

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Caetano Guilherme Gottlieb Schwantes

**CONCRETO ESTRUTURAL LEVE:
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE
ELASTICIDADE USANDO ARGILA EXPANDIDA COMO
AGREGADO GRAÚDO**

Porto Alegre
junho 2012

CAETANO GUILHERME GOTTLIEB SCHWANTES

**CONCRETO ESTRUTURAL LEVE:
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE
ELASTICIDADE USANDO ARGILA EXPANDIDA COMO
AGREGADO GRAÚDO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Ana Paula Kirchheim
Coorientadora: Cristina Vitorino da Silva**

Porto Alegre
junho 2012

CAETANO GUILHERME GOTTLIEB SCHWANTES

**CONCRETO ESTRUTURAL LEVE:
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE
ELASTICIDADE USANDO ARGILA EXPANDIDA COMO
AGREGADO GRAÚDO**

Porto Alegre, junho de 2012

Prof. Ana Paula Kirchheim
Dra. em Engenharia pela UFRGS
Orientadora

Cristina Vitorino da Silva
Mestre em Engenharia pela UFRGS
Coorientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ana Paula Kirchheim
Dra. em Engenharia pela Universidade
Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Ruy Alberto Cremonini
Dr. em Engenharia pela Universidade
de São Paulo

Eng. Cristina Vitorino da Silva
Mestre em Engenharia pela Universidade
Federal do Rio Grande do Sul

Eng. Abrahão Bernardo Rohden
Mestre em Engenharia pela Universidade
Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Odalgiro e Vera e a meu irmão, Henrique, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a professora Ana Paula Kirchheim, orientadora deste trabalho, pela atenção, dedicação, paciência e apoio nas várias situações de desespero.

Agradeço a engenheira Cristina Vitorino da Silva, coorientadora deste trabalho, pela atenção e dedicação, que me orientou e, entre outras atividades, auxiliou na procura de fornecedores dos materiais necessários para execução do trabalho e na preparação dos materiais em laboratório.

Agradeço ao pessoal do NORIE pelo apoio dado nos ensaios realizados.

E por fim, agradeço a professora Carin Maria Schmitt pela atenção e dedicação que me foi dada na elaboração desse trabalho.

Há muitas maneiras de avançar, mas só uma maneira de
ficar parado.

Franklin D. Roosevelt

RESUMO

Com o aumento da demanda por imóveis, as empresas construtoras buscam cada vez mais a otimização de processos, pois assim, podem diminuir o tempo de construção e entrega dos mesmos. Frente a esse cenário, têm-se a opção de usar o concreto leve para substituir, o convencional, buscando diminuir o consumo de concreto e, conseqüentemente, reduzir as seções dos elementos estruturais, pois haverá uma redução nos esforços da estrutura. No entanto, por ser um material relativamente novo no mercado, estudos relacionados com este tipo de concreto se caracterizam por ser inovadores, visto que há uma carência de pesquisas neste tema, principalmente nos aspectos relacionados com o módulo de elasticidade. Assim, esse trabalho objetiva avaliar a resistência à compressão, e o módulo de elasticidade de concretos estruturais leves com argila expandida com agregado graúdo, e também, a existência de uma relação entre as duas propriedades nos concretos estudados. O método do IPT/EPUSP foi utilizado para a dosagem dos concretos, na sequência foi adicionado 5% de sílica de casca de arroz para verificar a melhora nas propriedades avaliadas. Todas as misturas realizadas obtiveram a resistência mínima característica estipulada para concretos estruturais leves, 17 MPa. A adição de sílica de casca de arroz se mostrou benéfica no ganho de resistência da maioria dos concretos avaliados. Em termos de módulo de elasticidade, foram encontrados valores entre 45% e 65% do módulo de elasticidade estimados para concretos convencionais com mesma resistência à compressão. Não se encontrou uma relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade para os concretos estudados.

