas ao traço padrão (TF-1).

Para o traço TF-9, composto com sílica ativa, areia fina e redução de 20% no teor de EPS, o aumento de resistência à compressão foi de 62% aos 28 dias, quando comparado ao traço padrão TF-2.

Todas essas melhorias no desempenho à compressão do concreto leve com EPS podem ser frutos da melhoria da matriz cimentícia, com o melhor arranjo dos grãos do agregado miúdo composto por areia fina e média, aliado ao preenchimento dos vazios de cimento pela sílica ativa, reforçando a matriz cimentícia do material.

A adição de 0,6% de fibras de aço beneficia a resistência à compressão em 14%, enquanto que a sílica ativa proporciona um aumento de 14%.

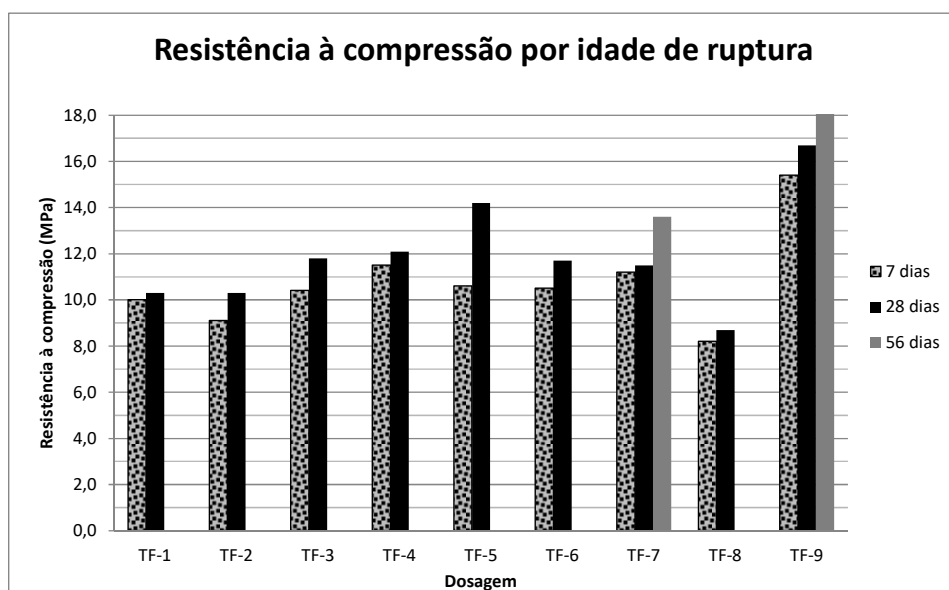


Figura 39: Resistência à compressão por idade do concreto leve

De acordo com a Figura 40, a tensão remanescente em todos os traços varia entre 34% e 67% da resistência à compressão. Em média, a resistência remanescente equivale a 50% da resistência à compressão do concreto leve com EPS, independente da idade de ruptura.

Outro fato que deve ser ressaltado é que o concreto leve com EPS, mesmo após a ruptura e posterior avaliação da tensão remanescente, permanece na forma de moldagem, sem lascamento, conforme apresentado na Figura 41.

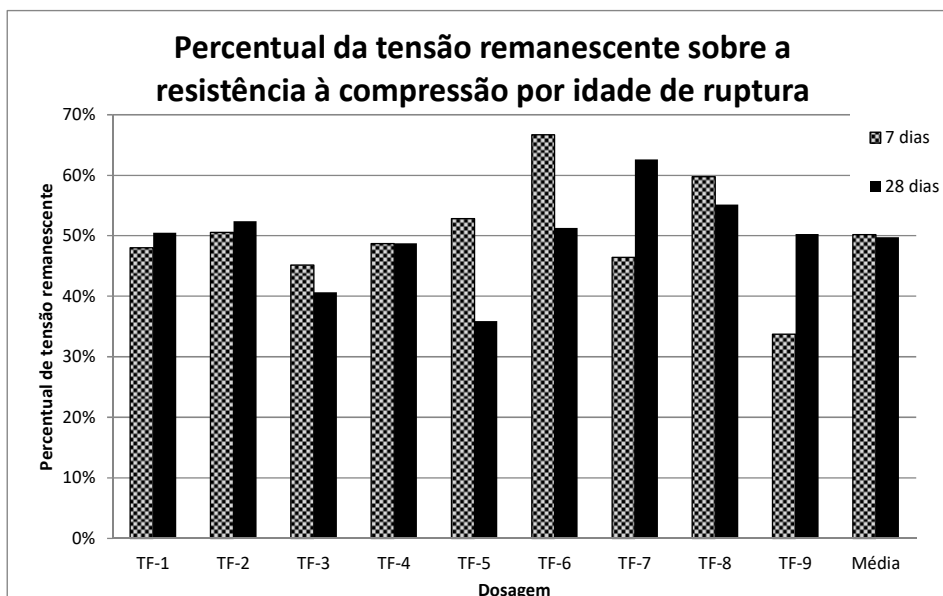


Figura 40: Percentual da resistência remanescente do concreto leve



Figura 41: Concreto leve com EPS após avaliação da tensão remanescente

#### 4.3.2 Absorção por capilaridade

O ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade nos concretos endurecidos foi conduzido conforme as recomendações da NBR 9779:2012 (ABNT, 2012), em todos os nove traços contemplados nesta etapa final do estudo. Os resultados individuais de cada corpo de prova por dosagem são apresentados na Tabela 18.

Cabe salientar que todos os corpos de prova cilíndricos (com dimensões de 100 mm x 200 mm) foram moldados e curados em câmara úmida até os 28 dias, idade em que foram ensaiados.

Tabela 18: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade

CP	Massa seca $m_s$ (g)	Massa saturada – $m_{sat}$ (g)					Altura de água (cm)	Absorção – $C$ (g/cm <sup>2</sup> )				
		3 h	6 h	24 h	48 h	72 h		3 h	6 h	24 h	48 h	72h
1	1897,1	1898,1	1902,3	1902,8	1904,4	1905,2	2,3	0,013	0,066	0,073	0,093	0,103
2	1904,7	1906,6	1912,2	1912,7	1914,3	1915,2	2,2	0,024	0,095	0,102	0,122	0,134
3	1840,5	1842,0	1847,4	1848,0	1849,6	1850,6	2,5	0,019	0,088	0,095	0,116	0,129
TF-1: Média							2,3	0,019	0,083	0,090	0,110	0,122
4	1927,7	1931,5	1933,7	1936,9	1938,9	1939,6	2,8	0,048	0,076	0,117	0,143	0,152
5	1872,1	1874,9	1876,5	1879,7	1881,5	1881,7	2,7	0,036	0,056	0,097	0,120	0,122
6	1795,9	1798,1	1801,1	1802,3	1803,7	1804,3	2,5	0,028	0,066	0,081	0,099	0,107
TF-2: Média							2,7	0,037	0,066	0,098	0,121	0,127
7	1891,2	1893,9	1894,2	1897,8	1898,5	1900,3	1,0	0,034	0,038	0,084	0,093	0,116
8	1960,9	1962,8	1963,5	1966,5	1967,3	1968,1	1,2	0,024	0,033	0,071	0,081	0,092
9	1777,9	1780,6	1781,2	1784,4	1785,2	1786,7	1,1	0,034	0,042	0,083	0,093	0,112
TF-3: Média							1,1	0,031	0,038	0,079	0,089	0,107
10	1907,8	1910,6	1912,2	1917,0	1918,5	1919,5	2,7	0,036	0,056	0,117	0,136	0,149
11	2050,2	2052,5	2053,8	2057,9	2059,7	2060,4	2,2	0,029	0,046	0,098	0,121	0,130
12	2250,4	2253,0	2254,2	2259,0	2260,7	2261,7	2,2	0,033	0,048	0,109	0,131	0,144
TF-4: Média							2,4	0,033	0,050	0,108	0,129	0,141
13	2054,5	2059,3	2060,0	2065,6	2067,2	2067,9	2,7	0,061	0,070	0,141	0,162	0,171
14	2022,2	2026,7	2027,6	2032,7	2034,4	2035,2	2,4	0,057	0,069	0,134	0,155	0,166
15	2147,4	2149,4	2148,4	2149,2	2149,5	2149,8	2,5	0,025	0,013	0,023	0,027	0,031
TF-5: Média							2,5	0,048	0,051	0,099	0,115	0,122
16	2085,1	2088,6	2088,9	2092,8	2094,1	2094,7	1,5	0,045	0,048	0,098	0,115	0,122
17	2063,6	2067,5	2067,8	2072,7	2073,8	2074,4	1,8	0,050	0,053	0,116	0,130	0,138
18	2141,3	2144,8	2145,0	2149,5	2150,8	2151,3	1,4	0,045	0,047	0,104	0,121	0,127
TF-6: Média							1,6	0,046	0,050	0,106	0,122	0,129
19	1996,5	2002,8	2004,5	2010,4	2011,2	2012,6	1,6	0,080	0,102	0,177	0,187	0,205
20	1974,6	1980,3	1982,4	1987,3	1989,7	1990,1	0,8	0,073	0,099	0,162	0,192	0,197
21	1825,6	1831,7	1833,7	1839,3	1840,9	1841,5	1,1	0,078	0,103	0,174	0,195	0,202
TF-7: Média							1,2	0,077	0,101	0,171	0,191	0,202
22	1669,1	1677,8	1679,2	1690,2	1695,7	1699,3	1,6	0,111	0,129	0,269	0,339	0,385
23	2184,2	2193,5	2194,9	2204,7	2209,2	2211,6	1,4	0,118	0,136	0,261	0,318	0,349
24	1913,6	1924,5	1926,5	1937,8	1943,2	1947,5	1,9	0,139	0,164	0,308	0,377	0,432
TF-8: Média							1,6	0,123	0,143	0,279	0,345	0,388
25	2099,0	2101,4	2101,5	2101,6	2101,8	2102,0	0,5	0,031	0,032	0,033	0,036	0,038
26	2062,5	2065,2	2065,4	2065,5	2065,6	2065,7	0,8	0,034	0,037	0,038	0,039	0,041
27	2096,7	2098,7	2098,9	2099,0	2099,2	2099,4	0,5	0,025	0,028	0,029	0,032	0,034
TF-9: Média							0,6	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038



Ao analisar a Figura 42, pode-se identificar que o traço TF-8 com adição de fibras de polipropileno apresentou o maior índice de absorção, próximo ao valor  $0,4 \text{ g/cm}^2$  após 72 h de imersão.

Para o traço composto TF-9, a absorção não ultrapassa o valor de  $0,05 \text{ g/cm}^2$  em nenhuma fase de imersão, demonstrando o excelente comportamento dessa mistura (Figura 51).

Os traços TF-1, TF-2, TF-3, TF-4, TF-5 e TF-6 apresentaram comportamento semelhante e valores próximos do índice de absorção, quando avaliado o tempo de imersão, como pode ser verificado pela proximidade das curvas de ajuste apresentadas na Figura 42 para cada traço estudado.

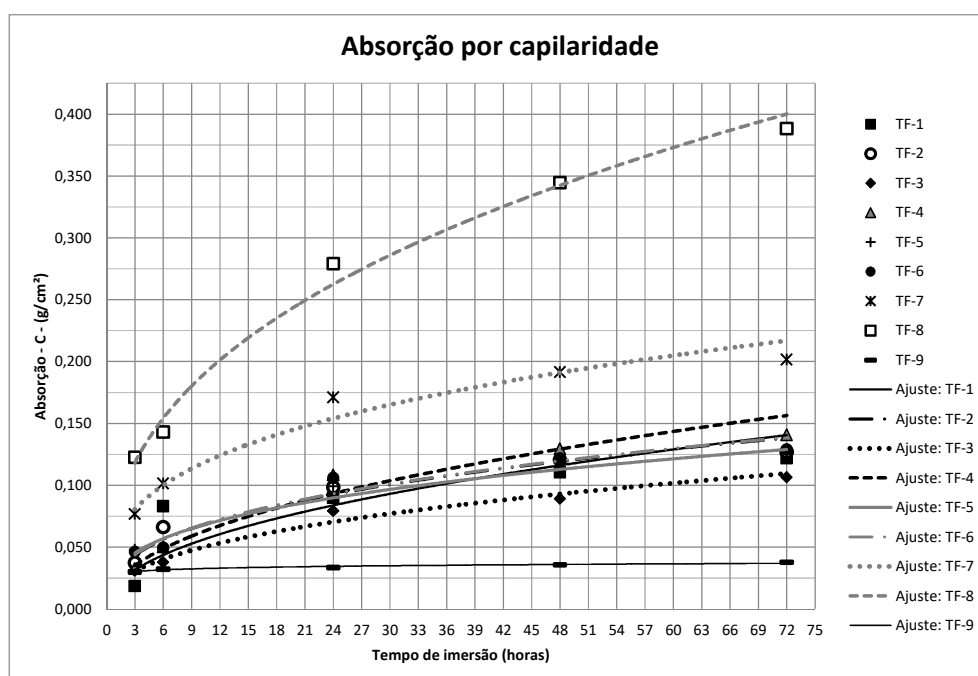


Figura 42: Absorção de água por capilaridade com curva de ajuste

Para o traço TF-9, assim como o baixo valor de absorção, é possível observar que a altura de percolação de água também é a menor dos traços avaliados, conforme apresentado na Figura 43.

A Figura 44 apresenta o comportamento da absorção por tempo de imersão para cada traço analisado. Vale ressaltar que em todos os traços, quanto maior o tempo de imersão, maior é a absorção do concreto.

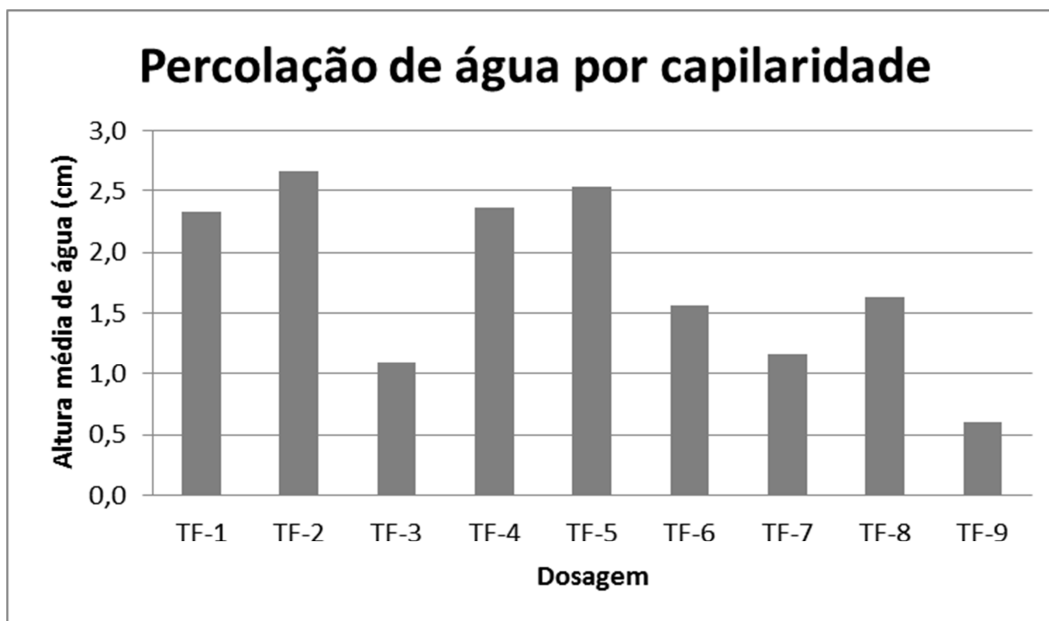


Figura 43: Altura média de ascensão de água por capilaridade

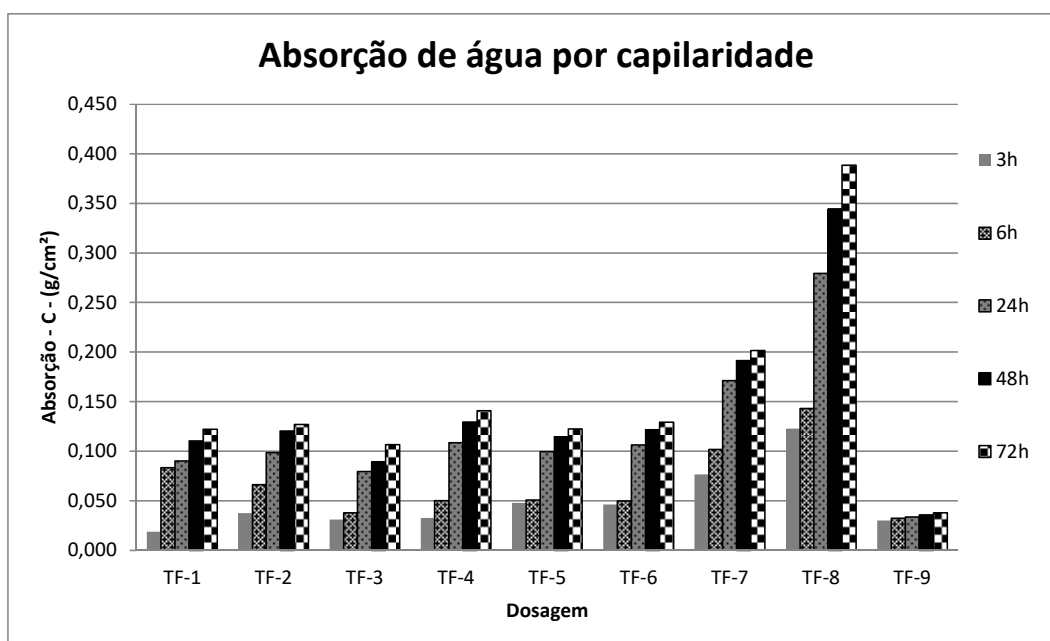


Figura 44: Absorção de água por capilaridade por tempo de imersão

Quando o EPS com pérolas menores foi utilizado para o traço TF-2 (Figura 46), observou-se que a absorção foi 5% maior, e a altura de ascensão 17% maior que no traço com pérolas maiores (TF-1, Figura 45).



