

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGE3M.

**APLICAÇÃO DE UMA ARGILA EXPANSIVA DE JAZIDA DO RIO GRANDE DO  
SUL À PRODUÇÃO DE AGREGADOS PARA CONCRETOS LEVES**

**Adalberto Viana Rodrigues**

**Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia**

**Porto Alegre – RS  
2018**

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

**APLICAÇÃO DE UMA ARGILA EXPANSIVA DE JAZIDA DO RIO GRANDE DO  
SUL À PRODUÇÃO DE AGREGADOS PARA CONCRETOS LEVES**

**Adalberto Viana Rodrigues**  
Tecnólogo em Construção Civil- Edifícios.  
Licenciado em Física

Trabalho desenvolvido no Laboratório de materiais cerâmicos da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais

Porto Alegre – RS

2018

### CIP - Catalogação na Publicação

Rodrigues, Adalberto Viana  
APLICAÇÃO DE UMA ARGILA EXPANSIVA DE JAZIDA DO RIO  
GRANDE DO SUL À PRODUÇÃO DE AGREGADOS PARA CONCRETOS  
LEVES / Adalberto Viana Rodrigues. -- 2018.  
112 f.  
Orientador: Saulo Roca Bragança.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. ARGILA EXPANSIVA. 2. AGREGADO DE ARGILA  
EXPANDIDA. 3. AGREGADO LEVE. 4. CONCRETO LEVE. 5.  
CONCRETO LEVE ESTRUTURAL. I. Bragança, Saulo Roca,  
orient. II. Título.

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia de Materiais, e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela banca examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Saulo Roca Bragança

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Ana Paula Kirchheim, PPGEC-UFRGS

Prof. Dr. Deivis Luis Marinoski, PPGEC-UFSC

Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior, PPGE3M-UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGE3M

## AGRADECIMENTOS

Somos feitos de um pouquinho de cada um, e nesse momento me transporto para agradecer a tantos que me ajudaram a chegar até aqui. A tia e professora Josefina que me ensinou a ler e a escrever. A prima Marlene que em dezembro de 1985 me presenteou com o meu primeiro livro, “O menino maluquinho”, e este seria o primeiro de tantos.

As tias Tereza (in memorian) e Laura, que sempre cuidaram, educaram e mimavam-me com os bolinhos de chuva – que saudade! Aos meus primos que carinhosamente torceram por mim, desde quando eu ainda era criança e seria uma lista interminável citá-los aqui.

Aos meus pais Raimundo (in memorian), que gostaria de tê-lo ao meu lado para participar de alegrias como essa em minha vida, que trabalhou muito, sem descanso para que eu pudesse estudar. A minha mãe Josefa, que me ensinou valores como respeitar o próximo, ser bondoso, e com pouca leitura me ensinou valores que são verdadeiros tesouros – que não encontro nas escolas - eu amo vocês.

É preciso carinhosamente lembrar-me dos meus irmãos: Andréia, Alexandre, Angélica e Adriano e de toda família, me perdoe pela ausência e distância, mas todos estão próximos de mim em pensamento e nas minhas orações, junto com seus cônjuges e meus sobrinhos.

Aos irmãos e amigos, que demonstraram empatia e que choraram e riram em tantas situações da minha vida me levantando e ajudando de todas e tantas formas, e os colegas do LACER, pelo incentivo.

Ao LAMTAC, por disponibilizar sua estrutura para o seguimento desta pesquisa, em especial a Dra. Ana Paula Kirchheim, pelos valiosos apontamentos.

Agradeço a empresa Cinexpan, pelas informações prestadas na pessoa do Eng. Carlos Alberto Pereira e a Senhora Ilda Ferreira, pelas amostras cedidas e valiosas informações que enriquecendo esse trabalho.

Aos Doutores Fabiana de Souza e Jaime Pedrassani, por acreditarem na viabilidade desta pesquisa e pelo incentivo constante. Aos alunos de IC que muito me ajudaram: João G. Mallmann; Lucas L. Ribas; Mario S. Costa e Guilherme Finkler, todos vocês são jovens gigantes.

Ao Prof. Dr. Saulo Roca Bragança, que tenho uma profunda admiração, pela amizade construída, que aceitou me orientar, e como um guia entusiasmado me apontava para onde eu devia ver. O senhor me apoiou, desde o primeiro dia que lhe conheci, a realizar um sonho. A sua dedicação é inspiradora pra mim... Muito obrigado.

A minha amada esposa Luciane, que me completa e acreditou mais em mim do que eu mesmo, trabalhando e fazendo de tudo, de tudo mesmo, para que eu pudesse estudar. “É a esposa que vale mais do que corais –Prov. 31”]; Talvez eu devesse escrever uma dissertação sobre você Lu, por tudo o que você representa.

Agradeço ao Engenheiro de Materiais e Criador Jeová, que fez os Céus e a Terra, me deu a vida e a oportunidade de entender que nossas vidas têm um objetivo.

Eu sou um pouquinho, e vocês são tantos... Todos de alguma forma me fizeram ver, me levantaram quando preciso e me ofereceram seus ombros quando exausto estava. No caminho da vida busquei apoio nos ombros de todos vocês e o encontrei em muitos momentos, eu sou um pouquinho, sim... Um pouquinho. E todos vocês são verdadeiros Gigantes. Obrigado.

*“Se vi e cheguei mais longe, é porque me apoiei nos ombros de Gigantes.”*

Isaac Newton (1643-1727)

## RESUMO

A principal aplicação dos agregados de argila expandida na construção civil é na produção de concretos leves (CL), incluindo-se os concretos leves estruturais (CLE). O trabalho iniciou com a caracterização de uma argila com propriedades expansivas, cuja jazida se encontra em Arroio Grande – RS. Essa argila foi avaliada quanto à composição química e mineralógica, granulometria e propriedades térmicas. O agregado leve produzido com a referida argila foi comparado em suas propriedades e características com o do único fabricante do país (Cinexpan), cuja indústria situa-se no estado de São Paulo. Analisaram-se as propriedades dos agregados: resistência à compressão, massa específica, granulometria e absorção de água. Posteriormente, realizou-se a produção de corpos de prova de CL em traços com matriz 1:4, substituindo-se o agregado graúdo por agregados de argila expandida. Foram analisadas a resistência à compressão do concreto, a massa específica, a absorção de água, o fator de eficiência (FE) e a resistência ótima (fg). Para produção dos concretos leves foram utilizados três tipos de agregados, queimados nas temperaturas de 1100°C, 1250°C e 1300°C. As qualidades dos agregados (e concretos) variaram de acordo com o ciclo de queima dos mesmos, ora ficando com menor densidade e ora com maior resistência. Portanto, o controle e escolha do ciclo de queima das argilas pelotizadas são fundamentais à determinação das propriedades almejadas. Assim, verificou-se ser viável a produção de agregados de argilas expandidas com a argila de Arroio Grande-RS e sua aplicação em CL e CLE, os quais apresentaram propriedades similares aos concretos confeccionados com o agregado leve comercial. Ao final, fez-se uma comparação do custo do agregado (comercial) em função das distâncias no país, bem como do custo do CL frente ao concreto normal (CN).

Palavra chave: argila expansível; agregado de argila expandida; concreto leve; concreto leve estrutural.

## ABSTRACT

The main application of aggregates of expanded clay in civil construction is the production of lightweight concrete (CL), and light structural concrete (CLE). This work began with the characterization of clay with expansive properties, whose deposit is in Arroio Grande - RS. The clay was characterized in terms of chemistry and mineralogical composition, granulometry and thermal properties. The aggregate was produced with this clay and its properties and characteristics were compared to the only manufacturer of the country (Cinexpan), located in the state of São Paulo. The main analyzed properties were: compressive strength, density, particle size and water absorption. After that, the production of CL bodies in 1:4 matrix traces was performed replacing normal aggregates with the expanded clay aggregates. Concrete compressive strength, density, water absorption, efficiency factor (FE) and optimum strength (fg) were the main properties analyzed. For the production of lightweight concrete, three types of clay aggregates were used, which were produced (fired) at temperatures of 1100°C, 1250°C and 1300°C. The properties of the aggregates (and concretes) varied according to the firing cycle of the aggregates, i.e., with a lower/higher density and lower/higher strength, depending on the firing temperature. Therefore, the control and the choice of the firing cycle are fundamental for the determination of the desired properties. Thus, it was verified that the production of expanded clay aggregates with Arroio Grande-RS clay and its application in CL and CLE was feasible, comparing to the concrete produced with the commercial aggregate. As a final point, it was made a comparison of the cost of the aggregate throughout the country according to the distances, as well as the cost of CL versus the conventional concrete.

Keyword (s): expandable clay; aggregate of expanded clay; lightweight concrete; structural lightweight concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Templo em El Tajin – México	23
Figura 02 - Coliseu em Roma	23
Figura 03 - Navio Selma ainda exposto em ambiente marinho	25
Figura 04 - Hotel Chase-Park Plaza na cidade de St. Louis	26
Figura 05 - Quartel-General da 12º Região Militar	27
Figura 06 - Catálogo Cinexpan	28
Figura 07 - Microestrutura mostrando poros internos	31
Figura 08 - Forno Rotativo	34
Figura 09 - AAE sendo queimado em forno rotativo	34
Figura 10 - Relação da massa específica com o tipo de material leve utilizado	36
Figura 11 - Classificação dos concretos leves em função da resistência à compressão	38
Figura 12 - Massa específica em função do fator de eficiência	41
Figura 13 - Resistência ótima	44
Figura 14 - Desempenho da fg em função do AAE	44
Figura 15 - Fluxograma das fases de Pesquisa	52
Figura 16 - Compactando a argila	55
Figura 17 - Moldando as argilas manualmente	55
Figura 18 - Queimando a argila expandida a 1100°C	56
Figura 19 - Composição mineral por DRX da Argila AE-RS	57
Figura 20 - Histograma do Diâmetro da Argila	59
Figura 21 - Desempenho Térmico	60
Figura 22 - Corpos de Prova antes e depois da queima a 1300°C	62
Figura 23 - Ensaio de Absorção do AAE-RS	63
Figura 24 - Rompimento do AAE dentro do CP's	65
Figura 25 - Rompimento do AAE com o consolo	65
Figura 26 - Distribuição Granulométrica da Areia	67
Figura 27 - Quadro Demonstrativo do AAE	75
Figura 28 - Distribuição Granulométrica do AAE	77
Figura 29 - Expansão em função da queima do AAE	78
Figura 30 - Absorção de Água em função do tempo de imersão	80

Figura 31 - Comparação entre as fcm do AAE em diferentes temperaturas	84
Figura 32 - Comparação do FE dos AAEs calculado com os dados do laboratório	85
Figura 33 - Resistência dos CL-1506, fator a/c=0,8, em função do tempo	87
Figura 34 - Resistência à compressão em função do tempo - CL-RS (1250°C)	88
Figura 35 - Comparação das fcm entre o CL-RS e CLE-1506 em função da cura.	89
Figura 36 - Comparação do FE ente os CLE-1506 e o CL-RS-1250°C	90
Figura 37 - fcm e FE em relação ao fator a/c com AAE 1100°C	94
Figura 38 - Relação fcm e FE dos 3 CL-RS	95
Figura 39 - fcm do CLE-1100°C e da Argamassa em função do fator a/c	97
Figura 40 - Relação entre a fcm da argamassa e do CLE-RS-1100°C variando a/c	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Classificação do Concreto Leve	21
Tabela 02 - Classificação quanto a Massa específica e Resistência à compressão	22
Tabela 03 - Classificação do Concreto segundo NBR 12655/15	22
Tabela 04 - Propriedades físicas do fabricante Cinexpan	28
Tabela 05 - Massa específica do agregado	29
Tabela 06 - Resistência do AAE	29
Tabela 07 - Absorção do AAE – Cinexpan	30
Tabela 08 - Classificação segundo Neville	36
Tabela 09 - Propriedade térmica dos concretos leve s	42
Tabela 10 - Condutividade térmica do AAE da Cinexpan e Argex	42
Tabela 11 - Propriedade de Condutividade em função do forno	42
Tabela 12 - Classificação quanto ao FE	43
Tabela 13 - Equação para o cálculo do módulo de deformação	46
Tabela 14 - Resumo de análises apresentadas	53
Tabela 15 - Cronograma de produção das AE-RS	55
Tabela 16 - Análise Química de Fluorescência (FRX) Argila AE-RS	58
Tabela 17 - Análise Química de Fluorescência (FRX) Argila Cinexpan	58
Tabela 18 - Diâmetro das partículas de argila AE-RS	59
Tabela 19 - Porcentagem retida nas peneiras da série normal para agregado miúdo	67
Tabela 20 - Valores médios do sistema geral de distribuição d'água DMAE	68
Tabela 21 - Consumo de materiais p/ m <sup>3</sup> CL-RS com AAE-1250°C com 3 traços	70
Tabela 22 - Consumo de materiais p/ m <sup>3</sup> CL-RS e o CLE-1506	70
Tabela 23 - Consumo de materiais p/ m <sup>3</sup> CL-RS utilizando AAE-1300°C	70
Tabela 24 - Consumo de materiais p/ m <sup>3</sup> CL-RS utilizando AAE-1100°C	71
Tabela 25 - Distribuição Granulométrica do AAE	76
Tabela 26 - Expansibilidade dos AAE	77
Tabela 27 - Absorção de água dos AAE	79
Tabela 28 - Capacidade de absorção em função do tempo dos AAE-RS	81

Tabela 29 - Capacidade de absorção em função do tempo dos AAE a 1250°C	81
Tabela 30 - Fator de a/c Real do CL-RS com AAE queimado a 1100°C	82
Tabela 31 - Fator de a/c Real do CL-RS com AAE queimado a 1250°C e 1300°C	83
Tabela 32 - Propriedades Físicas e Mecânicas dos AAE medidas em laboratório	83
Tabela 33 - Propriedades Físicas e Mecânicas do AAE-1506 conforme o fabricante	85
Tabela 34 - fcm do CL-1506 variando-se o percentual de agregado e o tempo de cura	87
Tabela 35 - fcm do CL-RS com AAE a 1250°C	88
Tabela 36 - Comparação da fcm em relação a cura entre os CLE-1506 e CL-RS	89
Tabela 37 - Percentual alcançado da resistência total em função do tempo.	89
Tabela 38 - Propriedades dos concretos CLE-1506 e o CL-RS (AAE 1250°C)	90
Tabela 39 - Propriedade do CL-RS com AAE a 1300°C	92
Tabela 40 - Propriedades do CLE-RS com AAE a 1100°C	93
Tabela 41 - Propriedades dos CL-RS com fator a/c =0,8 e dos AAE-RS	95
Tabela 42 - Demonstrativo do Módulo de Deformação do CL e CLE	96
Tabela 43 - Relação fcm do CLE-1100°C e Argamassa	97
Tabela 44 - Custo do AAE em função da distância (R\$/m <sup>3</sup> )	98
Tabela 45 - Custo do AAE em função da distância (R\$/por saca)	98
Tabela 46 - Custo do AAE por m <sup>3</sup> utilizando 4 referenciais econômicos	99
Tabela 47 - Custo do CL fck=10 MPa em 4 Estados e o Distrito Federal	99
Tabela 48 - Custo do CN fck = 10 MPa em 4 Estados e o Distrito Federal	100
Tabela 49 - Custo do CL fck =10 MPa por m <sup>3</sup> utilizando 4 referenciais econômicos	100
Tabela 50 - Custo do CLE fck = 20 MPa em 4 Estados e o Distrito Federal	100
Tabela 51 - Custo do CN fck = 20 MPa em 4 Estados e o Distrito Federal	101
Tabela 52 - Custo do CLE fck =20 MPa por m <sup>3</sup> utilizando 4 referenciais econômicos	101
Tabela 53 - Acréscimo do custo do CL e CLE em relação ao CN, em porcentagem	102

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AA	Absorção de Água
AAE	Agregado de Argila Expandida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AE	Argila Expansiva
ASTM	American Society for Testing and Materials
CL	Concreto Leve
CLE	Concreto Leve Estrutural
CLAD	Concreto Leve de Alto Desempenho
CN	Concreto Normal
CPV ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
DMC	Dimensão Máxima Característica
DRX	Difração de Raios X
DTA	Análise Térmica Diferencial
Eci	Módulo de Deformação Inicial do concreto (Elasticidade)
Ecs	Módulo de Deformação secante do concreto (Elasticidade)
EDS	Espectrometria de Energia Dispersiva por Raios X
FE	Fator de Eficiência
FRX	Fluorescência de Raios X
fck	Resistência Característica do Concreto à Compressão
fc <sub>m</sub>	Resistência Média à Compressão do Concreto
fg	Resistência Ótima
LAMTAC	Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído
LACER	Laboratório de Materiais Cerâmicos
ME	Massa Específica
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MF	Módulo de Finura
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil.
y	Massa específica do AAE

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	17
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	19
2.3	LIMITAÇÃO DA PESQUISA	20
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	21
3.1	DEFINIÇÃO DE CONCRETO LEVE	21
3.2	PANORAMA HISTÓRICO – GEOGRÁFICO	22
3.2.1	<i>Argila e concreto leve no mundo</i>	22
3.2.2	<i>Argila e concreto leve no Brasil</i>	26
3.3	PROPRIEDADES DO AGREGADO DE ARGILA EXPANDIDA	27
3.3.1	<i>Características do Agregado de Argila expandida</i>	28
3.3.2	<i>Classificação do Agregado de Argila expandida</i>	30
3.3.2.1	<i>Classificação quanto à origem</i>	30
3.3.2.2	<i>Classificação quanto à produção ou queima</i>	31
3.3.3	<i>Processo de Produção de Agregado de Argila Expandida (AAE)</i>	31
3.4	CLASSIFICAÇÃO DE CONCRETOS LEVES	35
3.5	TIPOS DE CONCRETOS LEVES	36
3.5.1	<i>Concreto leve com EPS</i>	36
3.5.2	<i>Concreto leve aerado</i>	37

<b>3.5.3</b>	<b><i>Concreto leve com agregado argila expandida</i></b>	37
<b>3.5.3.1</b>	<b><i>Concreto leve (CL)</i></b>	37
<b>3.5.3.2</b>	<b><i>Concreto leve estrutural (CLE)</i></b>	38
<b>3.5.3.3</b>	<b><i>Concreto leve de alto desempenho (CLAD)</i></b>	38
<b>3.6</b>	<b>PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE</b>	39
<b>3.6.1</b>	<b><i>Resistência à compressão e à tração</i></b>	39
<b>3.6.2</b>	<b><i>Massa específica</i></b>	40
<b>3.6.3</b>	<b><i>Isolamento térmico</i></b>	41
<b>3.6.4</b>	<b><i>Fator de eficiência do concreto leve</i></b>	43
<b>3.6.5</b>	<b><i>Resistência ótima do concreto leve</i></b>	43
<b>3.6.6</b>	<b><i>Módulo de Deformação (Eci)</i></b>	45
<b>3.6.7</b>	<b><i>Custo do AAE e dos Concretos Leves</i></b>	46
<b>3.7</b>	<b>SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	47
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	50
<b>4.1</b>	<b>ESTRUTURA DA PESQUISA E RELAÇÃO COM A CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS UTILIZADOS.</b>	50
<b>4.2</b>	<b>MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO</b>	53
<b>4.2.1</b>	<b><i>Argila expansiva</i></b>	53
<b>4.2.2</b>	<b><i>Agregado de argila expandida</i></b>	60
<b>4.2.3</b>	<b><i>Agregado miúdo – Areia</i></b>	65
<b>4.2.4</b>	<b><i>Cimento Portland</i></b>	68
<b>4.2.5</b>	<b><i>Água</i></b>	68
<b>4.2.6</b>	<b><i>Concreto</i></b>	68
<b>4.2.7</b>	<b><i>Custo do AAE e do Concreto</i></b>	73

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	75
5.1	AGREGADO DE ARGILA EXPANDIDA	76
5.2	CONCRETOS COM AAE	86
<b>5.2.1</b>	<i>Concreto com AAE-RS-1250°C e concreto com AAE-1506</i>	86
<b>5.2.2</b>	<i>Concreto utilizando AAE-1300°C</i>	92
<b>5.2.3</b>	<i>Concreto utilizando AAE-1100°C</i>	93
5.3	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	96
5.4	RELAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA ARGAMASSA E DO CONCRETO EM FUNÇÃO DO FATOR A/C	96
5.5	CUSTO DO AAE-1506 E AAE-0500	98
5.6	CUSTO DO CONCRETO LEVE	99
<b>5.6.1</b>	<i>Concreto Leve x Concreto Normal de 10 MPa</i>	99
<b>5.6.2</b>	<i>Concreto Leve Estrutural x Concreto Normal de 20 MPa</i>	100
<b>5.6.3</b>	<i>Custo do Concreto Leve em relação ao Concreto Normal</i>	101
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	103
<b>7</b>	<b>SUGESTÃO PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS</b>	106
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b>	107

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto à base de cimento Portland é o material produzido pelo homem de maior consumo, assim como seus componentes: cimento, areia e brita. Nas últimas quatro décadas, houve um grande desenvolvimento da tecnologia do concreto e se observa o aumento contínuo do consumo do mesmo. Somente no Brasil em 2017, as usinas produziram 51 milhões de m<sup>3</sup> de concreto (ABCP, 2018).

Dentre os avanços tecnológicos na área de construção civil, destaca-se o concreto leve (CL) e o concreto leve estrutural (CLE), utilizando-se o agregado de argila expandida (AAE). Entende-se como CLE, o concreto com resistência à compressão aos 28 dias acima de 17 MPa e massa específica inferior a 2000 kg/m<sup>3</sup>. Há ainda outras classificações do concreto leve que são considerados por outras normas (NEVILLE; BROOKS, 2013).

O uso de CL e CLE possuem uma grande gama de aplicações. Pode ser utilizado na execução de pontes, em especial com grandes vãos; construções pré-moldadas que necessitam ser transportadas, cúpulas, filtro anaeróbio, etc. Há ainda a aplicação como pré-moldado leve, propiciando não somente a redução do tamanho da peça, mas também, a diminuição da massa específica da mesma. Outras aplicações que merecem ser destacadas são os artefatos de concreto, como: churrasqueiras, guias, blocos não estruturais, pergolados, bancos, preenchimento de pisos e nichos, etc (MAMEDE, et. al., 2002).

O AAE é uma das opções para a produção de CL, concorrendo em propriedades com o CL utilizando EPS (poliestireno expandido), no quesito de concreto destinado a enchimento e isolamento térmica. No entanto, o CL-EPS não tem resistência estrutural. Assim o CL de AAE alia importantes propriedades como leveza e elevada resistência.

Quanto à aplicação, o uso dessa tecnologia no país ainda é modesto, se comparado ao crescimento do uso dos concretos normais (CN). Alguns fatores são responsáveis por isto, entre eles, cita-se: o desconhecimento da técnica por muitos profissionais, a falta de uma formação específica com esse tema e a limitação do fornecimento de agregado leve nas usinas devido à distância à fábrica produtora.

Ressalta-se que no Brasil há apenas um fabricante de agregado de argila expandida (AAE), localizada na cidade de Várzea Paulista, no estado de São Paulo, distante cerca de 50 km da capital. A empresa que produz tais agregados é a Cinexpan. Esse fato, muitas vezes tem inviabilizado o uso e disseminação tecnológica do CL, devido às grandes distâncias entre o fabricante e as obras espalhadas pelo país. Assim, o seu consumo em maior escala é encontrado principalmente na região sudeste (PEREIRA, 2008).

A fim de se promover a tecnologia de produção do AAE de forma viável em todo o território nacional, é preciso caracterizar as argilas expansíveis (argilas que potencialmente podem produzir agregados leves após a queima) à disposição em diversas jazidas pelo país. O Rio Grande do Sul é um estado estratégico em sua posição geográfica, já que se encontra próximo aos países que compõem o MERCOSUL e distando ~1000 km do atual fabricante em São Paulo.

O presente trabalho procura continuar os estudos de caracterização da argila proveniente de Arroio Grande-RS, os quais mostraram uma excelente qualidade na produção de agregados leves (CARÚS, 2014). De tal modo, foram confeccionados AAE em diversas granulometrias, diferentes temperaturas e avaliados na produção de concreto leve. Inicialmente, estudaram-se os parâmetros de formulação e produção do CL e, posteriormente, foram avaliadas as propriedades dos corpos de prova, como resistência mecânica, massa específica, fator de eficiência, absorção de água, entre outras.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Verificar as propriedades da argila expansiva da jazida de Arroio Grande – RS, como absorção de água, expansibilidade, resistência à compressão e caracterização química e física, almejando-se a produção de agregados leves. Caracterização das propriedades desses confeccionados em diferentes temperaturas de queima. Avaliar o uso o do agregado leve na produção de concretos leves.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Determinar as propriedades da argila expansiva de Arroio Grande-RS (AE-RS) e seu potencial para produção de agregados leves.

Caracterizar as propriedades do agregado de argila expandida (AAE-RS), como massa específica, resistência à compressão, fator de expansibilidade e propriedades físicas e químicas.

Aplicar os agregados de argila expandida na produção de concretos leves, ou concretos leves estruturais, verificando as principais propriedades físicas e mecânicas como: resistência à compressão, massa específica, absorção de água do concreto, fator de eficiência, resistência ótima e o custo desse concreto.

Comparar as propriedades dos agregados leves utilizando agregados do fabricante e dos concretos produzidos com AAE-RS. Além disso, visto que há apenas um fabricante no país, quantificar o custo médio do concreto leve utilizando o AAE em função da quilometragem de transporte, bem como o custo do concreto leve por m<sup>3</sup>, partindo de um traço apresentado na bibliografia corrente (TCPO-10, 1996). Adicionalmente, foi determinado o custo utilizando os valores do SINAPI - Caixa Econômica Federal.

Comparar e verificar as principais propriedades físicas e mecânicas como, a resistência à compressão, a massa específica, a absorção de água do concreto, o fator de eficiência dos concretos leves produzidos com os AAE-RS.

### **2.3 LIMITAÇÃO DA PESQUISA**

Em todas as comparações e avaliações das propriedades do agregado e do concreto leve desenvolvidos com a AE-RS e com o material da empresa Cinexpan (Tipo 1506), deve-se considerar que os primeiros são produzidos em forno elétrico laboratorial, enquanto o segundo em forno industrial rotativo. Portanto, diferenças significativas no processo de queima (e conformação), as quais implicam características específicas nos agregados e na inter-relação destas com os demais componentes do concreto leve.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 DEFINIÇÃO DE CONCRETO LEVE

A NBR 12655 (ABNT, 2015) define concreto leve no seu item 3.8 como: “concreto leve (CL), com massa específica seca, determinada de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005) inferior a 2000 kg/m<sup>3</sup>”. No entanto, é significativo observar que dependendo do autor, tem-se uma definição mais restrita ou mesmo mais abrangente, ao se definir o concreto leve (LOUTOU; HAJJAJI, 2017).

De acordo com Santos (1989) não existe uma definição específica para CL, mas sim uma geral e que pode ser tomada como sentido lato; sendo aplicada em qualquer concreto que tenha massa específica menor que o concreto normal (CN), que na ocasião era de 2400 kg/m<sup>3</sup>. Mehta e Monteiro (2008) definem o concreto leve com uma massa específica inferior a 1800 kg/m<sup>3</sup>, e deve-se ainda limitar a dimensão do agregado leve em 19 mm. Rossignolo (2009) faz sua definição ressaltando que de modo geral, pode ser considerado como CL quando este apresentar massa específica aparente abaixo de 2000 kg/m<sup>3</sup>. O autor apresenta os critérios de diversas normas, conforme Tabela 01, porém vale lembrar que a NBR NM 35 (ABNT, 1995) utilizada como base no Brasil, deixou de ser aplicada como parâmetro no Brasil.

Tabela 01 - Classificação do Concreto Leve.

<b>Referência</b>	<b>ME (kg/m<sup>3</sup>)</b>
NM 35 (1995)	1680<y<1840
ACI 21 3R (2003)	1120<y<1840
EUROCODE 2 (2007)	900<y<2200
NS 3473 E (1998)	1200<y<2200
CEB-FIP (1977)	y<2000
RILEM (1975)	y<2000

Fonte: Rossignolo, (2009).

Neville e Brooks (2013) utilizam como referência a norma norte-americana para classificação de concreto (ASTM C-330-05) e concreto leve estrutural (ASTM C-331-05). Esses autores fazem ainda uma distinção quanto ao uso e aplicação do concreto ser isolante (ASTM 332-99). Esse conjunto de referências permite estabelecer a aplicação desse concreto leve nas mais diversas funcionalidades, conforme sintetizado na Tabela 02.