Palavras-chave: Concreto Leve. Módulo de Elasticidade. Resistência à Compressão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de etapas de pesquisa.....	16
Figura 2 – Concretos com agregados leves.....	20
Figura 3 – Concretos celulares.....	20
Figura 4 – Concretos sem finos.....	20
Figura 5 – Intervalos típicos de massa específica de concretos com agregados leves.....	21
Figura 6 – USS Selma.....	22
Figura 7 – Ponte New Eidsvoll na Noruega.....	23
Figura 8 – Plataforma petrolífera Heidrun TLP.....	24
Figura 9 – Edifício da Southwestern Bell Telephone Company.....	25
Figura 10 – Edifícios de múltiplos pavimentos executados em concreto leve.....	26
Figura 11 – Pavilhão de Portugal.....	26
Figura 12 – Sequência de montagem de habitação pré-fabricada de concreto leve.....	27
Figura 13 – Efeito da frequência de vibração na flutuação dos agregados leves.....	29
Figura 14 – Influência da massa específica do concreto com argila expandida no valor da condutividade térmica.....	30
Figura 15 – Zona de transição agregado-pasta do concreto com agregado tradicional....	33
Figura 16 – Zona de transição agregado-pasta do concreto com agregado leve.....	33
Figura 17 – Relação entre resistência à compressão e granulometria da argila expandida.....	34
Figura 18 – Comportamento da curva tensão-deformação dos concretos com agregados leve.....	37
Figura 19 – Zonas que se encontram as composições químicas das argilas com característica expansiva.....	39
Figura 20 – Argila expandida Cinexpan 2215.....	40
Figura 21 – Argila expandida Cinexpan 1506.....	40
Figura 22 – Imagem por MEV da argila expandida.....	41
Figura 23 – Fluxograma simplificado do método de dosagem IPT/EPUSP.....	47
Figura 24 – Redução da amostra inicial pelo método do quarteamento.....	50
Figura 25 – Exclusão de parte da amostra inicial pelo método do quarteamento.....	50
Figura 26 – Sequência de peneiras para análise da granulometria.....	51
Figura 27 – Aparência do concreto com apenas areia comercialmente denominada como média como agregado miúdo.....	53
Figura 28 – Materiais separados para mistura em betoneira.....	56
Figura 29 – Processo de adensamento manual.....	57

Figura 30 – Corpos de prova cobertos por material não absorvente.....	58
Figura 31 – Câmara com umidade e temperatura controladas.....	58
Figura 32 – Verificação do abatimento de tronco de cone.....	60
Figura 33 – Resultados de resistência à compressão com teor de materiais secos (m)=3,8.....	62
Figura 34 – Resultados de resistência à compressão com teor de materiais secos (m)=4,2.....	62
Figura 35 – Resultados de resistência à compressão com teor de materiais secos (m)=4,6.....	62
Figura 36 – Resultados de resistência à compressão em função do teor de materiais secos (m).....	63
Figura 37 – Resultados de resistência à compressão em função do teor de sílica de casca de arroz.....	64
Figura 38 – Resultados de módulo de elasticidade dos concretos.....	66
Figura 39 – Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão dos concretos.....	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Histórico dos principais trabalhos com uso de cinza de casca de arroz.....	43
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de referência da massa específica dos concretos leves estruturais.....	19
Tabela 2 – Resistência ao fogo do concreto leve em função do tipo de agregado.....	31
Tabela 3 – Relação entre resistência à compressão e o teor de cimento.....	34
Tabela 4 – Características de alguns agregados leves comerciais.....	40
Tabela 5 – Composição química da cinza de casca de arroz, conforme diversos autores.....	42
Tabela 6 – Caracterização física da cinza de casca de arroz.....	44
Tabela 7 – Caracterização física da argila expandida 1506.....	52
Tabela 8 – Caracterização da areia comercialmente denominada como média.....	53
Tabela 9 – Caracterização da areia comercialmente denominada como fina.....	54
Tabela 10 – Resultado da dosagem experimental.....	59
Tabela 11 – Abatimento de tronco de cone e quantidade de aditivo.....	60
Tabela 12 – Resultados da resistência à compressão.....	61
Tabela 13 – Resultados do módulo de elasticidade.....	65
Tabela 14 – Estimativa de módulo de elasticidade para concretos convencionais.....	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	14
2.2.1 Objetivo principal	14
2.2.2 Objetivo secundário	14
2.3 PRESSUPOSTO.....	15
2.4 PREMISA.....	15
2.5 DELIMITAÇÕES	15
2.6 LIMITAÇÕES	15
2.7 DELINEAMENTO	15
3 CONCRETO ESTRUTURAL LEVE	18
3.1 DEFINIÇÃO.....	18
3.2 CLASSIFICAÇÃO.....	19
3.3 APLICAÇÕES.....	21
3.4 PROPRIEDADES.....	28
3.4.1 Trabalhabilidade	28
3.4.2 Propriedades térmicas, acústicas e resistência ao fogo	30
3.4.3 Durabilidade	31
3.4.4 Interface entre agregado e a matriz de cimento	32
3.4.5 Resistência à compressão.....	33
3.4.6 Módulo de deformação	35
3.5 MATERIAIS.....	37
3.4.1 Argila expandida.....	38
3.4.2 Sílica de casca de arroz.....	42
4 DOSAGEM	45
5 PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	49
5.1.1 Cimento Portland CPV-ARI.....	49
5.1.2 Agregado graúdo.....	49
5.1.3 Agregado miúdo.....	52
5.1.4 Sílica de casca de arroz.....	54
5.1.5 Aditivo.....	55