Figura 45: Absorção por capilaridade – TF-1



Figura 46: Absorção por capilaridade – TF-2

A redução do teor de EPS (TF-4 e TF-5, Figura 47) não demonstrou alterações de absorção por capilaridade e de percolação de água no concreto leve, quando comparados ao traço padrão (TF-1).

A adição de fibras de aço (TF-6, Figura 48) não interferiu na absorção por capilaridade do concreto, pois foi mantido o índice de absorção próximo aos resultados encontrados para o traço padrão (TF-2, Figura 46) e a altura de percolação foi menor.



Figura 47: Absorção por capilaridade – TF-5



Figura 48: Absorção por capilaridade – TF-6

Para o traço com sílica ativa (Figura 49), o índice de absorção foi maior que no traço padrão, no entanto a altura de percolação foi 55% menor.

A utilização de sílica ativa e a melhoria de distribuição da granulometria do agregado miúdo, associadas (TF-9, Figura 51) ou não (TF-3 e TF-7, Figura 49), proporciona redução da altura de percolação de água por capilaridade em 60% no traço TF-3, 56% no traço TF-7 e 78% no traço TF-9, quando comparados ao traço padrão TF-2.





Figura 49: Absorção por capilaridade – TF-7



Figura 50: Absorção por capilaridade – TF-8



Figura 51: Absorção por capilaridade – TF-9

De acordo com HELENE (1993), a penetração de água por capilaridade é menor quando a pressão capilar é menor. A pressão capilar é menor quando o diâmetro dos poros é maior. E, quando o diâmetro dos poros é maior, maior será a absorção de água.

Sendo o EPS um agente incorporador de vazios, é possível explicar os elevados valores de absorção encontrados no ensaio normalizado, possivelmente pelos vazios provenientes da degradação do EPS com a temperatura.

#### **4.3.3 Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica**

A determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica no estado endurecido das nove dosagens finais de concreto leve com EPS seguiu as recomendações da NBR 9778:2005 (ABNT, 2005).

Todos os corpos de prova cilíndricos, com 100 mm x 200 mm, foram ensaiados aos 28 dias. Permaneceram em câmara úmida até a data do ensaio. Os resultados obtidos estão indicados na Tabela 19.

Na Figura 52 estão apresentados os valores pontuais encontrados para cada corpo de prova ensaiado e seus resultados foram ajustados para cada dosagem analisada. Pode-se, então, observar que o traço com adição de fibras de polipropileno (TF-8) apresentou o maior percentual de absorção de água, enquanto que para o traço (TF-9) resultou o menor percentual de absorção.

O comportamento do índice de vazios segue de maneira similar a absorção de água, conforme pode ser visto na Figura 53, na qual constam os valores individuais para cada corpo de prova por traço de concreto leve estudado.

Avaliando os valores médios da absorção de água e do índice de vazios de cada um dos nove traços finais estudados (Figura 54), identifica-se para esse conjunto de dosagens que o índice de vazios é sempre maior que a absorção de água.

Para as variações das dosagens finais estudadas, vale ressaltar que a redução do diâmetro das pérolas de EPS aumentou a absorção e os vazios. O ajuste da granulometria da areia reduz esses percentuais.

A redução do teor de EPS no concreto leve proporciona um maior teor de argamassa na mistura, capaz de gerar um aumento na absorção e no índice de vazios.

A adição de fibras de aço não altera a absorção do concreto leve. No entanto, devido a sua interferência na trabalhabilidade, nota-se um aumento no índice de vazios.

A utilização de sílica ativa reduz a absorção de água e o índice de vazios.

Tabela 19: Absorção, índice de vazios e massa específica

CP	Massas (g)			Absorção - C - (%)	Índice de vazios - I <sub>v</sub> -	Massa Específica SECA $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica SATURADA $\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica REAL $\rho_r$ (g/cm <sup>3</sup> )
	Seca - m <sub>s</sub> -	Saturada - m <sub>sat</sub> -	Imersa - m <sub>i</sub> -					
1	1865,1	1973,8	498,1	5,8%	7,4%	1,26	3,96	1,36
2	1711,1	1815,4	352,5	6,1%	7,1%	1,17	5,15	1,26
3	1910,6	2011,3	531,4	5,3%	6,8%	1,29	3,79	1,39
TF-1: Média				5,7%	7,1%	1,24	4,30	1,34
6	1649,6	1784,4	217,3	8,2%	8,6%	1,05	8,21	1,15
7	1572,8	1714,4	149,7	9,0%	9,0%	1,01	11,46	1,11
8	1590,6	1714,8	157,4	7,8%	8,0%	1,02	10,90	1,11
TF-2: Média				8,3%	8,5%	1,03	10,19	1,12
12	1655,8	1781,0	225,9	7,6%	8,1%	1,06	7,89	1,16
13	1689,7	1827,3	250,3	8,1%	8,7%	1,07	7,30	1,17
14	1629,1	1738,8	168,5	6,7%	7,0%	1,04	10,32	1,12
TF-3: Média				7,5%	7,9%	1,06	8,50	1,15
17	1883,8	2053,5	491,6	9,0%	10,9%	1,21	4,18	1,35
18	2167,2	2316,2	749,8	6,9%	9,5%	1,38	3,09	1,53
19	1957,1	2071,9	504,7	5,9%	7,3%	1,25	4,11	1,35
TF-4: Média				7,2%	9,2%	1,28	3,79	1,41
22	1900,0	2065,9	502,2	8,7%	10,6%	1,22	4,11	1,36
23	1887,9	2057,1	509,2	9,0%	10,9%	1,22	4,04	1,37
24	1891,3	2043,8	484,9	8,1%	9,8%	1,21	4,22	1,34
TF-5: Média				8,6%	10,4%	1,22	4,12	1,36
27	1894,5	2038,1	503,5	7,6%	9,4%	1,23	4,05	1,36
28	1858,6	2009,8	469,8	8,1%	9,8%	1,21	4,28	1,34
29	1989,4	2169,3	604,7	9,0%	11,5%	1,27	3,59	1,44
TF-6: Média				8,3%	10,2%	1,24	3,97	1,38
32	1794,7	1906,4	371,8	6,2%	7,3%	1,17	5,13	1,26
33	1889,5	1995,3	460,3	5,6%	6,9%	1,23	4,34	1,32
34	1709,8	1809,4	273,8	5,8%	6,5%	1,11	6,61	1,19
TF-7: Média				5,9%	6,9%	1,17	5,36	1,26
37	1627,4	1862,1	397,5	14,4%	16,0%	1,11	4,69	1,32
38	1819,7	2006,8	468,2	10,3%	12,2%	1,18	4,29	1,35
39	1783,7	1971,4	237,0	10,5%	10,8%	1,03	8,32	1,15
TF-8: Média				11,7%	13,0%	1,11	5,77	1,27
42	2092,3	2191,5	650,4	4,7%	6,4%	1,36	3,37	1,45
43	1990,9	2100,4	540,7	5,5%	7,0%	1,28	3,88	1,37
44	1980,4	2091,2	557,9	5,6%	7,2%	1,29	3,75	1,39
TF-9: Média				5,3%	6,9%	1,31	3,67	1,41

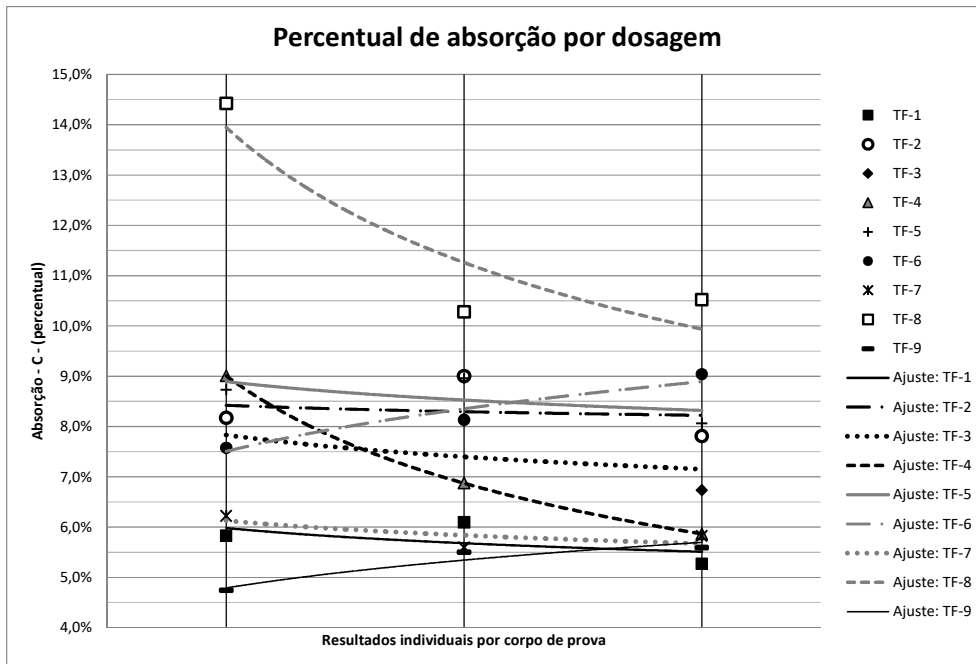


Figura 52: Absorção de água por corpo de prova para cada dosagem

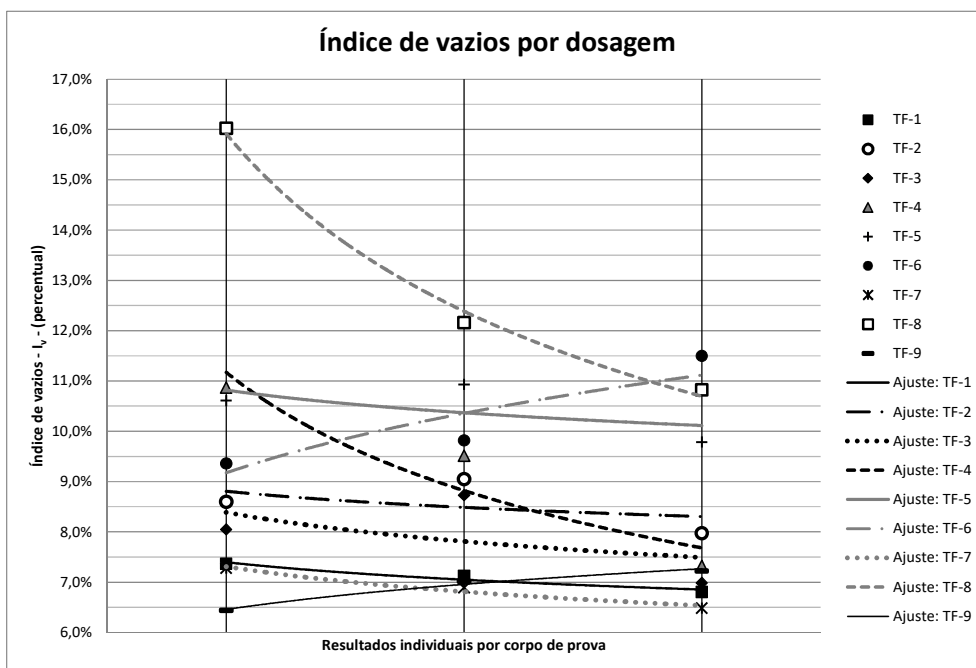


Figura 53: Índice de vazios por corpo de prova para cada dosagem

As fibras de polipropileno, devido à redução da trabalhabilidade, aumentam os percentuais de absorção e o índice de vazios do concreto leve.

A massa específica de cada uma das nove dosagens finais, calculadas conforme a NBR 9778:2005 (ABNT, 2005), está apresentada na Figura 55.



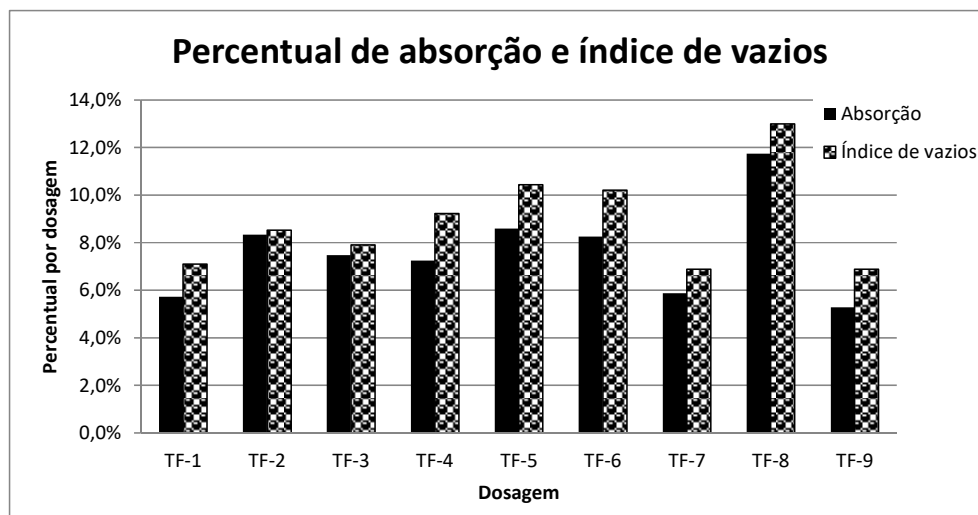


Figura 54: Absorção de água e índice de vazios por dosagem

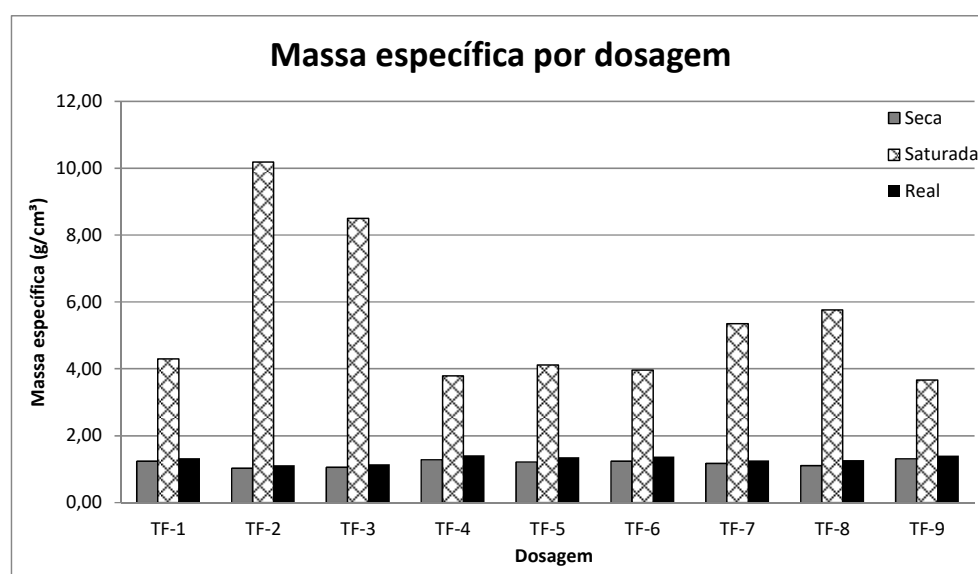


Figura 55: Massa específica seca, saturada e real por dosagem

A massa específica real média encontrada foi  $1,30 \text{ g/cm}^3$ , e a diferença entre o maior e o menor valor foi de  $0,29 \text{ g/cm}^3$ . A menor massa específica real é  $1,12 \text{ g/cm}^3$  para o traço TF-2, e os traços TF-4 e TF-9 apresentaram o maior valor de massa específica real, de  $1,41 \text{ g/cm}^3$ .

A média da massa específica seca foi de  $1,19 \text{ g/cm}^3$ , sendo que o menor valor encontrado foi para o traço TF-2, com redução do tamanho das pérolas de EPS, e o maior valor foi para o traço composto TF-9.

A massa específica saturada também apresentou seus valores extremos para os traços TF-2 e TF-9, maior e menor valor, respectivamente, porém o comportamento foi oposto ao ocorrido para a massa específica seca.

Como foi previsto, visando verificar a interferência da elevação de temperatura no EPS, foram executados simultaneamente os ensaios de absorção de água com secagem a 50 °C e posterior imersão com aquecimento nessa temperatura. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 20. Cabe salientar que não foi realizado o ensaio para o traço TF-9.

Como pode ser verificado na Figura 56, em média, tanto os valores da absorção de água quanto os do índice de vazios obtidos no ensaio a 50 °C são aproximadamente 20% dos valores encontrados para o ensaio normalizado com temperatura de 105 °C.

Tabela 20: Absorção de água, índice de vazios e massa específica – ensaios a 50 °C

CP	Massas (g)			Absorção - C - (%)	Índice de vazios - I <sub>v</sub> -	Massa Específica SECA ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica SATURADA ρ <sub>sat</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica REAL ρ <sub>r</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
	Seca - m <sub>s</sub> -	Saturada - m <sub>sat</sub> -	Imersa - m <sub>i</sub> -					
4	1691,9	1717,0	197,7	1,5%	1,7%	1,11	8,69	1,13
5	1829,8	1853,0	332,9	1,3%	1,5%	1,20	5,57	1,22
TF-1: Média				1,4%	1,6%	1,16	7,13	1,18
9	1709,9	1758,4	203,4	2,8%	3,1%	1,10	8,65	1,14
10	1741,5	1788,9	230,8	2,7%	3,0%	1,12	7,75	1,15
11	1693,1	1742,6	187,5	2,9%	3,2%	1,09	9,30	1,12
TF-2: Média				2,8%	3,1%	1,10	8,56	1,14
15	1689,0	1724,5	157,3	2,1%	2,3%	1,08	10,96	1,10
16	1732,0	1764,9	186,1	1,9%	2,1%	1,10	9,48	1,12
TF-3: Média				2,0%	2,2%	1,09	10,22	1,11
20	1847,3	1867,8	313,6	1,1%	1,3%	1,19	5,96	1,20
21	2032,5	2059,7	506,3	1,3%	1,8%	1,31	4,07	1,33
TF-4: Média				1,2%	1,5%	1,25	5,01	1,27
25	1982,7	2011,2	455,3	1,4%	1,8%	1,27	4,42	1,30
26	2029,5	2055,4	486,2	1,3%	1,7%	1,29	4,23	1,32
TF-5: Média				1,4%	1,7%	1,28	4,32	1,31
30	2043,2	2074,2	526,8	1,5%	2,0%	1,32	3,94	1,35
31	2058,7	2090,0	518,2	1,5%	2,0%	1,31	4,03	1,34
TF-6: Média				1,5%	2,0%	1,32	3,99	1,34
35	2100,2	2126,5	586,9	1,3%	1,7%	1,36	3,62	1,39
36	1827,9	1853,9	304,0	1,4%	1,7%	1,18	6,10	1,20
TF-7: Média				1,3%	1,7%	1,27	4,86	1,29
40	1728,0	1767,2	221,0	2,3%	2,5%	1,12	8,00	1,15
41	1797,3	1833,0	283,3	2,0%	2,3%	1,16	6,47	1,19
TF-8: Média				2,1%	2,4%	1,14	7,23	1,17

De acordo com o CEB 192 (1998), *apud* SILVA (2006), a qualidade dos concretos pode ser considerada em função da absorção de água por imersão, sendo

que, para teores de absorção inferiores a 3% a absorção é baixa e o concreto é de boa qualidade, para teores entre 3% e 5% a absorção é média e o concreto de média qualidade, e quando o teor de absorção é superior a 5% a absorção é alta e a qualidade do concreto é pobre.