Tabela 02 - Classificação quanto a Massa específica e Resistência à compressão

<b>ME (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>f<sub>cm</sub> (MPa)</b>	<b>Classificação</b>
<800	0,7-7,0	baixa massa específica
800-1350	7,0-17,0	resistência moderada
1350-1900	>17 MPa	alta resistência

No Brasil é possível respaldar o critério de classificação de um concreto observando as NBRs 6118 (ABNT, 2014) e 12655 (ABNT, 2015) que estabelecem como critério apenas a massa específica, possuindo três classes, a saber: concreto leve (CL), concreto normal (CN) e concreto denso (CD), conforme Tabela 03.

Tabela 03 - Classificação do Concreto segundo NBR 12655 (ABNT, 2015).

<b>Concreto leve</b>	<b>Concreto normal</b>	<b>Concreto denso</b>
<b>CL (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CN (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>CD (kg/m<sup>3</sup>)</b>
≤2000	2000 <CN <2800	≥ 2800

## 3.2 PANORAMA HISTÓRICO – GEOGRÁFICO.

### 3.2.1 Argila e concreto leve no mundo.

A primeira indicação da aplicação do concreto leve se deu cerca de 1100 a.C., na cidade de El Tajin, hoje localizada no México no estado de Vera Cruz. Nessa cidade há um sítio arqueológico com diversos monumentos de pedra, a exemplo do que ocorre na cidade de San Juan que dista 400 km, onde é possível observar as Pirâmides do Sol e da Lua, construídas no período pré-colombiano (VIEIRA, 2000).

As construções encontradas em El Tajin (Figura 01), possivelmente, foram feitas pelo povo tolteca que utilizavam uma mistura de pedra-pomes com cal e cinzas vulcânicas. O uso da cal pelos descendentes desse povo foi registrado no século XVI, pelo Frei Bernardino Sahagún, que viveu com seus descendentes por 40 anos (1547 a 1587) e mais tarde seus registros foram conhecidos como o Códice de Florentino (SAHAGÚN 1587, apud BERNARDES, 2008).

Sahagún (1587) descrevendo o hábito dos construtores astecas e descendentes desses povos, relatou: “tem por ofício fazer mescla (argamassa), molhar bem e colocar ‘tortas de cal’ e ‘alisar bem’, o canteiro lavra a pedra, desbasta, faz arcos... faz bons *caementum* (do latim:

cimento)” (SAHAGÚN 1587, apud BERNARDES, 2008). A Figura 01 mostra a utilização de concreto leve utilizando pedra-pomes, como a construção de templos em El Tajin.



Figura 01 - Templo em El Tajin México. Fonte: Viajar entre viagens, (2018).

Outra obra que recebeu concreto leve foi o Coliseu de Roma (Figura 02), considerado uma das sete maravilhas do mundo pela UNESCO. Mais tarde outras construções fizeram uso do concreto leve entre eles o Panteão em Roma cuja construção remonta 14 d.C e reconstruído no ano 126 d.C, pelo Imperador Adriano. O Panteão é uma construção com uma cúpula de 44 metros, trata-se dos maiores vãos em concreto não reforçado (MOORE, 1999).



Figura 02 - Coliseu em Roma. Fonte: Viaje leve, (2018).

Angelin (2014) menciona que essas obras supracitadas são algumas das construções que foram executadas utilizando algum tipo de cimento (aglomerante) e pedra-pomes, ou mesmo materiais reconhecidamente mais leves.

Stephen J. Hayde é considerado o pai da indústria do concreto leve nos tempos modernos. Por volta de 1914, Hayde produzindo tijolos em sua olaria nos EUA, observou que alguns dos seus tijolos tinham um alto teor de expansão após a queima. Ele passou a classificar seu material em três classes. Primeiro, os tijolos queimados para uso externo com capacidade de suportar a umidade e o gelo. O segundo conjunto de tijolos era chamado de “salmão”, devido a sua cor mais clara, passando-se a utilizá-los para ambientes internos. A terceira pilha de tijolos era considerada um refugio, chamado de “inchados”. Hayde identificou que esses tijolos haviam sido posicionados perto da fonte de calor no forno, portanto, sendo aquecidos rapidamente, de maneira que os gases incorporados na argila dissipavam rapidamente provocando vazios (BREMNER; RIES, 2018).

Hayde observou que em termos dimensionais os tijolos sofriam um aumento na ordem de até um terço, o que equivalia duas vezes o seu volume inicial. Com uma mente engenhosa e trabalhando com construções e reformas de edifícios, ele começou a fazer testes produzindo concreto com esse agregado. Na data de 7 de outubro de 1914, Hayde enviou uma carta ao seu sobrinho, relatando sua descoberta e afirmando que “parte do material é tão leve que flutua na água”. Hayde produziu um concreto com massa específica de  $1700 \text{ kg/m}^3$ , uma excelente resistência, e patenteou sua argila como *haydite*. Hayde pesquisou não somente o processo, mas os materiais que se expandiam: em sua patente ele descreveu a argila, a ardósia e a rocha de xisto, os quais deveriam ser aquecidos a  $1220^\circ\text{C}$  por cerca de 2 horas e resfriado abruptamente. A sua descoberta do AAE aplicado em concreto leve permaneceu consigo até meados de 1946 quanto expirou sua patente (BREMNER; RIES, 2018).

A concepção de concreto leve, utilizando agregados de argila expandida desde o século passado dá a Hayde o tributo de ser o seu inventor uma vez que ele fez uso do cimento Portland, na fabricação do concreto (OZGUVEN; GUNDUZ, 2012).

Com o início da 1ª Guerra Mundial, muitos navios estavam sendo afundados, e o ferro e seus derivados como o aço estavam se tornando escassos, quando então o Departamento de Construção de Navios de Emergência - em uma parceria - passam a construir navios de

concreto leve. O primeiro navio produzido foi o Atlantis, lançado ao mar em dezembro de 1918, e o segundo foi o navio “Selma” com dimensões de 123 metros de comprimento, largura de 13 metros, calado de 8 metros e uma espessura de concreto de 13 cm. A Figura 03 mostra o Navio Selma. Durante a primeira e a segunda guerra mundial foram construídas 14 embarcações e posteriormente 488 navios em concreto leve (ROSSIGNOLO, 2009; BREMNER; RIES, 2018).



Figura 03 - Navio Selma exposto ao ambiente marinho. Fonte: Pinterest, (2018).

A primeira aplicação em edifícios de múltiplo andar se deu em 1929 na cidade de Kansas com a expansão do edifício de escritório da SouthWestern Bell Telephone Company, construído com 14 pavimentos e ampliado com mais 8 pavimentos de concreto leve. Sua resistência chegou a 25 MPa a 28 dias. No mesmo ano em 1929, o hotel Chase-Park Plaza (Figura 04) na cidade de St. Louis é considerado o primeiro edifício de concreto leve com 28 pavimentos e toda sua estrutura com concreto leve (ANGELIN, 2014).



Figura 04 - Hotel Chase-Park Plaza. Fonte: CVENT, (2018).

Com um desenvolvimento tecnológico cada vez mais aprimorado, o concreto leve foi aplicado em pontes, com o objetivo de vencer grandes vãos. Dentre os diversos serviços executados, tem-se a construção da pista superior da ponte na baía de San Francisco construída em 1930.

### 3.2.2 Argila e concreto leve no Brasil.

O agregado de argila expandida (AAE) é produzido em mais de 20 países incluindo o Brasil. O seu nome é grafado e conhecido de muitas maneiras como: “*Leca*” em países como Reino Unido, Irã, Portugal, Finlândia, Alemanha, Itália, Dinamarca e Suíça, já em países como Suécia, China, Polônia e Rússia é conhecida como “*Keramzite*”, na Espanha como “*Liapour*”, na África do Sul é conhecida como “*Argex*” e nos EUA como “*Lightweight aggregate*” ou pelo seu acrônimo LWA (ALEXANDER, 1999; RASHAD, 2018).

A aplicação da argila expandida no Brasil tem sua origem com a indústria de pré-fabricados em concreto armado, CINASA, uma das empresas do Grupo Rabello. Esse grupo participou de construções significativas no Brasil, como: Rodovia Transamazônica, Ponte Rio-Niterói, Palácio do Jaburu, entre outras. Iniciando suas atividades em 1965 na cidade de São Bernardo do Campo, a CINASA passou a produzir pré-fabricados, mas viu-se numa situação limitada, uma vez que não havia fornecedores de agregados leves para suprir a sua necessidade.

No seu plano estratégico estava à produção de casas pré-fabricadas utilizando o concreto leve. Diante da falta de fornecedor, a CINASA funda a empresa CINASITA no ano de 1968, na cidade de Jundiaí, a 70 km da Capital. Mais tarde a empresa CINASITA deixou de operar surgindo a empresa CINEXPAN no ano de 2000, localizada no município vizinho a Jundiaí, na cidade de Várzea Paulista distando 50 km de São Paulo, sendo ainda hoje o único produtor de argila expandida no país (CINEXPAN, 2018).

No período que as empresas Cinasa e Cinasita atuaram, muitas obras foram realizadas em Brasília, DF. Houve a construção de 120 edifícios de 03 pavimentos, com 24 apartamentos em cada edifício.

Entre as principais obras no país com agregado de argila expandida, pode-se citar: a) Fábrica da Rhodia em Santo André – SP; b) Escola na vila Sônia em São Paulo – SP; c) Elevado Paulo de Frontin – RJ; d) Houve ainda obras de cunho estratégico como o Quartel-General da 12º Região Militar, conhecido como forte Apache localizado em Brasília-DF (Figura 05).



Figura 05 - Quartel-General da 12º Região Militar. Fonte: Flickr, (2018)

### **3.3 PROPRIEDADES DO AGREGADO DE ARGILA EXPANDIDA.**

As características, propriedades e classificação dos agregados de argila expandida, são apresentadas por meio dos dados do único fabricante do país, conforme seu catálogo técnico,

em função da granulometria nominal (CINEXPAN, 2018). Algumas informações foram complementadas, através de entrevista com o Responsável Técnico e Eng. Civil Carlos Alberto Pereira em 10/10/2018. Nominalmente, utiliza-se no mercado brasileiro para designar o produto do fabricante códigos como “3322”, isso significa que o diâmetro deste agregado será de 32 mm a 22 mm. A Tabela 04 e a Figura 06 exemplificam o código utilizado no mercado e muitas vezes referenciado no meio técnico.

Tabela 04 - Propriedades físicas do fabricante Cinexpan.

<b>Tipo Comercial</b>	<b>Variação</b>	<b>Agregado</b>	<b>Densidade</b>
<b>Código</b>	<b>Granulométrica (mm)</b>	<b>Equivalente</b>	<b>Aparente* (kg/m<sup>3</sup>)</b>
500	0-5	Areia Grossa	850
1506	6-15	Brita 0	600
2215	15-22	Brita 1	500
3222	22-32	Brita 2	450

\* pode ocorrer uma variação de 10%

Fonte: Catálogo Cinexpan, (2018).



Figura 06 - Catálogo Cinexpan. Fonte: Cinexpan, (2018).

### 3.3.1 Características do agregado de argila expandida.

a) **Massa Específica:** a primeira característica que define a argila expansiva é sua capacidade de ser leve. Observa-se que os agregados de uso convencional, como os basálticos ou de gnaiss, chegam a 3000 kg/m<sup>3</sup>, ao passo que o agregado de argila leve (AAE) pode ter densidade menor que a água, que é de 1000 kg/m<sup>3</sup> (ARDAKANI; YAZDANI, 2014). A Tabela 05 mostra a densidade em função do diâmetro nominal do AAE, baseado no catálogo técnico da empresa.

Tabela 05 - Massa específica do agregado.

<b>Massa Específica (kg/dm<sup>3</sup>)</b>			
<b>CÓD.</b>	<b>CÓD.</b>	<b>CÓD.</b>	<b>CÓD.</b>
<b>3222</b>	<b>2215</b>	<b>1506</b>	<b>500</b>
0,56	0,64	1,1	1,4

Fonte: Cinexpan, (2018).

- b) Resistência à Compressão Média do AAE ( $f_{cm}$ ): essa característica é uma propriedade complementar e nem sempre necessária para o uso em geral, como ocorre na indústria têxtil. Nesta, o processo em que utiliza a estonagem adicionando AAE com o objetivo de descolorir e provocar efeitos na roupa ou pano sendo de pouca importância a resistência à compressão. Já na construção civil ela é fundamental, e em muitos casos determinante, como na produção de concretos. A Tabela 06 apresenta as resistências dos AAE em função do seu diâmetro.

Tabela 06- Resistência do AAE

<b><math>f_{cm}</math> (MPa)</b>			
<b>CÓD. 3222</b>	<b>CÓD. 2215</b>	<b>CÓD. 1506</b>	<b>CÓD. 500</b>
1,88	0,94	0,6	0,22

Fonte: Cinexpan, (2018).

- c) Material Inerte: a argila expansiva é inerte quimicamente e livre de impurezas que possam afetar a saúde humana ou animal. No entanto, Rossignolo (2009) lembra que durante o processo de sinterização, caso a argila provenha de uma jazida com elevado teor de calcário, poderá haver a eflorescência com a presença de água.
- d) Porosidade: a depender do processo de produção, temperatura e da própria argila, o agregado de argila expandida poderá ter poros externos. Essa propriedade poderá promover maior aderência, por aumentar sua área de contato, quando em contato com o aglomerante, no entanto exigirá maior consumo de cimento. Na indústria têxtil essa é uma das principais propriedades, seguida da absorção de água.
- e) Absorção de água: parte dessa propriedade se dá em função da porosidade e da capacidade que os agregados têm de absorver a água ou a umidade (NEVILLE; BROOKS 2013). A Tabela 07 apresenta os resultados baseando-se no catálogo do fabricante.

Tabela 07 - Absorção do AAE Cinexpan.

<b>Absorção de água em 24 horas (AA%)</b>			
<b>CÓD.</b>	<b>CÓD.</b>	<b>CÓD.</b>	<b>CÓD.</b>
<b>3222</b>	<b>2215</b>	<b>1506</b>	<b>500</b>
10	10	7	6

Fonte: Cinexpan, (2018).

Essa propriedade é fundamental quando se utiliza o AAE em substituição ao agregado basáltico, gnaiss ou calcários, já que a absorção de água está relacionada com os mesmos fatores da porosidade, além da queima, em especial do volume do agregado – sua área superficial.

Neville e Brooks (2013) verificaram que a absorção de agregados leves no período de 24 horas pode variar entre 5% a 20% em relação à massa do agregado seco, e, segundo os autores, os agregados de boa qualidade limita-se a uma absorção de até 15%.

f) Resistência ao fogo: as argilas expandidas são incombustíveis, o que permite serem utilizadas como isolantes ao fogo (Cinexpan, 2018).

### **3.3.2 Classificação do agregado de argila expandida.**

#### **3.3.2.1 Classificação quanto à origem**

a) Naturais: são agregados leves extraídos da própria natureza, como a pedra-pomes, escórias vulcânicas, vermiculitas e perlitas, e não sofrem o processo de industrialização, apenas trituração e separação granulométrica. Mas a sua desvantagem remonta o tempo das antigas civilizações, uma vez que as obras e construções ficam limitadas a locais próximos de uma jazida. Foi diante dessa situação que surgiu a necessidade de produzir agregados expansivos, denominados artificiais (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE; BROOKS, 2013).

b) Artificiais: produzidos em um processo industrial, podendo ser os agregados de argila expandida com ou sem adição de escórias. Como exemplos de AAE artificial, têm-se as escórias de alumínio inseridas no AAE antes da queima, além de outros materiais como vidro expandido triturado e diversos materiais reciclados (TAKAHASHI, 2006; MOLINEUX et. al, 2016, CHUNG et .al., 2018).

### 3.3.2.2 Classificação quanto à produção ou queima.

- a) Sinterização: utiliza-se uma grelha rotativa e a argila é lançada nesta grelha, mas antes a argila deve ser misturada com o coque ou carvão e homogeneizada. Como consequência, no processo de queima os poros tendem a se voltar para o exterior da argila, dito poros abertos, diminuindo sua eficiência de expansibilidade, e não provocando o aumento do volume que se espera - isso levará a um material mais denso, na ordem de  $900 \text{ kg/m}^3$  (ANGELIN, 2014; BORJA, 2011).
- b) Forno rotativo: o princípio de fabricação é muito parecido com o processo dos fornos de cimento. São fornos circulares e o aquecimento se dá ao longo de seu comprimento. O movimento giratório do forno com as argilas expansivas, que na verdade são pequenos bastonetes, faz com que essas vão tomando a forma arredondada e eliminando as arestas até ficarem aparentemente esféricas. Os gases que estão na argila provocam sua expansão e aumentando o seu volume, devido ao revolvimento do agregado no forno e seu rápido resfriamento. Isso provoca uma sinterização da superfície, mantendo os poros internos, conforme a Figura 07 (NEVILLE; BROOKS, 2013; ANGELIN, 2014; AYATI et. al., 2018).

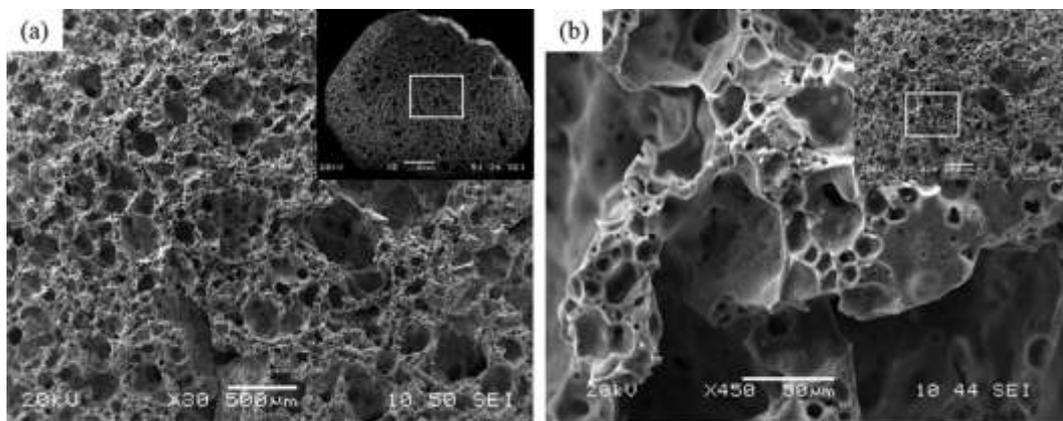


Figura 7 - Microestrutura mostrando poros internos (AYATI, 2018)

### 3.3.3 Processo de Produção de Agregado de Argila Expandida (AAE)

Para a produção de AAE é possível pontuar fases bem distintas no seu processo, podendo-se dividir em 10 fases. Muitas etapas são comuns às olarias. O processo de produção apresentado baseia-se na planta produtiva da empresa Cinexpan, com o apoio técnico do Eng. Civil Carlos Alberto Pereira (PEREIRA, 2018).

- a) Homogeneização: tem sido cada vez mais difícil conseguir uma argila que contenha todas as propriedades necessárias para produção de tijolos, principalmente próximos das grandes metrópoles, quanto mais para produção de argilas expansivas. Assim, misturas são feitas para que uma propriedade de um lote possa compensar a deficiência de outro. O local de homogeneização normalmente é aberto, onde caminhões e máquinas vão lançando e revolvendo em camadas as argilas para que a mistura ocorra entre elas. Parte fica em um galpão coberto - é uma etapa conhecida como 'envelhecimento' da argila. A batelada após ter sido homogeneizada é deixada em repouso e com o passar do tempo ela estará pronta para entrar para a próxima fase.
- b) Desintegração: a argila é lançada no desintegrador, um equipamento com lâminas giratórias, para uma britagem grosseira que reduzirá muitos torrões de argila com diâmetros iniciais de 20 a 30 cm a finais de 5 cm. O transporte para o desintegrador nessa fase é feita por pá-carregadeira, que lançam esse material em pequenos silos, a exemplo do que ocorre com as olarias convencionais.
- c) Misturador: a argila normalmente é transportada em esteiras e, a depender do processo escolhido, o material passa pelo processo de umidificação, podendo ser por aspersão ou gotejamento. Nessa fase, adições são feitas e correções químicas são complementadas por outras argilas. O objetivo é promover os atributos como expansibilidade e plasticidades, qualidades necessárias na produção e no produto final (PETRUCCI, 1973).
- d) Laminação: é uma trituração mais fina, diminuindo em 10 vezes a dimensão dos aglomerados. Torrões na ordem de 5 cm são moídos e deixados a 5 mm: esse processo ocorre quando a argila cai em moinhos rotativos e são comprimidas e cortadas, sendo levada para fase de extrusão. Digno de nota que o processo é uma sucessão de 'subprocessos', uma vez que ao final a argila está pronta para ser moldada. Petrucci (1973) chama essa fase de Laminador-Refinador.
- e) Extrusão/pelotização: a argila passa através de uma extrusora normalmente mecânica, com rosca sem fim de modo que a argila sai conformada como cilindro ou bastonetes de 2 cm com diâmetro de 1 cm. Embora essa fase seja chamada de pelotização, o final desse processo de pelotização ficará por conta da fase de queima em forno rotativo.

f) Fornação: compreende o processo de secagem e queima dos bastonetes de argila. Esses vão revolvendo no forno e passam assumir um formato arredondado, com a superfície fechada, chamado de processo de pelotização ou referido também por alguns autores como nodulação. As argilas extrudadas normalmente caem num silo que conduz para o forno rotativo com comprimento de 60 metros com um pequeno grau de inclinação, e à medida que este forno gira a argila vai se deslocando, aumentando seu volume e se pelotizando.

Ao longo desse forno a argila vai passando por diversas temperaturas, iniciando a 300°C até ao final do forno a 1300°C. Estudos revelam que a partir de 1000°C o fenômeno de expansibilidade começa a ocorrer nas argilas pelotizadas (OZGUVEN; GUNDUZ, 2012). O fenômeno da expansibilidade se dá em função da argila e mesmo do uso de aditivos como, escória de alumínio, vermiculita, perlita e outros (TAKAHASHI, 2006).

g) Resfriamento: esta é fase fundamental para pelotização e cristalização do agregado de argila expandida. Ao sair do forno, ele encontra-se incandescente e é rapidamente resfriado por ventiladores, caindo de uma temperatura de 1300°C a 200°C. Isso irá proporcionar poros fechados e ao mesmo tempo uma cristalização da superfície do AAE.

h) Peneiramento: no processo de queima no forno, algumas argilas são desbastadas e outras quebradas, precisando passar pelas peneiras para serem classificadas como pedrisco, brita 0, brita 01 e brita 02, como se deseja. Todo material é aproveitado.

i) Ensacamento: no mesmo exemplo que ocorre na indústria do cimento e do gesso, a argila expansiva será ensacada na dimensão nominal em sacos de acordo com o fabricante, normalmente de 50 litros.

j) Distribuição: o material é levado ao depósito para ser distribuído de acordo com a demanda do mercado.

As Figuras 08 e 09 apresentam o forno rotativo da empresa CINEXPAN, bem como o final do processo, observando-se os agregados incandescentes.



Figura 08- Forno Rotativo. Fonte: Cinexpan, (2018).

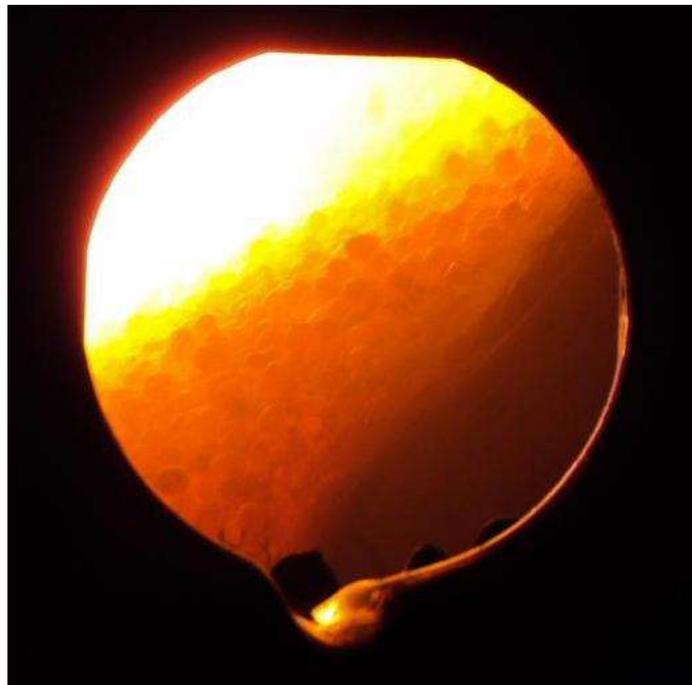


Figura 09 – AAE, sendo queimado em Forno Rotativo. Fonte: Cinexpan, (2018).

### 3.4 CLASSIFICAÇÃO DE CONCRETOS LEVES

Ao se produzir concreto leve, o que se busca no primeiro momento é a redução da massa específica, isto é possível graças à incorporação de ar/vazios no concreto. Este pode ser classificado, como (NEVILLE, 2016):

- a) Concreto com Agregados leves, pela incorporação de agregados porosos com massa específica menor que  $2,6 \text{ g/cm}^3$ , como exemplo, as argilas expansivas.
- b) Concreto sem finos: quando não se utiliza o agregado fino, apenas a nata de cimento ou uma quantidade muito reduzida de areia, ficando evidente o agregado graúdo.
- c) Concreto celular: sua produção é feita com cimento e areia, introduzindo bolhas de gás com o objetivo de promover vazios. Segundo Neville (2016), é possível se produzir concreto celular sem areia, mas este não poderá ser utilizado para fins estruturais. O autor ainda estabelece uma classificação levando em conta a resistência, a massa específica e ainda sua aplicação no isolamento térmico (Tabela 08).

É possível se verificar que na classificação de “baixa massa específica” não se exige uma resistência específica, e seu objetivo é buscar outras propriedades para esse concreto. Como por exemplo, têm-se artefatos de concreto como churrasqueiras, nos quais se busca um maior isolamento térmico, ou placas divisórias de ambientes, privilegiando-se o isolamento acústico, sem qualquer função estrutural.

Quanto à designação “resistência moderada” (Tabela 02), o material pode ser aplicado em artefatos de concreto, como em revestimento na fachada, ou na produção de tijolos e blocos estruturais, uma vez que a resistência exigida mínima é de 6,0 MPa para blocos de concreto classe A conforme NBR 6136 (ABNT, 2014); (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

O concreto leve “estrutural” é muito aplicado em vigas, lajes e em pilares. Esse material é mais nobre e exige a seleção e dosagem racionalizada, sendo a maioria dos estudos voltados para essa subclassificação.

Tabela 08 - Classificação segundo Neville (2016)

Concreto	ME (kg/m <sup>3</sup> )	fcm (MPa)	Aplicação
Baixa massa específica	300-800	Não exigido	Isolamento térmico
Resistência moderada	Não exigido	7-17	Não estrutural
Estrutural	1350-1900	>17	Estruturas

Com base na classificação de Neville (2016) é apresentada na Tabela 08 a massa específica dos materiais utilizados. Variando-se o tipo do material empregado é possível se ter uma massa específica que atenda a uma das três classificações, como se apresenta na Figura 10.

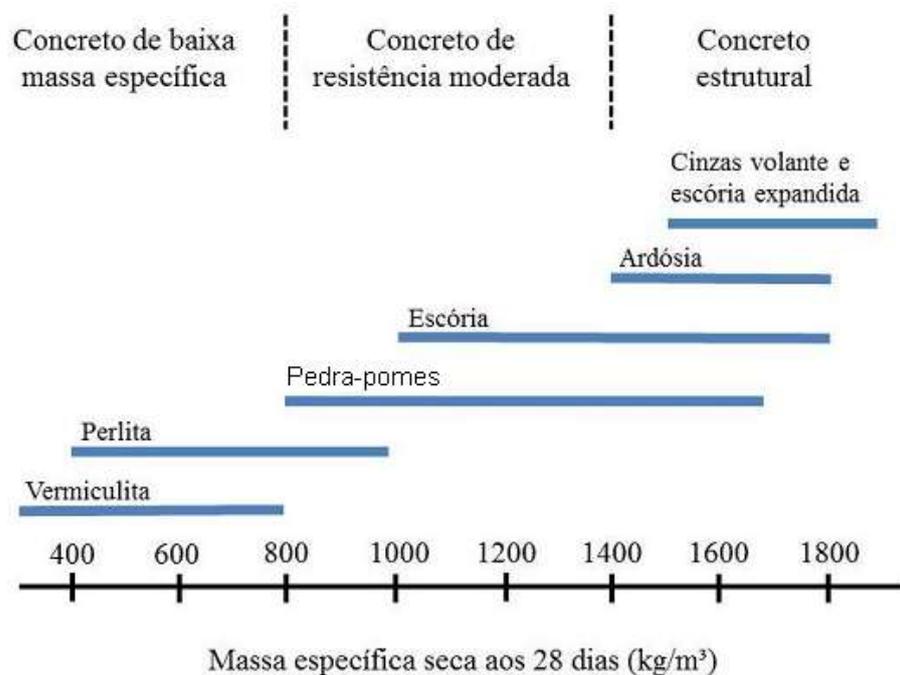


Figura 10 - Relação da ME com o tipo de material leve utilizado.