5.1.6 Água	55
5.2 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	55
5.2.1 Mistura dos materiais	55
5.2.2 Moldagem dos corpos de prova	56
5.2.3 Cura	57
5.3 DOSAGEM EXPERIMENTAL	59
6 ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	61
6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	61
6.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE	65
6.3 RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	67
7 CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

A constante busca da Engenharia em otimizar processos e custos faz com que, cada vez mais, se use materiais alternativos para que esses objetivos sejam alcançados. Nas obras com estrutura de concreto, o peso próprio representa uma parcela muito grande de carga total atuante e a redução da massa específica do concreto se torna de grande interesse. Desta forma, o concreto estrutural leve apresenta-se como uma alternativa.

Segundo Neville (1997), com o seu uso, as fôrmas e fundações devem suportar pressões menores do que com o concreto normal e, também, o peso total dos materiais manuseados é diminuído, resultando um aumento da produtividade. O concreto leve proporciona, além disso, um isolamento térmico muito melhor do que o concreto comum, pois a condutividade térmica é inversamente proporcional ao aumento da sua massa específica.

Assim, o principal foco desse trabalho será mostrar a aplicabilidade desse material e seus principais benefícios. Para isso, serão desenvolvidos em laboratório, proporcionamentos de concreto estrutural leve com argila expandida que atinjam os requisitos mínimos de resistência à compressão e serão verificados seus módulos de elasticidade, objetivando a análise de correlação entre esses dois fatores.

Assim, a apresentação do trabalho inicia com essa pequena introdução e, no segundo capítulo, estão descritas as diretrizes da pesquisa que nortearam a realização do trabalho. O terceiro capítulo apresenta a definição do concreto estrutural leve, sua classificação, suas aplicações, propriedades e materiais. O quarto, trata exclusivamente sobre os métodos de dosagem e como são desenvolvidas. No quinto capítulo, está descrito o programa experimental, constando caracterização dos materiais, a dosagem experimental e a produção dos concretos. O sexto capítulo apresenta a análise e apresentação dos resultados. Por fim, no sétimo capítulo estão as considerações finais.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Neste capítulo são apresentadas as diretrizes para elaboração do trabalho.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual a relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto estrutural leve utilizando a argila expandida como agregado?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal é a verificação, através de ensaios em laboratório, da existência de uma relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade de seis traços de concreto estrutural leve utilizando a argila expandida como agregado sem e com a adição de sílica de casca de arroz.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário é a definição de dosagens para o concreto leve de maneira a alcançar a resistência à compressão mínima para aplicação em estruturas.

2.3 PRESSUPOSTO

Como pressupostos, admite-se que, para os fins desta pesquisa, os procedimentos das seguintes normas são adequados:

- a) NBR 5738/03: moldagem, adensamento e a cura dos corpos-de-prova;
- b) NBR 5739/07: determinação da resistência à compressão;
- c) NBR 8522/08: determinação do módulo de elasticidade.