Para HELENE (1983), *apud* LEVY (2001), a durabilidade do concreto pode ser considerada em função da absorção de água, pois para valores de absorção inferiores a 4,2% os concretos são classificados como duráveis, para teores de absorção entre 4,2% e 6,3% o concreto é considerado normal, e quando a absorção é superior a 6,3% o concreto é deficiente. Com relação ao índice de vazios, o concreto é considerado durável para valores abaixo de 10%, normal com porosidade entre 10% e 15% e deficiente se a porosidade for superior a 15%.

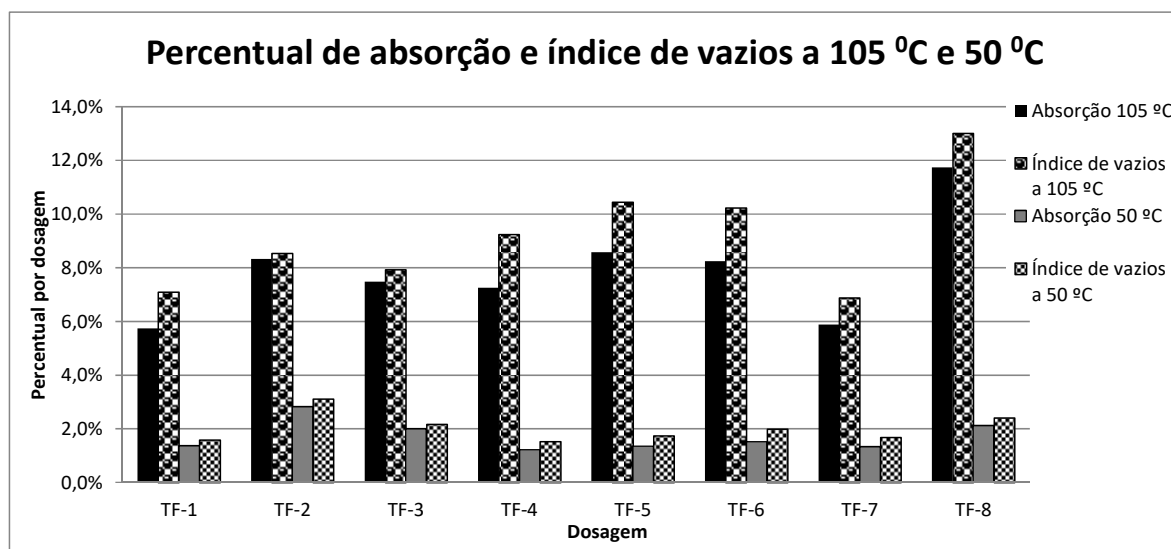


Figura 56: Absorção de água e índice de vazios por dosagem a 50 °C e 105 °C

Dessa forma, ao se considerarem apenas os valores encontrados para o ensaio de absorção com temperatura de 105 °C, os resultados indicam que os concretos apresentam alto índice de absorção, qualidade pobre e são deficientes.

No entanto, quando se consideram os valores no ensaio de absorção a 50 °C, têm-se concretos de baixa absorção, boa qualidade e duráveis.

Para ambas as temperaturas, os concretos apresentaram índices de vazios abaixo de 15%. No ensaio a 50 °C todos os concretos são considerados duráveis, com porosidade abaixo de 10%. Para o ensaio a 105 °C os traços TF-5, TF-6 e TF-8 são considerados normais, com porosidade entre 10% e 15%, e os demais traços podem ser considerados duráveis.

Considerando que a temperatura máxima suportada pelo EPS sem prejudicar suas propriedades é próxima aos 85 °C, os valores encontrados para o ensaio normalizado com temperatura de 105 °C podem não ser satisfatórios, devido à possibilidade de degradação do EPS, provocando um maior número de vazios permeáveis, principalmente na superfície dos corpos de prova (topo e fundo) de concreto leve com EPS.

#### 4.3.4 Interferência da temperatura na resistência à compressão

Para verificar se houve interferência da elevação de temperatura nos resultados dos traços de concreto leve com EPS, após o ensaio de absorção de água, os corpos de prova foram submetidos à ruptura por compressão axial. E, também para avaliar o comprometimento do concreto exposto a temperaturas mais elevadas, corpos de prova foram submetidos a secagem em estufa a 250 °C por 72 h. Esse tempo de exposição foi escolhido para manter igualdade de secagem com o ensaio para determinar a absorção de água por imersão.

Os resultados médios da resistência à compressão para as diferentes temperaturas de exposição estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Resistência à compressão e interferência da exposição a temperaturas elevadas

Dosagem	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)				Perda de resistência a 250 °C
	Temperatura ambiente	Exposição a 50 °C	Exposição a 105 °C	Exposição a 250 °C	
TF-1	10,3	10,5	10,4	6,9	33,0%
TF-2	10,3	10,3	8,6	6,3	38,8%
TF-3	11,8	10,1	9,5	7,9	33,1%
TF-4	12,1	12,2	12,2	8,2	32,2%
TF-5	14,2	12,0	10,9	8,9	37,3%
TF-6	11,7	11,2	9,9	8,7	25,6%
TF-7	11,5	13,0	12,5	8,7	24,3%
TF-8	8,7	8,6	7,4	5,9	32,2%
TF-9	16,7	---	16,8	12,6	24,6%

Avaliando os resultados médios para as temperaturas de exposição de 50 °C, eles indicam que para os traços TF-1, TF-2, TF-4 e TF-7 não houve diminuição da capacidade resistente do concreto.

Para a temperatura de exposição de 105 °C, os traços TF-1, TF-4, TF-7 e TF-9 não apresentaram perda da capacidade resistente, quando comparados com as resistências à compressão de corpos de prova em temperatura ambiente.

Os traços TF-3, TF-5, TF-6 e TF-8 apresentaram perda da capacidade resistente tanto na exposição a 50 °C quanto a 105 °C.

Com relação ao traço com sílica ativa, TF-7, a elevação da temperatura proporcionou ganho de resistência. Esse ganho pode ser devido ao fato das reações de reatividade da sílica continuarem ocorrendo após 28 dias, e o processo de aquecimento em imersão ter simulado uma cura térmica no concreto, beneficiando o desempenho mecânico.

Na Figura 57 são apresentadas as resistências médias de todas as nove dosagens estudadas, expostas às diferentes temperaturas.

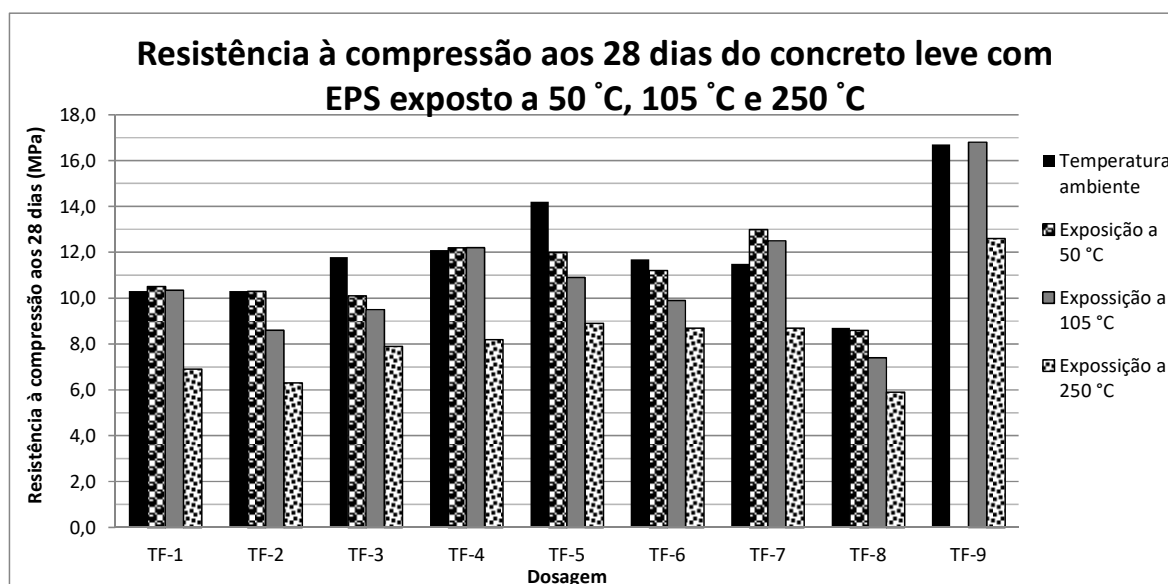


Figura 57: Interferência da elevação de temperatura na resistência à compressão

Para os corpos de prova expostos a 250 °C por 72 h, a perda da capacidade resistente em média foi 30%, quando comparada à resistência dos corpos de prova em temperatura ambiente.

Para os traços TF-2, TF-3, TF-5, TF-6 e TF-8 a resistência à compressão é diretamente reduzida com o aumento da temperatura.

#### 4.3.5 Perda de massa após secagem por 72 h

Após secagem em estufa com temperatura controlada de 50 °C, 105 °C e 250 °C, foi calculado o percentual da perda de massa do concreto leve com EPS, ou seja, o percentual da diferença entre a massa dos corpos de prova secos em temperatura ambiente e a massa após a secagem em estufa. Os valores percentuais para cada dosagem são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Perda de massa após secagem

Dosagem	Percentual de perda de massa ao secar		
	50 °C	105 °C	250 °C
TF-1	1,1%	6,1%	9,2%
TF-2	2,5%	7,5%	9,5%
TF-3	1,9%	7,4%	9,5%
TF-4	1,3%	6,6%	9,1%
TF-5	1,9%	7,7%	10,0%
TF-6	1,7%	7,0%	9,6%
TF-7	1,2%	7,3%	10,8%
TF-8	1,8%	7,6%	10,7%
TF-9	-	6,2%	10,7%
Média	1,7%	7,0%	9,9%

Na Figura 58 está apresentado o comportamento de cada traço com relação à perda de massa por temperatura de secagem.

Também é possível verificar que quanto maior a temperatura de secagem, maior o percentual de perda de massa do concreto leve, possivelmente porque o EPS, apesar de sofrer a maior degradação, representa uma parcela pequena da massa, e a matriz cimentícia perde massa pela eliminação da água dos poros e alteração dos compostos hidratados pela exposição a temperaturas elevadas.

Avaliando simultaneamente o comportamento da capacidade resistente após secagem (Figura 57), é possível verificar que quanto maior a perda de massa, menor é a capacidade resistente do concreto.

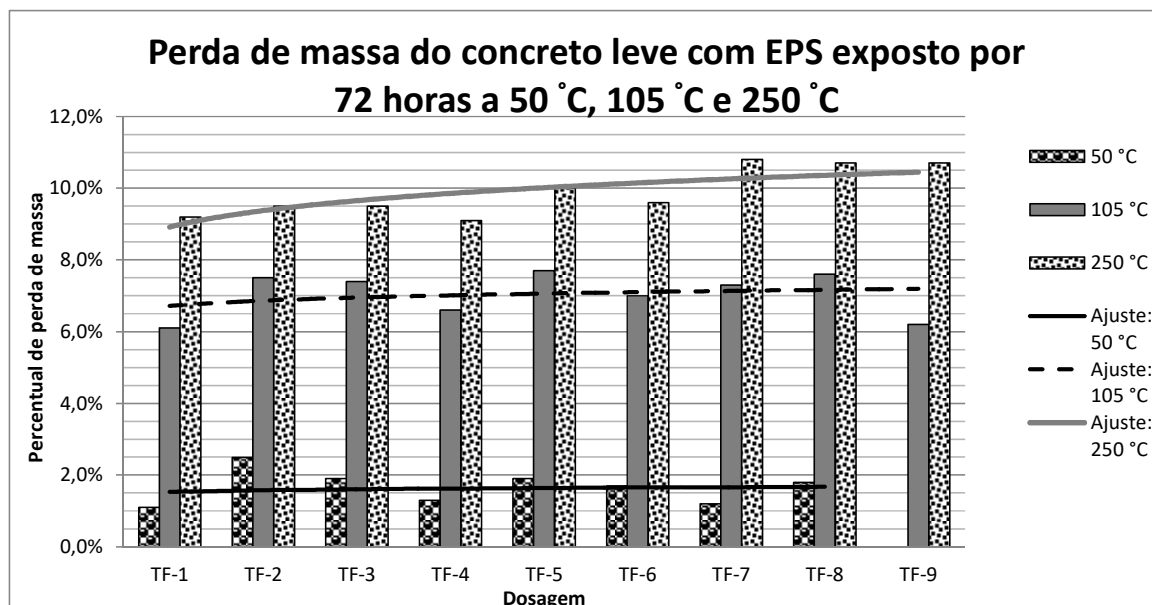


Figura 58: Perda de massa por temperatura de secagem

#### 4.3.6 Resistência à compressão versus módulo de elasticidade dinâmico

Na Tabela 23 são apresentados os valores encontrados para a resistência à compressão aos 28 dias para as nove dosagens finais do concreto leve com EPS, bem como o módulo de elasticidade dinâmico de cada traço.

Tabela 23: Resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico por dosagem

Dosagem	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
TF-1	10,3	9,9
TF-2	10,3	8,8
TF-3	11,8	9,5
TF-4	12,1	11,4
TF-5	14,2	12,0
TF-6	11,7	11,3
TF-7	11,5	10,5
TF-8	8,7	7,6
TF-9	16,7	14,5

Pode-se observar (Figura 59) que para todas as melhorias da variável de resistência à compressão houve aumento no módulo de elasticidade dinâmico, evidenciando que quanto maior a resistência do concreto leve com pérolas de EPS, maior é seu módulo de elasticidade.

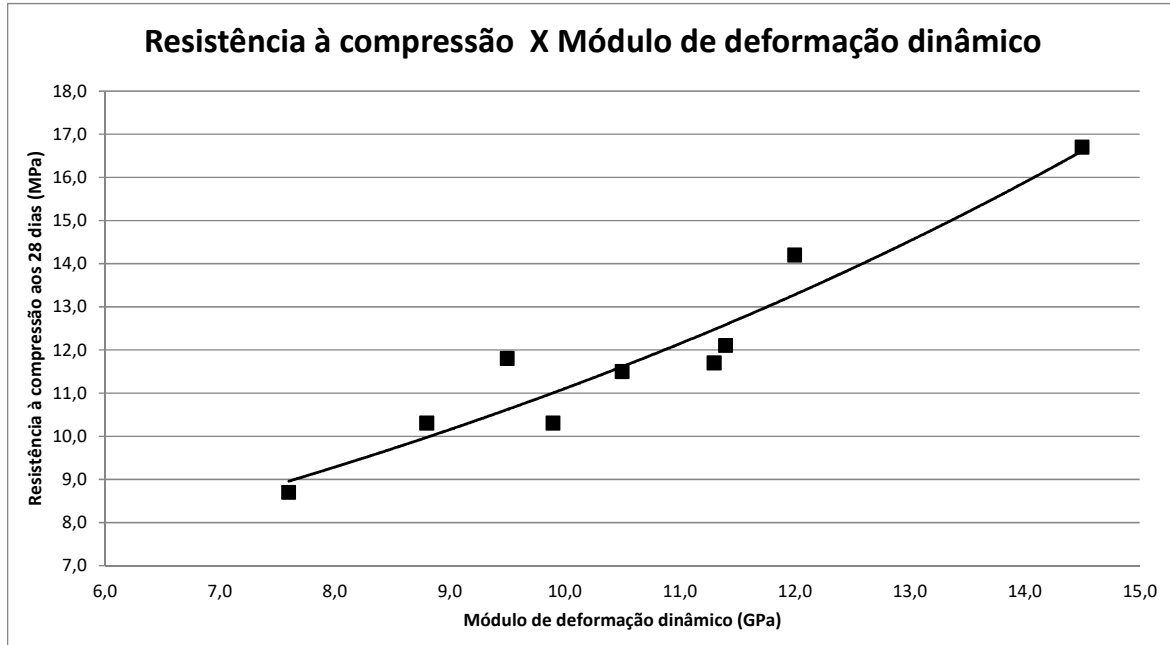


Figura 59: Resistência à compressão versus módulo de elasticidade dinâmico

#### 4.3.7 Resistência à compressão e à tração por compressão diametral

Os valores encontrados para resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral para cada dosagem estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Resistência à compressão e resistência à tração

Dosagem	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
TF-1	10,3	1,0
TF-2	10,3	1,2
TF-3	11,8	1,3
TF-4	12,1	1,1
TF-5	14,2	1,2
TF-6	11,7	1,2
TF-7	11,5	1,2
TF-8	8,7	1,0
TF-9	16,7	1,5

Verifica-se que a resistência à tração por compressão diametral corresponde aproximadamente a 10% da resistência à compressão do concreto leve com pérolas de EPS.

Para o traço com melhor distribuição granulométrica do EPS, TF-2, a resistência à tração corresponde a 12% da resistência à compressão, apresentando o melhor desempenho.