Fonte: Neville (2016) adaptado pelo autor, (2018).

### 3.5 TIPOS DE CONCRETOS LEVES

#### 3.5.1 Concreto leve com EPS

O concreto leve com EPS (poliestireno) é fabricado principalmente para duas funções: a primeira, para o preenchimento de vazios, como caixão perdido; o segundo uso, é como isolante térmico e acústico, classificado como um concreto de baixa massa específica, com densidade entre 300-800 kg/m<sup>3</sup>, conforme Neville (2016).

O EPS substitui o agregado miúdo, isto é, a areia do concreto normal. A densidade do EPS é de 10 kg/m<sup>3</sup> a 32 kg/m<sup>3</sup> (ABRAPEX, 2006). É possível se utilizar o EPS, com diâmetros de 1 a 2 mm, denominados como pérolas, como substituto da areia. Esses concretos apresentam muitos poros, têm pouca resistência e não devem ter função estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

### **3.5.2 Concreto leve aerado**

Esse concreto segue o mesmo princípio do concreto com EPS, dentro dessa classificação, estão os concretos celulares e concretos que através de aditivos expansores têm em sua massa microbolhas, promovendo a sua leveza. A vantagem do concreto aerado em relação ao de EPS é a sua incombustibilidade.

### **3.5.3 Concreto leve com agregado de argila expandida**

Há uma vantagem do concreto leve com agregado de argila expandida diferenciando-se dos demais concretos com os mais diversos agregados. O AAE consegue conferir resistência ao sistema, algo que o EPS e a aeração (formando vazios) não permitem. A classificação dos AAE leva em conta três fatores: a massa específica, resistência à compressão e o fator de eficiência; que podem ser aplicados para qualquer concreto leve.

O concreto leve com agregado de argila expandida é classificado em:

- a) Concreto leve (CL)
- b) Concreto leve estrutural (CLE)
- c) Concreto leve de alto desempenho (CLAD)

#### **3.5.3.1 Concreto leve (CL)**

O concreto leve é um concreto que possui uma densidade menor que 2000 kg/m<sup>3</sup>, não sendo importante a resistência à compressão. Privilegia-se a leveza do concreto leve em detrimento à sua resistência. Pode-se ainda afirmar que concretos com resistência menor que 17 MPa e massa específica menor que 2000 kg/m<sup>3</sup>, são classificados nessa condição (RASCHAD, 2018).

### 3.5.3.2 Concreto leve estrutural (CLE)

O concreto leve estrutural deve ter uma massa específica menor que  $2000 \text{ kg/m}^3$ , mas uma resistência maior que 17 MPa. Podem ser aplicados em componentes estruturais como fundações, pilares, vigas, lajes e preparo de caixa, ou seja, empregados para diversos fins estruturais (ASSUNÇÃO, 2016).

### 3.5.3.3 Concreto leve de alto desempenho (CLAD)

Segundo Armelin et al. (1994), entende-se como concreto leve de alto desempenho, aqueles que possuem massa específica até  $1200 \text{ kg/m}^3$  e resistência à compressão a partir de 30 MPa. Para Sptizner (1994) apud Assunção (2016), pode ser considerado concreto leve de alto desempenho, quando este atingir um fator de eficiência (FE) superior a  $25 \text{ MPa.dm}^3/\text{kg}$ . Portanto, trata-se de um concreto superior uma vez que relaciona a maior resistência a máxima leveza, A Figura 11 relaciona essas três classificações.

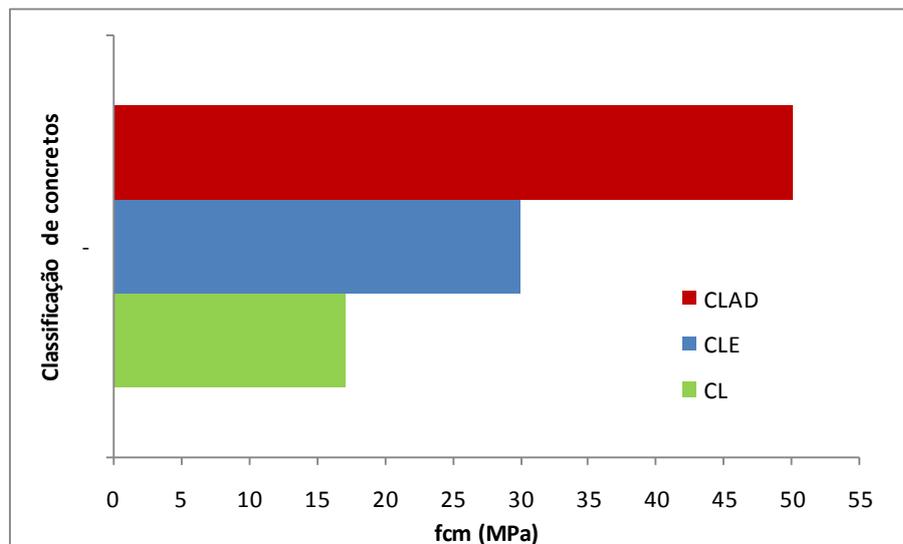


Figura 11 – Classificação dos concretos leves em função da resistência à compressão.

O entendimento e definição do CLAD estão relacionados com o CAD – concreto de alto desempenho. No CAD a resistência à compressão no Brasil é considerada como de 40 MPa, já nos EUA essa resistência é de 60 MPa (QUEIROGA, 2000). Assim em virtude da classificação variar em função do desenvolvimento tecnológico do país e de sua capacidade

de produzir concreto, o FE para CLAD, é um melhor balizador e pode variar de um país para o outro a depender do seu controle tecnológico.

Para o CLAD, é considerada a resistência mínima à compressão de 30 MPa, tendo uma massa específica de 1200 kg/m<sup>3</sup>, o que levaria a um FE de 25 MPa.dm<sup>3</sup>/kg. Esse parâmetro foi cunhado do CAD utilizado no EUA e que normalmente tinham uma resistência à compressão característica do concreto (fck) de 60 MPa e massa específica (ME) de 2400 kg/m<sup>3</sup>, alcançando o mesmo FE.

### **3.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO LEVE**

#### **3.6.1 Resistência à compressão e à tração**

A resistência à compressão é um dos principais atributos para classificação entre o CL, CLE e CLAD, conjugado com a massa específica. Dentre os fatores que influenciam a resistência à compressão, pode-se citar:

Fator água/cimento: a relação de água nos CL é maior do que no concreto normal e que nos concretos densos. Pode-se inferir que o fator a/c nos CL é na ordem de 6% a 10% superior ao CN, dependendo do próprio AAE e do traço estabelecido. Uma particularidade do concreto leve com AAE, é que esses concretos absorvem uma maior quantidade de água devido ao seu agregado que podem absorver de 5% a 20% (NEVILLE; BROOKS, 2013), o que implica fatores bem superiores a 0,65 a/c, conforme é aplicado para concretos normais como prescreve a NBR 6118 (ABNT, 2014).

a) Matriz escolhida: trata-se da relação entre aglomerantes e agregados. Quanto mais próxima for a relação 1:1, maior será a resistência. Como decorrência dessa propriedade é preciso estabelecer dentro dessa matriz um traço compatibilizando os agregados, de maneira que a areia e o agregado de argila expandida tenham uma maior eficiência (PETRUCCI, 1973; BAUER, 1994).

b) Granulometria do AAE: conforme Angelin (2014), a resistência à compressão pode ainda ser alterada em função do diâmetro dos agregados. Quanto maiores forem esses, menores serão as resistências. Ao se analisar os AAE, observou-se que à medida que a temperatura de queima é elevada, aumenta-se o volume do agregado e acima de 1100°C a

massa específica tende a diminuir mais intensamente em consequência da maior expansão (CARÚS et. al. 2014).

Observa-se que existe um limite máximo para se aumentar a resistência do concreto, alterando-se a quantidade de cimento e que esta quantidade oscila entre 400 kg/m<sup>3</sup> a 600 kg/m<sup>3</sup> para os concretos de alto desempenho (CLAD). Após esses teores, o ganho de resistência não é significativo (AITICIN 2013, apud ANGELIN, 2014).

Na década de 90, o Brasil atingiu a resistência de compressão de 73 MPa com argila expandia de massa específica de 1720 kg/m<sup>3</sup> e com um consumo de cimento de 1200 kg/m<sup>3</sup>. O agregado foi utilizado com dimensão máxima característica de 6,3 mm (GOMES NETO, 1998 apud ROSSIGNOLO, 2009).

Em seu trabalho Assunção (2016), apresenta a resistência de 52 MPa, submetido a altas temperaturas. Rossignolo (2009) afirma que a maior resistência já alcançada foi de 102 MPa, em resultados de Zhang e Gjörv (1991) para concretos leves com massa específica de 1735 kg/m<sup>3</sup> e um consumo de cimento de 550 kg/m<sup>3</sup>.

Quanto à resistência à tração por compressão diametral, a NBR 6118 (ABNT, 2014), norma de concretos normais, sugere um valor de 10% a 15% da resistência à compressão. Contudo, valores de até 19% foram encontrados por Carlos et. al. (2018). Para concretos leves, Rossignolo (2009) afirma que a resistência será consideravelmente menor, não só pelos agregados terem vazios, mas pelo fato que a quantidade em volume desses poder chegar até 50%. Estudos mostram que a tração por compressão diametral varia entre 6% a 9% da resistência à compressão, ao passo que a resistência à tração na flexão varia entre 8% a 11% da resistência à compressão (NEVILLE, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A resistência à tração é importante para verificação da qualidade da pasta de cimento, tendo sua aplicação em tirantes ou corpos cilíndricos, como em reservatórios d'água ou piscinas (NEVILLE; BROOKS, 2013).

### **3.6.2 Massa específica**

Essa propriedade pode ser estudada diretamente com a resistência do concreto sendo um dos fatores para classificação desse material, já que indica a leveza do material. Existe uma relação inversamente proporcional entre a massa específica e o fator de eficiência. A

Figura 12 apresenta essa relação baseado nos estudos de Rossignolo (2009), (SACHT; SANTOS, 2007).

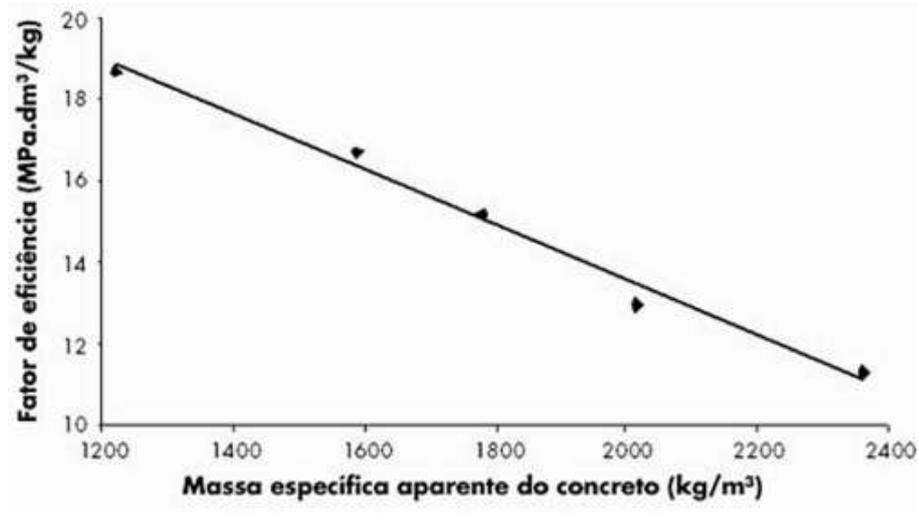


Figura 12 - Massa específica em função do fator de eficiência. Fonte: Rossignolo, (2009).

### 3.6.3 Isolamento térmico

O CL possui uma menor condutividade térmica ao se comparar com o concreto normal (CN) e o concreto denso (CD). Outra característica é o seu menor coeficiente de expansão térmica. Isso se dá pelo fato do ar aprisionado nas argilas expansivas reduzir a transferência e a absorção de calor (ANGELIN, 2014).

O atributo da argila e por sua vez do concreto em ser um bom isolante térmico, tem levado a sua aplicação em concreto para lajes e em paredes de fachada com alto índice de insolação. Ao se analisar os concretos leves, estabeleceram-se alguns parâmetros quanto às suas propriedades térmicas, de acordo com a Tabela 09 (BREMNER; HOLM, 2000; ANGELIN, 2014).

Tabela 09 - Propriedade térmica dos concretos leves

<b>Propriedades</b>	<b>Concreto normal</b>	<b>Concreto leve</b>
	<b>CN</b>	<b>CL</b>
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2400	1850
Resistência a compressão (MPa)	20-70	20-50
Calor específico (cal/g°C)	0,22	0,23
Condutividade térmica (W/m.K)	1,4-2,9	0,58-0,86
Difusão térmica (m <sup>2</sup> /h)	0,0025-0,0079	0,0015
Expansão térmica 10-6/°C	11	9

Fonte: BREMNER E HOLM, (2000).

O fabricante Cinexpan (Brasil) e o fabricante Argex (Portugal) apresentam a mesma condutividade térmica para argilas expandidas, independente do diâmetro do agregado, conforme apresentado na Tabela 10, baseado em seus respectivos catálogos (CINEXPAN; ARGEX, 2018).

Tabela 10 - Condutividade térmica do AAE da Cinexpan e Argex

<b>Fabricante</b>	<b>País</b>	<b>Tipo da</b>	<b>Condutividade</b>
<b>Argila expandida</b>	<b>Cidade</b>	<b>AAE</b>	<b>Térmica (W/m°C)</b>
Cinexpan	Brasil/Várzea Paulista	1506	0,11
Argex	Portugal/Aveiro	Argex 3-8	0,11

Fonte: o autor, (2018).

Uma relação de concretos leves com propriedades térmicas, relacionando o material, massa específica e resistência, é apresentada neste trabalho, baseado nos estudos de Neville e Brooks (2013) (Tabela 11).

Tabela 11 – Propriedade de condutividade em função do forno.

<b>Produção</b>	<b>ME (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>fcm(MPa)</b>	<b>Condutividade Térmica</b>
			<b>(J/m<sup>2</sup> sec °C/m)</b>
AAE- forno rotativo	1100-1200	14-17	038-0,40
AAE- forno rotativo e areia	1350-1500	17	0,57
AAE- de esteira	1500-1600	24-31	0,55-0,61

Fonte: Baseado em Neville e Brooks, (2013).

### 3.6.4 Fator de Eficiência do concreto leve

Fator de eficiência (FE) é a razão entre resistência à compressão e a massa específica (ME) e pode ser escrito conforme a equação 01.

$$\mathbf{FE = f_{cm}/ME \text{ (MPa.dm}^3\text{/kg)}}$$

*Eq. 01*

É considerado concreto leve de alto desempenho (CLAD), quando este fator de eficiência supera 25 MPa.dm<sup>3</sup>/kg. Para se enquadrar nas mesmas condições, como exemplo, é necessário um concreto em que sua resistência seja de 40 MPa e massa específica de 1600 kg/m<sup>3</sup>, o que levaria aos mesmos FE (SPITZNER, 1994 et. al. Apud ROSSIGNOLO, 2009).

Embora sua avaliação deva ser aplicada em CLAD, é possível aplicar em CL e CLE, com o objetivo de verificar o seu desempenho ainda que os valores sejam inferiores a 25 MPa.dm<sup>3</sup>/kg. Deste modo, é possível identificar por esse fator e suas interações, como aumentar o desempenho do concreto (ASSUNÇÃO, 2016). A Tabela 12 apresenta uma tendência de classificação dos 03 concretos utilizando-se o FE, baseado nos resultados de traços aplicados em obras.

Tabela 12 - Classificação quanto ao FE

<b>Concreto</b>	<b>Fator de Eficiência FE (MPa.dm<sup>3</sup>/kg)</b>
CL	FE < 10
CLE	10 ≤ FE < 25
CLAD	FE ≥ 25

Fonte: o autor, (2018).

### 3.6.5 Resistência Ótima do concreto leve

O conceito de resistência ótima (fg) é a relação entre a resistência do concreto leve e da argamassa, e esta relação é levada em duas fases distintas. A primeira fase tem uma relação diretamente proporcional, em que à medida que se aumenta a resistência da argamassa, aumenta-se a resistência do concreto. Na segunda fase, a rampa de crescimento ou inclinação tende a diminuir; isso se dá porque o módulo de deformação do agregado é menor que o da

argamassa, isso implica que a resistência do concreto é controlada pela resistência do agregado (PEREIRA; ROSSIGNOLO, 2005).

A resistência ótima ( $f_g$ ) contribui para se aperfeiçoar a resistência e a dosagem dos concretos. Ela é útil para mostrar que a partir de determinada dosagem, não será econômico aumentar a resistência da argamassa. As Figuras 13 e 14 mostram a relação entre as resistências de argamassa e do concreto, para o comportamento da resistência ótima. (ROSSIGNOLO, 2009);

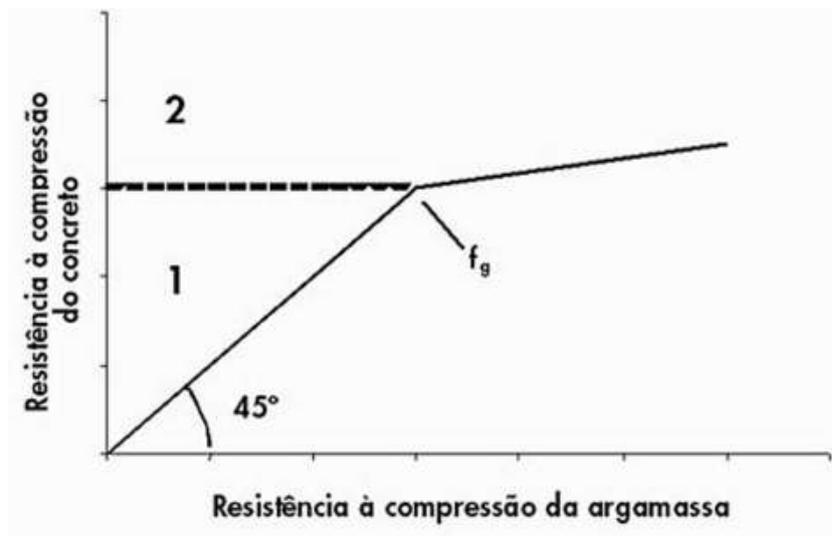


Figura 13 – Resistência Ótima. Fonte: Rossignolo, (2009).

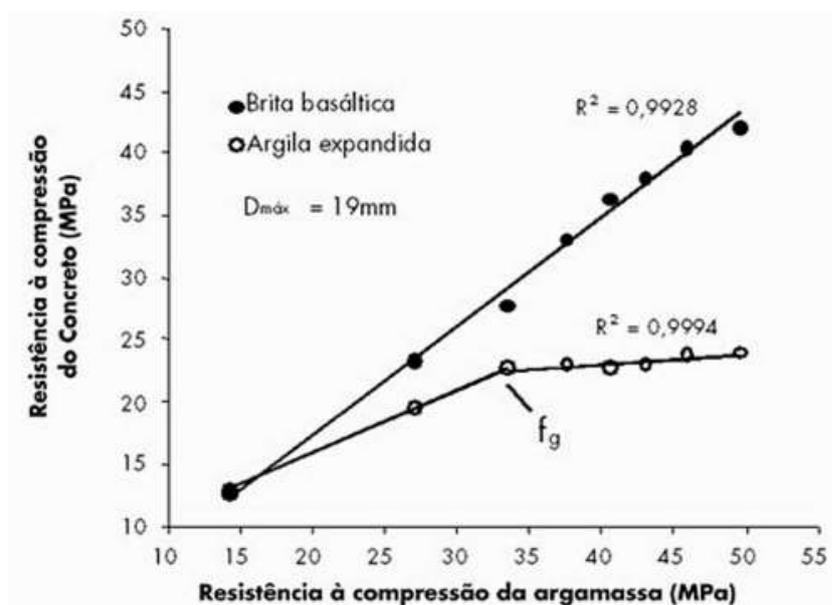


Figura 14 - Desempenho da  $f_g$  em função do AAE. Fonte: Rossignolo, (2009).

### 3.6.6 Módulo de Deformação ( $E_{ci}$ )

Para se calcular o módulo de deformação ou módulo de elasticidade é preciso se conhecer a ação da tensão aplicada e sua reação através da deformação. O concreto se comporta aproximadamente elástico num primeiro momento, mas em cargas constantes e mesmo estáveis, o concreto apresenta fluência, ou seja, deformação em função do tempo (NEVILLE; BROOKS, 2013; ARDAKANI; YAZDANI, 2014).

O concreto não possui um comportamento linear e seu módulo depende da quantidade de argamassa e de agregado graúdo. Segundo Schwantes (2012), o concreto estrutural normal possui um maior módulo de elasticidade do que o concreto leve estrutural. Isso ocorre porque o módulo de elasticidade do agregado utilizado no concreto normal é maior do que o do agregado leve, portanto é apenas uma consequência da escolha dos agregados.

Bremner e Holm (2000) apontam que o módulo de deformação pode ser estimado para concretos leves entre 10 GPa a 18 GPa. É possível se estimar o Módulo de deformação sobre compressão inicial ( $E_{ci}$ ) em função da massa específica do agregado ( $\gamma$ ) (FIP, 1983 apud ARDAKANI; YAZDANI, 2014). A equação 02 exemplifica a fórmula sugerida pelos autores aplicados em especial nos agregados:

$$E_c = 0,008\gamma^2 \text{ (MPa)}$$

*Eq. 02*

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), a verificação do módulo de elasticidade do concreto é dada pela equação 03, e pode ser estimada quando não se realizar os ensaios de compressão diametral. Dado o módulo de elasticidade inicial ( $E_{ci}$ ) em função da resistência à compressão característica do concreto ( $f_{ck}$ ):

$$E_{ci} = 5600 f_{ck}^{0,5} \text{ (MPa)}$$

*Eq. 03*

A Tabela 13 apresenta algumas equações para estimar o módulo de deformação em serviço ( $E_{cs}$ ), proposta por algumas normas ou autor.

Tabela 13- Equação para o cálculo do módulo de deformação.  
 Ecs: Módulo de deformação secante; fck: resistência característica do concreto; Eci: Módulo de deformação inicial; y: massa específica

<b>Norma ou Autor</b>	<b>Equação Eci</b>	<b>Unidade</b>
NBR 6118/2014*	$E_{ci}=5600 f_{ck}^{0,5}$	MPa
ACI 318/2008	$E_{ci}=0,043y^{1,5} f_{ck}^{0,5}$	MPa
Rossignolo (2005)	$E_{ci}=0,049y^{1,5} f_{ck}^{0,5}$	MPa

\* Ecs=0,85\* Eci

Fonte: Adaptado de Rossignolo, (2009).

### 3.6.7 Custo do AAE e dos Concretos Leves

Ao se analisar o custo ou o preço unitário do AAE e dos concretos leves que possam ser produzidos, alguns fatores precisam ser ponderados, entre eles a disponibilidade do material na região, seu transporte (frete), taxas e impostos sobre o material (IPI, ICMS, e outros) e período de produção. Soma-se a isso o custo da mão de obra e os encargos sociais, além do BDI – Benefícios e despesas indiretas (BOTELHO, 1983; AZEREDO, 1995). O estudo do custo de um material e sua aplicação direta e indireta faz parte do estudo de Planejamento e Controle de Obras. Para melhor parametrizar o orçamento na construção civil, decretos e normas orientam o profissional orçamentista e suas estimativas, como a NBR 12721 (ABNT, 2006).

Segundo o Depto. Técnico da Cinexpan (CINEXPAN, 2018), ao se comparar os custos da AAE com a brita da região, encontra-se um custo mais elevado do primeiro, e essa variação pode atingir os mais diversos percentuais. O custo do material pode sofrer exceções, como exemplo, na região amazônica há poucas jazidas de brita elevando o custo da mesma (BAUER, 1994). Isso implica uma menor diferença de custo entre agregados, apesar das distâncias, quando comparados com outros estados relativamente mais próximos da empresa (Cinexpan). Por outro lado, em regiões como o Rio Grande do Sul há muitas jazidas de brita, diminuindo o custo do CN e aumentando a diferença percentual entre os agregados (e concretos leves).

No estado de São Paulo ou num raio de 200 km da indústria Cinexpan, a diferença entre o AAE e a brita (calcárias, gnaisse) é muito menor e o mesmo ocorre entre o concreto normal e o concreto leve. Neste caso específico, o fator transporte não tem uma contribuição tão significativa no orçamento.

Quando se compara o concreto leve com o concreto normal, o critério para se chegar ao custo se torna mais complexo uma vez que se deve considerar a Dosagem Racional (ALVES, 1982). Diversos fatores levam a uma dosagem racionalizada: o traço, a quantidade mínima de cimento, o fator de água/cimento, a resistência do concreto, além da massa específica entre o AAE e a brita comum; mas, diferente nos seus quantitativos, deve-se estabelecer o volume unitário por m<sup>3</sup> para uma comparação (SILVA, 1975).

Para composição do m<sup>3</sup> do AAE, o fabricante Cinexpan (2018) orienta que pode haver uma variação de 10% na massa específica do AAE. Isso implica na incerteza do volume que deve ser levado em conta no ato da aquisição do AAE, além da perda na formulação/traço e do tipo de controle tecnológico (TCPO-10,1996).

É preciso pontuar que os AAE e a brita, assim como o CN e o CL, são produtos com propriedades diferentes tanto entre os agregados e entre os concretos, justificando em muitas situações a adoção de um ou outro sistema. Deve-se chamar atenção não somente para o custo unitário pela unidade do m<sup>3</sup>, mas também para o custo global da obra, o que pode levar, por exemplo, o CL ou AAE com um custo num primeiro momento superior, mas a depender da tipologia da obra a um custo menor quando se faz uma análise global. Outro fator é que são materiais diferentes, tanto entre os agregados e entre os concretos, justificando em muitas situações a adoção de um ou outro sistema (PINHEIRO; CRIVELARO, 2014).

Ao compor o custo de cada insumo do AAE se utilizou os mesmos valores aplicados pela empresa Cinexpan, ao passo que o custo do insumo para produção com concreto leve e do concreto convencional (normal) foi composto com o custo do SINAPI – de janeiro de 2019.

### **3.7 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Ao se observar o agregado de argila expandida do fabricante Cinexpan, o único fabricante no país, nota-se que sua massa específica varia em função do seu diâmetro, ou seja, quanto maior o diâmetro menor a sua massa específica, podendo oscilar de 0,56 a 1,4 kg/dm<sup>3</sup>.

No estudo em questão o AAE 1506 possui uma massa específica de  $1,11 \text{ kg/dm}^3$ . Uma propriedade que os AAE possuem e que difere dos agregados basálticos e de gnaíse é sua capacidade de absorção de água. Neville e Brooks (2013) salientam que a absorção dos agregados são inferiores a 2% em massa, ao passo que o AAE, segundo catálogo do fabricante é de 7% em 24 horas para o tipo 1506 (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Essas observações são relevantes quanto à dosagem de um concreto.

Os AAE podem ser classificados em naturais e artificiais. Os primeiros são quando esta argila possui naturalmente propriedades expansíveis. Nos artificiais há inserção de aditivos como expansores, materiais que proporcionam leveza ou o aumento de volume, como as escórias de alumínio (TAKAHASHI, 2006). Segundo Petrucci (1973) é possível se aumentar a porosidade por adição de materiais carbonosos, como serragem, madeira dura e carvão moído. O fabricante faz uso de aditivos não revelados com o objetivo de potencializar o volume de agregado e leveza.

O processo produtivo influencia não somente na expansão, mas também na pelotização e sinterização, mantendo os poros internos, com o rápido aumento até a temperatura máxima (de  $1100$  a  $1300^\circ\text{C}$ ) e na sequência um rápido resfriamento.

A definição de concretos leves é ampla a depender de alguns autores ou da norma a ser considerada. Como exemplo, Mehta e Monteiro (1994) consideram CL como concreto que tenha massa específica  $1800 \text{ kg/m}^3$ . No presente trabalho, levou-se em consideração a NBR 12655 (ABNT, 2015) que avalia concreto leve em sentido lato, ou seja, o concreto com massa específica menor ou igual a  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Esse mesmo valor é utilizado por Rossignolo (2003).

Para se distinguir o concreto entre leve, normal ou denso é preciso verificar primeiramente a sua massa específica. Quando o concreto tem uma massa específica menor que  $2000 \text{ kg/m}^3$  é dito um concreto leve. Esse pode ser CL, CLE e CLAD; para essa subdivisão, o critério é a sua resistência, ou seja, quando um concreto tem  $f_{cm}$  maior que  $17 \text{ MPa}$  é considerado CLE, quando menor é um CL. O terceiro critério é o fator de eficiência aplicado em especial aos CLAD, sendo considerado CLAD quando esse tem FE maior ou igual a  $25 \text{ MPa}\cdot\text{dm}^3/\text{kg}$  e uma resistência maior que  $30 \text{ MPa}$ .