2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que materiais alternativos, como os agregados leves para a produção de concreto estrutural, devem ser estudados com maior profundidade e que todas as características devem ser definidas para sua correta aplicação.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao ensaio de seis traços de concreto estrutural leve com argila expandida, sendo somente três com a adição de sílica de casca de arroz.

2.6 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se:

- a) a argila expandida empregada é a única fabricada no Brasil;
- b) os estudos se restringem à verificação da relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos leves.

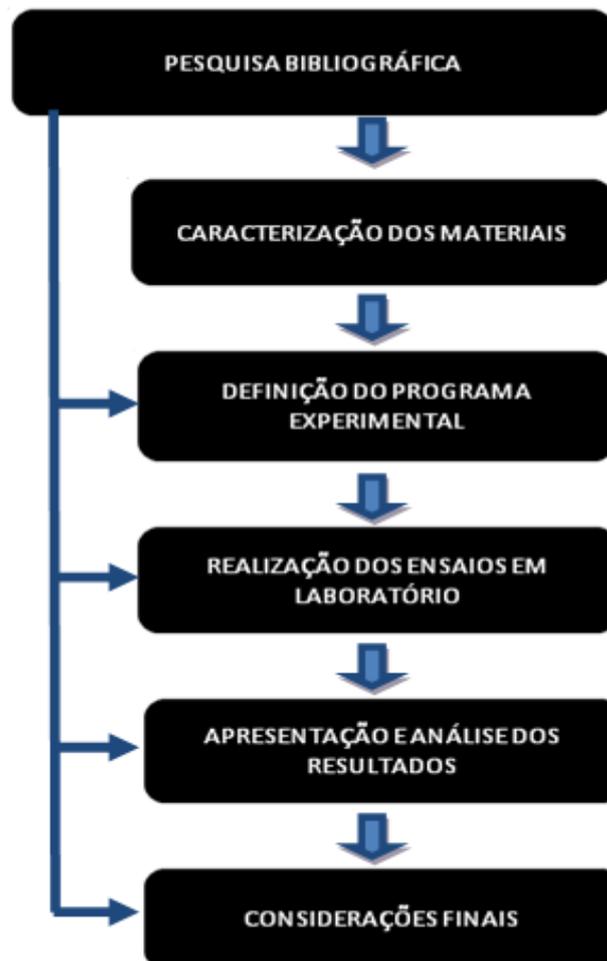
2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;

- b) caracterização dos materiais;
- c) definição do programa experimental;
- d) realização dos ensaios em laboratório;
- e) apresentação e análise dos resultados;
- f) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama de etapas da pesquisa



(fonte: elaborada pelo autor)

Primeiramente foi realizada a pesquisa bibliográfica objetivando o embasamento teórico do tema. A mesma foi desenvolvida durante todo o decorrer do trabalho.

A caracterização dos materiais consistiu em relacionar os materiais que fazem parte do concreto estrutural leve com argila expandida. Nesta etapa, foram citadas as aplicações e propriedades de cada um dos materiais constituintes.

Em seguida, foi definido o programa experimental que consistiu em desenvolver uma revisão bibliográfica sobre o estudo e posterior definição das dosagens utilizadas e de como se deu a produção dos concretos objetivando alcançar os requisitos de um concreto estrutural leve. Nesse mesmo contexto, foram caracterizados os equipamentos, métodos e normas para se determinar a resistência à compressão e módulo de elasticidade.

A etapa da realização dos ensaios foi praticada no laboratório do Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE) da UFRGS, onde foram misturados os materiais em três diferentes proporções, com e sem a adição de sílica de casca de arroz, e moldados os respectivos corpos de prova. Os ensaios foram executados de forma que fossem obtidos os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto estrutural leve com argila expandida de cada um dos seis traços.

Por fim, foram apresentados e analisados os resultados obtidos na fase anterior, fazendo analogia aos concretos convencionais e normas de desempenho.