No entanto, para o traço composto, apesar da relação entre os valores não apresentar o melhor desempenho, os resultados individuais isolados foram os maiores, ou seja, a resistência à tração foi de 1,5 MPa e a resistência à compressão, de 16,7 MPa, que são os maiores valores encontrados dentre as dosagens estudadas, mas apresentam uma relação em que a resistência à tração corresponde apenas a 9% da resistência à compressão.

Como pode ser observado na Figura 60, a melhoria do desempenho da resistência à tração é diretamente proporcional ao aumento da resistência à compressão.

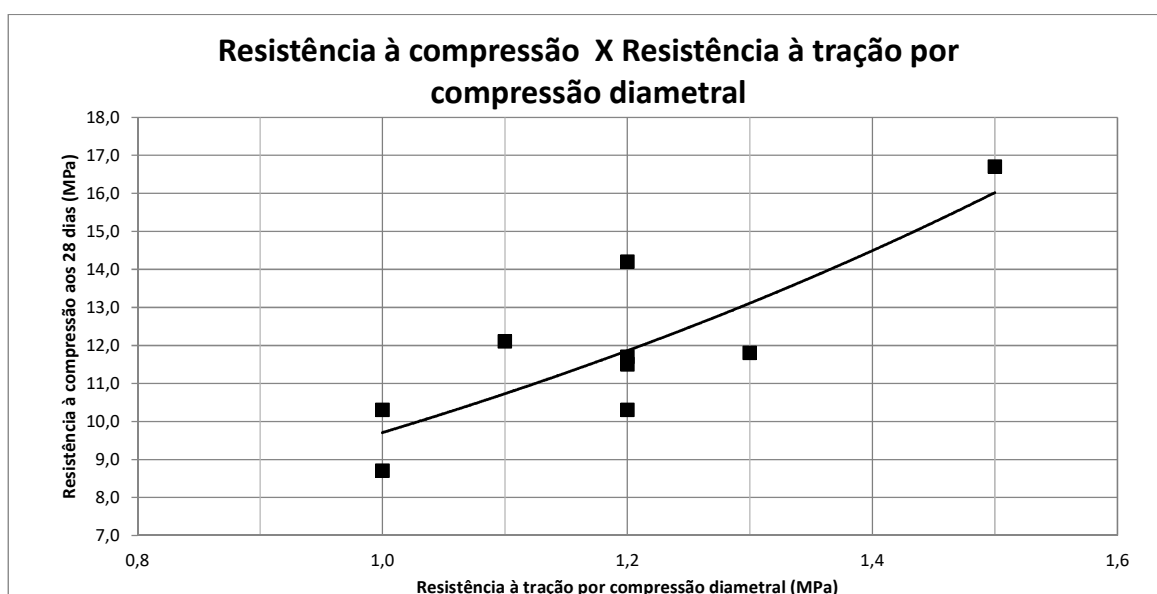


Figura 60: Resistência à compressão versus resistência à tração

#### **4.3.8 Resistência à tração na flexão e tenacidade**

A determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos (15 cm x 15 cm x 50 cm) de concreto leve com EPS seguiu as recomendações da NBR 12142:2010 (ABNT, 2010). Os resultados individuais para as dosagens sem adição de fibras estão apresentados na Tabela 25.

Para os traços de concreto leve com adição de fibras de aço e de polipropileno, os resultados estão apresentados na Tabela 26.

Salienta-se que para todos os prismas ensaiados a ruptura ocorreu no terço médio. A idade de ensaio foi 28 dias.

Tabela 25: Resistência à tração e fator de tenacidade no concreto leve sem fibras

Prisma	Força máxima (N)	Área sob a curva (N.mm)	Deslocamento máximo considerado (mm)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Fator de tenacidade (MPa)
1	12929	9938,06	2,0955	1,7	0,44
2	12338	8837,08	1,63	1,6	0,39
3	13323	10235,09	2,052	1,8	0,45
4	12741	10272,69	2,0375	1,7	0,46
TF-1: Média				1,7	0,44
1	12911	5842,45	1,2895	1,7	0,26
2	14055	6761,28	1,4775	1,9	0,30
3	12682	6335,14	1,431	1,7	0,28
4	15291	8105,44	1,458	2,0	0,36
5	15245	8243,53	1,475	2,0	0,37
TF-2: Média				1,9	0,31
1	15841	8889,93	1,62	2,1	0,40
2	15841	18554,61	2,5185	2,1	0,82
3	18404	26371,45	2,8995	2,5	1,17
4	16848	10638,4	1,8535	2,2	0,47
TF-3: Média				2,2	0,72
1	18450	16557,05	1,7829	2,5	0,74
2	31910	1499,62	0,0895	4,3	0,07
3	18038	18723,95	2,0595	2,4	0,83
TF-4: Média				3,0	0,54
1	12041	7495,68	1,513	1,6	0,33
2	13414	7428,03	1,416	1,8	0,33
3	10850	5935,83	1,1815	1,4	0,26
4	13460	7779,43	1,3725	1,8	0,35
5	10896	6896,03	1,3705	1,5	0,31
TF-5: Média				1,6	0,32
1	13597	7503,27	1,3685	1,8	0,33
2	14833	8822,99	1,7675	2,0	0,39
3	14147	9220,92	1,9235	1,9	0,41
4	14101	9332,37	1,7875	1,9	0,41
5	14513	10285,14	1,864	1,9	0,46
TF-7: Média				1,9	0,40
1	17763	833,61	0,0855	2,4	0,04
2	21838	1307,93	0,1015	2,9	0,06
3	20007	845,87	0,077	2,7	0,04
4	20602	1035,37	0,093	2,7	0,05
5	20831	45222,32	2,6065	2,8	2,01
TF-9: Média				2,7	0,44

Tabela 26: Resistência à tração e fator de tenacidade do concreto leve com fibras

Prisma	Força máxima (N)	Área sob a curva (N.mm)	Deslocamento máximo considerado (mm)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Fator de tenacidade (MPa)
1	14650	14743,28	2,1615	2,0	0,66
2	15978	16625,56	3	2,1	0,74
3	19549	25500,29	3	2,6	1,13
4	15016	16508,03	3	2,0	0,73
TF-6: Média				2,2	0,82
1	23303	15507,31	2,273	3,1	0,69
2	22204	15722,33	2,222	3,0	0,70
3	18130	13288,84	2,768	2,4	0,59
4	21105	12406,69	2,051	2,8	0,55
5	19640	10706,98	1,6005	2,6	0,48
TF-8: Média				2,8	0,60
1	21884	23502,65	3	2,9	1,04
2	19183	19520,81	3	2,6	0,87
3	25684	24268,45	3	3,4	1,08
TF-10: Média				3,0	1,00
1	23211	31262,9	3	3,1	1,39
2	21380	25876,82	2,5225	2,9	1,15
3	23852	35834,85	3	3,2	1,59
TF-11: Média				3,0	1,38

Para a avaliação da tenacidade do concreto leve com EPS foram consideradas mais duas dosagens, identificadas na Tabela 26 por TF-10 e TF-11, nas quais foram adicionados os percentuais de 0,3% e 0,9% de fibras de aço sobre o volume de concreto, respectivamente.

A tenacidade foi calculada conforme a recomendação da norma japonesa JSCE-SF4:1984, utilizada também por OLIVEIRA (2012) e FIGUEIREDO (2011).

Dessa forma, o fator de tenacidade é determinado pelo trabalho realizado de modo a manter a integridade do prisma até determinado deslocamento (área total abaixo da curva de carregamento versus deformação).

No caso dos prismas em que não foi possível manter o carregamento até a deformação de 3 mm, foi calculada a tenacidade equivalente, ou seja, a área abaixo da curva foi considerada até a deformação máxima encontrada.

Para as dosagens sem adição de fibras, a deformação máxima ficou abaixo de 3 mm, conforme pode ser verificado no comportamento do carregamento imposto versus deformação dos prismas para cada uma das dosagens citadas (Figura 61 até Figura 67).

Avaliando as dosagens TF-1 e TF-2, a redução do tamanho das pérolas de EPS melhorou a resistência à tração na flexão, mas como a deformação máxima foi inferior em TF-2, a tenacidade também foi reduzida (Figura 61 e Figura 62).

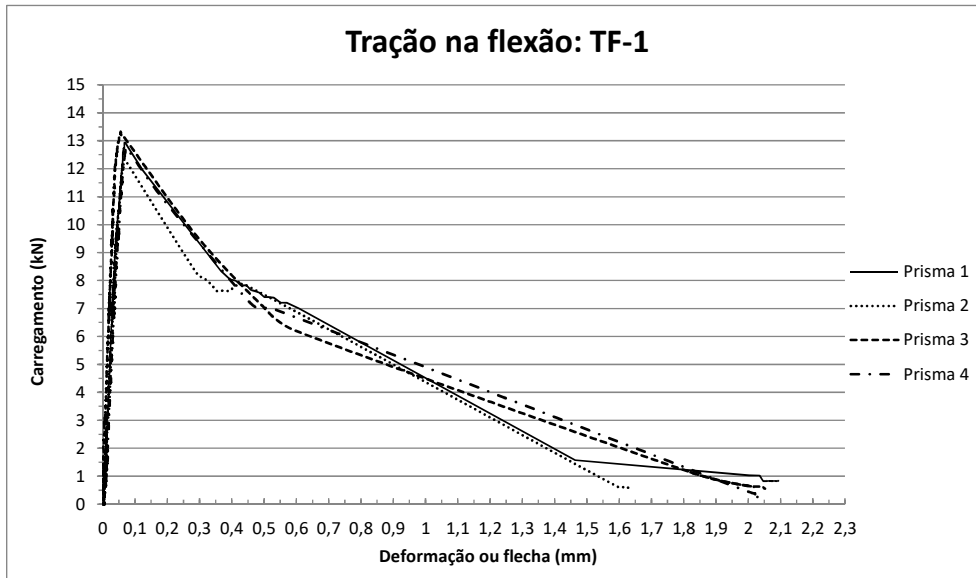


Figura 61: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-1

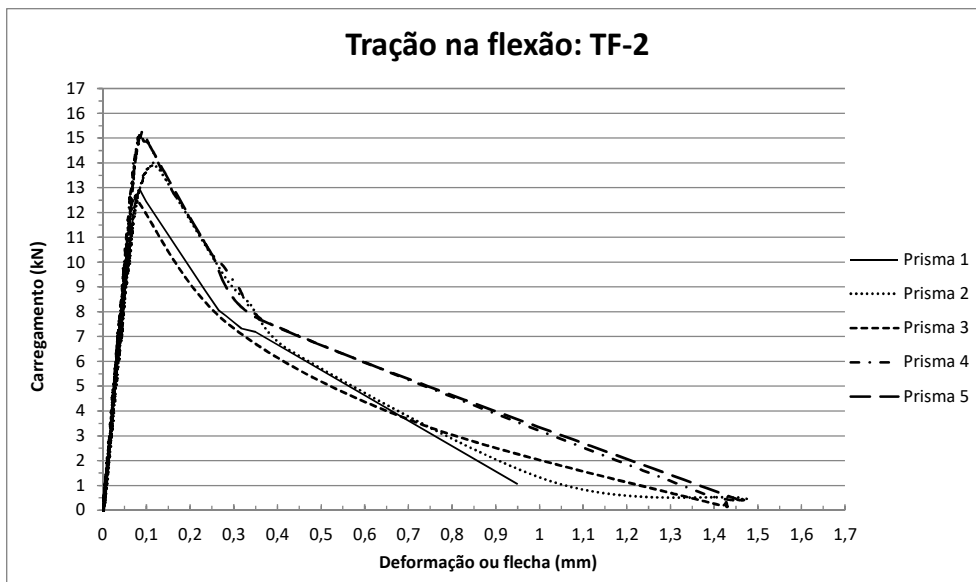


Figura 62: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-2

A substituição de parte do agregado miúdo médio por fino na dosagem TF-3 demonstra melhora de 15% na resistência à tração e 130% na tenacidade (Figura 63).

A redução de 10% no teor de EPS (TF-4) aumentou 76% a resistência à tração e 23% a tenacidade (Figura 64). Esse comportamento não se verifica na

dosagem com redução de 20% do teor de EPS (TF-5), pois a resistência à tração é 6% menor e a tenacidade 28% menor, quando comparadas às do traço padrão (TF-1).

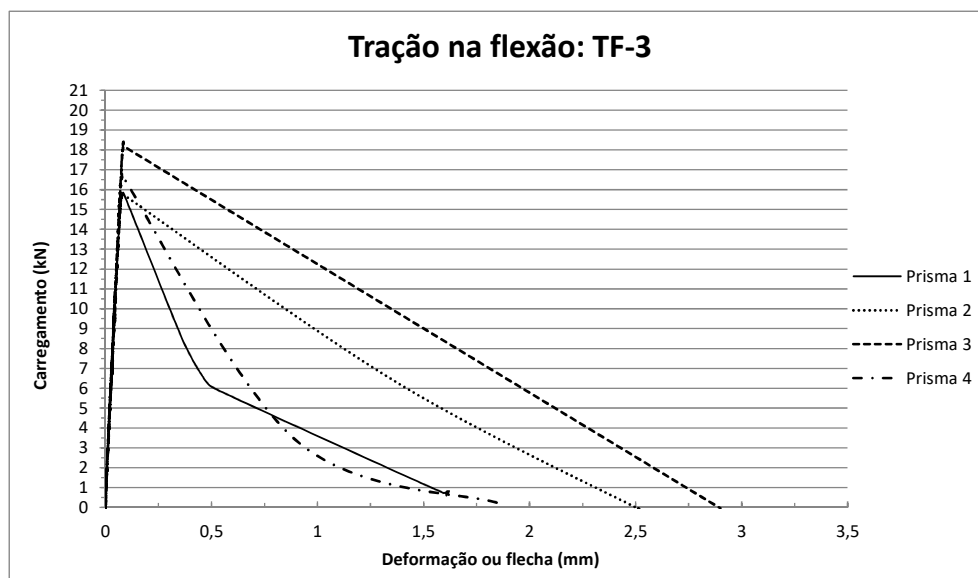


Figura 63: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-3

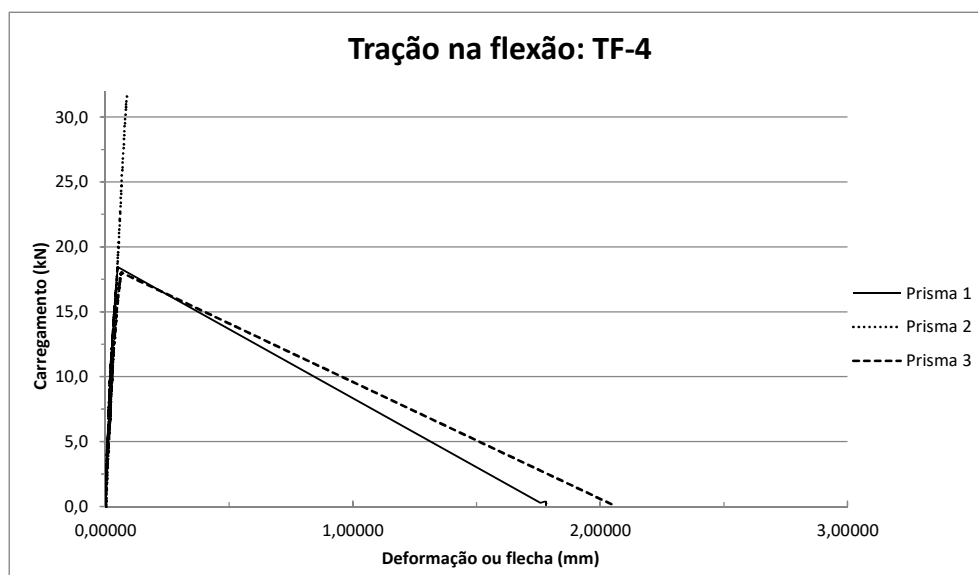


Figura 64: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-4

No entanto, o comportamento da curva carregamento versus deformação para TF-5, Figura 65, está com uma melhor postura na etapa pós-fissuração, na qual ainda é possível manter o carregamento e observar a deformação, sem apresentar ruptura brusca como ocorreu na dosagem TF-4 (Figura 64).

A utilização de sílica ativa na dosagem TF-7 contribuiu no estado pós-fissuração, aumentando em 29% a tenacidade do concreto leve. A distribuição das curvas de carregamento versus deformação pode ser verificada na Figura 66.