Após a classificação do CL (sentido lato), produzido com AAE, verificou-se que o fator de eficiência (FE) ajuda na avaliação e tomada de decisão em se utilizar esse concreto quando comparado com o concreto normal. Outro fator é a resistência ótima, a qual mostra o potencial de aumento de resistência do concreto em função do aumento de resistência da argamassa (ROSSIGNOLO, 2009).

Quanto ao custo do AAE em comparação com a brita, existem tantos fatores, como região, impostos, transporte, custo unitário e o custo global, que é preciso em cada caso fazer um estudo específico. Um parâmetro pode ser inferido, entretanto, é que na região próxima da indústria produtora do AAE as diferenças entre custo serão menores tanto do agregado como do concreto, devido a menor influência do custo de transporte. Isso implica em afirmar que outras empresas produtoras de AAE espalhadas pelas mais diversas regiões do país poderão levar a um menor custo desse agregado e do concreto leve, fomentando o uso dos mesmos.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS.**

### **4.1 ESTRUTURA DA PESQUISA E RELAÇÃO COM A CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS UTILIZADOS**

A pesquisa está dividida em cinco fases, a saber:

#### **FASE 01: Caracterização da Argila Expansível.**

Essa fase compreende a caracterização da argila. A capacidade expansível foi analisada queimando-se a argila a temperaturas de 1100°C, 1220°C, 1250°C e 1300°C. Realizou-se a difração de raios X, fluorescência de raios X e granulometria a laser. Verificou-se o as propriedades térmicas por análise térmica gravimétrica (ATG). Como a as propriedades da argila de Arroio Grande-RS já tinham sido estudadas previamente (CARÚS, 2014), basicamente, foram feitas repetições das análises.

#### **FASE 02: Produção e Caracterização do AAE-RS.**

Essa fase compreende a caracterização dos AAE preparados em laboratório. Os concretos leves foram produzidos com agregados queimados em três temperaturas. A primeira a 1250°C, depois 1300°C e por último a 1100°C. A granulometria variou de 12,5mm a 2,4mm. Não se utilizou nenhum aditivo nas argilas para produção dos AAE. Verificou-se também a expansão volumétrica dos agregados (a partir das esferas de argilas cruas), a massa específica e a contribuição granulométrica em percentual na preparação da batelada, visto que o agregado tinha várias dimensões.

As propriedades como módulo de finura, dimensão máxima característica foram resultados da análise da distribuição granulométrica realizada por peneiras normatizadas ABNT. Verificou-se as propriedades térmicas do AAE, sua absorção de água em função das temperaturas (três), a resistência à compressão do agregado e o fator de eficiência do agregado. Este último não é referenciado na bibliografia presente: seu conceito encontra-se restrito ao concreto e argamassa.

### **FASE 03: Caracterização do AAE-1506.**

A caracterização da granulometria do AAE-1506, que segundo o fabricante é queimado a 1250°C, serviu de base à escolha da granulometria do AAE-RS queimado nas três temperaturas citadas anteriormente. As demais propriedades foram somente comparadas com o AAE-RS queimado a 1250°C. Embora alguns dados possam ser encontrados no catálogo do fabricante, para efeito comparativo, os mesmos ensaios foram realizados com os dois tipos de agregados em laboratório. Para comparações e aferições nessa fase, caracterizou-se a massa específica do agregado, absorção de água, granulometria, dimensão máxima característica do agregado e seu módulo de finura.

### **FASE 04: Caracterização do Agregado Miúdo e Aglomerante.**

O agregado miúdo (areia) e o aglomerante (cimento) muito embora sejam materiais usados na produção dos dois concretos, com AAE-RS e AAE-1506, portanto, causando os mesmos efeitos em ambos os concretos, foram caracterizados, pois esses dados servirão para verificar as possibilidades para se melhorar o desempenho. Como exemplo, a utilização de areia grossa em geral tem uma maior eficiência na resistência à compressão do concreto do que as areias finas (BOTELHO, 1998). Quanto ao cimento, as características são transcritas principalmente pelas informações prestadas pelo fabricante.

### **FASE 05: Produção e Caracterização do Concreto.**

A matriz de cimento/agregados foi de 1:4. Três traços foram pré-testados, indicando o traço 1:2,4:1,6 (cimento, areia, agregado de argila expandida, água) como o de melhor desempenho em relação à resistência à compressão. O fator água/cimento foi constante em 0,8 para os concretos que utilizaram os AAES queimados em 1250°C e 1300°C, variando esse fator apenas nos AAES queimados a 1100°C.

Quanto à denominação dos concretos produzidos, ordenou-se concreto leve (CL) ou concreto leve estrutural (CLE), recebendo a identificação do agregado (RS) ou do fabricante.

O concreto com AAE-RS foi definido como CL-RS ou CLE-RS, enquanto o material da empresa Cinexpan teve a definição de CL-1506 ou CLE-1506.

Os ensaios realizados com o concreto foram: resistência à compressão, absorção de água, massa específica, módulo de deformação, fator de eficiência e resistência ótima. Para verificação da resistência ótima houve a necessidade da produção da argamassa variando apenas o fator água/cimento, sendo seu traço de (1:2,4), ou seja, na prática foi avaliada a relação entre a resistência do concreto com a da argamassa, variando-se o fator a/c de ambos.

Visto que houve limitação na produção de AAE-RS, optou-se por utilizar um molde cilíndrico de  $\varnothing 5$  cm x 10 cm. A análise e comparação foram realizadas entre os concretos produzidos com o AAE-RS queimados nas três referidas temperaturas. A comparação dos concretos com o agregado do fabricante foi realizada somente com o concreto leve produzido com AAE-RS a 1250°C, já que o AAE-1506 foi produzido industrialmente a 1250°C. A Figura 15 apresenta o desenvolvimento da pesquisa e suas fases.

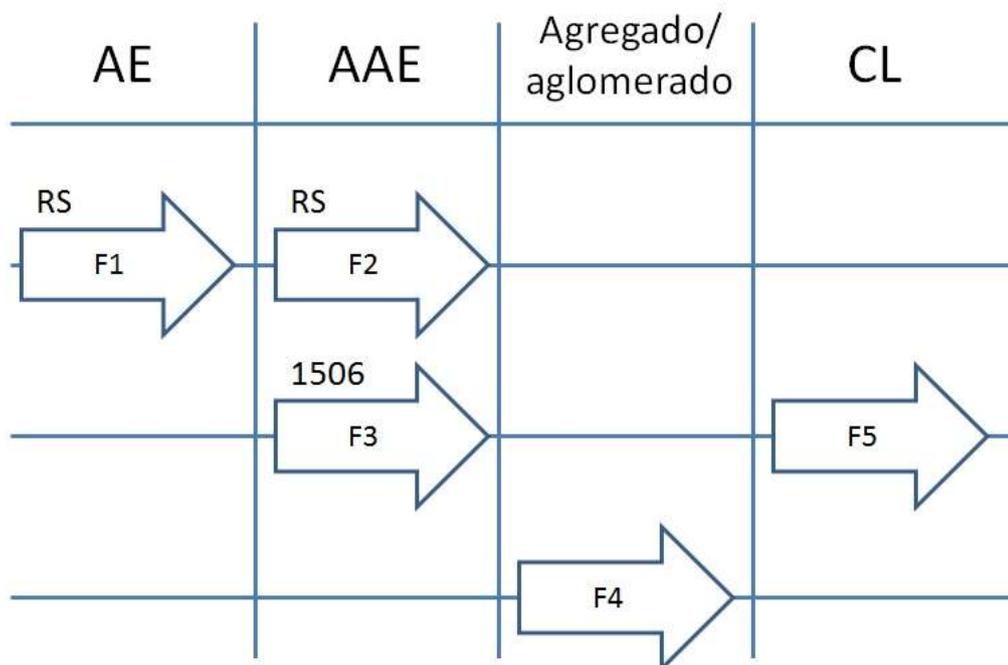


Figura 15- Fluxograma das fases de Pesquisa. Fonte: autor (2019).

## 4.2 MÉTODO DE CARACTERIZAÇÃO.

Apresenta-se a Tabela 14 com os ensaios, análises e propriedades avaliadas, sejam de ensaios realizados neste trabalho ou dados provenientes de laudos.

Tabela 14- Resumo de análises apresentadas

Ensaios-Análises Propriedades	AE-RS	AE-1506	AAE-RS	AAE-1506	Cimento	Areia	Argamassa	Concreto Leve
FRX								
DRX								
Granulometria a laser								
ATG								
Expansibilidade								
Absorção de água (AA)								
Granulometria por peneira								
Módulo de finura (MF)								
Massa específica (ME)								
Resist. à compressão (fcm)								
Dimensão máxima (DMC)								
Fator de eficiência (FE)								
Resistência ótima (fg)								
Módulo de Deformação (Eci)								

### 4.2.1 Argila expansiva (AE-RS).

A amostra da argila expansiva (AE) é originária de Arroio Grande – RS, recebendo a denominação AE-RS. Ela foi secada em estufa a 110°C, desagregada em almofariz de porcelana, passando posteriormente em peneira da ABNT malha 325 (abertura 45µm).

O mesmo lote de argila utilizada nesta dissertação foi utilizado em um trabalho anterior por Carús et. al. (2014). Assim são apresentadas aqui as mesmas análises de caracterização deste trabalho prévio: DRX, FRX, análise granulométrica a laser e análise térmica (ATG).

Não se obteve a argila natural do fabricante Cinexpan para comparações de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Face a isso, apresenta-se os dados baseados em laudo técnico fornecidos pela empresa. A produção da AE-RS deu-se de forma manual. O seu processo de produção seguiu as seguintes fases:

1° Compactação com uma marreta de 0,5 kg, conforme Figura 16, propiciando homogeneização, desintegração e mistura (e plasticidade) e simulando a fase industrial conhecida como homogeneização-amassador e de moldagem por parafuso sem-fim (PETRUCCI, 1973; PEREIRA, 2018).

2° Moldagem à mão e repouso por 24 horas para secagem natural. Os AAEs foram produzidos de acordo com o diâmetro que se necessitava na mesma quantidade em massa do fabricante, para cada batelada produzida. Para evitar fissuras nos AAEs, esses são cobertos por um pano úmido. A Figura 17 exemplifica a produção da moldagem do AAE simulando as fases de laminação e extrusão/pelotização.

3° Aquecimento dos agregados em mufla na temperatura de 50°C por um período de 24 horas. Após esse processo os AAE são mantidos em repouso por um período de 12 a 24 horas.

4° Queima no forno com rampa de aquecimento de 5°C/min até as temperaturas de 1100°C, 1250°C e 1300°C, permanecendo na temperatura máxima em patamar de 20 minutos. O ciclo total de queima foi aproximadamente de 04 horas a 04h40min minutos a depender da temperatura escolhida. A Figura 18 demonstra a queima dessas argilas que são posicionadas individualmente no forno.

Após atingir a temperatura máxima, o AAE é resfriado lentamente, diferente do processo da Cinexpan na qual há um resfriamento abrupto chegando a 200°C ou 300°C em poucos minutos, evidenciando essa diferença no processo produtivo. Tal diferença entre resfriar rapidamente ou lentamente é apenas um dos fatores que podem interferir no produto final. A temperatura incandescente das AAE e a abertura do forno para sua retirada diminuiria a vida útil desse forno e levaria a uma exposição com risco aos pesquisadores em sua manipulação. A retirada da argila ocorre apenas quando o forno está a uma temperatura inferior a 100°C, o que durava um período médio de 14h00min para o resfriamento do forno.

O ciclo de produção do primeiro até o quarto passo dura 72 horas, conforme demonstra a Tabela 15, permitindo-se a produção de até duas bateladas por semana com volume médio de 05 a 80 ml de AAE, a depender do seu diâmetro.

Tabela 15 - Cronograma de produção das AE-RS.

Fase	24 horas	48 horas	72 horas
1-2	■		
3		■	
4			■



Figura 16 - Compactando a argila. Fonte: o autor, (2018).



Figura 17 - Moldando as argilas manualmente. Fonte: o autor, (2018).



Figura 18 - Queimando a argila expandida a 1100°C. Fonte: o autor, (2018).

Os fornos utilizados foram dois, sendo que para as temperaturas de 1250°C e 1300°C forno modelo TB-9665 Jung e para a temperatura de 1100°C o forno modelo CL- Sanchis.

a) Composição mineral (DRX).

A avaliação das fases presentes na argila AE-RS foi realizada a partir da análise com difratômetro de raios X marca Phillips modelo X'Pert MDB, com auxílio do software X'Pert High Score. O Material de AE foi aquecido por 24 horas em estufa a 110°C, depois de retirada foi mantida em repouso por 2 horas e passando por um processo de desagregação em almofariz de porcelana, na sequência passada em peneira ABNT malha 325. A varredura é de 5 a 75 graus (2 $\theta$ ) equipado com monocromador  $\text{K}\alpha$  (1,54184 Å); Ânodo fixo de cobre entre 40 kVA e 40mA. Para identificação das fases presentes foi utilizado às informações do ICDD-JCPDS. Os resultados encontrados no DRX apontam uma composição de montmorilonita, quartzo e caulinita em destaque (Figura 19).

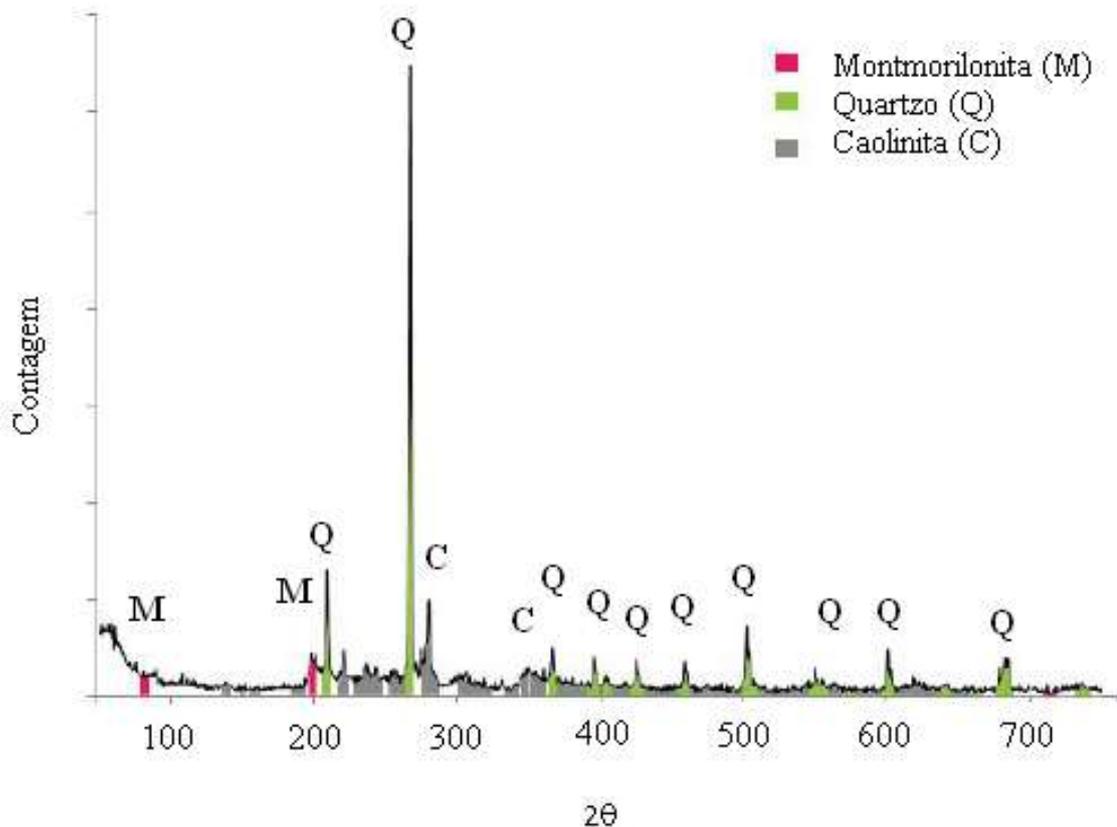


Figura 19 - Composição mineral por DRX da argila AE-RS.

#### b) Composição Química por Fluorescência (FRX)

Para composição química da AE-RS, utilizou-se o espectrômetro da marca Shimatzu modelo XRF-1800 com potência de 4 kw e radiação de RH, operando em 40 kv e 80 mA.

Esta técnica consiste em criar pastilhas a partir de 3 gramas de amostra compactada a 20 MPa, e com ligante – ácido bórico – a uma quantidade de 3 gramas. Apresenta-se a análise química por fluorescência de raios X (FRX) da argila RS realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos (UFRGS) e a fornecida pelo fabricante (Cinexpan), conforme as Tabelas 16 e 17, respectivamente. As argilas apresentam composições diferentes, quanto ao teor de

diversos óxidos e perda ao fogo, embora ambas possam ser classificadas como argila vermelha.

Tabela 16 - Análise Química de Fluorescência (FRX). Argila AE-RS.

<b>Composição Química</b>	<b>AE-RS (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	64,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,05
K <sub>2</sub> O	2,48
TiO <sub>2</sub>	1,24
CaO	1,23
SO <sub>3</sub>	1,19
Na <sub>2</sub> O	0,21
PF	11,68
Total	100

Fonte: o autor, (2018).

Tabela 17 - Análise Química de Fluorescência (FRX). Argila da Cinexpan.

<b>Composição Química</b>	<b>Cinexpan -1506 (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	52,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,10
K <sub>2</sub> O	5,50
TiO <sub>2</sub>	0,88
CaO	0,09
SO <sub>3</sub>	0,00
Na <sub>2</sub> O	0,22
PF	6,80
Total	100

Fonte: o autor, (2018).

### c) Granulometria a laser

Para análise granulométrica a laser, foi utilizado o equipamento granulômetro a laser marca Cilas, modelo 1180, utilizando como fluido a água. Em que um feixe de  $\lambda = 830,625$  nm mede o tamanho das partículas que passam através dele, em uma faixa entre  $0,04\mu\text{m}$  a

2500 $\mu\text{m}$ , gerando um histograma com a distribuição do tamanho das partículas, a Tabela 18 e a Figura 20 apresentam o diâmetro médio, bem como a distribuição granulométrica.

Tabela 18 - Diâmetro das partículas de argila AE-RS.  
(10%<: representa que 10% da amostra apresenta diâmetro menor que 0,87 $\mu\text{m}$ )

Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	10%<	50%<	90%<	Diâmetro Médio
	0,87	4,48	19,19	7,51

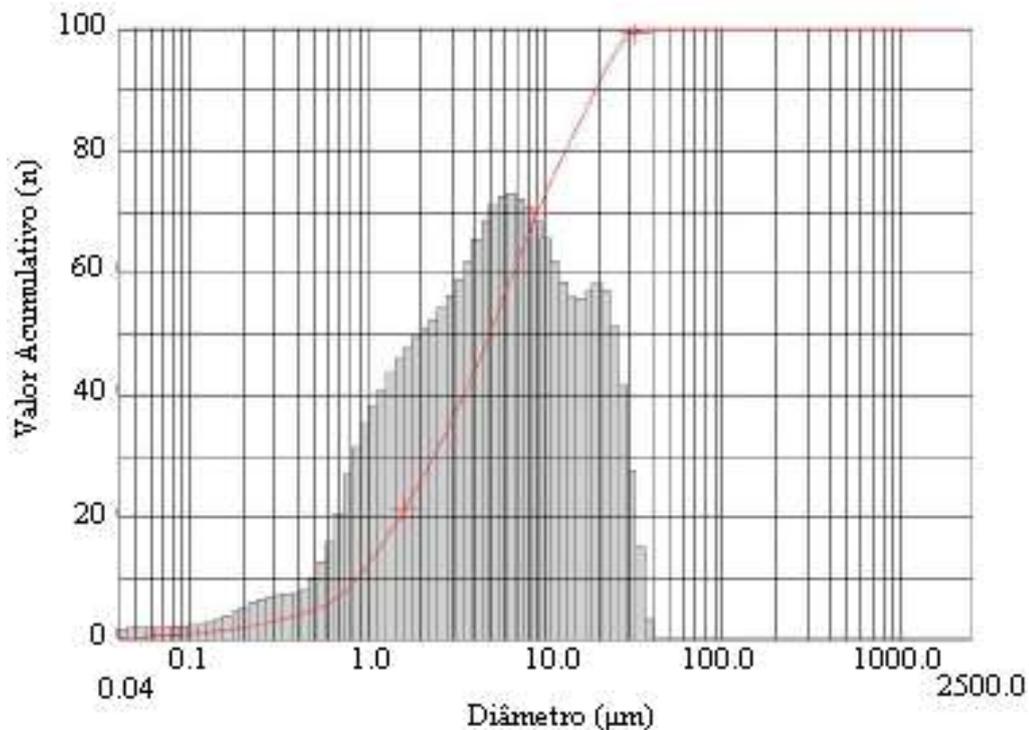


Figura 20 - Histograma da granulometria da Argila AE-RS.

#### d) Análises térmicas

Assim como a DRX e a granulometria, o ensaio de análise termogravimétrica ATG foi realizado apenas na AE-RS.

Na análise termogravimétrica (ATG), o equipamento utilizado foi o Mettler Toledo, modelo TGA/SDTA 851, com taxa de aquecimento de 5°C/min e intervalo entre 100°C a

1350°C. O ensaio consiste em verificar através de balança o monitoramento da perda/ganho de massa durante o aquecimento/resfriamento em condições monitoradas e controladas.

Ao observar a Figura 21 com dados termogravimétricos (ATG) é possível observar na curva TG a perda de massa até ~160°C e nesta temperatura 4,5% da massa da AE-RS é perdida, esse fato ocorre em função da perda de água adsorvida pela argila.

A curva TG, tem um equilíbrio entre 200°C a 400°C, quando então há uma perda abrupta de 400°C a 550°C, devido à perda de água estrutural, projetando-se uma perda mais suave de 550°C a 900°C, e, após, observa-se uma inclinação quase estável até 1300°C.

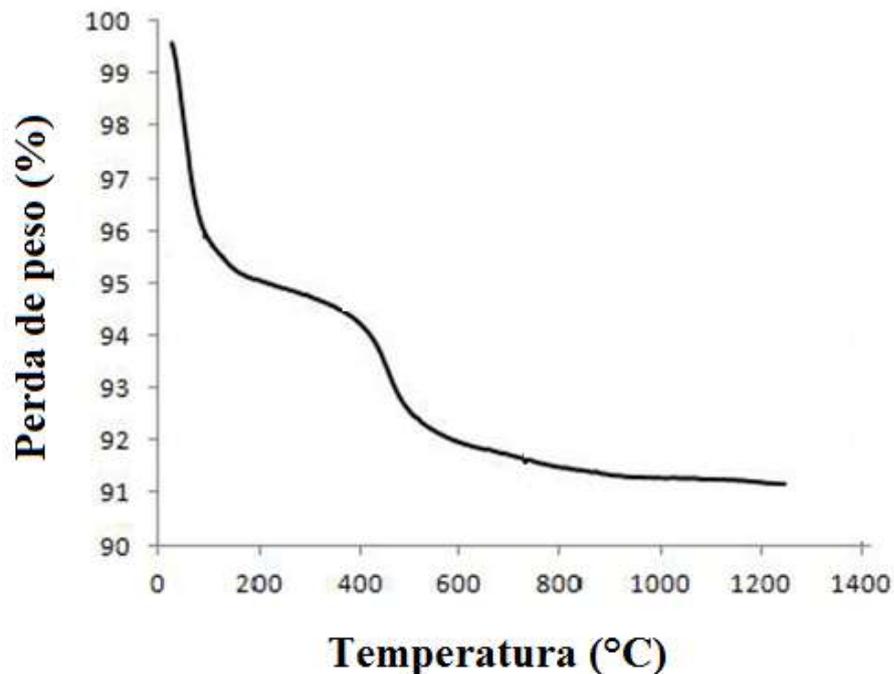


Figura 21 – Análise termogravimétrica. Argila AE-RS.

#### 4.2.2 Agregado de Argila Expandida

Nos AAE-RS realizou-se o teste de absorção de água em função do tempo, sendo caracterizada a massa específica, o módulo de finura, a expansibilidade e a resistência à

compressão da argila. A granulometria foi realizada por peneira, incluindo-se a dimensão máxima do agregado.

O agregado fornecido pelo fabricante Cinexpan, tipo 1506, foi definido como AAE-1506. Realizou-se a análise granulométrica da amostra recebida, a análise de absorção em função do tempo, módulo de finura, massa específica e resistência à compressão. Esses dois últimos também foram comparados com os dados do catálogo técnico, além da dimensão máxima característica do agregado.

a) Granulometria por peneiramento

O ensaio de granulometria seguiu a NBR 7211 (ABNT, 2009) com o jogo de peneiras ABNT. Partindo-se de 4,0 kg de material, promoveu-se o quarteamento da amostra, de maneira que o material selecionado foi aquecido por 4 horas em estufa a 110°C, antes do ensaio, para garantir a secagem do mesmo.

Para determinação da composição granulométrica seguiu-se a NBR NM 248 (ABNT, 2003) As peneiras utilizadas foram de 19,00mm; 12,5mm; 9,50mm; 6,3mm; 4,75mm; 2,36mm e 1,18mm. Com os resultados obtidos foi possível ainda determinar o módulo de finura ao se considerar as peneiras da série normal.

b) Expansibilidade.

Ao aquecer os agregados de argila expandida verificou sua expansão. Esse ensaio foi realizado para os AAE na temperatura de 1100°C, 1250°C e 1300°C. Para verificação da expansão foi utilizado dois métodos, sendo o primeiro com 4 CP's prismáticos (6,00x2,00x0,5) cm, compactados a 20 MPa e umidificado com 7% em massa. No segundo método, utilizou-se também 7% de umidade e obteve-se a média de doze AAE esféricos nos diâmetros de 12,5mm; 9,5mm; 6,3mm e 4,8mm, sendo 3 AAE de cada diâmetro, todos moldadas à mão.

Para diminuir as incertezas e devido à inconstância da forma geométrica, optou-se pelo uso de CP's prismáticos para essa caracterização, servindo o segundo método como uma referência na produção dos agregados a serem utilizados no decorrer do trabalho. Para os CP's queimados a 1100°C, efetuaram-se as medidas de sua dimensão antes e depois, uma vez que o

CP's manteve a sua forma prismática. Já para os AAEs queimados a 1250°C e 1300°C, obteve-se o volume pela imersão em água após repouso por 24 horas.

As Figuras 22 e 23 demonstram os resultados antes e depois da queima. Tratam-se de agregados queimados a 1100, 1300°C, além do CP's antes da queima (argila verde) a título de exemplo.

Conforme se pode observar na Figura 22, o AAE queimado a 1100°C expandiu, mas ainda são perceptíveis as arestas, conservando a sua forma prismática. Já o AAE queimado a 1300°C sofreu expansão de modo não ser possível mensurar sua dimensões com uma régua. O grau de expansão de cada AAE está exposto nos resultados e discussões. A caracterização da expansão para os AAE-RS nas temperaturas de 1200°C e 1220°C complementa os resultados alcançados por Carús et. al. (2014).



Figura 22 - Corpos de Prova antes e depois da queima a 1300°C.

c) Absorção de Água.

A batelada do AAE-1506 recebida do fabricante foi quarteada e a amostra selecionada foi aquecida a uma temperatura de 110° C. Após sua secagem em estufa por um período de 72 horas e repouso em temperatura ambiente por 24 horas, foi imersa em água por 72 horas (Figura 23). Durante esse tempo, determinou-se a absorção baseado na NBR NM 53 (ABNT, 2009), utilizando-se 1kg de amostra. Quanto ao AAE-RS, procedeu-se o teste de absorção para os três agregados produzidos (1100°C, 1250°C e 1300°C), com uma massa de 0,5 kg. Verificou o comportamento da absorção também para tempos diferentes do indicado na norma: períodos de 1, 3 e 5 e 24 horas além de 72 horas.



Figura 23 - Ensaio de Absorção do AAE-RS

d) Massa Específica

Para essa caracterização, utilizou-se o AAE-RS em 4 diâmetros: de 12,5mm, 9,5mm, 6,3mm e 4,8mm. Empregou-se 5 CPs de cada diâmetro, perfazendo um total de 20 CPs do AAE. Após permanecer em 72 horas na mufla a 110°C e em repouso por 24 horas em

temperatura ambiente, pesou-se o conjunto de agregados e, posteriormente, eles foram imersos por 72 horas, retirados e enxugados. Após, foram depositados em uma proveta com um volume conhecido e mediu-se o deslocamento de água, identificando o volume e procederam-se os cálculos. Para o AAE-1506, realizou o mesmo ensaio apesar de o fabricante apresentar em seu catálogo técnico a massa específica. Assim apresenta-se nesse trabalho para o AAE-1506 a massa específica em catálogo bem como em ensaios realizados.

e) Módulo de Finura

Essa propriedade é complementar dos resultados da distribuição granulométrica, conforme as normas NBR 7211 (ABNT, 2009) e NBR NM 248 (ABNT, 2003), utilizando-se as peneiras de série normal. Essa propriedade foi similar para ambos os agregados, uma vez que o AAE-RS seguiu a mesma distribuição granulométrica do AAE-1506.

f) Resistência à Compressão do Agregado.