3 CONCRETO ESTRUTURAL LEVE

Segundo Petrucci (1995), o crescente avanço tecnológico em todos os setores, e muito particularmente na técnica construtiva, forçou o aparecimento de materiais novos que viessem a corresponder às necessidades impostas pelas obras. Assim, tendo em vista que uma das deficiências do concreto tradicional, em face dos materiais competidores, é seu peso próprio, surgem os concretos leves. Assim, são abordados nesse capítulo os seguintes tópicos sobre concreto estrutural leve:

- a) definição;
- b) classificação;
- c) aplicações;
- d) propriedades.

3.1 DEFINIÇÃO

A norma ACI 213R-87 (1999, tradução nossa) define os concretos estruturais leves como aqueles que têm resistência à compressão aos 28 dias acima de 17,2 MPa e massa específica seca ao ar, aos 28 dias, com variação entre 1440 kg/m³ a 1850 kg/m³. De acordo com a NBR NM 35 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995) os concretos estruturais com agregados leves são caracterizados de acordo com sua resistência à compressão aos 28 dias, sendo que para resistência à compressão de 28 MPa, o concreto deve possuir, no máximo, 1840 kg/m³ e para concretos com resistência de 17 MPa, sua massa específica não deve exceder 1680 kg/m³.

Já Rossignolo (2009), considera que estes concretos devem ter massa específica abaixo de 2000 kg/m³. Através da tabela 1, o autor cita várias normas com seus respectivos limites de massa específica para concretos leves estruturais.

Tabela 1 – Valores de referência da massa específica dos concretos leves estruturais

REFERÊNCIA	MASSA ESPECÍFICA APARENTE (kg/m ³)
NM 35 (1995)	1680 < γ < 1840
ACI 213R-03 (2003)	1120 < γ < 1920
EUROCODE 2 (2007)	900 < γ < 2000
NS 3473 E (1998)	1200 γ < 2200
CEB-FIP (1977)	γ < 2000
RILEM (1975)	γ < 2000

(fonte: ROSSIGNOLO, 2009)

O concreto pode ser constituído inteiramente com agregados leves ou com uma combinação de agregados leves e convencionais. Do ponto de vista da trabalhabilidade e de outras propriedades, é comum utilizar areia de massa específica convencional como agregado miúdo e limitar a dimensão do agregado leve em 19 mm (MEHTA; MONTEIRO, 2008). De acordo com Maycá et al. (2009), o concreto leve é um material com estrutura porosa que apresenta propriedades refratárias e de isolamento térmico, é definido por apresentar massas específicas inferiores ao concreto tradicional.

3.2 CLASSIFICAÇÃO

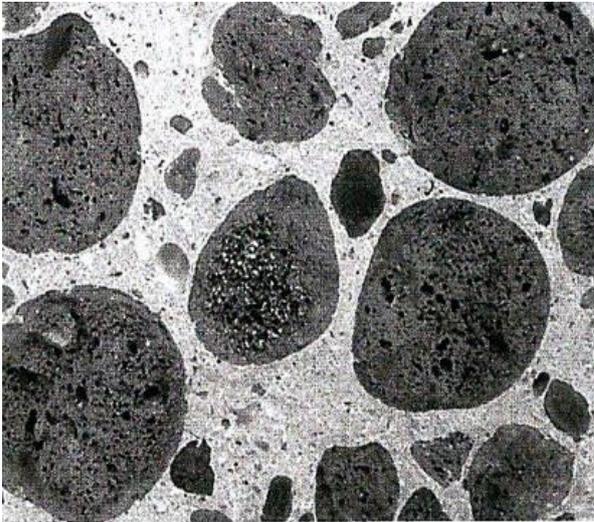
Neville (1997) cita que existem três métodos para obtenção do concreto leve. No primeiro, substitui-se o agregado tradicional cuja massa específica é 2500 kg/m³ por um agregado poroso de massa específica baixa. O concreto obtido é, geralmente, designado pelo agregado usado. A figura 2 ilustra essa forma.

O segundo método, baseia-se na introdução de grandes vazios no interior da massa de concreto, porém, cabe salientar, que são diferentes dos pequenos vazios produzidos pela incorporação de ar. Concreto aerado, ou de espuma, ou celular, ou com gás são as denominações desse concreto e a figura 3 mostra o aspecto da estrutura de um concreto leve obtido por meio deste método (NEVILLE, 1997).