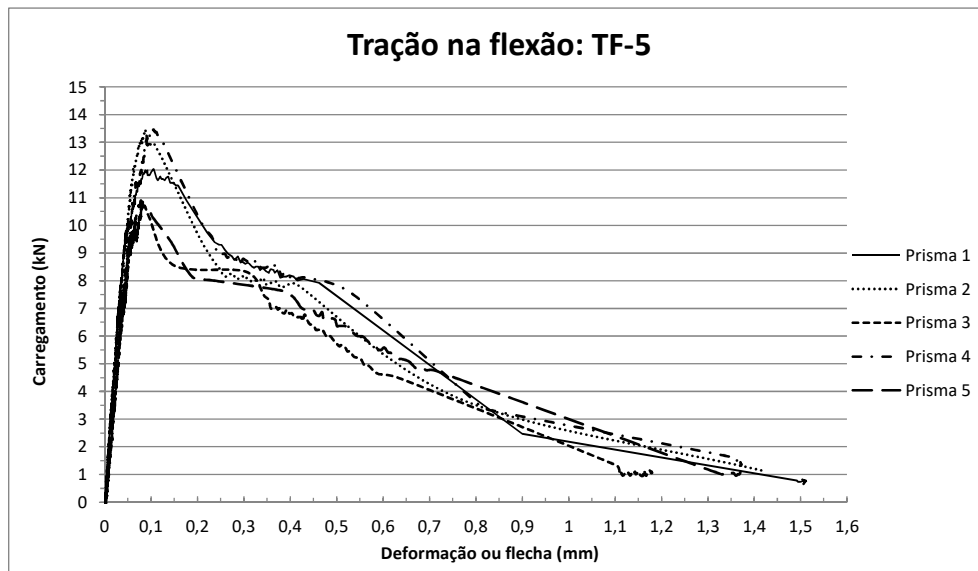


Figura 65: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-5

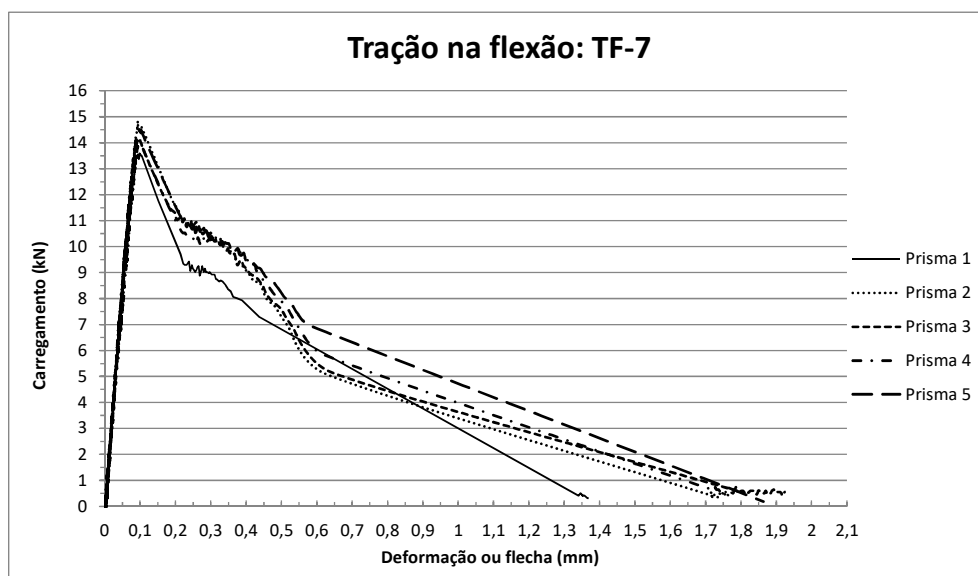


Figura 66: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-7

Para o traço composto TF-9, com sílica ativa, agregado miúdo fino e redução de 20% no teor de EPS, o ganho de resistência à tração e de tenacidade foi de 42% para ambas. No entanto, ao se observar a Figura 67, verifica-se que o comportamento pós-fissuração demonstra maior fragilidade, visto que não há progresso da deformação no estágio pós-fissuração, devido ao colapso do material.

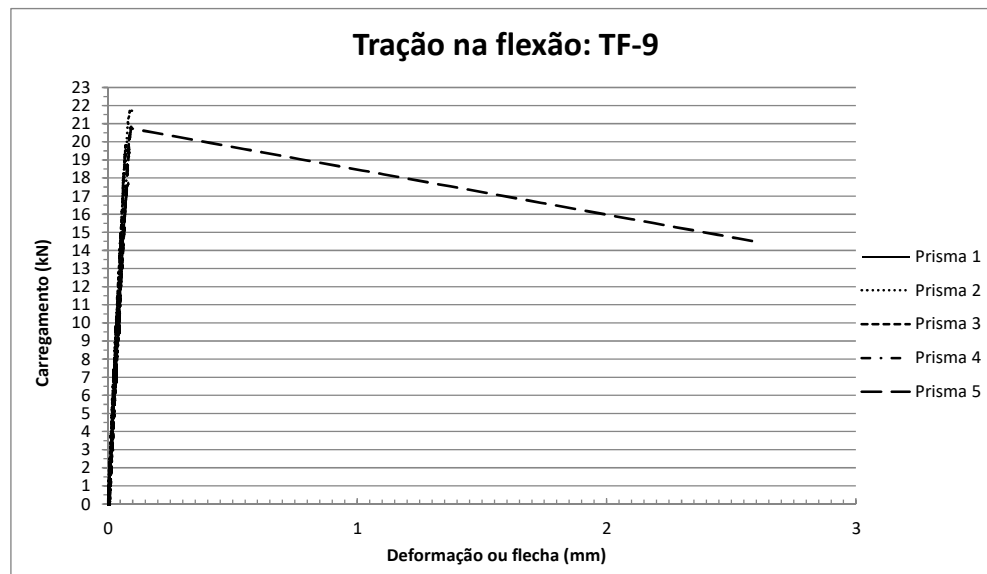


Figura 67: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-9

Avaliando num primeiro momento a adição de fibras de polipropileno (Figura 69), TF-8, verifica-se que ocorreu um aumento de 47% na resistência à tração e 94% na tenacidade, indicando a contribuição das fibras na deformação plástica do material. Outro fato a ser observado é que a deformação máxima não atingiu o valor de 3 mm, conforme apresentado na Figura 68.

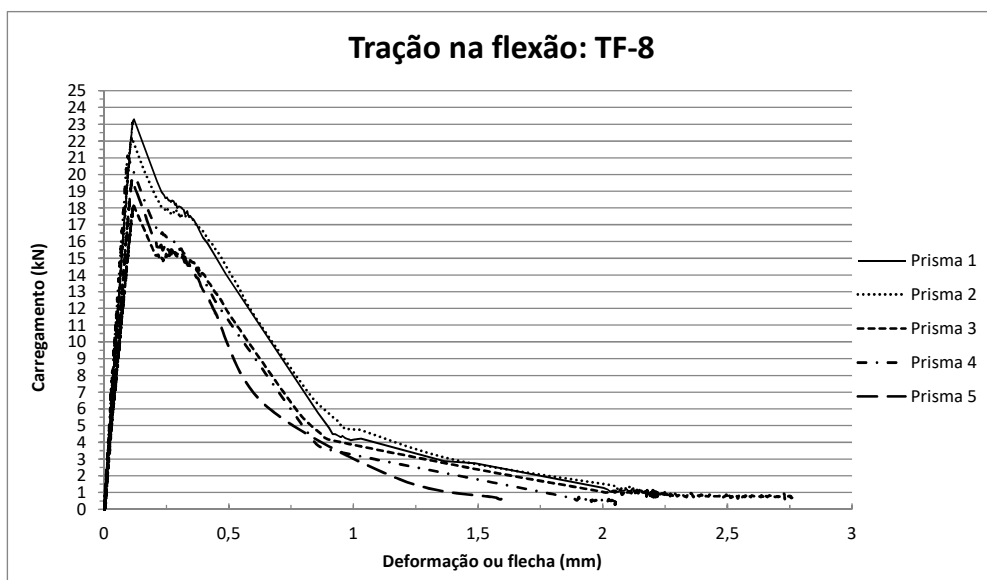


Figura 68: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-8



Figura 69: Prismas com adição de 0,2% de fibras de polipropileno

A adição de fibras de aço no concreto leve com EPS proporcionou aumento na resistência à tração na flexão e no fator de tenacidade, demonstrando os benefícios dessa fibra no estado pós-fissuração.

A Figura 70 apresenta os prismas com adição de 0,6% de fibras de aço após o ensaio de tração na flexão.



Figura 70: Prismas com adição de 0,6% de fibras de aço

Na Figura 71, na Figura 72 e na Figura 75 são apresentadas as distribuições das curvas de carregamento versus deformação para os traços de concreto leve com adição de 0,6% (TF-6), 0,3% (TF-10) e 0,9% (TF-11) de fibras de aço sobre o volume de concreto, respectivamente.



Para as dosagens, TF-10 e TF-11, com 0,3% e 0,9% de adição de fibras de aço, respectivamente, os prismas ensaiados à flexão podem ser verificados na Figura 73 e Figura 74.

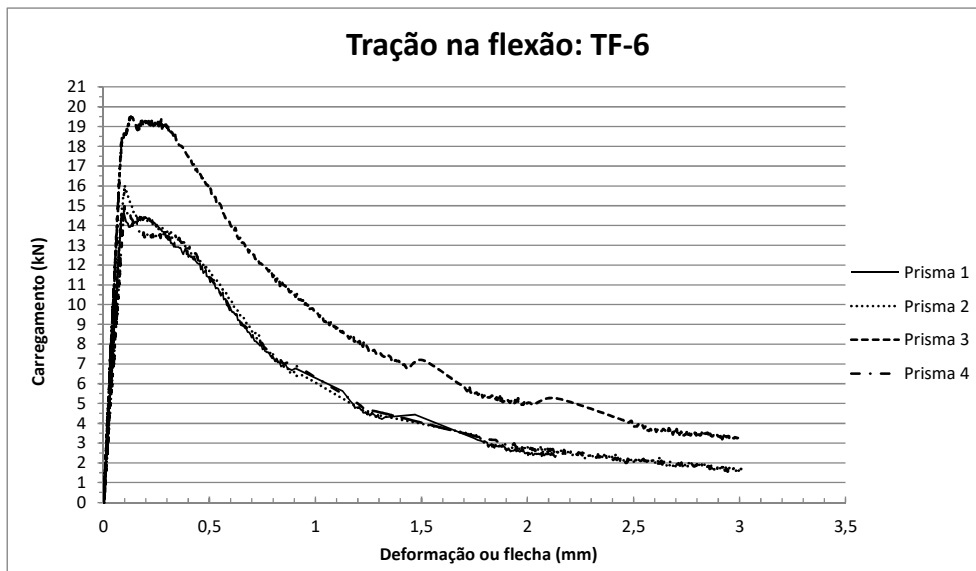


Figura 71: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-6

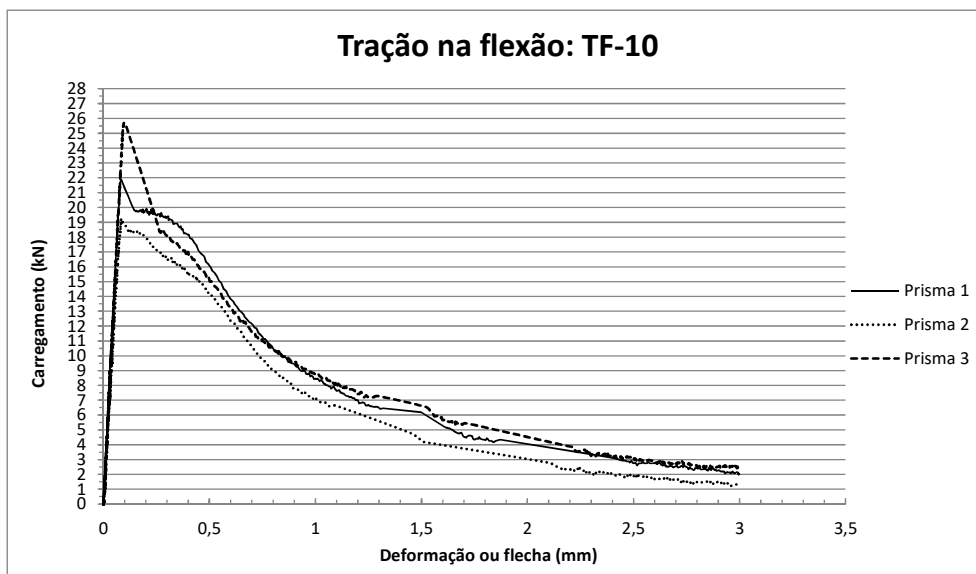


Figura 72: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-10



Figura 73: Prismas com adição de 0,3% de fibras de aço



Figura 74: Prismas com adição de 0,9% de fibras de aço

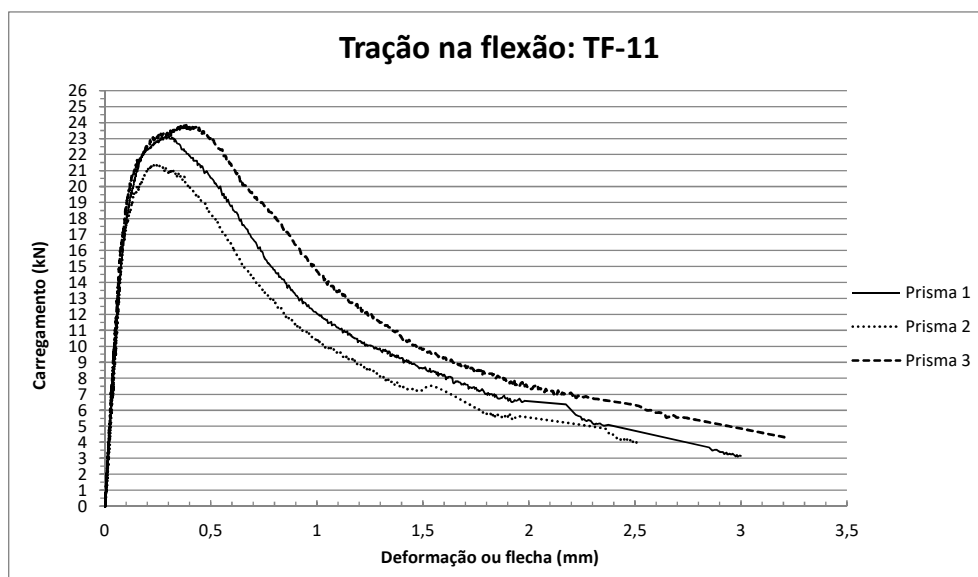


Figura 75: Carregamento versus deformação ou flecha no traço TF-11

Salienta-se que o aumento de resistência à tração, comparando ao traço padrão TF-2, representa um ganho de 58% para os teores de 0,3% e 0,9% de fibras de aço (TF-10 e TF-11), e 16% para o teor de adição 0,6% (TF-6).

Com relação à tenacidade, quando comparados ao traço sem fibras, os ganhos são mais expressivos, 222%, 165% e 345% para os traços TF-10, TF-6 e TF-11, respectivamente, com teor de adição de fibras de aço de 0,3%, 0,6% e 0,9%.

#### 4.3.9 Resistência à tração versus resistência à compressão

A Tabela 27 apresenta a média dos valores da resistência à compressão, da resistência à tração por compressão diametral e da resistência à tração na flexão, para cada uma das nove dosagens finais de concreto leve com EPS.

Avaliando os valores, é possível verificar que, em média, a resistência à tração na flexão é 19% da resistência do concreto à compressão, enquanto que a resistência à tração por compressão diametral é apenas 10% da resistência à compressão. Sendo assim, observa-se que o material se comportou de maneira semelhante ao concreto convencional.

No entanto, como pode ser observado na Figura 76, não existe uma boa correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão, pois os resultados são muito dispersos, não sendo possível obter um ajuste satisfatório.

Tabela 27: Resistência à compressão e resistência à tração do concreto leve com EPS

Dosagem	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)
TF-1	10,3	1,0	1,7
TF-2	10,3	1,2	1,9
TF-3	11,8	1,3	2,2
TF-4	12,1	1,1	3,0
TF-5	14,2	1,2	1,6
TF-6	11,7	1,2	2,2
TF-7	11,5	1,2	1,9
TF-8	8,7	1,0	2,8
TF-9	16,7	1,5	2,7
Média	11,9	1,2	2,2

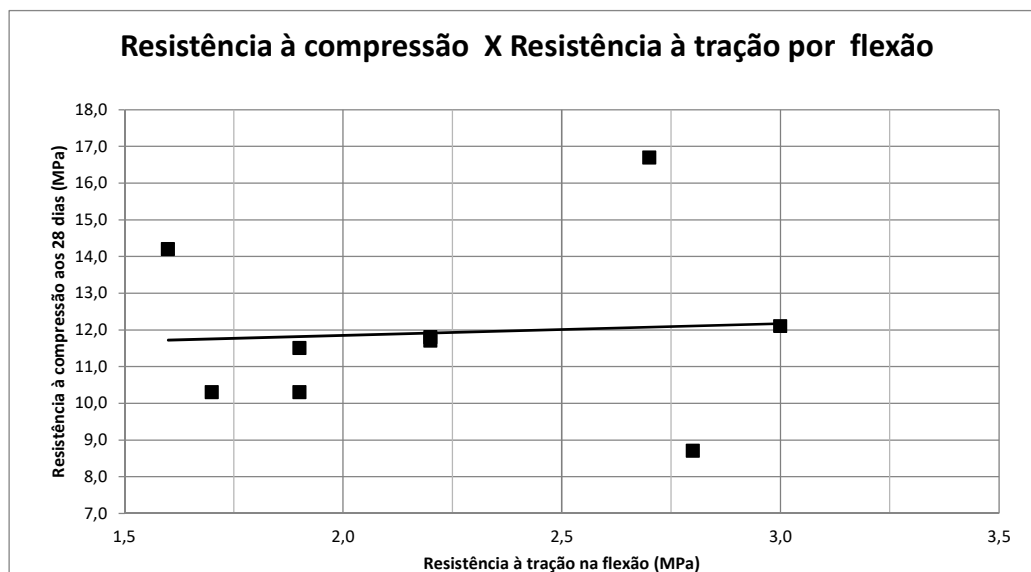


Figura 76: Resistência à compressão versus resistência à tração na flexão

#### 4.3.10 Fator de eficiência

O fator de eficiência é determinado pela relação entre a resistência à compressão e a massa específica do concreto. É um parâmetro usual para caracterizar os concretos leves.

Ao se considerar um concreto convencional com 20 MPa de resistência à compressão, massa específica de 2400 kg/m<sup>3</sup> e fator de eficiência de 8,3 MPa.dm<sup>3</sup>/kg, como parâmetro de concreto com características estruturais mínimas para comparação, os resultados apresentados na Tabela 28 demonstram que os traços estudados têm fator de eficiência superior, exceto o TF-8, com adição de fibras de polipropileno, que apresenta fator de eficiência de 7,7 MPa.dm<sup>3</sup>/kg, aproximadamente 7% menor que o do concreto convencional de 20 MPa.

Tabela 28: Fator de eficiência

Dosagem	Resistência à compressão (MPa)	Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Fator de eficiência (MPa.dm <sup>3</sup> /kg)
TF-1	10,3	1220	8,4
TF-2	10,3	1170	8,8
TF-3	11,8	1150	10,3
TF-4	12,1	1290	9,4
TF-5	14,2	1320	10,8
TF-6	11,7	1330	8,8
TF-7	11,5	1230	9,3
TF-8	8,7	1130	7,7
TF-9	16,7	1370	12,2

Dessa forma, a viabilidade de aplicação do material é justificada, seja nas situações em que a resistência mínima requerida é menor, seja nos casos em que se pode considerar a equivalência pelo fator de eficiência.

#### **4.4 Interferência dos equipamentos de ensaio**

Apresenta-se a avaliação da interferência dos equipamentos de ensaio nas propriedades do concreto leve com EPS.