O fabricante apresentou um laudo técnico, citando a NBR 5739 (ABNT, 2018), em que rompia os AAE dentro de um CP's com um consolo de 65 mm de altura e diâmetro conforme o CP's para distribuir a carga comprimida. Realizou-se este ensaio nos AAE-RS, o qual foi feito com 02 CP's, apresentando-se uma simples média aritmética como resultado.

No teste da empresa Cinexpan, os agregados são dispostos em camadas e comprimidos e podem receber nata de cimento na proporção de 1:1 em massa (cimento: água), apenas para promover uma leve ligação entre os agregados, posteriormente, podem ser rompidos no 3º dia. As Figuras 24 e 25 apresentam o ensaio realizado pelo fabricante em fotografia gentilmente cedida pelo Eng. Carlos Alberto Pereira, em CP's de  $\varnothing 10 \times 20$  cm. Observa-se que neste método, o cimento é apenas para uma leve aderência entre os agregados sem que ele de fato influencie na resistência, uma vez que se busca é a resistência tão somente do agregado e não de um concreto leve (sem o agregado miúdo) (NEVILLE, BROOKS; 2013).

Para a caracterização da resistência do AAE-RS, optou-se pelo rompimento de materiais sem o aglomerante (cimento), em CP's de  $\varnothing 5$  cm x 10 cm. Essa escolha foi devido ao menor consumo de material, já que a produção de AAE nos fornos do laboratório é demorada.



Figura 24- Rompimento do AAE dentro do CP's. Fonte: Eng. Carlos Alberto Pereira, (2018).



Figura 25- Rompimento do AAE com o consolo. Fonte: Carlos Alberto Pereira, (2018).

#### g) Dimensão Máxima Característica (DMC)

Esta é uma propriedade que se extrai da distribuição granulométrica e tem por objetivo identificar o agregado ou a maior dimensão encontrada na amostra, que influenciará, por exemplo, o consumo de água e sua trabalhabilidade.

#### 4.2.3 Agregado Miúdo – Areia

Para produção do concreto utilizou-se a areia como agregado miúdo e analisou-se sua distribuição granulométrica, dimensão máxima característica, além de propriedades como massa específica e módulo de finura.

a) Granulometria por peneiramento

Utilizou-se a areia disponível comercialmente, fornecida pelo LAMTAC, proveniente do aquífero Jacuí, sendo uma areia com características quartzosa, e coloração variegada. Promoveu-se a homogeneização de 10 litros de areia, o quarteamento e o peneiramento de 2 litros.

O ensaio de granulometria adotou como referência a Tabela 02 da NBR 7211 (ABNT, 2009). Com o objetivo de identificar a qualidade desse material no traço do concreto, quanto à distribuição granulométrica, seguiu-se a NBR NM 248 (ABNT, 2003). As peneiras utilizadas foram de 6,30mm; 4,75mm; 2,36mm; 1,18mm; 0,6mm; 0,3mm; 0,15mm, além do fundo (material pulverulento <0,15mm). Com os resultados obtidos foi possível ainda determinar o módulo de finura (MF) ao considerar as peneiras da série normal.

b) Massa Específica

Esse agregado foi caracterizado no LAMTAC, seguindo os preceitos da NBR NM 52 (ABNT, 2009). A massa específica encontrada foi de 2,58 g/cm<sup>3</sup>, sendo realizado em duas ocasiões conforme a norma.

c) Módulo de Finura

Essa propriedade é complementar aos resultados da distribuição granulométrica, conforme as normas NBR 7211(ABNT, 2009) e NBR NM 248 (ABNT, 2003), em que foi extraída a numeração das peneiras de série normal. Passou-se a areia nas peneiras de 4,75 mm a 0,15mm, além do fundo, dando a essa massa retida sua contribuição em porcentagem e posteriormente verificou a massa acumulada e procedeu-se o cálculo.

A Tabela 19 e Figura 26 exemplificam os resultados encontrados na análise granulométrica. Os resultados mostraram que a areia utilizada está fora dos parâmetros da zona ótima e tangenciando a zona utilizável (NBR 7211, 2009). Isso indica que uma maior resistência à compressão dos concretos (CL e CN) poderia ser alcançada ao se utilizar uma areia dentro da zona ótima.

Tabela 19 - Porcentagem retida nas peneiras da série normal para agregado miúdo.

Abertura das Peneiras (mm)	Amostra		Retida acumulada (%) em massa. (NBR 7211/2009).			
	Massa Retida (%)	Massa Acumulada (%)	Limite Inferiores		Limite Superiores	
			Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
4,75	1,82	1,82	0	10	20	25
2,36	6,12	7,94	5	20	30	50
1,18	8,34	16,28	15	35	55	70
0,60	17,08	33,36	50	65	85	95
0,30	40,52	73,88	85	90	95	100
0,15	24,49	98,37	100	100	100	100
fundo	1,63	100,00				
<b>Módulo de Finura (mm)</b>			<b>2,31</b>			
<b>Dimensão Máxima Característica (mm)</b>			<b>4,75</b>			
<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>			<b>2,58</b>			

Fonte: o autor, (2018).

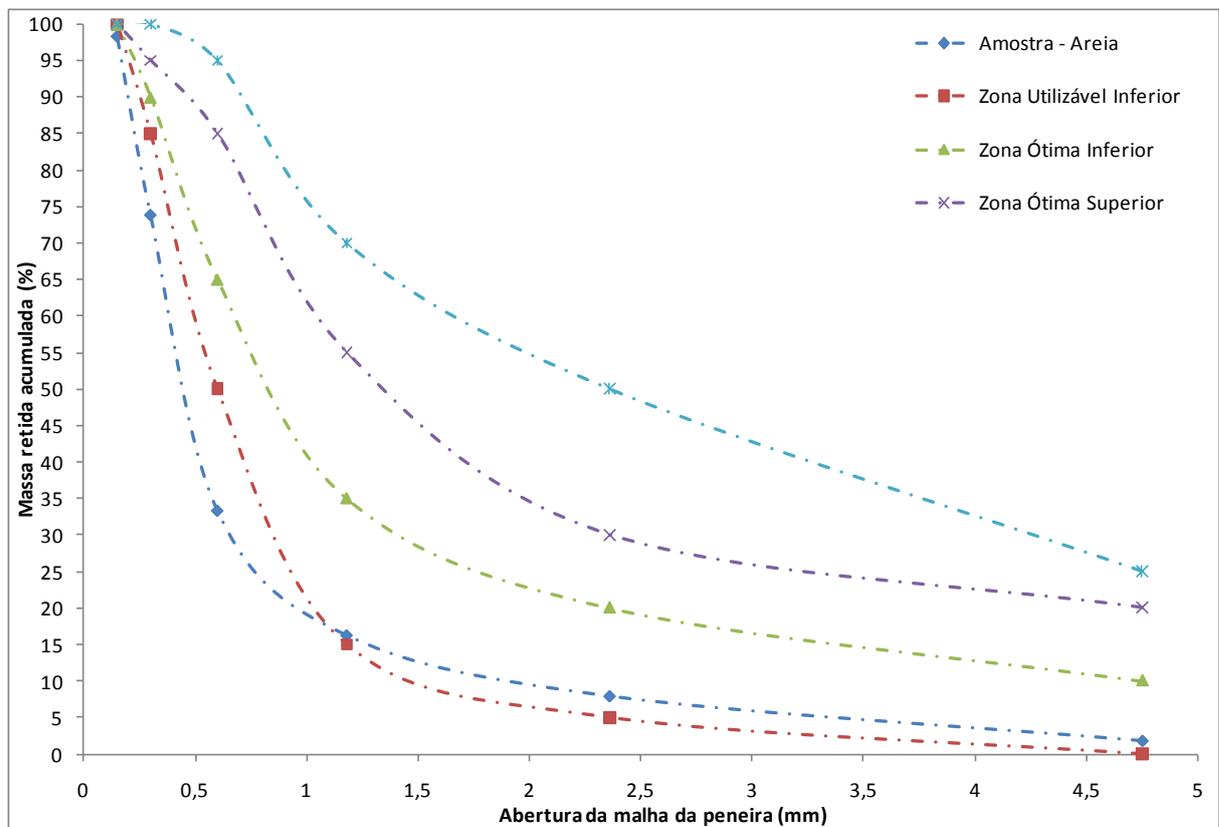


Figura 26 - Distribuição Granulométrica da Areia.

#### 4.2.4 Cimento Portland.

O cimento utilizado foi o CPV- ARI da marca TUPI. A exemplo do trabalho de Maycá et.al.(2009), optou-se por esse cimento com o objetivo de verificar logo nas primeiras idades (3 e 7 dias) os resultados práticos. Apresentam-se através de catálogo técnico Tupi (2018) os seguintes dados: massa específica de 3,10 kg/dm<sup>3</sup>, superfície específica (método Blaine) de 5480 cm<sup>2</sup>/g e resistência à compressão aos 28 dias superior a fck=40MPa.

#### 4.2.5 Água

Conforme a NBR 15900 (ABNT, 2009), no seu item 3.2, águas de abastecimento público são consideradas adequadas para o uso em concreto e não necessita ser ensaiada. Assim, é apresentada na Tabela 20 a caracterização média da água segundo a concessionária. Alves (1982) lembra que um parâmetro que precisa ser observado é o pH da água, pois para utilização em concretos não deve ser inferior a 3 e recomenda-se ainda verificar sua influência nas armadura, quando for inferior a 5.

De acordo com os índices apresentados pela concessionária municipal, não há impedimento do uso desta água para produção de argilas expandidas, argamassa ou mesmo concreto. A água utilizada provém da concessionária de Porto Alegre, do sistema de abastecimento do município e seus parâmetros de consumo encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Valores médios do sistema geral de distribuição d'água

pH	Turbidez	Cor Aparente Máximo 15mg Pt-Co/L	Cloro livre Mínimo 0,2mg CP/L	Cloro Combinado Mínimo 0,2mg CP/L	Coliformes totais A cada 100ml
(6,0-9,5)	Máx. 5,0 UT	<3	0,8	0,91	Ausente

Fonte: DMAE Departamento Municipal de Águas e Esgoto, (2018).

#### 4.2.6 Concreto

Com o objetivo de verificar a aplicação do AAE em CL e CLE, estabeleceu-se a matriz 1:4. Tal matriz foi escolhida baseando-se nos traços utilizados por Jovine (1978) apud Rossignolo (2009), bem como estudo realizado por Maycá et. al. (2009). Variou-se primeiro o

traço do concreto utilizando o AAE-1506, nas proporções de 25%, 40% e 60%, na busca do concreto com maior resistência e com características de leveza. Diante das mesmas condições, realizaram-se os ensaios do concreto leve se utilizando o AAE-RS queimado a 1250°C, a exemplo do CL-1506, com fator  $a/c=0,8$ . Comparou-se o desempenho e as propriedades entre os dois concretos CL-RS e CL-1506.

Posteriormente, na busca do concreto de menor densidade, produziu-se AAE-RS na temperatura de 1300°C, mantendo-se o fator  $a/c$  em 0,8. Os estudos práticos mostraram que o concreto produzido com AAE, demanda uma maior quantidade de água, uma vez que o agregado absorve a água de amassamento, embora o fator seja aparentemente alto quando comparado a NBR 6118 (ABNT, 2014). Essa estabelece fator  $a/c$  até 0,65 para concreto armado (CA), com classe de agressividade I conforme Tabela 6.1 da referida norma. Para os concretos leves (CL) e concretos leves estruturais (CLE), espera-se um maior consumo nessa relação (NEVILLE, BROOKS, 2013; RASHAD, 2018).

Buscou-se ainda com esse fator de  $a/c=0,8$  a pior situação ou dito o limite máximo na produção de concreto leves sem a incorporação de aditivos e a verificação de sua classificação, em CL, CLE ou CLAD. Mediante os resultados, poder-se-ia inferir melhorias no seu desempenho, como ocorreu com o CL-RS produzido com o AAE queimado a 1100°C.

Em uma última análise, realizaram-se ensaios com o CL-RS com AAE-RS queimado a 1100°C. Somente nessa última dosagem de concreto foi avaliado o fator  $a/c$  na busca de uma variação da resistência do concreto em função desse fator. A variação foi de 0,5 a 0,8. Objetivou-se verificar o potencial da produção de CLE-RS e a influência dessa relação no concreto leve.

Os agregados não foram umedecidos previamente. Portanto, deve-se levar em conta que parte da água de amassamento será absorvida pelo agregado servindo como água de hidratação. Essa absorção varia de traço para traço devido a que cada AAE ter o seu potencial de absorção e sua contribuição no sistema. Como é conhecida, a absorção de água em um concreto varia em função da granulometria, formato (rugosidade) e demais fatores que determinam sua área superficial. No caso dos agregados de argilas, a temperatura de queima e

fatores relacionados à queima, como retração de queima, porosidade, entre outros, vão influenciar a absorção de água.

Nos concretos formulados, foram analisadas as propriedades de resistência à compressão, absorção de água, massa específica, fator de eficiência e resistência ótima.

A Tabela 21 apresenta o estudo de 3 traços com teores diferentes de agregados de argila expandida, sendo que o traço com 40% tornou-se o concreto de referência produzido com AAE queimado a 1300°C e 1100°C. A Tabela 22 apresenta a comparação e a dosagem entre o CL-RS e o CL-1506, utilizando o AAE queimados na temperatura de 1250°C.

Tabela 21-Consumo de Materiais p/ m<sup>3</sup> CL-RS com AAE-1250°C, com 3 traços

<b>Traço</b> <b>1:(4)</b>	<b>Concentração</b> <b>de AAE(%)</b>	<b>Cimento</b> <b>kg</b>	<b>Areia</b> <b>kg</b>	<b>AAE-RS</b> <b>kg</b>	<b>água</b> <b>l</b>	<b>fator</b> <b>a/c</b>
1:3:1	25	310	930	310	248	0,8
1:2,4:1,6	40	281	674	450	225	0,8
1:1,6:2,4	60	249	399	598	199	0,8

Tabela 22-Consumo de Materiais p/ m<sup>3</sup> entre o CL-RS e o CL-1506

<b>Traço</b> <b>1:(4)</b>	<b>AAE queimado</b> <b>1250° C</b>	<b>Cimento</b> <b>kg</b>	<b>Areia</b> <b>kg</b>	<b>AAE</b> <b>kg</b>	<b>água</b> <b>l</b>	<b>fator</b> <b>a/c</b>
1:2,4:1,6	AAE-RS	260	624	416	208	0,8
1:2,4:1,6	AAE-1506	281	674	450	225	0,8

obs.: O CL-RS 1250° C é o mesmo CL com 40% de AAE, pois este se tornou a referência

A Tabela 23 apresenta o consumo do CL produzido com o AAE-RS queimado a 1300°C, mantendo o fator a/c=0,8. Já Tabela 24 apresenta a dosagem do CL-RS utilizando o AAE-RS queimados a 1100°C. Nesse concreto há a variação do fator a/c. Vale lembrar que as três tabelas apresentam o fator de a/c aparente, ou seja, os agregados não foram umidificados previamente.

Tabela 23-Consumo de Materiais p/ m<sup>3</sup> do CL-RS utilizando AAE-1300° C

<b>Traço</b> <b>1:(4)</b>	<b>AAE queimado</b> <b>1300° C</b>	<b>Cimento</b> <b>kg</b>	<b>Areia</b> <b>kg</b>	<b>AAE-RS</b> <b>kg</b>	<b>água</b> <b>l</b>	<b>fator</b> <b>a/c</b>
1:2,4:1,6	AAE-RS	226	542	361	181	0,8

Tabela 24-Consumo de Materiais p/ m<sup>3</sup> CL-RS utilizando AAE-1100°C.

<b>Traço</b> <b>1:(4)</b>	<b>AAE queimado</b> <b>1100°C</b>	<b>Cimento</b> <b>kg</b>	<b>Areia</b> <b>kg</b>	<b>AAE-RS</b> <b>kg</b>	<b>água</b> <b>l</b>	<b>fator</b> <b>a/c</b>
1: 2,4: 1,6	AAE-RS	409	981	654	204	0,5
1: 2,4: 1,6	AAE-RS	393	943	628	236	0,6
1: 2,4: 1,6	AAE-RS	378	907	605	265	0,7
1: 2,4: 1,6	AAE-RS	364	874	583	291	0,8

a) Resistência à Compressão do Concreto

Para verificação da resistência à compressão média (fcm), verificou nas idades de 3,7 e 28 dias, sendo rompido 2 CP's para cada idade, perfazendo um total de 6 CP's para cada proporção. Os resultados estão descritos nas Tabelas 34, 35 e Figura 33. Dentre os 3 traços escolhidos com a mesma matriz, o concreto que apresentou maior resistência à compressão aos 28 dias (CP 40% AAE) passou a ser a referência de traço para todos os testes, sendo complementado com mais 4 CP's, para ter um resultado significativo a idade de 28 dias perfazendo um total de 6 CP's. Assim foram produzidos os concretos leves com os AAE queimados a 1100°C, 1250°C e 1300°C. Posteriormente, para todos os traços utilizou-se o total de 6 CP's, para a idade de 28 dias.

Em ordem cronológica, os ensaios foram realizados primeiro com CL utilizando AAE a 1250°C, na sequência 1300°C e por fim a 1100°C. Como dito, somente para essa temperatura se variou o fator de água cimento de 0,5 a 0,8. Em todos os demais testes referentes às outras temperaturas, conservou-se o fator de água/cimento de 0,8. O ensaio de resistência à compressão seguiu os preceitos na NBR 5739 (ABNT, 2018).

Seguiram-se os seguintes passos para dosagem: primeiro a adição de cimento e areia e homogeneização total; adicionou-se o agregado leve e na sequência a água; esse concreto foi homogeneizado em uma argamassadeira no LAMTAC-UFRGS, em velocidade baixa (velocidade 1 para não danificar os agregados); após todo o material misturado, o concreto foi homogeneizado no período de 3 a 5 minutos, repouso de 2 minutos aproximadamente. Para o adensamento do concreto nos corpos de prova, utilizou-se mesa vibratória, variando o tempo de vibração: para concretos com fator a/c=0,8 e 0,7 foi na ordem de 10 a 15 segundos,

observando sempre uma possível segregação a ser evitado; nos concretos com fatores  $a/c=0,5$  e  $0,6$  esse tempo variou entre 15 a 25 segundos. Para realização do procedimento de moldagem e adensamento seguiu-se a NBR 5738 (ABNT, 2015). Os CP's utilizados foram de  $\varnothing 5\text{cm} \times 10\text{cm}$  de altura.

Após a conformação, os corpos de prova foram levados para câmara úmida e entre 24 e 72 horas foram desmoldados dos moldes metálicos e novamente acondicionado em câmara úmida para o seu rompimento em 28 dias. A câmara úmida utilizada mantinha uma temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade superior a 95%.

Para o ensaio de compressão utilizou-se o equipamento EMIC linha DL modelo 20000 n° 10741. Foram moldados por batelada 9 CP's, dos quais 6 foram utilizados para o ensaio de resistência à compressão e os outros 3 CP's para outros ensaios não destrutivos.

#### b) Absorção de Água

O ensaio de absorção foi realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005) para os CL e CLE utilizando o AAE-RS nas 3 temperaturas estudadas ( $110^\circ\text{C}$ ;  $1250^\circ\text{C}$  e  $1300^\circ\text{C}$ ). Para sua determinação, empregou-se 3 CP's que foram colocados em estufa na temperatura de  $110^\circ\text{C}$  por 72 horas, permanecendo aproximadamente 5 horas em repouso ao ar. Após esse período foi medida a massa e eles foram imersos em água nos intervalos de 24 horas e 72 horas. Depois desses períodos, verificou-se sua massa, sendo os resultados de absorção de água uma média desses 3 CP's.

#### c) Massa Específica

A amostra foi seca por um período de 72 horas a temperatura de  $110^\circ\text{C}$  em estufa e, após sua retirada, permaneceu em ambiente por 5 horas e posteriormente imerso por mais 72 horas, de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005). É um parâmetro fundamental para se determinar o “fator de eficiência” do concreto leve.

#### d) Fator de Eficiência

Estudou-se o fator de eficiência, dos CL e CLE utilizando os AAE-RS nas três temperaturas além do CL produzido com o AAE-1506. O fator de eficiência é uma relação

entre a resistência à compressão pelo sua massa específica. O objetivo é avaliar simultaneamente leveza e resistência (CADORE et. al, 2018). Os resultados apresentados é uma média de 6 CP's.

e) Resistência Ótima.

É uma relação entre a resistência média à compressão do concreto ( $f_{cm}$ ) e a resistência média à compressão da argamassa e serve de parâmetro para identificar quanto a argamassa contribui à resistência do concreto.

O estudo de resistência ótima foi realizado apenas com o CL-RS com AAE queimados a 1100°C. Apenas nesse concreto foi realizado tal estudo devido a limitação na produção do AAE. Para a determinação da resistência ótima, produziu-se 4 CP's de Argamassa no traço 1:2,4 em massa, variando o fator a/c de 0,5 a 0,8, extraindo-se uma resistência média para cada fator a/c desses 4 CP's.

f) Módulo de Deformação/Elasticidade ( $E_{ci}$ ).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), quando não forem feitos ensaios ou não existirem dados mais precisos é possível estimar o MD em função da resistência à compressão. Os CL-RS e o CLE-RS podem aplicar perfeitamente essa estimativa com base na fórmula proposta pela norma, pois sua massa específica se enquadra no parâmetro de 2000 kg/m<sup>3</sup>. Schwantes (2012), porém, aplicou esse mesmo conceito para estimar o Módulo de Deformação em concretos leves com massa específica variando em seus estudos de 1400 kg/m<sup>3</sup> a 1600 kg/m<sup>3</sup>, chegando a valores confiáveis segundo esse autor.

#### 4.2.7 Custo do AAE e do Concreto

Devido à complexidade que se pode encontrar nesse tema, optou-se por um tópico específico para tratar a metodologia aplicada no AAE bem como do CL. Apresenta-se nesse estudo o custo por m<sup>3</sup> e por saco do AAE-1506 e do AAE-500, variando as distâncias a cada 500 km, até 2500 km, tendo a saída do estado de São Paulo (local da indústria CINEXPAN). Para se ter um parâmetro do seu valor, inclui-se o custo do material e do frete posto obra, o qual é significativo, uma vez que dado a uma certa distância, o custo do transporte é superior

ao do material, portanto, o transporte pode definir o valor final. Levou-se em conta o transporte feito com carreta, capacidade de carga de 30 toneladas.

Optou-se pelos índices de custo utilizando o SINAPI (Sistema nacional de preços e índices da construção civil), sem desoneração. Quanto aos índices de produtividade, utilizou-se o TCPO-10 (1996).

Buscando outra referência do custo do CL e CLE, utilizou-se o TCPO –10: Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos, fixando a resistência desse concreto em 10 MPa (cód. 060372) e 20 MPa (cód. 060376), ambos controle tipo “B” com o AAE-1506. Nas distâncias de 500, 1000, 1500 e 2000 km, esses concretos (nessas resistências) equivalem ao CL e ao CLE, respectivamente.

Fez-se uma comparação entre o Concreto leve (massa específica menor que 2000 kg/m<sup>3</sup>) e o concreto normal (acima de 2000 kg/m<sup>3</sup>). Utilizando-se o TCPO, fixou-se novamente as resistências de 10 MPa (cód. 060360) e 20 MPa (060365), ambos com controle tipo “B” com brita 1. Essa comparação entre CL e CN permitirá ter um parâmetro do custo de cada um dos concretos em função da resistência. Far-se-á apenas essa comparação entre os custos do concreto produzido no estado de São Paulo - capital com distância de até 200 km - e no Rio Grande do Sul, grande Porto Alegre, o equivalente a 1000 km de São Paulo.

Os valores monetários do AAE e dos concretos apresentados com o tempo perdem o seu referencial em função da desvalorização monetária. Assim, escolheu-se 3 indexadores para que os resultados apresentados não se tornem obsoletos e que tenha-se um melhor parâmetro para sua atualização em anos posteriores.

O primeiro é o dólar comercial com valores de 2 janeiro de 2019 em R\$ 3,79 (CÂMBIO UOL, 2019). O segundo é o CUB do estado de São Paulo Padrão Normal R01, de dezembro de 2018, no valor de R\$ 1673,72 sem desoneração (SINDUSCON, 2019). A terceira referência é o valor do saco de 50 kg de cimento em São Paulo com valores de janeiro de 2019 com média de 3 fornecedores na capital, sendo seu valor de R\$ 21,00.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se nesse capítulo os resultados por material (agregado de argila da jazida de Arroio Grande-RS, AAE-RS, e o agregado da Cinexpan, AAE-1506) e as relações das propriedades desses materiais, incluindo-se os dados obtidos nos estudos do concreto leve e concreto leve estrutural.

A Figura 27 apresenta o agregado de argila expandida do fabricante e os três agregados de argilas expandida desenvolvidos nesta pesquisa. É possível se observar alterações na porosidade superficial, na cor e na intensidade do brilho em função da temperatura de queima. Ainda, observa-se a diferença devido à moldagem manual (no caso de AAE-RS) em seu formato após a queima, com as características do AAE-1506 do fabricante.

AAE	Temp. °C	12,5 mm	9,5mm	6,3mm	4,75mm	2,4mm
1506	1250					
RS	1250					
RS	1300					
RS	1100					

Figura 27 - Quadro Demonstrativo dos AAE. Fonte: o autor, (2018).

## 5.1 AGREGADO DE ARGILA EXPANDIDA

### a) Distribuição Granulométrica.

A escolha da granulometria dos agregados da argila de Arroio Grande (AAE-RS) foi baseada nos agregados fornecidos pela CINEXPAN (AAE-1506). Após passar o material nas peneiras normatizadas, foi verificado conforme Tabela 25 sua distribuição e selecionado a mesma porcentagem para os AAE-RS, para que houvesse uma similaridade de tamanhos. Ambos os AAEs possuem uma granulometria equivalente a brita 1.

A Figura 28 mostra que a distribuição granulométrica está fora do limite estabelecido da NBR 7211 (ABNT, 2009). Observou-se que os AAEs não estão dentro dos limites de Zona ótima ou Zona utilizável, o que pode significar uma perda de eficiência nos CL produzidos com essa distribuição granulométrica, notando apenas que o AAE apresenta a granulometria de 4,75mm dentro desse parâmetro. Não se corrigiu essa distribuição granulométrica mantendo-se, portanto, o mesmo material que as concreteiras e construtoras recebem do único fabricante do país. Portanto, considerou-se mais importante priorizar a comparação entre os concretos formulados com o agregado produzido em laboratório e o comercial.

Tabela 25 - Distribuição Granulométrica do AAE

<b>Porcentagem retida de AAE-12,5mm.</b>		
<b>Peneira (mm)</b>	<b>Massa retida (%)</b>	<b>Massa acumulada(%)</b>
19,00	0	0
12,50	15,82	15,82
9,50	33,68	49,50
6,30	30,81	80,31
4,75	13,80	94,11
2,36	3,01	97,12
1,18	0,32	97,44
<1,18	2,56	100,00
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	
<b>Módulo de Finura (MF)</b>		<b>6,68mm</b>
<b>Dimensão Máxima Característica (DMC)</b>		<b>12,5 mm</b>

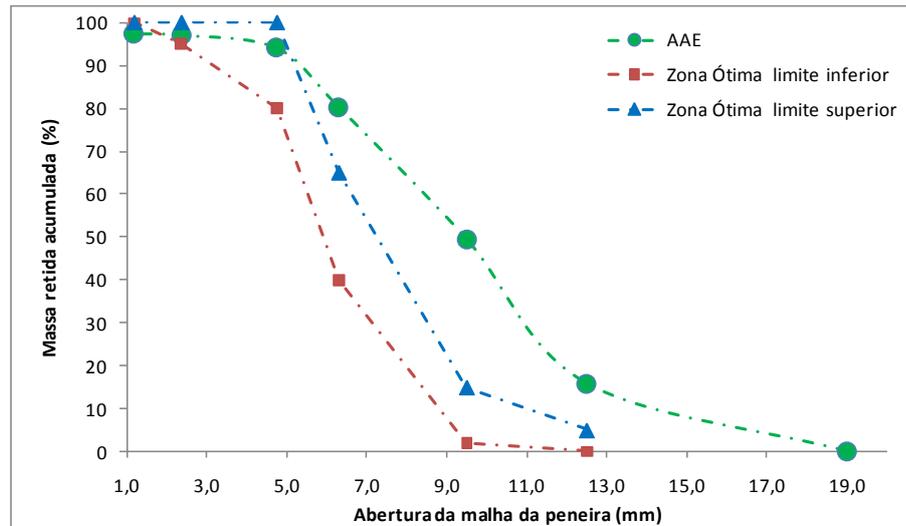


Figura 28 - Distribuição Granulométrica do AAE

#### b) Expansibilidade

A expansão dos AAE-RS na queima é apresentada na Tabela 26. Nota-se que a expansão volumétrica está diretamente relacionada ao aumento de temperatura. Esse dado é relevante já que mostra a qualidade da argila escolhida para a produção de AAE-RS. Observou-se que o AAE-RS sofre de fato o fenômeno de expansão a partir de 1100°C de forma significativa, tendo um aumento de 35%. Em menores temperaturas não se tem uma expansão significativa que possa classificar o material como argila expansiva, conforme estudos demonstrados neste trabalho e conjugado com os de Carús et. al. (2014).