O terceiro método consiste em formar uma grande quantidade de vazios simplesmente através da exclusão de agregado miúdo. Somando-se a isso, geralmente, adota-se o emprego de

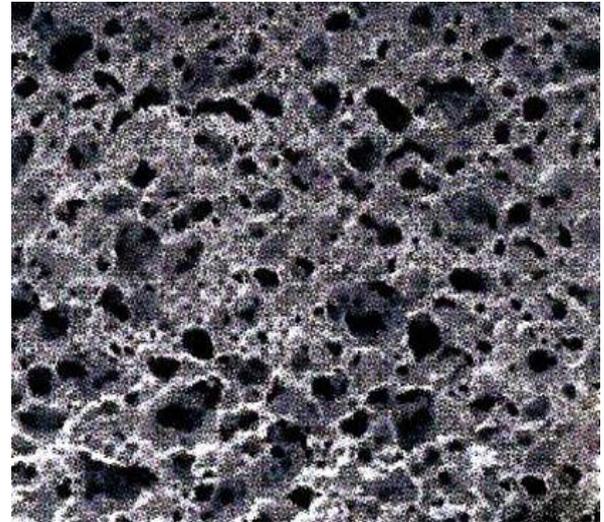
agregados de massa específica normal. Este concreto é designado, abreviadamente, como concreto sem finos e está ilustrado na figura 4 (NEVILLE, 1997).

Figura 2 – Concretos com agregados leves



(fonte: ROSSIGNOLO, 2009)

Figura 3 – Concretos celulares



(fonte: ROSSIGNOLO, 2009)

Figura 4 – Concretos sem finos



(fonte: ROSSIGNOLO, 2009)

Segundo a norma ACI 213R-87 (1999, tradução nossa), usa-se a massa específica para classificar o concreto leve de acordo com a aplicação, em três categorias:

- a) concreto de baixa massa específica: possui massa específica abaixo de 800 kg/m³. Esse concreto possui resistência à compressão variando entre 0,7 e 7,0

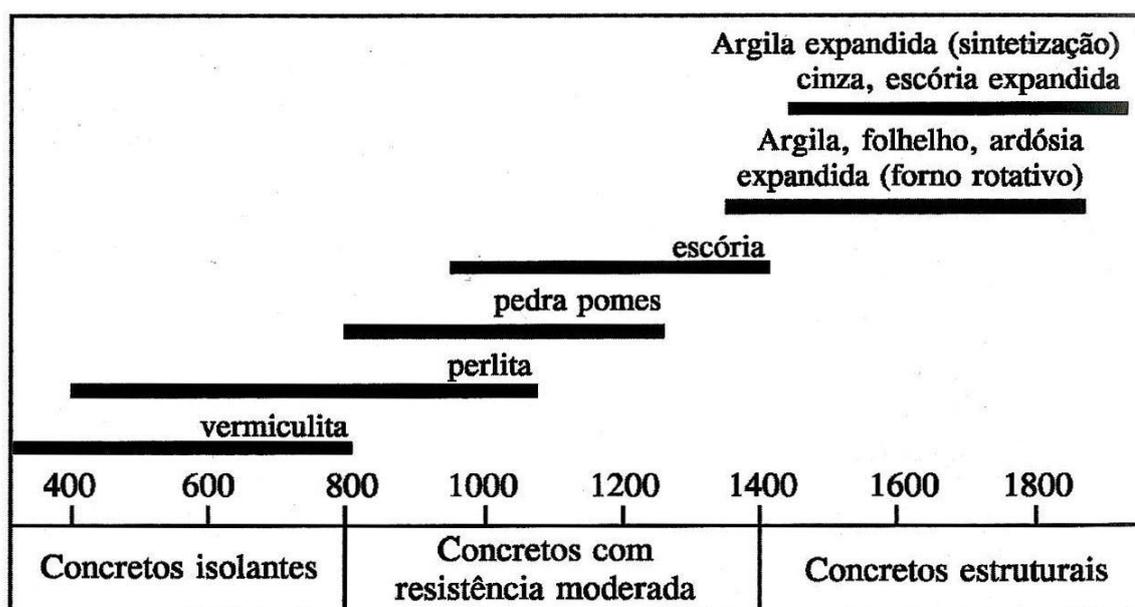
MPa aos 28 dias e é utilizado para fins não estruturais principalmente para isolamento térmica;