Nessa etapa da pesquisa foram confeccionados 40 corpos de prova cilíndricos (10 mm x 20 mm), que foram submetidos a ensaio de compressão aos 28 dias. Essa nova dosagem produzida foi idêntica à do traço TF-2, descrito no item 4.3.

Os valores encontrados para o módulo de elasticidade e a resistência à compressão estão apresentados na Tabela 29 e na Tabela 30.

A Tabela 29 corresponde aos resultados em que os corpos de prova foram submetidos a ensaio não destrutivo para a determinação do módulo de elasticidade por impulso de vibração, no equipamento ATCP-Sonelastic, e posteriormente rompidos em prensa hidráulica da marca ELE, sem leitura da deformação. Constituem os resultados relativos ao denominado primeiro conjunto de equipamentos, identificado por ELE - Dinâmico.

Para os resultados da Tabela 30, os corpos de prova foram submetidos a ensaio de compressão e leitura da deformação na prensa marca INSTRON. São os resultados referentes ao denominado segundo conjunto de equipamentos, identificado por INSTRON - Estático.

Para os dois conjuntos foram determinadas as constantes estatísticas de média, mediana, desvio padrão, variância, valor máximo, valor mínimo e coeficiente de variação.

A divisão em duas amostras com número maior de corpos de prova foi uma escolha para melhor representar os resultados com o ensaio de módulo de elasticidade por impulso dinâmico e ruptura na prensa marca ELE, uma vez que todos os resultados apresentados anteriormente foram obtidos de maneira idêntica.

Tabela 29: Módulo de elasticidade dinâmico, carga de ruptura e resistência à compressão (ELE-Dinâmico)

Corpo de prova	Módulo de elasticidade (GPa)	Carga de ruptura (kN)	Resistência (MPa)
1	8,6	76,8	9,8
2	9,4	81,7	10,4
3	8,8	72,8	9,3
4	9,0	80,5	10,2
5	9,7	88,5	11,3
6	9,0	80,2	10,2
7	9,9	88,4	11,3
8	10,5	83,9	10,7
9	9,6	84,0	10,7
10	13,4	119,5	15,2
11	9,2	86,0	10,9
12	8,8	82,4	10,5
13	9,0	83,1	10,6
14	15,5	116,3	14,8
15	14,7	98,8	12,6
16	8,7	77,5	9,9
17	9,1	81,8	10,4
18	9,6	89,8	11,4
19	16,0	114,5	14,6
20	9,7	85,6	10,9
21	14,9	129,9	16,5
22	10,4	94,9	12,1
23	10,4	91,9	11,7
24	14,6	135,4	17,2
25	9,1	84,2	10,7
26	16,3	135,1	17,2
27	11,1	105,1	13,4
28	10,0	88,3	11,2
29	9,6	89,2	11,4
30	10,0	96,1	12,2
Média - 28 dias	10,8	94,1	12,0
Mediana	9,7	88,4	11,2
Desvio Padrão	2,5	17,5	2,2
Variância	6,1	307,8	5,0
Valor Máximo	16,3	135,4	17,2
Valor Mínimo	8,6	72,8	9,3
Coefficiente de Variação - CV	23%	19%	19%

Módulo de elasticidade dinâmico (SONELASTIC) e ruptura na prensa ELE

Observando os valores apresentados na Tabela 29, identifica-se que para o módulo de elasticidade dinâmico a média é 10,8 GPa, a metade dos valores encontrados é superior a 9,7 GPa, o desvio padrão é 2,5 GPa e o coeficiente de variação, 23%. Na mesma tabela, verifica-se que a média da resistência à

compressão é 12,0 MPa, a metade dos valores encontrados é superior a 11,2 MPa, o desvio padrão da amostra é 2,2 MPa e o coeficiente de variação, 19%.

Tabela 30: Módulo de elasticidade estático, carga de ruptura e resistência à compressão (INSTRON-Estático)

Corpo de prova	Módulo de elasticidade (GPa)	Carga de ruptura (kN)	Resistência (MPa)
31	15,8	80,26	10,2
32	17,4	79,29	10,1
33	15,8	78,24	10,0
34	24,2	82,91	10,6
35	16,9	90,42	11,5
36	26,1	112,12	14,3
37	17,3	85,66	10,9
38	12,7	70,32	9,0
39	13,9	80,35	10,2
40	20,0	118,99	15,1
Média - 28 dias	18,0	87,9	11,2
Mediana	17,1	81,6	10,4
Desvio Padrão	4,3	15,6	2,0
Variância	18,4	242,3	3,9
Máximo	26,1	119,0	15,1
Mínimo	12,7	70,3	9,0
Coeficiente de variação – CV	24%	18%	18%

Módulo de elasticidade estático e ruptura na prensa INSTRON

Para os resultados obtidos com a prensa de marca INSTRON (Tabela 30), o módulo de elasticidade estático médio é 18,0 GPa, a metade dos valores da amostra é superior a 17,1 GPa, o desvio padrão da amostra é 4,3 GPa e o coeficiente de variação, 24 %. A média da resistência à compressão é 11,2 MPa, a metade dos valores é superior a 10,4 MPa, o desvio padrão é 2,0 MPa e o coeficiente de variação, 18%.

Dessa forma, comparando os dois conjuntos de equipamentos de ensaio de compressão, apesar da média para o segundo conjunto ter sido 15 % inferior, a amostra apresenta um desvio padrão menor e, conseqüentemente, um menor coeficiente de variação.

Para o módulo de elasticidade, o valor médio do ensaio estático é 67% maior que o valor médio para o ensaio dinâmico. No entanto, o comportamento da segunda amostra apresenta maior dispersão, como pode ser verificado na Figura 77.

A curva de ajuste para o primeiro conjunto de equipamentos (ELE-Dinâmico) apresenta um valor de ajuste mais preciso se comparado ao segundo conjunto (INSTRON-Estático).

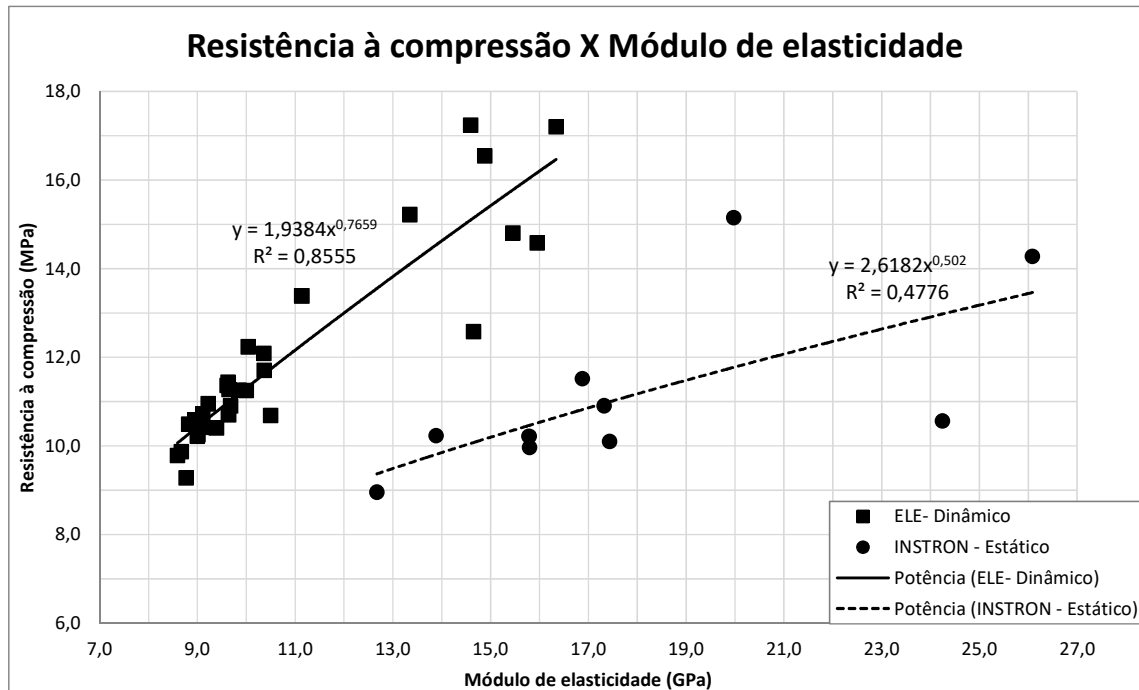


Figura 77: Resistência à compressão versus módulo de elasticidade para os dois conjuntos de equipamentos de ensaio



## **5 Conclusões**

---

Ao final da pesquisa são apresentados os ganhos de desempenho mecânico encontrados para um conjunto de dosagens de concreto leve com pérolas de EPS.

O emprego de EPS em estruturas de concreto reduz o peso das construções e o consumo de agregados (areias e britas ou seixos), da mesma forma que o emprego de adições ao concreto (materiais finos) reduz o consumo de cimento.

Com os resultados encontrados nos ensaios realizados para os diferentes traços de concreto leve com EPS, pode-se caracterizar o comportamento do material no estado endurecido pelo módulo de elasticidade, resistência à compressão, carga remanescente, resistência à tração, absorção de água e comportamento sob temperaturas elevadas.

Dessa forma, foi atendido o objetivo geral de estudar o comportamento mecânico de concreto leve com EPS, para posterior aplicação do material, principalmente em elementos estruturais pré-moldados. E, os objetivos secundários de otimizar as dosagens e reduzir o consumo de cimento podem tornar o concreto leve com pérolas de EPS mais sustentável e economicamente competitivo no mercado.

### **5.1 Considerações finais**

Em aspectos gerais, quanto maior a resistência do concreto leve à compressão, maior o módulo de elasticidade dinâmico.

A resistência à tração por compressão diametral corresponde a aproximadamente 10% da resistência à compressão.

Para um mesmo lote de corpos de prova ensaiados à compressão em equipamentos diferentes, observou-se uma variação de 15% nos resultados.

O módulo de elasticidade estático apresentou valores 65% maiores que o módulo de elasticidade dinâmico.

A resistência remanescente, determinada logo após a ruptura por compressão, resultou, em média, 50% da resistência à compressão. Mesmo após a

ruptura e posterior avaliação da tensão remanescente, o concreto leve com pérolas de EPS permaneceu íntegro, com a forma em que foi moldado, sem lascamento ou colapso.

Para os corpos de prova expostos à secagem em temperatura de 250 °C por 72 h, a perda de resistência à compressão foi, em média, 30%.

Quanto maior a temperatura de secagem por 72 h, maior foi a perda de massa. Em média, para os corpos de prova expostos a 50 °C, a perda foi de 1,7%, para 105 °C, de 7%, e para 250 °C, de 10%.

Ao se comparar a perda de massa e a capacidade resistente após a secagem, quanto maior a perda de massa, menor foi a capacidade resistente residual após exposição a temperaturas de 50 °C, 105 °C ou 250 °C.

Avaliando o fator de eficiência de 8,3 MPa.dm<sup>3</sup>/kg de um concreto convencional de resistência 20 MPa e de massa específica 2400 kg/m<sup>3</sup>, como parâmetro de características estruturais mínimas, apenas o traço com fibras de polipropileno não apresentou condições satisfatórias para utilização, com fator de eficiência 7% menor.

Observando o conjunto de variáveis por dosagem, é possível destacar os aspectos indicados nos itens apresentados na sequência.

### **5.1.1 Traços com variação da granulometria do EPS (TF-1 e TF-2)**

Quanto melhor distribuído for o tamanho das pérolas, melhor é o desempenho do concreto leve, pois para o traço com pérolas de tamanho menor (EPS-b), os resultados da resistência à compressão foram 16% maiores que os valores encontrados para o concreto leve que utilizou pérolas de maior dimensão e mais uniformidade de tamanho (EPS-a).

Vale ressaltar que o módulo de elasticidade dinâmico também aumentou quando foi utilizada uma melhor distribuição nos grãos de EPS.

### **5.1.2 Traço com mistura de areia média e areia fina (TF-3)**

A substituição de 50% da areia média por areia fina, visando melhorar a distribuição dos grãos de agregados miúdos no concreto leve com EPS, proporcionou melhorias nas propriedades mecânicas e de durabilidade.

Em comparação com o traço padrão TF-2, pode-se verificar que houve aumento de aproximadamente 3% da massa aparente, da massa seca e da massa real. A resistência à compressão foi melhorada em torno de 15%. A perda de massa após a queima foi constante, e a perda de resistência, 15% menor no concreto com areia fina, após 72 h a 250 °C.

O módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à tração por compressão diametral foram 8% maiores que no traço padrão.

Com relação às questões de durabilidade, a substituição de 50% da areia média por areia fina melhorou a distribuição dos grãos no concreto leve, reduzindo a taxa de absorção em 10% e o índice de vazios em 7%.

### **5.1.3 Traços com redução do teor de EPS (TF-4 e TF-5)**

A redução do teor de EPS no concreto leve aumentou a massa aparente e melhorou a resistência à compressão. Conseqüentemente, quando o concreto foi exposto a 250 °C por 72 h, a tensão de ruptura pós-queima foi maior que a tensão encontrada para o traço padrão.

Vale salientar que quanto menor foi a quantidade de EPS no concreto leve, maior foi o seu módulo de elasticidade dinâmico.

O acréscimo na resistência à tração por compressão diametral foi proporcional à redução do teor de EPS no concreto leve.

Em contrapartida, como o EPS é impermeável e atua como agente incorporador de vazios, as propriedades de durabilidade avaliadas neste estudo, absorção e índice de vazios, foram maiores, demonstrando que o EPS no interior do concreto proporciona uma barreira física, dificultando a percolação de fluidos, dificultando a conectividade dos poros.

### **5.1.4 Traço com fibras de aço (TF-6)**

A adição de fibras de aço num teor de 0,6% sobre o volume de concreto aumentou tanto a massa aparente quanto a resistência à compressão em 13%, em comparação com o traço padrão (TF-2).

Com relação à tensão suportada pós-queima a 250 °C por 72 h, o ganho com as fibras foi de 38%. A resistência à tração por compressão diametral se

manteve constante. A absorção não foi prejudicada pela adição das fibras de aço. No entanto, como as fibras interferem na trabalhabilidade, verificou-se um aumento de 20% no índice de vazios.

A resistência à tração na flexão apresentou um ganho de 16% quando comparado ao traço padrão. Para a tenacidade, o ganho com a adição de fibras de aço foi de 165%.

### **5.1.5 Traço com 10% de sílica ativa em substituição ao cimento (TF-7)**

A substituição de 10% do peso de cimento pelo mesmo volume de sílica ativa proporcionou um aumento de 12% da resistência à compressão do concreto leve com EPS, indicando uma melhora no desempenho mecânico do material.

A redução de 10% no consumo de cimento neste traço tornou o concreto leve com EPS mais sustentável.

A massa aparente, a massa seca e a massa real foram maiores devido ao melhor preenchimento dos vazios pelos finos da sílica ativa.

A perda de massa após a exposição a 250 °C por 72 h foi maior no concreto com sílica. No entanto, a resistência residual após a queima resultou 38% maior se comparada com a do traço padrão, e a perda de resistência, 37% menor se comparada com a resistência antes da queima.

### **5.1.6 Traço com fibras de polipropileno (TF-8)**

Tanto as variáveis de massa quanto as de resistência e as de durabilidade foram prejudicadas quando as fibras de polipropileno foram adicionadas ao concreto leve com pérolas de EPS.

Cabe salientar que a massa aparente do concreto leve com fibras de polipropileno foi reduzida quando comparada com a massa relativa ao traço padrão. Esse fato foi resultante da perda de trabalhabilidade da mistura, dificultando o adensamento e fazendo que o concreto apresentasse aumentos expressivos no índice de vazios e na absorção.

### **5.1.7 Traço composto (areia fina, sílica ativa e redução de EPS, TF-9)**

Quando o traço composto foi comparado com o traço padrão ou com os demais traços (TF-3, TF-5 e TF-7), nos quais ocorreu apenas a variação de um dos componentes presentes no traço composto, pode-se verificar que o comportamento de cada variável estudada apresentou potencial de melhora em todas as comparações.

Para melhor exemplificar esse comportamento do traço composto, ao se analisar apenas a resistência à compressão, foi possível identificar que essa variável resultou 62% maior que no traço padrão, 41% maior que no traço com areia fina, 20% maior que no traço com sílica ativa e 17% maior que no traço com redução de 20% do teor de EPS.

Esse ganho identifica a melhora das propriedades do concreto leve com pérolas de EPS, principalmente quando se ampliou o número de variações de materiais na dosagem.

Cabe salientar que ao comparar o traço composto TF-9 com o traço com sílica ativa TF-7, as variáveis que avaliam o índice de vazios, o percentual de perda de massa e a perda de resistência após aquecimento a 250 °C por 72 h permaneceram praticamente sem alterações, demonstrando que os demais componentes do traço composto não interferiram nos benefícios adquiridos com a sílica ativa.

Comparando o traço composto TF-9 com o traço padrão TF-2, foi possível identificar que ele resultou 17% mais pesado, seu módulo de elasticidade dinâmico foi 65% maior, a resistência à compressão após a queima foi o dobro, e que as variáveis de durabilidade também foram beneficiadas. A absorção por imersão reduziu 36% e o índice de vazios diminuiu 19%, em relação ao traço padrão.

Quando se avalia pontualmente o traço composto com o traço padrão, o traço com sílica ativa, o traço com areia fina e o traço com 20% de redução no teor de EPS, verifica-se que as variáveis de massa aparente, massa seca, massa real, módulo de elasticidade dinâmico, resistência após a queima e à tração por compressão diametral também aumentaram, evidenciando por completo os benefícios encontrados com esse traço composto.

A absorção por capilaridade, além de apresentar um menor teor de absorção, também apresentou menor altura de ascensão, quando comparada aos demais traços.

Também foi observado um aumento de 42% na resistência à tração na flexão e na tenacidade, quando comparado ao traço padrão.

## **5.2 Sugestão para outras pesquisas**

Visando dar continuidade às pesquisas sobre o comportamento do concreto leve com EPS, são sugeridos os estudos de avaliação dos comportamentos térmico e acústico do material.