Tabela 26 - Expansibilidade dos AAE.

Temperatura (°C)	Expansão (%)
1100	35
1200*	110
1220*	275
1250	415
1300	645

Fonte: O autor, (2018) e \* Carús et. al, (2014).

Na queima do AAE-RS a 1300°C houve uma expansão equivalente a 645%, mostrando uma excelente expansão, porém afetando a resistência (já que os agregados apresentam porosidade elevada). Rossignolo (2009) menciona que os agregados de argila expandida

podem chegar até 7 vezes o seu volume inicial, sem mencionar a temperatura que esse agregado foi exposto. Portanto, o AAE-RS na temperatura de 1300°C atinge próximo desse limite conhecido. A temperatura de 1250°C, para os AAE, mostrou um grau de expansão na ordem de 415%. Esse agregado foi escolhido para se comparar com a AAE-1506 da empresa Cinexpan, para se estudar o potencial para aplicação como componente do concreto. A relação de expansão é destacada por meio da Figura 29.

Embora se tenha verificado que quanto maior a temperatura, maior será a expansão, é preciso pontuar outros fatores que podem influenciar na expansão bem como no processo de pelotização do AAE, são eles: o aumento da taxa de aquecimento, o rápido resfriamento e as próprias propriedades expansíveis da argila (PETRUCCI, 1973). Ressalta-se ainda o uso de aditivos para se aumentar a expansão, algo que não foi testado no presente trabalho, já que a argila em questão apresentou uma excelente expansão.

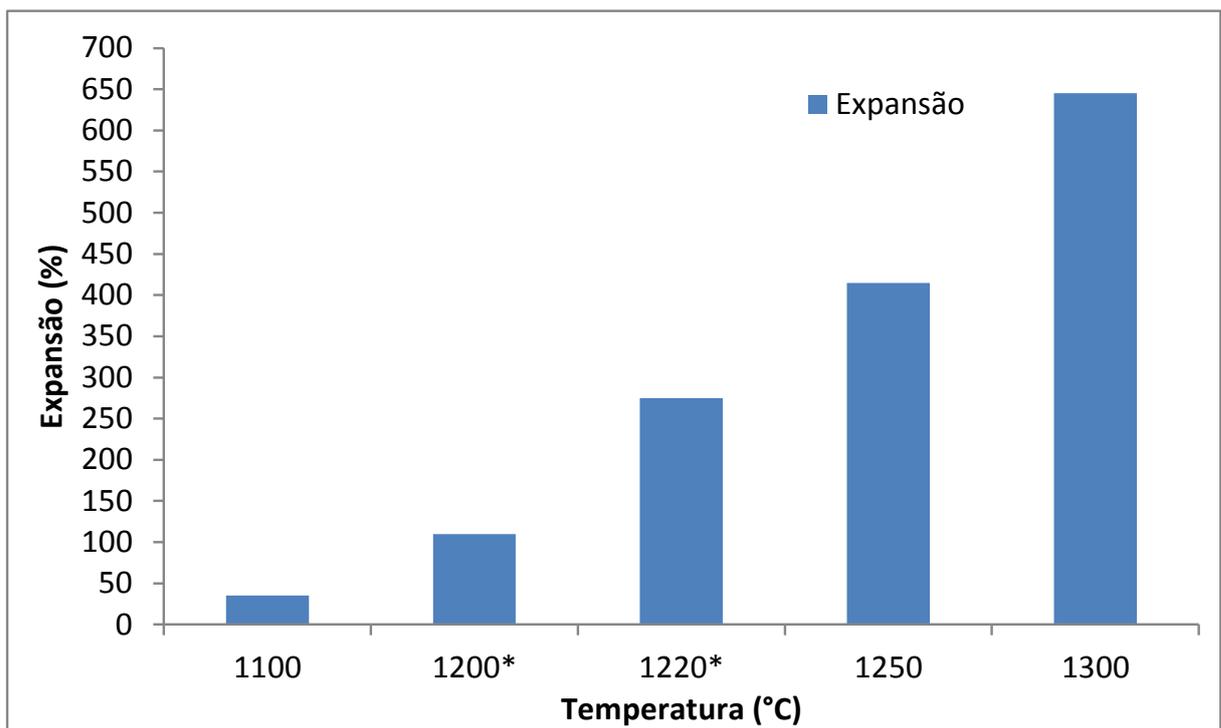


Figura 29 - Expansão em função da queima do AAE. Fonte: O autor (2018) e Carús et. al, (2014).

## c) Absorção de Água.

Na Tabela 27, é possível se verificar uma tendência de estabilização de absorção próxima de 24 horas, apresentando pouca variação em 72 horas de ensaio. No entanto, vale destacar que a absorção apresentada em 24 horas pelo AAE-1506 em laboratório é superior a absorção apresentada no catálogo Cinexpan (Tabela 07). Portanto, é importante sempre se realizar esses ensaios para aferir esses índices com maior precisão, já que são esperadas variações desse índice na produção industrial.

Tabela 27-Absorção de água dos AAE

<b>Agregado</b>	<b>Temperatura</b>	<b>1 hora</b>	<b>3horas</b>	<b>5 horas</b>	<b>24 horas</b>	<b>72 horas</b>
	<b>°C</b>	<b>AA (%)</b>	<b>AA (%)</b>	<b>AA (%)</b>	<b>AA (%)</b>	<b>AA (%)</b>
AAE-1506	1250	8,06	9,89	11,04	18,80	18,80
AAE-RS	1250	4,11	5,51	7,69	12,50	12,73
AAE-RS	1100	4,25	5,16	5,23	6,19	6,33
AAE-RS	1300	3,13	3,36	3,88	4,18	4,18

O AAE-1506 mostrou um alto poder de absorção na ordem de 18,8%, quando comparado com o AAE-RS queimado 1250°C, que foi apenas de 12,73% conforme se verifica na Tabela 27. Outro fator significativo é que embora a Figura 27 apresente os AAE-1506 sem muitas trincas aparentes, no uso em maior escala e mesmo em função do transporte, esse agregado é partido pelo atrito e nesse momento, aumenta-se o seu poder de absorção, devido o aumento da área superficial, ou seja, a exposição dos poros internos. Ressalva-se que quando os AAE são produzidos em fornos de grelha, situação que são expandidos e depois são triturados ou moídos de acordo com o diâmetro que se deseja, são gerados agregados com alto poder de absorção (ROSSIGNOLO, 2009).

A propriedade de absorção tem sua importância no estudo de dosagens, porque o fator de água/cimento deverá ser corrigido para que a água de amassamento não seja absorvida pelo agregado, naturalmente, quanto menor essa taxa de absorção, melhor será para o controle tecnológico do concreto.

Para os agregados queimados a 1100°C e 1300°C, quando se compara a absorção de 5 horas com sua absorção ao final de 72 horas, há uma variação próxima de 1%. Na temperatura

de 1250°C esse aumento/diferença é mais acentuado na ordem de 7% para o AAE-1506 e 5% para o AAE-RS-1250°C.

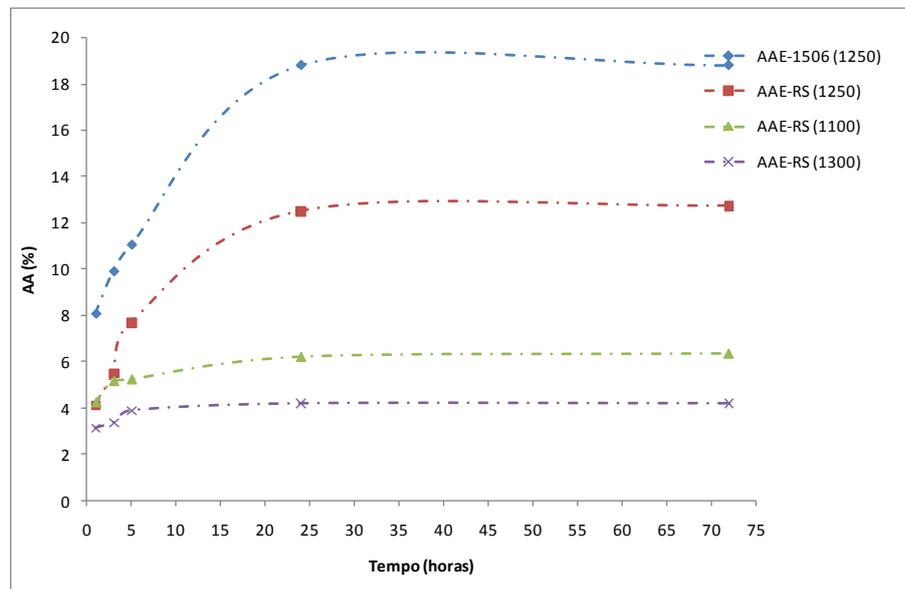


Figura 30 - Absorção de água em função do tempo de imersão.

Na Figura 30 e na Tabela 27 nota-se que os AAE-RS-1250°C apresentaram maior absorção em relação aos das outras duas temperaturas estudadas: a 1100°C absorveu 6,33%; a 1250°C 12,73% e a 1300°C 4,18%. Num primeiro momento, esperar-se-ia certa linearidade porque o aumento de temperatura em geral reduz o índice de absorção, à medida que se aumenta a sinterização. Essa aparente incoerência pode ser explicada:

- A queima a 1300°C apesar de provocar um maior tamanho de poros internos devido a maior expansão, propicia uma maior sinterização e vitrificação superficial da argila, diminuindo a absorção do AAE-1300°C.
- A 1100°C, o material tem baixa expansão, sendo a temperatura insuficiente para causar o amolecimento da fase vítrea e permitir a expansão do ar no poro.
- O AAE queimado a 1250°C alcança alta expansão e alta porosidade ligada às propriedades de absorção, mas com uma vitrificação inferior ao AAE-1300°C.

A Tabela 28 apresenta a absorção da água em função do tempo de cada agregado. Observa-se que no período de até 1 hora para argilas queimadas a 1100°C e 1300°C, a absorção é ~70%. E com 5 horas, ambas ultrapassam 80% de sua absorção, enquanto do

fabricante é de 62%. Esse tempo de 5 horas é bastante adequado a um ciclo de trabalho de uma concreteira, sendo fáceis as devidas correções de dosagem a/c. Não é de praxe as concreteiras utilizarem o agregado saturado, no entanto, procede-se às correções em dias de chuva. O AAE-RS-1250°C apresentou o maior volume de poros abertos (maior absorção de água, de acordo com a Tabela 27) e menor taxa de absorção em 5 horas (Tabela 28).

Tabela 28 - Capacidade de absorção em função do tempo dos AAE-RS.

Agregado	Temperatura °C	Taxa de Absorção em função do tempo (%)				
		1 hora	3 horas	5 horas	24 horas	72 horas
AAE-RS	1100	67	82	83	98	100
AAE-RS	1250	32	43	62	98	100
AAE-RS	1300	75	80	93	100	100

Ao se comparar os AAE-RS-1250°C com do fabricante (Tabela 29), observou-se que a taxa de absorção dos AAE-RS é menor nas primeiras horas e similar na 5ª hora (62%). Isso pode ser explicado pelas diferenças na microestrutura entre ambos, como, por exemplo, o raio do capilar, a profundidade de capilar, entre outros.

Tabela 29 - Capacidade de absorção em função do tempo do AAERS-1250°C e AAE-1506.

Agregado	Temperatura °C	Taxa de Absorção em função do tempo (%)				
		1 hora	3 horas	5 horas	24 horas	72 horas
AAE-1506	1250	43	52	59	100	100
AAE-RS	1250	32	43	62	98	100

Quando se refere ao fator de a/c, deve-se levar em conta que é um fator aparente, ou seja, o fator que se lança na dosagem e não o que realmente participa do amassamento uma vez que parte dessa água é absorvida pelo agregado. A absorção da água pelo agregado no concreto leve depende da quantidade em massa e do tipo de agregado (traço) usado na formulação do traço. Uma vez que cada AAE tem seu potencial de absorção que é em função de sua queima, o que se pode inferir é que o fator a/c aparente sempre será maior que o fator a/c real. A Tabela 30 apresenta o fator aparente descontado à absorção do agregado, ou seja, uma aproximação ao fator a/c real. Esse é o fator que de fato está contribuindo para as propriedades do concreto no período da dosagem até o adensamento.

Tabela 30- Fator de a/c Real do CL-RS com o AAE-RS queimado a 1100°C.

<b>Fator Aparente</b>	<b>Fator Real</b>
0,80	0,72
0,70	0,62
0,60	0,52
0,50	0,42

Considerou-se no cálculo na Tabela 30:

- Contribuição do agregado graúdo no traço (1:2,4:1,6) = 1,6. Absorção (%) 3 horas = 5,16. AA pelo agregado = 0,08.
- Fator Real = Fator Aparente – (Contribuição do traço (1,6) x Taxa de absorção 3h (5,16%) = 8,25% = ~0,08)

A pega do concreto pode levar até 10 horas conforme a NBR 16607 (ABNT, 2017). O AAE-RS tem um poder de absorção acentuado até 5 horas e atinge uma estabilização de absorção até 24 horas com um aproveitamento no mínimo de 98%. No entanto, utilizou-se como referência a absorção do período de 3 horas. O motivo de estabelecer como correção a absorção de até 3 horas é porque esse tempo é razoável para executar a dosagem, transportar, lançar e promover o adensamento do concreto na fôrma. É também dentro desse período que normalmente se verifica a consistência do concreto. É fato, que ao se utilizar o AAE, a absorção é significativa logo na primeira hora, assim, o que se analisa nesse momento são as propriedades do concreto no estado fresco (NEVILLE; BROOKS, 2013). Vale lembrar ainda que o fator a/c é a relação entre água e cimento, ao passo que na relação de absorção, relaciona-se água/agregado, sendo, portanto, relações diferentes, o que demanda cálculos implícitos.

Naturalmente, quando houver uma necessidade de um maior período para trabalhar com o concreto, o fator a/c real deverá adequar-se a cada situação. Recomenda-se, em todos os casos, quando não houver a medição experimental da absorção de água, uma estimativa de absorção do agregado em 6%. Outro fator é que o AAE-RS nesse tempo absorveu de 43 a 82% do total, a depender da queima do mesmo (Tabelas 28 e 29). Isso é uma alternativa à recomendação de umidificação prévia do AAE, sempre que esse possuir uma absorção de água superior a 10% (ROSSIGNOLO, 2009).

Dada a complexidade do tema, é importante salientar que na Tabela 31 a coluna II indica a contribuição do agregado graúdo no traço (1:2,4:1,6), a saber 1,6; coluna III indica a contribuição de absorção que o AAE causa no período de 3 horas; a coluna IV é produto da coluna II e III e significa o quanto a água absorvida corresponde no fator a/c. A coluna VI é a diferença entre a coluna V e IV, ou seja, mostra o fator real (VI).

A Tabela 30 refere-se apenas ao CL produzido com o AAE-RS queimado a 1100°C, já a Tabela 31 mostra o CL produzido com AAE-RS a 1250°C e 1300°C além do CL-1506.

Tabela 31- Fator de a/c Real do CL com AAE queimado a 1250°C e 1300°C.

(I) <b>Concreto Leve com</b>	(II) <b>AAE</b>	(III) <b>AA (%) 3 horas</b>	(IV) <b>AA pelo Agregado</b>	(V) <b>Fator Aparente</b>	(VI) <b>Fator Real</b>
AAE-1506-1250°C	1,6	9,89	0,16	0,80	0,64
AAE-RS-1250°C	1,6	5,51	0,09	0,80	0,71
AAE-RS-1300°C	1,6	3,36	0,05	0,80	0,75

\*Contribuição do agregado no traço.

#### d) Resistência à Compressão e Massa Específica

A resistência à compressão e a massa específica são apresentadas na Tabela 32. O aumento da temperatura provoca diminuição da resistência do AAE-RS, isso se dá pelo fato de que há o aumento de vazios em consequência da maior expansão, levando a fissuras que determinam a resistência no rompimento do corpo de prova.

Tabela 32 - Propriedades Físicas e Mecânicas dos AAE medidas em laboratório. FE: fator de eficiência.

<b>Agregado</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>Resistência MPa</b>	<b>Massa Específica kg/dm<sup>3</sup></b>	<b>FE MPa.kg/dm<sup>3</sup></b>
AAE-1506	1250	1,2	0,96	1,25
AAE-RS	1100	1,3	2,07	0,63
AAE-RS	1250	0,8	0,85	0,94
AAE-RS	1300	0,1	0,56	0,18

A Tabela 32 mostra a comparação da resistência entre o AAE-RS-1250°C e o AE-1506. Pode-se observar que a diferença entre as resistência à compressão é de 0,40 MPa tendo o AAE-1506 maior resistência, o que irá refletir diretamente na resistência do concreto, ou seja, agregados com maior resistência produzem concretos mais resistentes. Na questão da

resistência do agregado nestas temperaturas estudadas, foi observada uma relação inversa entre temperatura e resistência entre os AAE-RS. Contudo, o AAE-1506 por ser produzido com outra argila e em forno rotativo, mesmo queimado em 1250°C, apresentou, como era esperado, propriedades distintas, conforme ilustra a Figura 31.

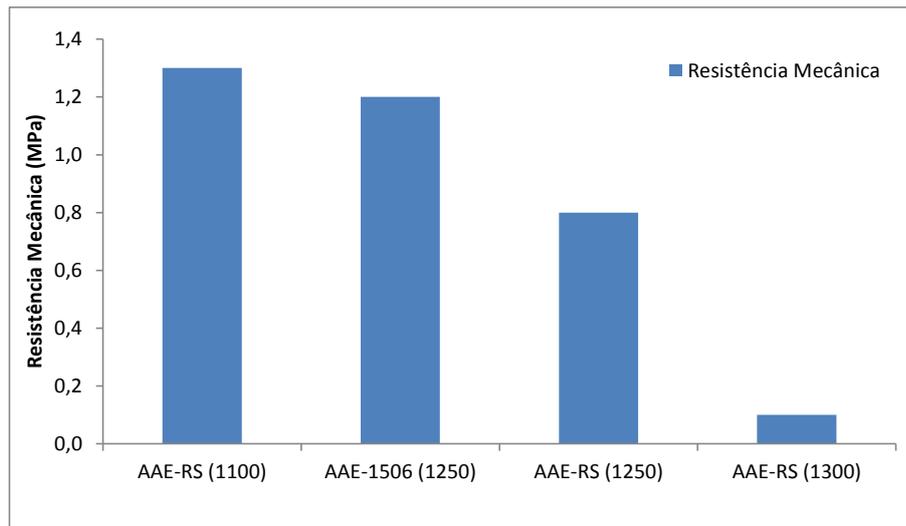


Figura 31: Comparação entre as fcm do AAE em diferentes temperaturas.

Quanto à densidade, propriedade fundamental para produção de um concreto leve, houve uma variação de 2,07 kg/dm<sup>3</sup> (1100°C) a 0,56 kg/dm<sup>3</sup> (1300°C). A alta variação entre estas massas específicas (370%) é um indicativo de uma excelente expansibilidade que o material pode alcançar ao se variar a temperatura. A massa específica (ME) tem a mesma relação que a fcm, ou seja, quanto maior a temperatura, menor será a massa específica.

Os dados do fabricante são apresentados conforme a Tabela 33 (o FE foi calculado com os dados apresentados). Em virtude da massa específica apresentada ser maior do que a calculada no laboratório, seu fator de eficiência (FE) diminuiu (1,10 kg/dm<sup>3</sup> e 0,96 kg/dm<sup>3</sup>, respectivamente), verificando-se uma variação de 15% entre os resultados das Tabelas 32 e 33.

Tabela 33 - Propriedades Físicas e Mecânicas do AAE-1506 conforme o fabricante.  
fcm: res. à compressão. ME: massa específica. FE: fator de eficiência. MF: módulo de finura.

Temperatura °C	fcm MPa	ME kg/dm <sup>3</sup>	FE MPa.kg/dm <sup>3</sup>	MF mm
1250	1,2	1,10	1,09	6,36

Fonte: Cinexpan, adaptado pelo autor, (2018).

#### e) Fator de Eficiência do Agregado (FE)

O fator de eficiência do agregado não se encontra em nenhuma norma vigente, mas sua relação é importante, pois apresenta à capacidade de resistência à compressão do material agregado conjugando a sua capacidade de leveza. Observa-se que comumente é apresentado o FE do concreto (ROSSIGNOLO, 2009), ao passo que neste tópico se apresenta o FE do agregado, conforme a Figura 32 (e Tabela 32).

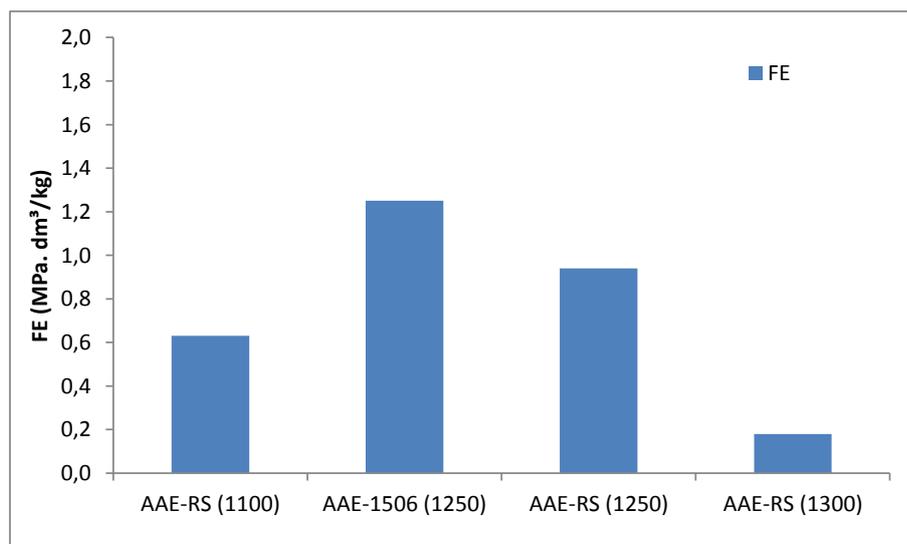


Figura 32 - Comparação do FE dos AAEs. Calculado com os dados do laboratório.

A Figura 32 mostra que a temperatura de queima tem forte relação com o fator de eficiência entre os AAE-RS. Para a utilização no concreto, esse dado facilita a comparação das propriedades. Por outro lado, ao se variar a temperatura de queima do AAE-RS é possível, em diferentes temperaturas de teste, aumentar-se o FE, caso o material sofra maior sinterização, aumentando sua resistência, sem, no entanto, variar significativamente o volume. Ao se comparar AAE-RS-1250°C e o agregado comercial, observa-se uma diferença de 50%

na resistência; já no quesito massa específica, a diferença foi de 13%, mas quando se compara o fator de eficiência, a variação, neste caso, foi de 33%. Por isso, a análise precisa ser vista de forma criteriosa, e o fator de eficiência traz essa ponderação.

Na Figura 32 foi observado que o AAE-RS tem um maior FE quando queimado a 1250°C. O FE do AAE-RS (1100°C) perde em eficiência em função de sua elevada massa e o AAE-RS (1300°C) perde em função da baixa resistência.

## 5.2 CONCRETOS COM AAE

### 5.2.1 Concreto com AAE-RS-1250°C e concreto com AAE-1506

#### a) Resistência à compressão ( $f_{cm}$ ) e Massa específica (ME)

Para definição do melhor traço utilizou-se como parâmetro a AAE-1506, com matriz 1:4 (1:m; sendo “m” areia + agregado), de acordo com a sugestão de Maycá (2009), com 3 traços em massa variando o AAE em 25%, 40% e 60%. Os resultados mostraram que o melhor desempenho do concreto foi o concreto com 40% de argila expandida e foi utilizado fator de  $a/c = 0,80$ : traço (1:2,4:1,6). O fator  $a/c$  foi determinado buscando a pior situação, com o objetivo de se pode graduar esse fator, avaliando-se seu efeito. Foi verificado que a absorção de água dos AAE-1506 atingiu 18,8% após 72 horas e que essa porcentagem de absorção no concreto corresponde ao fator  $a/c$  aparente em 0,30 ( $1,6 \times 0,188$ ) para este traço, ou seja: da água inserida na dosagem (fator  $a/c=0,8$  aparente), cerca de 0,30 é consumida pelo AAE em 72 horas, o que corresponde a 37,6% da água de amassamento. Para correção do fator de  $a/c$  real, levou-se em consideração o tempo de até 3 horas de absorção e não de 72h, uma vez que o concreto já estaria no processo de cura.

A Tabela 34, mostra que ao final dos 28 dias a resistência média do corpo de prova (CP) chegou a 20,92 MPa (CP 40% AAE). Esse valor é superior ao valor mínimo de 17 MPa para um concreto leve estrutural. Quanto a sua massa específica, obteve-se 1,52 kg/dm<sup>3</sup>. Esse é um valor bem menor a 2,00 kg/dm<sup>3</sup>, o qual é o valor máximo de ME à classificação em concretos leves. Mediante esses dois dados, resistência e densidade, foi possível classificar o concreto utilizando AAE-1506, como concreto leve estrutural (CLE).

A Figura 33 salienta o aumento crescente da resistência em função do tempo. O CL-1506 utilizando 40% de AAE-1506 atingiu a maior resistência ao final de 28 dias, podendo ser denominado como CLE-1506.

Tabela 34 – fcm do CL-1506 variando-se o percentual de agregado e o tempo de cura.

Corpos de Prova	3 dias fcm (MPa)	7 dias fcm (MPa)	28 dias fcm (MPa)	Traço massa
CP 25% AAE	9,22	13,07	15,02	1,0: 3,0: 1,0
CP 40% AAE	16,71	18,52	20,92	1,0: 2,4: 1,6
CP 60% AAE	2,37	2,22	4,54	1,0: 1,6: 2,4

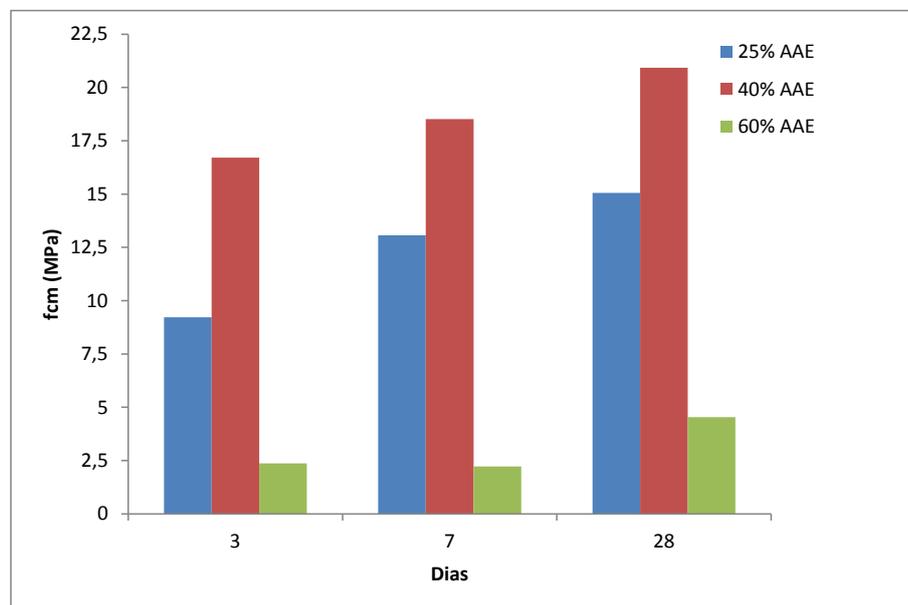


Figura: 33 - Resistência dos CLs-1506, fator  $a/c=0,8$ , em função do tempo de cura.

Diante do exposto acima, estabeleceu-se para a CL-RS a matriz 1:4, traço CL 40% (1:2,4:1,6) e fator  $a/c = 0,80$ , para se efetuar a comparação, com rompimento nas mesmas idades, 3,7 e 28 dias. Os resultados são expressos na Tabela 35, observando que sua massa específica foi de  $1,48 \text{ kg/dm}^3$ .