Pontualmente ao estudo de caracterização do material, são sugeridas investigações de durabilidade, como carbonatação, penetração de íons cloreto e por ensaios de envelhecimento. Também se faz necessário avaliar a microestrutura e a porosidade do concreto leve com pérolas de EPS.

Outras linhas de estudos do concreto leve com EPS estão relacionadas à verificação frente as normas de desempenho de edifícios e de incêndio.

A continuidade da investigação de refinamento das dosagens, buscando proporcionar melhorias no desempenho mecânico e redução do consumo de cimento, não gera outra linha de pesquisa, mas deve atender muitas questões que não foram contempladas no escopo deste trabalho.

Cabe salientar que podem ser exploradas investigações de dosagens com fixação do parâmetro de consistência, diferentes controles de tempo para inserir o aditivo, uso de aditivo colante para verificar se há melhor aderência das pérolas de EPS na argamassa, ampliação do teor de aplicação de areia fina, utilização de pó de quartzo na fração de agregado e até mesmo explorar a utilização de brita zero.

Acredita-se que a continuidade das pesquisas relativas ao emprego de concreto leve com EPS em estruturas pré-moldadas para painéis de paredes e de lajes contribuirá para a disseminação do material, de modo a proporcionar seu desenvolvimento e aplicabilidade na construção civil.

## 6 Referências

---

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. O desafio da sustentabilidade na construção civil. In: GOLDEMBERG, J. **Série sustentabilidade**. v.5. São Paulo: Blücher, 2011.

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 213R-03**: Guide for Structural lightweight-aggregate concrete, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C1611**: Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. West Conshohocken, 2014.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. v.II. Cap. 47. p.1731-1767. São Paulo: IBRACON, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA (ABIQUIM). **Comissão setorial do EPS no Brasil**. [www.epsbrasil.eco.br](http://www.epsbrasil.eco.br), acessado em 04/11/2016.

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

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade, Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 12644**: Concreto leve – Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 13956-3**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias . Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15823-2**: Concreto auto-adensável. Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams, Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15530**: Fibras de aço para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 35**: Agregados leves para concreto estrutural – especificação. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (ABRAPEX). **Manual de utilização do EPS na construção civil**. São Paulo: Pini, 2006.



BABU, D. S.; BABU, K. G.; WEE, T. H. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. **Cement and concrete research**, v.35, p.1218-1223, 2005.

\_\_\_\_\_. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete. **Cement and concrete research**, v.28, p.520-527, 2006.

BABU, K. G.; BABU, D. S. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. **Cement and concrete research**, v.33, p.755-762, 2003.

\_\_\_\_\_. Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates. **Cement and concrete research**, v.26, p.605-611, 2004.

CATOIA, T. **Concreto Ultraleve® estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes**. 2012, 153p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

CHEN, B.; FANG, C. Contribution of fibres to the properties of EPS lightweight concrete. **Magazine of concrete research**, v.61, n.9, November, p.671-678, 2009.

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

\_\_\_\_\_. Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads. **Construction and building materials**, v.21, p.7-11, 2007.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. Diagnosis and assessment concrete structures – State of the art report. **Bulletin d' information n° 192**. Javier, 1998.

DITZ, J. D. **Desempenho de almofadas de argamassa modificada na transferência de tensões de compressão em ligações de concreto pré-moldado**. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

DONIAK, I. L. O; GUTSTEIN, D. Concreto pré-fabricado. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. v.II. Cap. 42. p.1569-1613. São Paulo: IBRACON, 2011.

EVANGELISTA, P. P. A.; COSTA, D. B.; ZANTA, V. M. Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v.10, n.3, p.23-40, jul./set. 2010.

FERREIRA, D. V. G. **Edifícios com lajes maciças e paredes portantes pré-moldadas de concreto leve com pérolas de EPS**, 2013. 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

FIGUEIREDO, A. D. (2000). **Concreto com fibras de aço**. 2000. Boletim técnico. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras de aço**. 248 p. Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2011.

GORNINSKI, J. P. Concreto com polímeros. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. v.II. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 44. p.1616-1643.

HELENE, P. R. L. **La Agresividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón**. Hormigón, AATH, n. 10 p. 25-35, ago. 1983.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto Armado**. 241p. Tese (Livre Docência) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v.4, n.2, p.19-30, abr./jun. 2004.

ISAIA, G. C. et al. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v.10, n.1, p.121-137, jan./mar. 2010.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, **SF4 – Method of tests for flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**, p.58-61. Tokyo, 1984.

JOHN, V. M. Concreto sustentável. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. v.II. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 50. p.1843-1869.

KAN, A.; DEMIRBOGA, R. A novel material for lightweight concrete production. **Cement & concrete composites**, v.31 (2009a), p.489-495.

KAYALI, O; HAQUE, N. M.; ZHU, B. Some characteristics of strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. **Cement and concrete research**, v.25 (2003), p.207-213.

KERBAUY, M. J. **Concreto estrutural ultraleve com desmoldagem rápida destinado à fabricação de placas, painéis e lajes**. BR n. PI 1004268-7, 2010.

KERBAUY, M. J. **Concreflex®: a evolução da construção**. Folder. 2011.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 194p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil São Paulo, 2001.

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 (2014), p.227-232.

MADANDOUST, R.; RANJBAR, M. M.; MOUSAVI, S. Y. An investigation on the properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. **Cement & concrete composites**, v.25 (2011), p.3721-3731.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MILED, K.; SAB, K.; LE ROY, R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: experimental investigation and modelling. **Mechanics of materials**, v.39, p.222-240, 2007.

MOHAMMED, H. J.; ZAIN, M. F. M. Experimental application of EPS concrete in the new prototype design of the concrete barrier. **Construction and Building Materials**. v.124, p.312–342, 2016.

LO MONTE, F.; BAMONTE, P.; GAMBAROVA, P. G. Physical and mechanical properties of heat-damage structural concrete containing expanded polystyrene synthesized particles. **Fire and materials**, v.39, p.58-71, 2015.

OLIVEIRA JÚNIOR, L. A. **Ligação viga-pilar em estruturas de concreto pré-moldado com fibras de aço: análises estática e dinâmica**. 254p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

PECCE, M. et al. Steel-concrete bond behaviour of lightweight concrete with expanded polystyrene (EPS). **Materials and structures**, v.48, p.139-152, 2015.

RANJBAR, M. M.; MOUSAVI, S. Y. Strength and durability assessment of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. **Materials and Structures**, v.48, n.4, p.1001-1011, 2015.

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

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Concreto estrutural leve. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. v.2. 1.ed. Cap. 43, p.1331-1362. São Paulo: IBRACON, 2005.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Concreto leve estrutural. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. v.II. Cap. 42. p.1531-1568. São Paulo: IBRACON, 2011.

SADRMOMTAZI, A. et al. Properties of multi-strength grade EPS concrete containing silica fume and rice husk ash. **Cement & concrete composites**, v.35 (2012), p.211-219.

SARTORTI, A. L. **Comportamento dinâmico de lajes maciças de concreto leve com pérolas de EPS**. 2015. 352p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SCHACKOW, A. et al. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. **Construction and building materials**, v.57 (2014), p.190-197.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 236p. Tese (doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) Interunidades. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

SILVA, R. M.; FREITAS, S. B.; CESAR, T. G. **Estudo da aderência entre barras de aço e concreto leve com pérolas de poliestireno expandido (EPS)**. 105p. Monografia. Centro Universitário Adventista de São Paulo, Engenheiro Coelho, 2014.

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

XU, Y. et al. Experimental study and modeling on effective thermal conductivity of EPS lightweight concrete. **Journal of Thermal Science and Technology**, v.11, n.2, 13p., 2016.



## Apêndice A – Ação do fogo

Por se tratar de um material ainda pouco pesquisado, não se conhece exatamente o comportamento do concreto leve com pérolas de EPS exposto a temperaturas elevadas.

Como o Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo dispõe de um forno para avaliar o comportamento de estruturas em situação de incêndio, e esse equipamento estava testando vigas de madeira, foi disponibilizado pela equipe que operava o forno um espaço para que se colocassem corpos de prova de concreto leve com EPS, que seriam expostos à queima com temperatura controlada, para posterior avaliação de seu comportamento.

Na Tabela I são apresentadas as informações referentes aos corpos de prova avaliados, a temperatura máxima de exposição e a carga residual após a queima. No entanto, como se tratavam de corpos de prova que sobraram de pesquisas anteriores, não foi possível caracterizar a dosagem correta e a resistência aos 28 dias. Sendo assim, como foram identificadas três dosagens diferentes, foi feita a avaliação em 50% das amostras na situação “in natura”, com secagem ao ar, na mesma data de ensaio dos corpos de prova expostos à queima.

Tabela I: Resultados da resistência à compressão dos corpos de prova in natura e submetidos à queima com temperatura controlada.

Traço	CP	Condição	Temperatura	Tensão de ruptura (MPa)	Resistência Média (MPa)
A	1	in natura	ambiente	11,33	<b>11,3</b>
A	2	in natura	ambiente	13,33	
A	3	queima	850 °C	2,025	<b>2,2</b>
A	4	queima	850 °C	2,319	
B	5	in natura	ambiente	16,4	<b>16,4</b>
B	6	queima	850 °C	9,788	<b>9,8</b>
C	7	in natura	ambiente	10,95	<b>11,6</b>
C	8	in natura	ambiente	11,93	
C	9	in natura	ambiente	11,88	
C	10	queima	1000 °C	2,394	<b>2,5</b>
C	11	queima	1000 °C	2,313	
C	12	queima	1000 °C	2,287	
C	13	queima	1000 °C	2,966	

Conforme os resultados encontrados, foi possível verificar que, para os traços A e B, a temperatura máxima de exposição foi de 850 °C, e que para o traço C, a temperatura máxima foi de 1000 °C. O tempo de exposição foi de aproximadamente 40 min. Constatou-se que após a queima os corpos de prova não apresentaram colapso, mantendo-se íntegros e permitindo a realização de ensaios de ruptura por compressão.

A Figura I apresenta os corpos de prova já queimados, ainda no interior do forno. À direita, mostra-se uma vista do forno utilizado.



Figura I: Corpos de prova no interior do forno e vista do forno onde ocorreu a queima

Na Figura II é possível verificar que após a queima o corpo de prova apresenta vazios provenientes da queima do EPS.



Figura II: Corpos de prova antes da ruptura por compressão



A Figura III mostra os corpos de prova após o ensaio de ruptura por compressão, tanto os corpos de prova “*in natura*” quanto os que foram submetidos à queima. Os corpos de prova após a queima encontram-se à direita na figura.



Figura III: Corpos de prova após o ensaio de ruptura à compressão

Para os traços A e C, a resistência residual após a queima foi aproximadamente 20% da resistência média à compressão.

Para o traço B, a resistência residual foi aproximadamente 60% da resistência à compressão do corpo de prova *in natura*.

Segundo SILVA (2012), o fator de redução da resistência dos concretos com agregados predominantemente silicosos, como é o caso do concreto leve com EPS, é de aproximadamente 0,115 para temperatura de 850 °C e 0,04 para a temperatura de 1000 °C.

Dessa forma, para os traços A e B, a resistência residual prevista seria aproximadamente 11,5% da resistência a compressão, e para o traço C, 4%.

Como os resultados encontrados foram muito superiores aos esperados, pode-se considerar como sendo de interesse o estudo do concreto leve sob a ação de incêndio, pois aparentemente ele apresenta um bom comportamento.

## **Apêndice B – Resultados individuais**

---

Os resultados individuais de resistência à compressão axial e de resistência à tração por compressão diametral dos traços analisados na etapa de dosagens finais estão apresentados em nove tabelas que seguem.

Vale ressaltar que para todo o corpo de prova ensaiado, independente da idade, foi determinada sua massa aparente.

<b>Traço Padrão - EPS STYRO TECH - peneirado (&lt; 4,8mm)</b>												
Moldagem - 13/10/2015												
Proporção - 1:1:1,5:0,28:1%												
Quantidade (kg) - 60 : 60 : 1,773 : 16,8 : 0,6												
<b>Ruptura</b>												
CP	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Peso (g)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de deformação (Gpa)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Carga remanescente (kN)	Tensão remanescente (MPa)	% Remanescente
1	100	7854,0	199	0,001563	1852,5	1185,3	8,8	76,4	9,7	39,2	5,0	51%
2	100	7854,0	200	0,001571	1938,0	1233,8	10,6	84,2	10,7	38,5	4,9	46%
3	100	7854,0	199	0,001563	1860,3	1190,3	8,6	74,3	9,5	34,3	4,4	46%
<b>Compressão - 7 dias - 20/10/2015</b>												
4	100	7854,0	197	0,001547	1992,2	1287,6	11,1	96,7	12,3	36,1	4,6	37%
5	100	7854,0	200	0,001571	1984,0	1263,1	10,0	84,0	10,7	43,3	5,5	52%
6	100	7854,0	199	0,001563	2035,7	1302,5	11,9	100,5	12,8	43,9	5,6	44%
<b>Compressão - 14 dias - 27/10/2015</b>												
7	100	7854,0	199	0,001563	1934,1	1237,5	9,3	83,3	10,6	38,2	4,9	46%
8	100	7854,0	200	0,001571	1872,2	1191,9	9,6	80,2	10,2	40,0	5,1	50%
9	100	7854,0	199	0,001563	1796,9	1149,7	9,1	77,7	9,9	33,0	4,2	42%
10	100	7854,0	200	0,001571	1918,8	1221,5	9,7	83,5	10,6	44,3	5,6	53%
<b>Compressão - 28 dias - 10/11/2015</b>												
11	100	7854,0	200	0,001571	2054,1	1307,7	12,2	44,6	1,4	28,4	0,9	64%
12	100	7854,0	200	0,001571	2013,9	1282,1	10,9	27,9	0,9	20,1	0,6	72%
13	100	7854,0	198	0,001555	1942,8	1249,3	10,4	38,0	1,2	21,6	0,7	57%
14	100	7854,0	200	0,001571	1866,8	1188,4	9,1	34,7	1,1	24,4	0,8	70%
15	100	7854,0	195	0,001532	1790,1	1168,8	8,9	28,1	0,9	22,1	0,7	79%
<b>DIAMETRAL - 28 dias - 10/11/2015</b>				<b>Média</b>		<b>1239,3</b>	<b>10,3</b>	<b>34,7</b>	<b>1,1</b>	<b>23,3</b>	<b>0,7</b>	<b>54%</b>
						<b>1230,6</b>	<b>10,0</b>			<b>Percentual médio</b>		

<b>Traço Padrão - EPS ISOTERM</b>												
Moldagem - 26/10/2015												
Proporção - 1:1:1,5:0,28:1%												
Quantidade (kg) - 60 : 60 : 1,8 : 16,8 : 0,6												
<b>Ruptura</b>												
CP	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Peso (g)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de deformação (GPa)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Carga remanescente (kN)	Tensão remanescente (MPa)	% Remanescente
1	100	7854,0	199	0,001563	1736,2	1110,9	8,1	76,2	9,7	38,3	4,9	50%
2	100	7854,0	199	0,001563	1935,0	1238,0	9,8	90,0	11,5	41,5	5,3	46%
3	100	7854,0	199	0,001563	1820,8	1165,0	8,0	75,2	9,6	38,5	4,9	51%
<b>Compressão - 14 dias - 09/11/2015</b>												
4	100	7854,0	198	0,001555	1760,8	1132,3	8,7	76,7	9,8	39,4	5,0	51%
5	100	7854,0	200	0,001571	1956,1	1245,3	10,5	91,2	11,6	44,9	5,7	49%
6	100	7854,0	199	0,001563	1829,1	1170,3	8,4	78,8	10,0	49,0	6,2	62%
7	100	7854,0	200	0,001571	1858,0	1182,8	8,9	82,3	10,5	40,9	5,2	50%
8	100	7854,0	199	0,001563	1769,0	1131,8	8,7	81,9	10,4	39,0	5,0	48%
<b>Compressão - 28 dias - 23/11/2015</b>												
9	100	7854,0	198	0,001555	1748,8	1124,6	8,6	38,6	1,2	24,3	0,8	63%
10	100	7854,0	198	0,001555	1741,7	1120,0	8,2	37,5	1,2	24,3	0,8	65%
11	100	7854,0	199	0,001563	1808,9	1157,4	9,2	39,4	1,3	26,4	0,8	67%
12	100	7854,0	200	0,001571	1964,1	1250,4	10,5	40,2	1,3	20,5	0,7	51%
13	100	7854,0	200	0,001571	1823,6	1160,9	8,9	37,4	1,2	24,2	0,8	65%
<b>DIAMETRAL - 28 dias - 23/11/2015</b>												
				<b>Média</b>	<b>1168,4</b>			<b>38,6</b>	<b>1,2</b>	<b>23,9</b>		<b>62%</b>
												<b>Percentual médio</b>
												<b>55%</b>

### Traço Areia fina e Areia média - EPS ISOTERM

Moldagem - 09/11/2015												
Proporção - 1:0,5:0,5:1,5:0,28:1%												
Quantidade (kg) - 60 : 30 : 30 : 1,8 : 16,8 : 0,6												
Ruptura												
CP	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Peso (g)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de deformação (Gpa)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Carga remanescente (kN)	Tensão remanescente (MPa)	% Remanescente
1	100	7854,0	199	0,001563	1832,6	1172,5	9,5	91,8	11,7	40,4	5,1	44%
2	100	7854,0	199	0,001563	1734,5	1109,8	8,8	80,3	10,2	33,9	4,3	42%
3	100	7854,0	200	0,001571	1744,3	1110,5	8,7	84,5	10,8	32,9	4,2	39%
<b>Compressão - 14 dias - 23/11/2015</b>						<b>1130,9</b>	<b>9,0</b>	<b>85,5</b>	<b>10,9</b>	<b>35,7</b>	<b>4,5</b>	<b>42%</b>
4	100	7854,0	197	0,001547	1811,1	1170,5	9,8	93,1	11,9	38,7	4,9	42%
5	100	7854,0	199	0,001563	1822,2	1165,9	9,7	93,5	11,9	34,8	4,4	37%
6	100	7854,0	199	0,001563	1849,5	1183,3	9,6	91,7	11,7	40,0	5,1	44%
7	100	7854,0	199	0,001563	1832,0	1172,1	10,0	91,4	11,6	38,1	4,9	42%
<b>Compressão - 28 dias - 07/12/2015</b>						<b>1173,0</b>	<b>9,8</b>	<b>92,4</b>	<b>11,8</b>	<b>37,9</b>	<b>4,8</b>	<b>41%</b>
8	100	7854,0	197	0,001547	1693,6	1094,6	8,3	37,6	1,2	18,3	0,6	49%
9	100	7854,0	199	0,001563	1698,6	1086,8	8,4	35,4	1,1	23,4	0,7	66%
10	100	7854,0	198	0,001555	1940,4	1247,8	11,3	49,4	1,6	9,4	0,3	19%
11	100	7854,0	199	0,001563	1756,5	1123,8	9,0	42,6	1,4	18,6	0,6	44%
12	100	7854,0	199	0,001563	1741,9	1114,5	8,9	38,6	1,2	24,3	0,8	63%
<b>DIAMETRAL - 28 dias - 07/12/2015</b>						<b>1133,5</b>	<b>9,2</b>	<b>40,7</b>	<b>1,3</b>	<b>18,8</b>	<b>0,6</b>	<b>46%</b>
<b>Média</b>						<b>1146,0</b>	<b>9,3</b>			<b>Percentual médio</b>		<b>44%</b>