Os resultados (Tabela 35) indicam que o CL-RS não atingiu a resistência mínima esperada de 17 MPa, não podendo ser considerado, portanto, estrutural, uma vez que sua resistência máxima foi de 12,54 MPa. No entanto, com uma massa específica menor do que  $2,00 \text{ kg/dm}^3$ , pode-se classificá-lo como concreto leve (CL-RS). Na Figura 34 é possível observar claramente o aumento constante de resistência até a idade de 28 dias.

Tabela 35 – fcm do CL-RS com AAE a 1250°C.

Corpos de Prova	3 dias fcm (MPa)	7 dias fcm (MPa)	28 dias fcm (MPa)	Traço massa
CP 40% AAE	7,14	9,53	12,54	1,0: 2,4: 1,6

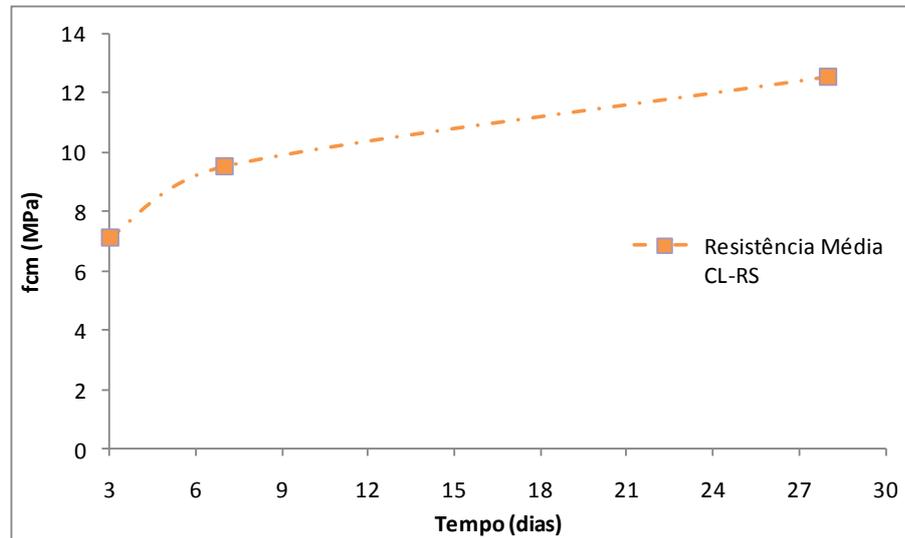


Figura 34 - Resistência à compressão em função do Tempo – CL-RS (1250°C)

A maior fcm do CLE-1506 em relação ao CL-RS pode ser vista na Tabela 36. Nota-se que a diferença entre as resistências dos concretos chegou a 134% nos 3 primeiros dias, diminuindo para 67% ao final dos 28 dias. Lembrando que o AAE-RS foi queimado a 1250°C, assim como AAE-1506, porém esse em forno industrial, ou seja, em diferentes condições de queima e em ciclos de queima distintos. Assim, essa diferença pode ser parcialmente atribuída ao tipo de produção dos AAE, uma vez que o AAE-1506 é produzido em fornos rotativos criando uma casca cerâmica, provavelmente devido à forte radiação da chama. Como é sabido, a resistência do agregado contribui positivamente, levando a um concreto com maior resistência (LOUTOU, 2017; AYATI, et. al. 2018). Por outro lado, essa diferença de processo de produção dos AAE tende a propiciar diferentes propriedades aos concretos, incluindo-se diferenças no processo de cura da matriz cimentícia.

Tabela 36 – Comparação da fcm em relação à cura entre os CL-1506 e CL-RS.

<b>Tempo dias</b>	<b>CL-1506 fcm (MPa)</b>	<b>CL-RS fcm (MPa)</b>	<b>Varição entre fcm (%)</b>
3	16,71	7,14	134%
7	18,52	9,53	94%
28	20,92	12,54	67%

Pode-se dizer que o efeito do AAE-1506 no concreto é similar a do concreto normal utilizando agregado de origem basáltica, que atinge nas primeiras idades (Tabela 36), isto é 3 dias, valores superiores a 65% de sua resistência final, quando se usa CP V-ARI. Observou-se que o CL-RS atingiu 60% de sua resistência total ao final de 3 dias, ao passo que o CL-1506 atingiu no mesmo período uma eficiência de 80%. Portanto, o concreto utilizando o AAE-1506 se mostra superior não só na sua resistência final, mas também no seu comportamento nas primeiras idades. As Tabelas 36, 37 e Figura 35 mostram as diferenças entre os concretos produzidos em mesmas condições de laboratório.

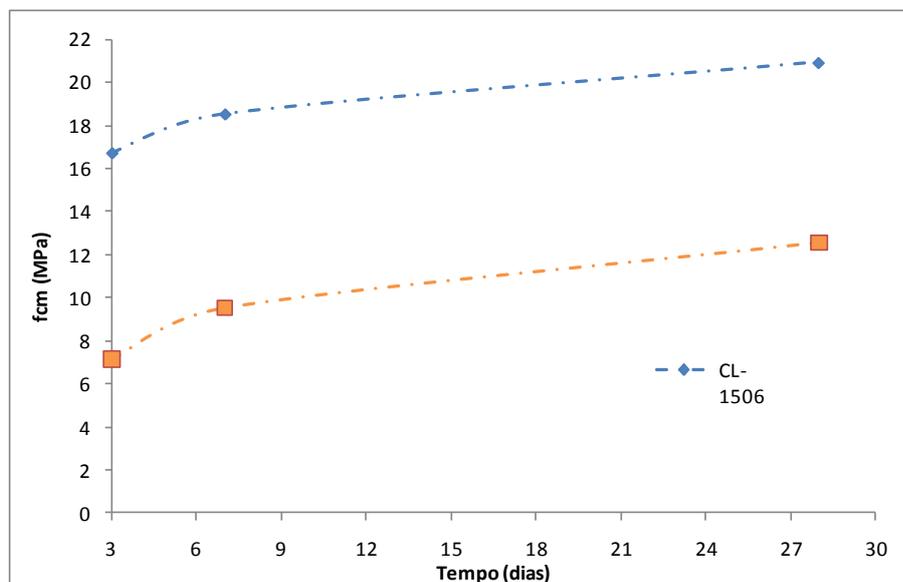


Figura 35 - Comparação das fcm entre o CL-RS e CL-1506 em função do tempo de cura.

Tabela 37 – Percentual alcançado da resistência total em função do tempo.

Concreto	% de fcm		
	3 dias	7 dias	28 dias
CL-RS	60	76	100
CL-1506	80	88	100

## d) Fator de Eficiência e Absorção de Água.

Na Tabela 38, ressalta-se que a massa específica do CL-RS foi menor que a do concreto CLE-1506, enquanto a resistência à compressão o CLE-1506 foi acentuadamente superior. Essas duas relações compõem um FE do CLE-1506 de 13,77 MPa.dm<sup>3</sup>/kg diante do CL-RS com 8,47 MPa.dm<sup>3</sup>/kg CL-RS, quer dizer, uma variação de eficiência em 62%.

Tabela 38 - Propriedades dos concretos CLE-1506 e o CL-RS (AAE 1250°C)

Concreto	ME	AA (%)	AA (%)	fcm	FE
	(kg/dm <sup>3</sup> )	24 horas	72 horas	(MPa)	(MPa.dm <sup>3</sup> /kg)
<b>CLE-1506</b>	1,52	3,43	3,60	20,92±1,21	13,77
<b>CL-RS</b>	1,48	4,76	5,42	12,54±0,26	8,47

Estudos indicam que agregados com poros abertos consomem de 30 a 100 kg de cimento por m<sup>3</sup>, para que se atinja a mesma resistência do concreto, sendo difícil determinar a proporção dessa contribuição que a pasta de cimento faz sobre o AAE (ZHANG; GJØRV, 1992; ROSSIGNOLO, 2003). Com base na dosagem que se encontra na Tabela 22, na qual se apresenta o consumo de cimento (260 kg), pode-se concluir que para o CL-RS atingir a mesma resistência à compressão do CLE-1506 deverá ser adicionado na ordem de 8% a mais de cimento (~21kg), equivalendo ao consumo de 281 kg por m<sup>3</sup>. A Figura 36 apresenta o desempenho desses FE entre os concretos leves.

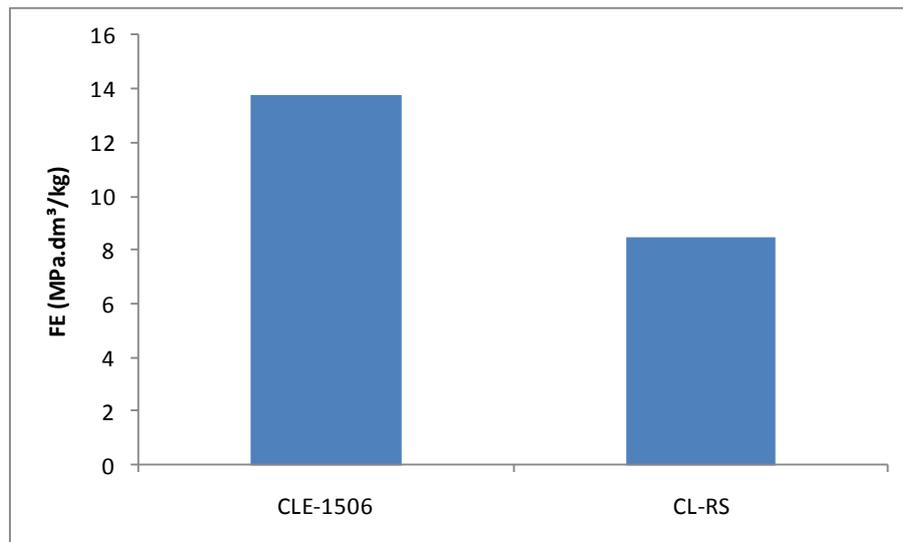


Figura 36 – Comparação do Fator de Eficiência entre os CLE-1506 e CL-RS-1250°C.

Nos ensaios de absorção, observaram-se os seguintes resultados: CLE-1506 3,60% e CL-RS 5,42% (Tabela 38), para um período de 72 horas conforme prescreve a norma. O que se pode observar é que o AAE-1506 tem um maior poder de absorção 18,8% (Tabela 27), no entanto o seu concreto leve teve uma absorção menor, isso indica que não necessariamente ter um agregado com alto poder de absorção terá efetivamente um concreto com esse mesmo comportamento. Essas diferenças de porosidade entre os concretos explicam, ou mesmo exercem forte influência na diferença de fcm apresentada entre ambos concretos (Tabela 38).

Outra medição que merece ser destacada em relação ao comportamento dos concretos é a absorção por imersão em 24 horas, a qual apresentou uma diferença de absorção nesse período. O CLE-1506 em 24 horas atinge 95% de sua absorção e o CL-RS atinge 87%, já os AAes nesse mesmo período (24 horas) atingem ~98% de sua capacidade de absorção (Tabela 28). No entanto, a quantidade de água absorvida pelos agregados é diferente. Todos esses fatores levam a uma diferença no processo de cura da matriz cimentícia.

Na questão do teor de absorção de água há uma distinção entre esses dois concretos leves. Baseando-se na NBR 9778 (ABNT, 2005), pode-se classificar o CLE-1506 como “durável-alto desempenho”, uma vez que seu teor de AA foi de 3,60% e, desse modo, menor que 4,2% conforme prescreve a referida norma. O CL-RS atingiu um teor de AA de 5,42% podendo ser classificado como “convencional” uma vez que o resultado ficou dentro dos limites de 4,2% a 6,2%.

Diante da resistência alcançada do CL-RS (AAE 1250°C) de 12,54 MPa, não se pode classificá-lo como CLE. Essa resistência permite a sua utilização para artefatos de concreto que necessitam de uma resistência próxima aos limites estabelecidos por normas, ou mesmo a produção de blocos estruturais, como os da classe AE com resistência mínima de 6 MPa, conforme a NBR 6136 (ABNT, 2014). Apesar do CL-RS não ser classificado como estrutural, apenas de enchimento, de acordo com os resultados experimentais, seu potencial para esse fim não pode ser descartado. Assim, outros parâmetros precisam ser aferidos, como a areia, o fator a/c, ou mesmo as propriedades da matriz, caso pretenda-se usar o AAE-RS sem se alterar a queima de 1250°C.

O FE do CLE-1506 mostrou uma boa eficiência (13,77 MPa.dm<sup>3</sup>/kg), uma vez que concretos normais (CN) em sua grande maioria, ao utilizar agregados basálticos ou de gnaiss, apresentam em média FE de 10 a 14 MPa.dm<sup>3</sup>/kg, para concretos com resistência entre 25-35 MPa. Ressalta-se que desvio padrão da fcm do CLE-1506 foi de 1,21 MPa. O desvio padrão do CL-RS (1250°C) foi de 0,26 MPa. Essa diferença de desvio padrão pode também ser atribuída ao formato dos agregados AAE-RS (Figura 27), outro fator que deve ser ponderado, na análise dos resultados.

### 5.2.2 Concreto utilizando AAE-1300°C

Com base nos estudos realizados com o AAE-RS a 1300°C, produziu-se um CL-RS com a mesma matriz, mesmo traço e fator de água cimento aparente de 0,8, com o objetivo de verificar as propriedades desse concreto, as quais são apresentadas na Tabela 39.

Tabela 39 - Propriedade do CL-RS com AAE a 1300°C.

Concreto	ME (kg/dm <sup>3</sup> )	AA (%) 24 horas	AA (%) 72 horas	fcm (MPa)	FE (MPa.dm <sup>3</sup> /kg)
CL-RS	1,22	5,56	5,88	3,94±0,53	3,23

Com base nos resultados encontrados é possível afirmar que o CL-RS (AAE-RS 1300°C) é atrativo ao uso de isolamento termoacústica, como capas de última laje, divisórias, etc. Notou-se uma perda significativa de resistência quando se compara os concretos utilizando AAE-1250°C e AAE-1300°C. Com aumento de temperatura de apenas 50°C na

queima do agregado (o equivalente a 4%), houve uma perda de 69% na resistência desse concreto. Ao se observar a AA do CL-RS (AAE 1250°C) e CL-RS (AAE-1300°C) respectivamente 5,42% e 5,88%, houve um aumento de 8,4%.

Ressalva-se que a resistência alcançada do CL-RS (AAE 1300°C) 3,94 MPa permite seu uso como tijolos de fechamento os quais devem ter resistência de 2 MPa. Quanto ao teor de AA desse concreto, pode-se classificá-lo “Convencional”, conforme NBR 9778 (ABNT, 2005).

### 5.2.3 Concreto utilizando AAE-1100°C

No estudo do concreto com o AAE queimado a 1100°C foi avaliada também a variação do fator a/c de 0,5 a 0,8, mantendo os outros parâmetros idênticos aos estudos anteriores. Ao se observar a resistência à compressão e a massa específica na Tabela 40, verifica-se que se conseguiu produzir um CLE que atendesse a massa específica máxima de 2,00 kg/dm<sup>3</sup>, com uma leve variação de até 2,10 kg/dm<sup>3</sup>. O CLE-RS com fator a/c 0,5 ficou pouco acima desse parâmetro (2,04 kg/dm<sup>3</sup>). Acredita-se que esta ME pode ser facilmente corrigida com pequena alteração no traço, pois essa variação está mesmo dentro de parâmetros de incertezas, como ocorreu no fator a/c 0,8. Com pequena correção da massa específica, todos os traços poderiam ser considerados como de concreto leve estrutural ( $f_{cm} > 17$  MPa).

Tabela 40 - Propriedades do CLE-RS com AAE a 1100°C.

<b>Fator</b>	<b>ME</b>	<b>AA (%)</b>	<b>AA (%)</b>	<b>f<sub>cm</sub></b>	<b>FE</b>
<b>a/c</b>	<b>(kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>24 horas</b>	<b>72 horas</b>	<b>(MPa)</b>	<b>(MPa.dm<sup>3</sup>/kg)</b>
0,5	2,04	1,97	2,03	30,56±1,23	14,98
0,6	2,00	0,90	0,92	29,79±2,01	14,88
0,7	2,00	1,00	1,00	25,81±0,88	12,89
0,8	2,10	0,96	0,96	25,52±1,36	12,17

Na questão de trabalhabilidade, muito embora não se tenha feito o teste de abatimento do cone (*slump test*), devido à limitação de produção do material, observou-se no manuseio dos materiais uma melhor trabalhabilidade com fator 0,6, pela significativa facilidade de moldagem do concreto. Digno de nota que utilizando o fator 0,5 houve grande dificuldade na

moldagem dos corpos de prova, em virtude da menor quantidade de água, sendo recomendável o uso de aditivos para esse fator. Os fatores 0,7 e 0,8 mostram uma fluidez elevada.

O maior fator de eficiência foi de 14,98 MPa.dm<sup>3</sup>/kg, utilizando a relação a/c 0,5, praticamente igual ao valor de a/c 0,6 com 14,88 MPa.dm<sup>3</sup>/kg. Quando considera-se a melhor trabalhabilidade no fator a/c 0,6, nota-se a vantagem de trabalhar com esse fator. A ME tendeu a uma constante de 2,00 kg/dm<sup>3</sup>, sendo esse o limite para um CL, CLE e CLAD. (Tabela 40).

Apesar de ter um teor de água consideravelmente maior, o fator a/c em 0,8 atingiu a resistência de um CLE, chegando a fcm de 25,52 MPa.

Como não houve uma variação significativa da massa específica, o FE foi praticamente controlado pela fcm em todas as relações a/c, como pode ser visto na Figura 37. Foi observado que a variação entre a fcm do CL com fator 0,5 e 0,6 encontra-se dentro do desvio padrão e o mesmo ocorre com os fatores 0,7 e 0,8.

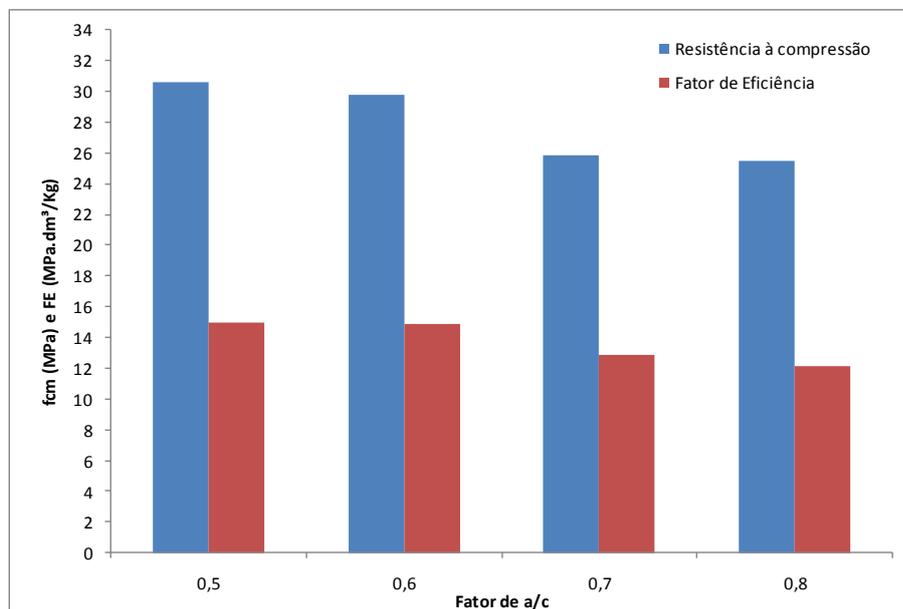


Figura 37- fcm e FE em relação ao fator a/c com AAE 1100°C

A Tabela 41 mostra os resultados dos concretos produzidos com os AAE-RS queimados em diferentes temperaturas para o fator a/c aparente de 0,8. A Figura 38 destaca que o FE sofre grande influência da fcm dos concretos. É interessante notar na Tabela 41 que

segundo o FE o melhor agregado foi o AAE-RS-1250°C, mas o melhor concreto foi o CLE-1100°C. Entretanto, esse concreto apresentou uma ME no limite máximo prescrito pela norma NBR 9778 (2,00 dm<sup>3</sup>/kg), ao mesmo tempo, sabe-se que um concreto convencional alcança facilmente um FE de 12 MPa.dm<sup>3</sup>/kg (fcm 30 MPa e ME 2,5 dm<sup>3</sup>/kg). Em outras palavras, acredita-se que o AAE-RS-1250°C seja o melhor para se formular um CLE. Para tanto, seria necessário se queimar o agregado em uma temperatura um pouco menor (ex. 1220°C), ou, simplesmente, ajustando-se alguns parâmetros da formulação do concreto (areia, traço, a/c, entre outros), como já mencionado anteriormente.

Tabela 41 – Propriedades dos CL-RS com fator a/c =0,8 e dos AAE-RS.  
ME: massa específica; fcm: res. à compressão; FE: fator de eficiência.

<b>Concreto</b>			
<b>Agregado</b>	<b>fcm (MPa)</b>	<b>ME(dm<sup>3</sup>/kg)</b>	<b>FE (MPa.dm<sup>3</sup>/kg)</b>
CLE-RS-1100°C	25,52	2,10*	12,17
CL-RS-1250°C	12,54	1,48	8,47
CL-RS-1300°C	3,94	1,22	3,23
AAE-RS-1100°C	1,30	2,07	0,63
AAE-RS-1250°C	0,80	0,85	0,94
AAE-RS-1300°C	0,10	0,56	0,18

\*Facilmente alcançaria uma ME=2,00 kg/dm<sup>3</sup> para classificação em CL.

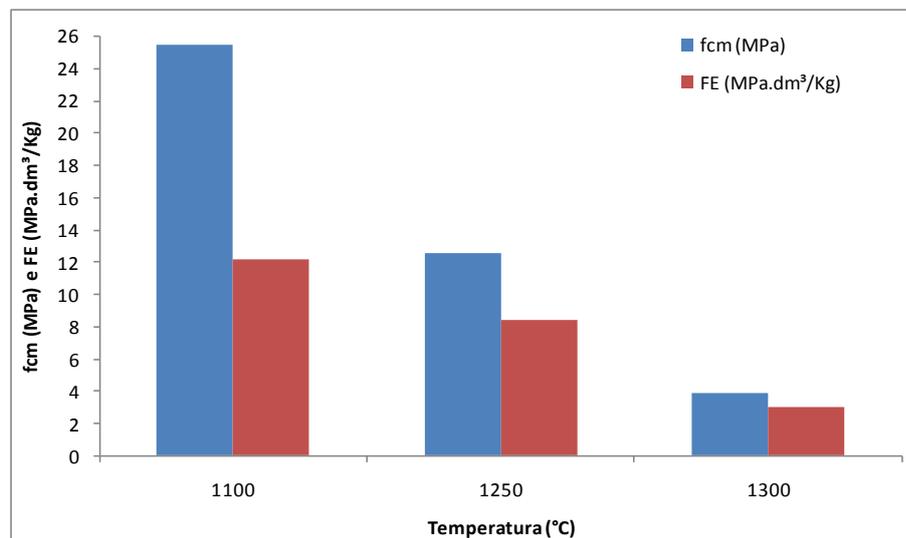


Figura 38 - Relação fcm e FE dos 3 CL-RS.

### 5.3 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

É possível se estimar o módulo de deformação com base na  $f_{cm}$  (NBR 6118, 2014), obtendo-se o módulo de deformação inicial ( $E_{ci}$ ) e o módulo de deformação secante ( $E_{cs}=0,85 E_{ci}$ ). Seus parâmetros acompanham a mesma tendência da  $f_{cm}$  (Tabela 42).

Tabela 42-Demonstrativo do Módulo de Deformação do CL e CLE

Concreto	Temperatura de queima do AAE	Fator a/c Aparente	Fator a/c Real	$f_{cm}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	$E_{cs}$ (GPa)
CLE-1506	1250°C	0,8	0,64	20,92	25,61	21,76
CL-RS	1250°C	0,8	0,71	12,54	19,83	16,86
CL-RS	1300°C	0,8	0,75	3,94	11,11	9,44
CLE-RS	1100°C	0,8	0,72	25,52	28,29	24,90
CLE-RS	1100°C	0,7	0,62	25,81	28,45	24,18
CLE-RS	1100°C	0,6	0,52	29,79	30,56	25,98
CLE-RS	1100°C	0,5	0,42	30,56	30,95	26,31

### 5.4 RELAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA ARGAMASSA E DO CONCRETO EM FUNÇÃO DO FATOR A/C.

Essa avaliação foi realizada somente para o CLE-1100°C, já que nesse concreto foi estudada a variação do fator a/c. A argamassa foi preparada com o mesmo traço do concreto 1:2,4.

Com base na Tabela 43, é possível se verificar que há uma relação direta entre o aumento da resistência da argamassa e o aumento da resistência do concreto, em menores teores de água. O comportamento da resistência entre os dois materiais em função do fator a/c é facilmente notado por meio da Figura 39 ilustra. Nos fatores a/c 0,7 e 0,8, infere-se que a resistência da argamassa é menor em função da maior quantidade de água e, conseqüentemente, maior porosidade. Por conseguinte, a absorção de água do AAE diminui a água de amassamento do concreto, justificando sua maior resistência. Para os fatores a/c 0,6 e 0,5, a  $f_{cm}$  da argamassa foi superior, como era esperado.

Tabela 43- Relação fcm do CLE-1100°C e Argamassa.

Fator a/c	Concreto fcm(MPa)	Argamassa fcm(MPa)
0,8	25,52	14,99
0,7	25,81	23,02
0,6	29,79	32,59
0,5	30,56	37,56

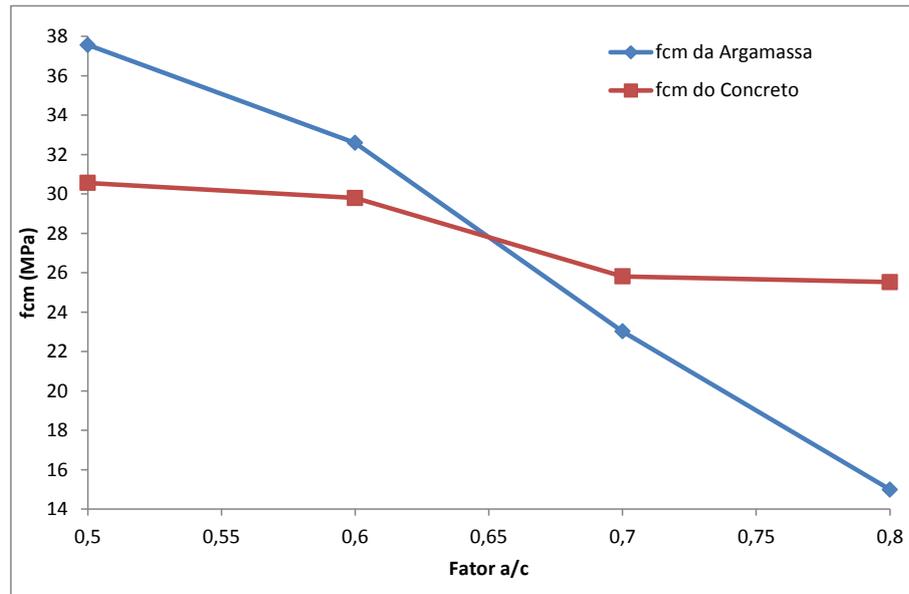


Figura 39 – fcm do CLE-RS-1100°C e da argamassa em função do fator a/c.

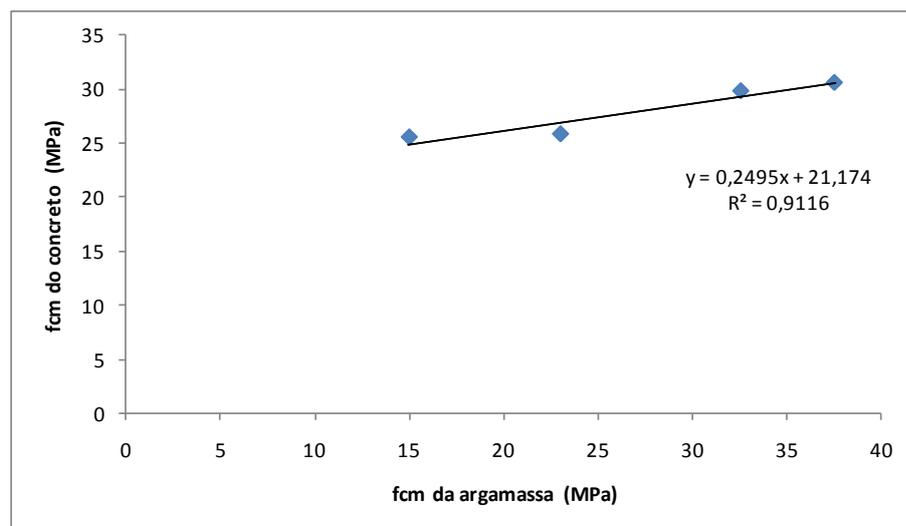


Figura 40 – Relação entre a fcm da argamassa e do CLE-RS-1100°C variando a/c

A Figura 40 apresenta o mesmo padrão registrado por Rossignolo (2009) para se calcular a resistência ótima (ver Revisão Bibliográfica). Não se obteve uma inflexão na curva da Figura 40, a qual representa a resistência ótima do concreto, ou seja, acima da qual a adição de cimento (aumento da resistência da argamassa) não propicia ganho de resistência no concreto leve. Na Figura 40, considerando-se que a resistência da argamassa seja controlada pelo fator  $a/c$ , pode-se concluir que o aumento da resistência da argamassa mostrou a tendência de contribuir continuamente ao aumento da resistência do concreto. No entanto, como o ângulo da reta é pequeno, esse ganho é relativo. Pode ser mais vantajoso, caso se precise aumentar a resistência do CL, avaliar a influência do traço, da distribuição granulométrica dos agregados, ou até mesmo, do aumento da resistência do agregado graúdo.

## 5.5 CUSTO DO AAE-1506 E AAE-0500

A Tabela 44 apresenta o custo do AAE por  $m^3$  e do transporte a granel em função da distância da fábrica da Cinexpan, podendo-se verificar até 2500 km o valor do  $m^3$ . O fato que se procura destacar é que o custo do transporte é tão significativo que pode dobrar o custo do material, como ocorre a ~1500 km. A Tabela 45 apresenta o mesmo estudo de custo, porém em sacos de 50 litros.

A Tabela 46 apresenta o custo por  $m^3$ , tendo outros parâmetros financeiros, como o custo em reais, dólar americano, o custo unitário básico da construção civil e o por saco de cimento CP II-32, a fim de se facilitar a atualização dos dados. Esses valores foram obtidos a partir de um orçamento feito com a empresa Cinexpan, juntamente com o de uma transportadora. Valores obtidos em dezembro de 2018.

Tabela 44- Custo do AAE em função da distância (R\$/ $m^3$ ).

<b>AAE Tipo</b>	<b>Retira Fábrica</b>	<b>200 km</b>	<b>500 km</b>	<b>1000 km</b>	<b>1500 km</b>	<b>2000 km</b>	<b>2500 km</b>
1506	228,00	265,00	323,00	418,00	448,00	548,00	638,00
500	221,00	260,00	317,00	411,00	441,00	541,00	631,00

Tabela 45- Custo do AAE em função da distância (R\$/por saca).

<b>AAE Tipo</b>	<b>Retira Fábrica</b>	<b>200 km</b>	<b>500 km</b>	<b>1000 km</b>	<b>1500 km</b>	<b>2000 km</b>	<b>2500 km</b>
1506	16,50	18,35	21,25	26,00	27,50	32,50	37,00
500	16,00	17,95	20,80	25,50	27,00	32,00	36,50

Tabela 46- Custo do AAE por m<sup>3</sup> utilizando 4 referenciais econômicos

<b>AAE</b>	<b>Retira Fábrica</b>	<b>200 km</b>	<b>500 km</b>	<b>1000 km</b>	<b>1500 km</b>	<b>2000 km</b>	<b>2500 km</b>
<b>R\$/m<sup>3</sup></b>	228,00	265,00	323,00	418,00	448,00	548,00	638,00
<b>U\$/m<sup>3</sup></b>	60,16	69,92	85,22	110,29	118,21	144,59	168,34
<b>cub/m<sup>3</sup></b>	0,14	0,16	0,19	0,28	0,27	0,33	0,38
<b>sc.cim./m<sup>3</sup></b>	10,86	12,62	15,38	19,90	21,33	26,10	30,38

## 5.6 CUSTO DO CONCRETO LEVE

### 5.6.1 Concreto Leve x Concreto Normal de 10 MPa

As Tabelas 47 e 48 apresentam a comparação dos custos por m<sup>3</sup> do concreto leve e do concreto normal com resistência de 10 MPa, respectivamente, com valores quantitativos dos insumos propostos pela TCPO-10 (1996). Os valores dos custos por estados e distrito federal foram retirados do SINAPI de janeiro de 2019. As tabelas apresentam os respectivos códigos. Foi inserida a distância aproximada entre o fabricante até a capital dos estados, para que se pudesse calcular o custo do AAE até esses locais, conforme as Tabelas 47 (e Tabela 50). No caso de São Paulo, considerou-se o cálculo para um raio de 200 km do fabricante. A Tabela 49 apresenta os custos indexados.

É possível se verificar que no RS o custo do CL é 47% maior em relação a SP. Na Bahia, onde se tem o maior custo do CL em função do frete, o custo em relação a SP aumenta em 61% (Tabela 47).

Quanto ao Concreto Normal, no estado do RS o custo é 6% maior em relação a SP e na BA é 7% maior. O DF apresentou o maior valor de CN, em virtude do custo da areia e da brita (Tabela 48).

Tabela 47- Custo do CL fck = 10 MPa em 4 Estados e o Distrito Federal. Distâncias válidas somente ao AAE.

Componentes TCPO-10	Consumo	Código SINAPI	Custo	Custo	Custo	Custo	Custo
			SP 200 km	MG 600 km	DF 1000 km	BA 2000 km	RS 1300 km
Cimento	256 kg	1379	99,85	97,28	104,96	145,92	145,92
Areia	0,76 m <sup>3</sup>	367	47,08	49,40	72,20	49,40	43,32
AAE 1506	1,02 m <sup>3</sup>	s/ cód.	270,30	348,84	426,36	558,96	484,50
Servente	6 h	6111	86,58	63,24	61,26	58,50	71,16
Betoneira	0,71 h	87445	1,99	2,06	2,21	2,13	2,04
<b>Custo do CL (R\$/m<sup>3</sup>)</b>			<b>505,80</b>	<b>560,82</b>	<b>666,99</b>	<b>814,91</b>	<b>746,94</b>

Tabela 48- Custo do CN fck = 10 MPa em 4 Estados e o Distrito Federal.

Componentes TCPO-10	Consumo	Código SINAPI	Custo	Custo	Custo	Custo	Custo
			SP	MG	DF	BA	RS
Cimento	254 kg	1379	99,06	96,52	104,14	144,78	144,78
Areia	0,92 m <sup>3</sup>	367	56,99	60,26	87,40	59,80	52,44
Brita 1	0,84 m <sup>3</sup>	4721	39,97	54,94	68,19	47,20	37,38
Servente	6 h	6111	86,58	63,24	61,26	58,50	71,16
Betoneira	0,71 h	87445	1,99	2,06	2,21	2,13	2,04
Transp. Areia	30 km	93588	43,33	41,95	43,05	42,78	43,05
Transp. Brita	30 km	93588	39,56	38,30	39,31	39,06	39,31
<b>Custo do CN (R\$/m<sup>3</sup>)</b>			<b>367,48</b>	<b>357,27</b>	<b>405,56</b>	<b>394,25</b>	<b>390,16</b>

Tabela 49- Custo do CL fck =10 MPa por m<sup>3</sup> utilizando 4 referenciais econômicos

Concreto	Custo SP	Custo MG	Custo DF	Custo BA	Custo RS
R\$/m <sup>3</sup>	505,80	561,00	666,99	814,91	746,94
U\$/m <sup>3</sup>	133,46	148,02	175,99	215,02	197,08
cub/m <sup>3</sup>	0,30	0,34	0,40	0,49	0,45
sc. cimento/m <sup>3</sup>	24,09	26,71	31,76	38,81	35,57

### 5.6.2 Concreto Leve Estrutural x Concreto Normal de 20 MPa

A Tabela 50 apresenta o custo do CLE com 20 MPa. O custo do CLE no RS é 48% maior que o de SP, não se alterando praticamente essa diferença quando comparado com o CL de 10 MPa (47%; Tabela 49). Ao se analisar o CN, observa-se que no RS seu custo é na ordem de 12,8% maior que MG, local onde há o menor custo nacional do concreto normal, em virtude do menor valor do cimento (Tabela 51). A Tabela 52 apresenta os valores de custo indexados.

Tabela 50 – Custo do CLE fck=20 MPa em 4 Estados e o Distrito Federal.

Distâncias válidas somente ao AAE.

Componentes	Consumo	Código SINAPI	Custo	Custo	Custo	Custo	Custo
			SP 200 km	MG 600 km	DF 1000 km	BA 2000 km	RS 1300 km
Cimento	354 kg	1379	138,06	134,52	145,14	201,78	201,78
Areia	0,68 m <sup>3</sup>	367	42,12	44,54	64,60	44,20	38,76
AAE 1506	1,02 m <sup>3</sup>	s/ cód.	270,30	348,84	426,36	558,96	484,50
Servente	6 h	6111	86,58	63,24	61,26	58,50	71,16
Betoneira	0,71 h	87445	1,99	2,06	2,21	2,13	2,04
<b>Custo do CLE (R\$/m<sup>3</sup>)</b>			<b>539,05</b>	<b>593,20</b>	<b>699,57</b>	<b>865,57</b>	<b>798,24</b>

Tabela 51- Custo do CN fck = 20 MPa em 4 Estados e o Distrito Federal.

Componentes	Consumo	Código SINAPI	Custo	Custo	Custo	Custo	Custo
			SP	MG	DF	BA	RS
Cimento	336 kg	1379	131,05	127,69	137,77	191,53	191,53
Areia	0,85 m <sup>3</sup>	367	52,66	55,25	80,75	55,25	48,45
Brita 1	0,84 m <sup>3</sup>	4721	39,97	54,94	68,19	47,20	37,38
Servente	6 h	6111	86,58	63,24	61,26	58,50	71,16
Betoneira	0,71 h	87445	1,99	2,06	2,21	2,13	2,04
Transp. Areia	30 km	93588	40,03	38,76	39,78	39,52	39,78
Transp. Brita	30 km	93588	39,56	38,30	39,31	39,06	39,31
<b>Custo do CN (R\$/m<sup>3</sup>)</b>			<b>391,84</b>	<b>380,24</b>	<b>429,27</b>	<b>433,19</b>	<b>429,65</b>

Tabela 52- Custo do CLE fck =20 MPa por m<sup>3</sup> utilizando 4 referenciais econômicos.

Concreto	Custo SP	Custo MG	Custo DF	Custo BA	Custo RS
R\$/m <sup>3</sup>	539,05	593,20	699,57	865,57	798,24
U\$/m <sup>3</sup>	142,23	156,52	184,58	228,38	210,62
cub/m <sup>3</sup>	0,32	0,35	0,42	0,52	0,48
sc. cimento/m <sup>3</sup>	25,67	28,25	33,31	41,22	38,01

### 5.6.3 Custo do Concreto Leve em relação ao Concreto Normal

A Tabela 53 apresenta em termos percentuais o quanto o custo do CL/CLE é superior ao CN, em relação a cada estado e distrito federal. Observou-se que independente da resistência, no estado de SP, esse percentual é de 38% maior, sendo a menor diferença de todos os estados. Isso explica em parte porque o CL é muito mais difundido nas obras desse estado, pois o seu custo não é tão grande quando comparado com o CN. Uma vez que a densidade do CL é menor, na ordem de 15% a 20% que o CN, o seu uso pode propiciar uma

economia global no custo da obra, já que as construções tornam-se menos onerosas em virtude de menores cargas. É claro que esse custo pode ser relativo, quando se considera apenas pequenos serviços pontuais, como enchimento de piso, ou produção de pequenos artefatos de concreto.

No RS, o uso do CL de AAE encarece em 92% para concretos de 10 MPa e em 86% para 20 MPa, em relação ao CN. Isso demonstra o peso do transporte sobre o custo e, dependendo do tipo de obra, pode inviabilizar a aplicação do CL. Por outro lado, destaca-se que jazidas como a encontrada em Arroio Grande – RS tem um grande potencial do ponto de vista econômico e estratégico, uma vez que até o momento, a oferta de AAE nem sempre é atrativa para o emprego da técnica.

A maior diferença entre o CL/CLE e o CN está na BA, chegando a 107% considerando uma distância de 2000 km da Cinexpan. Isso mostra que a aplicação do concreto leve em estados distantes se mostra pouco atrativa e urge a necessidade de outras plantas de produção no país.

Tabela 53- Acréscimo do custo do CL e CLE em relação ao CN, em porcentagem.

<b>Concreto</b>	<b>fck</b>	<b>SP</b>	<b>MG</b>	<b>DF</b>	<b>BA</b>	<b>RS</b>
		<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
<b>CL</b>	<b>10 MPa</b>	<b>38</b>	<b>57</b>	<b>65</b>	<b>107</b>	<b>92</b>
<b>CLE</b>	<b>20 MPa</b>	<b>38</b>	<b>56</b>	<b>63</b>	<b>100</b>	<b>86</b>

## 6 CONCLUSÃO

O agregado de argila expandida (AAE-RS) produzido com a argila de Arroio Grande-RS apresentou excelentes qualidades técnicas. Quando queimado a 1250°C em laboratório, ele atingiu uma densidade menor que o agregado comercial Cinexpan (AAE-1506), respectivamente, 0,85 e 0,96 g/cm<sup>3</sup>. Isso mostra o grande potencial na utilização como agregado graúdo, propiciando leveza em uma estrutura.

Os concretos produzidos com AAE-RS (1250°C) podem ser classificados como concreto leve (CL). Eles encontram aplicação em artefatos de concreto como churrasqueiras, guias, blocos não-estruturais, pergolados e bancos de concreto, existindo ainda uma cadeia produtiva muito consolidada para esse mercado. Esses CL, alcançaram uma boa resistência à compressão, na ordem de 12,54 MPa, com um fator aparente água/cimento de 0,8 (sem descontar a absorção do agregado). É possível ainda se produzir artefatos estruturais (bloco estrutural), uma vez que, conforme a norma, a resistência mínima deste tipo de produto é de 6 MPa.

Os resultados mostraram que a absorção de água do AAE-RS foi menor que o AAE-1506 (12,73% e 18,8%, respectivamente). Isso indica uma boa qualidade do material nesse quesito e conseqüentemente do processo de queima realizado. Esse é um resultado bastante relevante do material produzido em laboratório, já que o excesso de absorção pode prejudicar a reação do cimento no concreto. Para que a água de amassamento não seja parcialmente absorvida pelo agregado, necessitando em cada caso de cálculos prévios, pode-se recorrer à pré-saturação. Nesse caso, ao se utilizar o AAE-RS é necessário 6% de umidificação (absorção do AAE em 5 horas de imersão em água). Observou-se ainda que em 24 horas de imersão, tanto o agregado como o concreto produzido (curado), atingem 98% de sua capacidade de absorção.

Concretos produzidos com o AAE-RS (queimado a 1100°C) apresentaram uma massa específica de 2,00 kg/dm<sup>3</sup> (CLE-RS-1100°C), enquanto que para o AAE-RS queimado em 1300°C, a massa específica foi de 1,22 kg/dm<sup>3</sup> (CL-RS-1300°C). Esses materiais atingiram também nesse atributo o necessário para sua classificação como concretos leves (NBR 12655,

ABNT 2015). Ressalva-se que é possível ainda produzir concretos muito leves com AAE-RS queimado a 1300°C, mas a perda de resistência nessa faixa é muito alta, podendo ser usado apenas como enchimento.

Com o AAE-1100°C conseguiu-se atingir as maiores resistências dentre os concretos produzidos, podendo-se classificá-los como um concreto estrutural (CLE-RS-1100°C). A resistência mínima alcançada foi de 25,52 MPa, superior aos 17 MPa, o qual já suficiente para classificação como concreto estrutural. Esse mesmo concreto alcançou uma resistência máxima ( $f_{cm}$ ) de 30,56 MPa, ou seja, pode ser utilizado em obras de porte médio, como em edifícios de até 4 pavimentos. Essa variação de resistência foi alcançada variando-se o fator de  $a/c$  aparente entre 0,5 a 0,8.

O controle da temperatura de queima e, em geral, do processo de queima (temperatura, taxa de aquecimento/resfriamento, tipo de forno) é essencial na determinação das propriedades do AAE produzido. Nas três temperaturas testadas, 1100°C, 1250°C e 1300°C, os agregados apresentaram forte variação em seu tamanho, densidade e resistência mecânica, os quais interferem diretamente nas propriedades do concreto produzido. O AAE-RS e o AAE-1506 apresentaram propriedades diferentes, as quais podem ser consequência do processo de queima, além do tipo de argila.

Avaliando-se os AAE-RS produzidos em diferentes temperaturas de queima, considera-se que o AAE-RS-1250°C seja o melhor para se formular um CLE. Para tanto, seria necessário se queimar esse agregado em uma temperatura um pouco menor (ex. 1220°C), ou, simplesmente, ajustar-se alguns parâmetros da formulação do concreto (areia, traço,  $a/c$ , aditivos, entre outros). Isso se deve ao fato de que na temperatura de 1250°C o AAE apresentou uma excelente expansão e uma ótima resistência. O AAE-RS-1100°C apresentou maior resistência, mas sua expansão foi considerada baixa. O AAE-RS-1300°C mostrou excelente expansão, mas teve uma resistência muito baixa.

O custo do AAE é de R\$ 228,00/m<sup>3</sup> para retirada na fábrica (Várzea Paulista-SP) e cerca de R\$ 418,00/m<sup>3</sup> no Rio Grande do Sul. O custo do concreto leve é cerca de 38% superior ao concreto normal no estado de São Paulo. Já no Rio Grande do Sul, distante

aproximadamente 1000 km da Cinexpan, esse valor sobe para 92%, devido principalmente ao custo do transporte do AAE. Isso demonstra que para se aumentar a aplicação do concreto leve em estados distantes de São Paulo é muito importante a instalação de outras plantas de produção de AAE no país, as quais dependem da exploração de novas jazidas de argila expansiva.

## 7 SUGESTÃO PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS

Os AAE-RS produzidos não receberam aditivos ou qualquer tipo de expansor, diferente do que ocorre com os do fabricante. Assim, sugere-se um estudo utilizando os mais diversos expansores com o objetivo de melhorar seu desempenho em concretos leves.

Mais estudos precisam ser realizados quanto ao processo de produção do AAE em laboratório, como a influência da taxa de aquecimento e o rápido resfriamento, para uma sinterização/produção, assemelhando-se ainda mais com o processo industrial.

O traço escolhido limitou-se à matriz 1:4, porém outros traços podem ser testados, com matriz 1:3 ou 1:5, com o objetivo de verificar as principais propriedades e estabelecer comparações com os dados aqui apresentados.

O estado da arte reconhece que agregados menores produzem resistências maiores, assim a exemplo de Maycá et. al. (2009), estudos podem ser feitos, estabelecendo-se apenas uma granulometria, como somente de 6,3mm ou 9,5mm, em especial ao se utilizar CP's com dimensão de  $\varnothing 5 \times 10$  cm.

O presente trabalho demonstrou a viabilidade da produção de AAE para concretos leves (CL) e concretos leves estruturais (CLE), mas não se realizaram estudos para um concreto leve de alto desempenho (CLAD), tendo a necessidade de maiores estudos para o desenvolvimento desse último tipo de concreto.

## 8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos Corpos de Prova NBR 5738. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos NBR 5739. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto: procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. NBR 6136. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. Agregados para concreto - Especificação. NBR 7211. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. Concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupo de resistência e consistência. NBR 8953. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. NBR 9778. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. Concreto de cimento portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento. NBR 12655. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios. NBR 12721. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisito. NBR 15900. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. NBR 16607. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. Agregados – Determinação da massa unitária e de volume de vazios. NBR NM 45. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. Agregado miúdo – Determinação da massa específica, massa aparente e absorção de água. NBR NM 52. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa aparente e absorção de água. NBR NM 53. Rio de Janeiro, 2009.

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

ABCP. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro. [www.abcp.org.br/imprensa/noticia/pesquisa-inedita-e-exclusiva](http://www.abcp.org.br/imprensa/noticia/pesquisa-inedita-e-exclusiva). Acesso em 26/05/2018

ABRAPEX. Manual de utilização de EPS na construção civil. 1ºed. Editora PINI, São Paulo, 2006.

AGNESINI, M.V.C; GOMES NETO, D.P. Microconcretos leves com argila expandida: influência da adição de sílica ativa no fator de eficiência em dosagem de pré-fabricados pequena espessura: estudo de caso. In: Congresso Brasileiro do Concreto –IBRACON-40. Rio de Janeiro. 1998.

ALVES, J.D. Manual de tecnologia do concreto 2ºed. Editora Goiânia – UFG, Goiânia,1982.

ANGELIN, A.F; Concreto leve estrutural – Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais. Dissertação de Mestrado, Universidade de Campinas - UNICAMP – Faculdade de Tecnologia, Limeira, 2014.

ARGEX –Argilas expandida, S.A. Catálogo Técnico. Portugal, Aveiro. Acesso 12/11/2018: [www.argex.pt](http://www.argex.pt)

ARDAKANI, A; YAZDANI, M. The relation between particle density and static elastic moduli of lightweight expanded clay aggregates. Applied Clay Science 93-94 (2014) 28–34.

ARMELIN, H.S; et.al; Alta resistência com argila expandida. Revista Ibracon, n. 09, p. 42-47, 1994.

ASSUNÇÃO, J.W; Concreto leve autoadensável – Avaliação da influencia da argila expandida no processo de dosagem e nas propriedades do concreto. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2016.

AYATI, B. et. al. Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate. Construction and Building Materials 162 (2018) 124–131.

AZEREDO, H. A. O edifício e seu acabamento. 4º edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1995.

BAUER, L.A.F. Materiais de Construção. 5º edição volume I e II. São Paulo: Editora LTC. 1994.

BERNARDES, A.G.M.; Urbanismo Mesoamericano Pré-colombiano: Teotihuacán. 2000. 166f. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília –UNB. Brasília-DF. 2008.

BORJA, E.V. Efeitos da adição da argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, 2011.

BOTELHO, M.H.C. Concreto Armado: eu te amo. 2º edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher. 1998

BREMNER, T. W; HOLM, T.A; State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for application in severe marine environments. US Army Corps of Engineer Research in Development. ERDC/SL TR, 2000.

BREMNER, T. W; RIES, J; Stephen J. Hayde: pai da indústria de concreto leve. Centro nacional de artes da construção. American Concrete Institute ([www.concrete.org](http://www.concrete.org)), 2018.

CADORE, W.W; et. al. Análise de Desempenho de concreto Leve com a Utilização de Argila Expandida, EVA e Borracha com Agregado; 60º Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon (ISSN 2175-8182), Foz do Iguaçu, 2018.

CARLOS, J.P. et.al. Avaliação mecânica e química de concreto leve produzido com adição de micro-EPS e argila expandida triturada; 60º Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon (ISSN 2175-8182), Foz do Iguaçu, 2018.

CARÚS, L.A. et. al; Caracterização de argila expandida para uso de concretos leves. 58º Congresso Brasileiro de Cerâmicos. Bento Gonçalves, RS, 2014.

CAMBIO UOL. Disponível em < <https://economia.uol.com.br/cotacoes/>> Acesso em 02/01/2019.

CHUNG, S.Y; et al. The influence of different concrete additions on the properties of lightweight concrete evaluated using experimental and numerical approaches. Construction and Building Materials 189 (2018) 314–322.

CVENT. Disponível em <<https://www.cvent.com/venues/st-louis/hotel/the-chase-park-plaza-royal-sonesta-hotel/venue-02259fe0-0542-4c73-957a>>. Acesso em 09/10/2018.

CINEXPAN; Catálogo Técnico Argila expandida 1506 Brita 0, Várzea Paulista SP, 2018.

COLISEU EM ROMA. Disponível em: <<http://www.viajeleve.net/historia-coliseu-de-roma/>>. Acesso em 10/10/2018.

FLICKR. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/dircinha/9446423695>>. Acesso em 10/10/2018.

LOUTOU, M; HAJJAJI, M; Clayey wastes-based lightweight aggregates: Heating transformations and physical/mechanical properties. Applied Clay Science 150 (2017) 56–62.

MAYCÁ, J., et al., Estudo de resistência à compressão de concretos leves produzidos com argila expandida nacional, 51º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo, IBRACON, 2009.

MAMEDE, F.C; et al; Vantagens da utilização de pré-moldados leves em edifícios de alvenaria estrutural; VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, Belo Horizonte, CEFET,2002.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M; Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 1º Ed; São Paulo, IBRACON, 2008.

MOLINEUX, C.J; et al. Bauxite residue (red mud) as a pulverised fuel ash substitute in the manufacture of lightweight aggregate. Journal of Cleaner Production 112 (2016) 401e408.

MOORE, D. The Pantheon. Romanconcrete.com.(1999). Disponível em: <<http://www.romanconcrete.com/docs/chapt01/chapt01.htm>>. Acesso em 12/10/2018.

NAVIO SELMA. Disponível em: <<https://br.pinterest.com/pin/350154939764546715/>> &<<https://www.crystalbeach.com/selma.htm>> Acesso em 10/10/2018.

NEVILLE, A.M. Propriedades do Concreto. Ed. Bookman. Porto Alegre, 2016.

NEVILLE, A.M; BROOKS J.J. Tecnologia do Concreto. Ed. Bookman. Porto Alegre, 2013.

OZGUVEN, A; GUNDUZ, L; Examination of effective parameters for the production of expanded Clay aggregate. Cement & Concrete Composites 34 (2012) 781–787.

PEREIRA, M.A; Estudo de Adição de argila expandida na formulação de concretos leves. 82f. 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN; Natal.

PEREIRA, C.A. Processo de produção da Cinexpan (Mensagem pessoal) Mensagem recebida <[contato@cinexpan.com.br](mailto:contato@cinexpan.com.br)> em 05/11/2018.

PEREIRA, J.R. L; ROSSIGNOLO, J.A. Influência do agregado no desempenho da resistência à compressão do concreto: comparação entre basalto e argila expandida. V ENCONTRO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA CIVIL E ARQUITETURA- ENTECA. Anais. Maringá, 2005.

PETRUCCI, E.G.R. Materiais de Construção. 11ª edição. (1998) São Paulo: Editora Globo. 1973.

PINHEIRO, A.C.F.B; CRIVELARO, M. Planejamento e Custo de Obras 1ª Edição. São Paulo: Editora Érica. 2014.

QUEIROGA, M.V.M de. Concreto de Alta Resistência: propriedades, características e experimentações. 1ª edição. Canoas: Editora ULBRA. 2000.

RASHAD, A. M; Lightweight expanded Clay aggregate as a building material – An overview. Construction and Building Materials 170 (2018) 757–775

RAMALHO, M.A; CORRÊA M.R.S. Projeto de edifícios de alvenaria estrutural. 1ª ed. Editora Pini. São Paulo, 2003.

ROSSIGNOLO, J.A. Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações. Editora Pini. São Paulo, 2009.

ROSSIGNOLO, J.A. Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos-dosagem, produção, propriedades e microestrutura. 2003.211f. Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo – USP; São Carlos, 2003.

SACHT, H.M. Painéis de vedação de concreto moldados in loco: Avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2008.

SACHT, H.M; SANTOS, W.N. A influência do teor de argila expandida na condutividade térmica do concreto leve. In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - Ibracon . Anais, Bento Gonçalves, 2007.

SÁNCHEZ, M.G.P; GOMES, N. S; CARNEIRO, M.A; Caracterização Mineralógica dos lutitos diatomáceos da Península de Santa Elena, Equador. Rem: Ver. Esc. Vol. 63 nº 02 Ouro Preto – MG. Jun. 2010.

SANTIS, B.C; Agregado leve de argila calcinada para uso em concreto estrutural: viabilidade da cerâmica vermelha do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2012.

SANTOS, P.S; Ciência e Tecnologia das Argilas 2º ed. Rio de Janeiro. Editora Edgard Blucher. 1989.

SCHWANTES, C.G.G; Concreto estrutural leve: resistência à compressão e módulo de elasticidade usando argila expandida como agregado graúdo. Trabalho de Conclusão de Curso-TCC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2012.

SILVA, G.R; Manual de traços do concreto. 3ª edição. Livraria Nobel. São Paulo, 1975.

SINDUSCON –SP. Disponível em: < <https://www.sindusconsp.com.br/>> Acesso em 19/01/2019.

TAKAHASHI, E.N. Utilização da escória de alumínio na fabricação de argila expandida. Dissertação de Mestrado. IPEN-Autarquia Associada a USP. São Paulo, 2006.

TCPO-10. Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos. 10º edição. Editora Pini, São Paulo, 1996.

TUPI. Catálogo Técnico Tupi Cimentos S.A. Carandaí, MG, Acesso: 16/10/2018: <<http://www.cimentotupi.com.br/cimentotupi/Portugues/detUnidades.php>>

VIAJAR ENTRE VIAGENS. Disponível em: <<https://www.viajarentreviagens.pt/mexico/el-tajin/>>. Acesso em 12/10/2018.

VIEIRA, M.G; Betões de elevado desempenho de agregados leves – Durabilidade e microestrutura. 2000. 126f. Dissertação de Mestrado. IST- Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.

ZHANG, M. H; GJØRV O. E. Penetration of cement past into lightweight aggregate. Cement and concrete research. Vol. 22 pp. 47-55. NTH – Norwegian Institute of Technology. (1992).