<b>Traço com redução de EPS (-10%) - EPS STYRO TECH - peneirado (&lt; 4,8mm)</b>												
Moldagem - 22/03/2016												
Proporção - 1:1:1,35:0,28:1%												
Quantidade (kg) - 66,66 : 66,66 : 1,773 : 18,66 : 18,66 : 0,6666												
<b>Ruptura</b>												
CP	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Peso (g)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de deformação (GPa)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Carga remanescente (kN)	Tensão remanescente (MPa)	% Remanescente
1	100	7854,0	199	0,001563	2075,6	1328,0	11,2	96,0	12,2	44,1	5,6	46%
2	100	7854,0	197	0,001547	2070,6	1338,3	10,4	86,7	11,0	43,8	5,6	51%
3	100	7854,0	199	0,001563	2015,6	1289,6	10,3	87,1	11,1	33,0	4,2	38%
<b>Compressão - 7 dias - 29/03/2016</b>												
4	100	7854,0	198	0,001555	1936,6	1245,3	9,7	47,4	6,0	40,3	5,1	45%
5	100	7854,0	200	0,001571	2066,4	1315,5	11,4	97,4	12,4	45,1	5,7	46%
6	100	7854,0	199	0,001563	2066,9	1322,4	11,5	86,7	11,0	47,5	6,0	55%
<b>Compressão - 14 dias - 05/04/2016</b>												
7	100	7854,0	200	0,001571	2019,8	1285,8	11,2	97,3	12,4	32,0	4,1	33%
8	100	7854,0	200	0,001571	2085,5	1327,7	11,7	91,6	11,7	45,1	5,7	49%
9	100	7854,0	200	0,001571	2023,9	1288,5	11,5	94,8	12,1	35,2	4,5	37%
10	100	7854,0	198	0,001555	2112,3	1358,3	12,8	110,0	14,0	48,6	6,2	44%
<b>Compressão - 28 dias - 19/04/2016</b>												
11	100	7854,0	200	0,001571	2080,7	1324,6	12,6	30,9	1,0	21,2	0,7	69%
12	100	7854,0	199	0,001563	2052,3	1313,1	11,6	40,5	1,3			
13	100	7854,0	199	0,001563	1965,8	1257,8	10,9	34,8	1,1			
14	100	7854,0	198	0,001555	1927,9	1239,7	10,3	31,9	1,0			
15	100	7854,0	200	0,001571	1969,4	1253,8	10,4	37,1	1,2			
<b>DIAMETRAL - 28 dias - 19/04/2016</b>				<b>Média</b>			<b>11,1</b>	<b>35,0</b>	<b>1,1</b>	<b>21,2</b>	<b>0,7</b>	<b>60%</b>
							<b>11,2</b>			<b>Percentual médio</b>		<b>47%</b>

<b>Traço com redução de EPS (-20%) - EPS STYRO TECH - peneirado (&lt; 4,8mm)</b>															
Moldagem - 05/04/2016															
Proporção - 1:1:1,2:0,28:0,8%															
Quantidade (kg) - 75 : 75 : 1,773 : 21 : 0,6															
<b>Ruptura</b>															
CP	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Peso (g)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de deformação (Gpa)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Carga remanescente (kN)	Tensão remanescente (MPa)	% Remanescente			
1	100	7854,0	196	0,001539	2070,9	1345,3	11,8	73,9	9,4	50,8	6,5	69%			
2	100	7854,0	198	0,001555	2043,3	1313,9	10,9	83,2	10,6	50,5	6,4	61%			
3	100	7854,0	197	0,001547	2033,5	1314,3	11,1	92,3	11,8	30,6	3,9	33%			
<b>Compressão - 7 dias - 12/04/2016</b>															
4	100	7854,0	199	0,001563	2068,7	1323,6	11,8	98,6	12,6	29,7	3,8	30%			
5	100	7854,0	200	0,001571	2146,4	1366,4	12,6	100,3	12,8	38,4	4,9	38%			
6	100	7854,0	198	0,001555	2091,8	1345,1	12,4	101,3	12,9	52,7	6,7	52%			
<b>Compressão - 14 dias - 19/04/2016</b>															
7	100	7854,0	197	0,001547	2052,7	1326,7	12,1	113,7	14,5	46,4	5,9	41%			
8	100	7854,0	198	0,001555	2080,0	1337,5	12,2	112,0	14,3	37,9	4,8	34%			
9	100	7854,0	201	0,001579	2065,2	1308,2	11,9	108,5	13,8	33,8	4,3	31%			
10	100	7854,0	197	0,001547	2055,3	1328,4	12,6	110,8	14,1	35,5	4,5	32%			
<b>Compressão - 28 dias - 03/05/2016</b>															
11	100	7854,0	200	0,001571	2095,5	1334,0	12,3	40,2	1,3						
12	100	7854,0	200	0,001571	2042,5	1300,3	11,9	40,2	1,3						
13	100	7854,0	197	0,001547	2029,6	1311,8	11,6	39,1	1,3						
14	100	7854,0	199	0,001563	2103,3	1345,7	12,0	37,4	1,2						
15	100	7854,0	200	0,001571	2081,5	1325,1	11,7	35,0	1,1						
<b>DIAMETRAL - 28 dias - 03/05/2016</b>															
				<b>Média</b>		<b>1328,4</b>	<b>11,9</b>	<b>38,4</b>	<b>1,2</b>	<b>Percentual médio</b>			<b>42%</b>		



<b>Traço com adição de 0,6% de fibras de aço - EPS ISOTERM (&lt; 4,8mm)</b>													
<b>Moldagem - 03/05/2016</b>													
<b>Proporção - 1:1:1,5:0,28:1,1%</b>													
<b>Quantidade (kg) - 117 : 117 : 3,738 : 32,76 : 1,287 + 8,761kg de fibras de aço</b>													
<b>Ruptura</b>													
CP	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Peso (g)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de deformação (GPa)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Carga remanescente (kN)	Tensão remanescente (MPa)	% Remanescente	
1	100	7854,0	197	0,001547	2032,7	1313,8	10,2	85,7	10,9	57,3	7,3	67%	
2	100	7854,0	195	0,001532	1964,8	1282,9	9,5	80,6	10,3	53,8	6,9	67%	
3	100	7854,0	195	0,001532	1980,5	1293,2	9,8	81,7	10,4	54,7	7,0	67%	
<b>Compressão - 7 dias - 10/05/2016</b>													
4	100	7854,0	198	0,001555	2114,7	1359,9	11,6	98,5	12,5	42,3	5,4	43%	
5	100	7854,0	197	0,001547	2018,9	1304,8	10,7	81,1	10,3	35,5	4,5	44%	
6	100	7854,0	200	0,001571	2102,5	1338,5	11,4	83,3	10,6	45,8	5,8	55%	
<b>Compressão - 14 dias - 17/05/2016</b>													
7	100	7854,0	199	0,001563	2169,5	1388,1	12,0	87,9	11,2	56,6	7,2	64%	
8	100	7854,0	197	0,001547	2095,2	1354,2	11,1	96,3	12,3	40,2	5,1	42%	
9	100	7854,0	195	0,001532	1984,2	1295,6	11,1	90,3	11,5	45,3	5,8	50%	
<b>Compressão - 28 dias - 31/05/2016</b>													
10	100	7854,0	199	0,001563	2237,1	1431,3	13,9	56,1	1,8	43,5	1,4	78%	
11	100	7854,0	197	0,001547	2030,9	1312,6	11,1	41,7	1,3	31,6	1,0	76%	
12	100	7854,0	201	0,001579	2043,6	1294,5	11,0	42,0	1,3	33,0	1,0	79%	
13	100	7854,0	196	0,001539	1853,9	1204,3	9,1	33,8	1,1	24,9	0,8	74%	
<b>DIAMETRAL - 28 dias - 31/05/2016</b>													
				<b>Média</b>		<b>1310,7</b>	<b>11,3</b>	<b>43,4</b>	<b>1,4</b>	<b>33,3</b>		<b>1,1</b>	<b>77%</b>
						<b>1321,0</b>	<b>11,0</b>			<b>Percentual médio</b>		<b>62%</b>	

## Traço com 10% de sílica - EPS ISOTERM (< 4,8mm)

Moldagem - 17/05/2016

Proporção - 0,9:0,1:1:1,5:0,28:1,1% ou 1:0,11:1,11:1,66:0,28:1,1%

Quantidade (kg) - 59,4 : 4,745 : 66 : 2,1087 : 18,48 : 0,7062

### Ruptura

CP	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Peso (g)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de deformação (GPa)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Carga remanescente (kN)	Tensão remanescente (MPa)	% Remanescente	
1	100	7854,0	194	0,001524	1939,8	1273,1	10,9	98,5	12,5	42,3	5,4	43%	
2	100	7854,0	194	0,001524	1799,6	1181,1	9,0	81,1	10,3	35,5	4,5	44%	
3	100	7854,0	199	0,001563	1840,7	1177,7	9,4	83,3	10,6	45,8	5,8	55%	
<b>Compressão - 7 dias - 24/06/2016</b>													
4	100	7854,0	198	0,001555	1927,1	1239,2	10,7	91,0	11,6	43,2	5,5	47%	
5	100	7854,0	199	0,001563	1891,7	1210,3	10,0	85,4	10,9	45,2	5,8	53%	
6	100	7854,0	196	0,001539	1985,9	1290,1	11,2	100,0	12,7	41,3	5,3	41%	
<b>Compressão - 14 dias - 31/06/2016</b>													
7	100	7854,0	199	0,001563	1817,1	1162,6	9,2	81,1	10,3	39,4	5,0	49%	
8	100	7854,0	198	0,001555	2042,6	1313,5	11,8	86,4	11,0	60,4	7,7	70%	
9	100	7854,0	199	0,001563	2057,5	1316,4	12,7	112,8	14,4	77,7	9,9	69%	
10	100	7854,0	195	0,001532	1785,5	1165,8	9,7	81,5	10,4	48,2	6,1	59%	
<b>Compressão - 28 dias - 14/06/2016</b>													
11	100	7854,0	198	0,001555	1917,7	1233,2	10,6	37,5	1,2	27,4	0,9	73%	
12	100	7854,0	198	0,001555	1843,5	1185,5	9,6	34,7	1,1	26,2	0,8	76%	
13	100	7854,0	196	0,001539	1939,8	1260,1	11,0	35,8	1,2	25,7	0,8	72%	
14	100	7854,0	195	0,001532	1829,8	1194,8	10,1	36,1	1,2	21,5	0,7	60%	
15	100	7854,0	198	0,001555	1929,3	1240,6	10,2	45,4	1,5	25,5	0,8	56%	
<b>DIAMETRAL - 28 dias - 14/06/2016</b>													
16	100	7854,0	200	0,001571	2159,5	1374,8	13,1	124,6	15,9	45,0	5,7	36%	
17	100	7854,0	200	0,001571	2154,3	1371,5	13,4	120,1	15,3	80,7	10,3	67%	
18	100	7854,0	199	0,001563	1963,4	1256,2	11,0	95,0	12,1	45,3	5,8	48%	
19	100	7854,0	198	0,001555	1938,0	1246,2	10,8	102,2	13,0	42,0	5,3	41%	
20	100	7854,0	198	0,001555	1817,1	1168,5	10,1	93,4	11,9	39,0	5,0	42%	
<b>Compressão - 56 dias - 12/07/2016</b>													
<b>Média</b>							<b>11,7</b>	<b>107,1</b>	<b>13,6</b>	<b>6,4</b>	<b>50,4</b>	<b>6,4</b>	<b>47%</b>
<b>Percentual médio</b>							<b>10,7</b>						<b>55%</b>

<b>Traço com adição de 0,2% de fibras de polopropileno - EPS ISOTERM (&lt; 4,8mm)</b>												
Moldagem - 31/05/2016												
Proporção - 1:1:1,5:0,28:1%												
Quantidade (kg) - 66,66 : 66,66 : 1,773 : 18,66 : 0,6666												
<b>Ruptura</b>												
CP	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Peso (g)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de deformação (Gpa)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Carga remanescente (kN)	Tensão remanescente (MPa)	% Remanescente
1	100	7854,0	200	0,001571	2106,7	1341,2	9,1	65,4	8,3	45,9	5,8	70%
2	100	7854,0	195	0,001532	1752,6	1144,3	7,0	39,7	5,1	28,3	3,6	71%
3	100	7854,0	195	0,001532	1793,5	1171,1	7,6	63,1	8,0	41,2	5,2	65%
<b>Compressão - 7 dias - 07/06/2016</b>												
4	100	7854,0	199	0,001563	1736,5	1111,0	7,3	66,0	8,4	35,7	4,5	54%
5	100	7854,0	198	0,001555	1809,2	1163,4	8,1	44,2	5,6	34,3	4,4	78%
6	100	7854,0	197	0,001547	1779,9	1150,4	7,1	66,6	8,5	37,3	4,7	56%
<b>Compressão - 14 dias - 14/06/2016</b>												
7	100	7854,0	199	0,001563	1779,5	1138,6	7,8	71,4	9,1	36,6	4,7	51%
8	100	7854,0	199	0,001563	1724,0	1103,0	7,1	65,3	8,3	34,2	4,4	52%
9	100	7854,0	200	0,001571	1813,7	1154,6	8,2	71,4	9,1	40,8	5,2	57%
10	100	7854,0	200	0,001571	1754,3	1116,8	7,6	66,7	8,5	39,0	5,0	58%
<b>Compressão - 28 dias - 28/06/2016</b>												
11	100	7854,0	198	0,001555	1738,0	1117,6	7,5	32,8	1,1	26,3	0,8	80%
12	100	7854,0	200	0,001571	1839,1	1170,8	8,0	30,6	1,0	20,4	0,6	67%
13	100	7854,0	198	0,001555	1745,2	1122,3	7,6	29,0	0,9	21,7	0,7	75%
14	100	7854,0	198	0,001555	1722,7	1107,8	7,3	25,7	0,8	20,2	0,6	79%
15	100	7854,0	199	0,001563	2352,4	1505,1	14,8	43,5	1,4	32,1	1,0	74%
<b>DIAMETRAL - 28 dias - 28/06/2016</b>												
				<b>Média</b>		<b>1204,7</b>	<b>9,0</b>	<b>32,3</b>	<b>1,0</b>	<b>24,1</b>	<b>0,8</b>	<b>75%</b>
						<b>1174,5</b>	<b>8,1</b>			<b>Percentual médio</b>		<b>66%</b>

<b>Traço composto (sílica, areia fina e redução de EPS) - EPS ISOTERM (&lt; 4,8mm)</b>												
Moldagem -09/08/2016												
Proporção - 0,9:0,1:0,5:0,5:1,2:0,28:0,9%												
Quantidade (kg) - 67,5 : 5,4 : 37,5 : 37,5 : 1,917 : 21 : 0,675												
<b>Ruptura</b>												
CP	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	Peso (g)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de deformação (Gpa)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Carga remanescente (kN)	Tensão remanescente (MPa)	% Remanescente
1	100	7854,0	195	0,001532	2144,1	1400,0	14,4	125,5	16,0	29,0	3,7	23%
2	100	7854,0	199	0,001563	2081,6	1331,8	12,9	113,5	14,5	41,6	5,3	37%
3	100	7854,0	198	0,001555	2187,3	1406,5	14,1	122,9	15,6	40,7	5,2	33%
<b>Compressão - 7 dias - 16/08/2016</b>												
4	100	7854,0	196	0,001539	2105,0	1367,4	13,9	137,5	17,5	44,9	5,7	33%
5	100	7854,0	197	0,001547	2122,2	1371,6	13,6	130,2	16,6	45,7	5,8	35%
6	100	7854,0	195	0,001532	2100,8	1371,7	13,3	136,5	17,4	52,8	6,7	39%
<b>Compressão - 14 dias - 23/08/2016</b>												
7	100	7854,0	197	0,001547	2103,1	1359,3	14,3	124,8	15,9		0,0	0%
8	100	7854,0	198	0,001555	2135,2	1373,0	15,7	139,7	17,8		0,0	0%
9	100	7854,0	198	0,001555	2144,4	1379,0	14,1	97,7	12,4	65,7	8,4	67%
10	100	7854,0	200	0,001571	2197,9	1399,2	14,9	129,5	16,5		0,0	0%
<b>Compressão - 28 dias - 06/09/2016</b>												
11	100	7854,0	200	0,001571	2145,7	1366,0	14,2	46,0	1,5	32,8	1,0	71%
12	100	7854,0	200	0,001571	2102,7	1338,6	14,5	45,6	1,5		0,0	0%
13	100	7854,0	197	0,001547	2169,3	1402,1	14,7	46,9	1,5	4,9	0,2	10%
<b>DIAMETRAL - 28 dias - 06/09/2016</b>												
				<b>Média</b>		<b>1374,3</b>	<b>14,2</b>			<b>46,2</b>	<b>1,5</b>	<b>27%</b>
										<b>Percentual médio</b>	<b>0,4</b>	<b>27%</b>