b) concreto de resistência moderada: concreto com massa específica variando entre 800 e 1350 kg/m³ e resistência à compressão aos 28 dias, variando entre 7 e 17 MPa, geralmente utilizado para enchimentos e suas características de isolamento térmica são intermediárias;

c) concreto leve estrutural: concreto com massa específica entre 1350 e 2000 kg/m³. Por definição, possui resistência à compressão acima de 17,2 Mpa. São concretos que contém, geralmente, xistos expandidos, argilas, ardósias, escórias e pedra-pomes como agregado graúdo. Possuem menor isolamento térmico do que concretos estruturais leves de menor massa específica.

A figura 5 apresenta essa classificação.

Figura 5 – Intervalos típicos de valores de massa específica de concretos com agregados leves



(fonte: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1999)

3.3 APLICAÇÕES

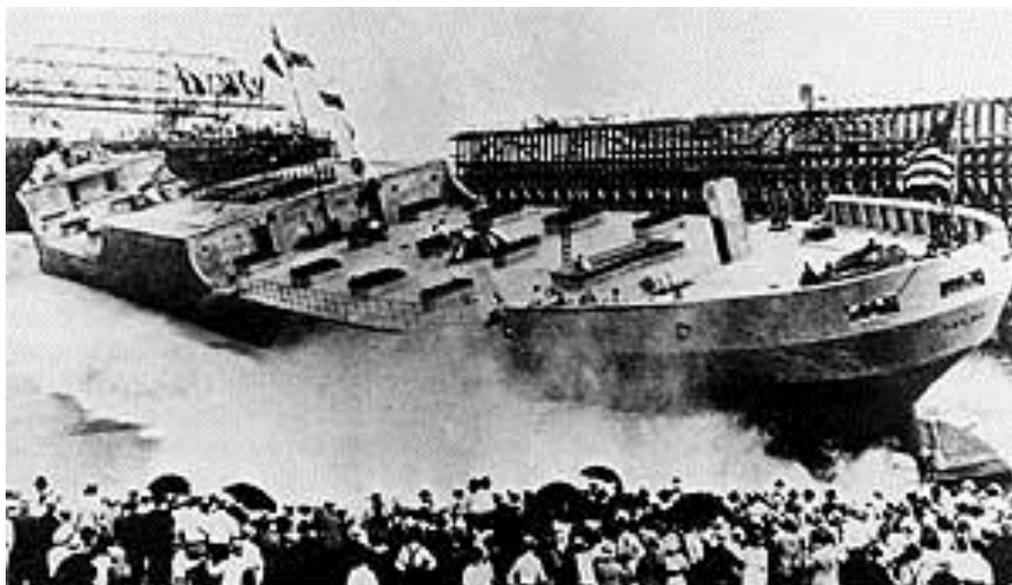
Segundo Rossignolo (2009, p. 91):

Apesar de o concreto leve estrutural apresentar aplicações nos mais diversos setores da construção civil, sua viabilidade técnica e econômica é maior em estruturas nas quais grande parte das solicitações deve-se ao peso próprio, como pontes e

edificações de múltiplos pavimentos, em construções que envolvem transporte de componentes, caso dos sistemas construtivos pré-fabricados, e em estruturas flutuantes, como plataformas e tanques.

De acordo com o ACI 213R-87 (1999, tradução nossa), uma das primeiras utilizações do concreto com agregados leves foi na Primeira Guerra Mundial, com a construção de navios e barcaças de guerra. Com xisto expandido e massa específica de 1760 kg/m^3 foi possível atingir resistência à compressão acima de 34 MPa. A figura 6 ilustra o USS Selma, construído em 1919 nos Estados Unidos e possuía massa específica de 1600 kg/m^3 .

Figura 6 – USS Selma



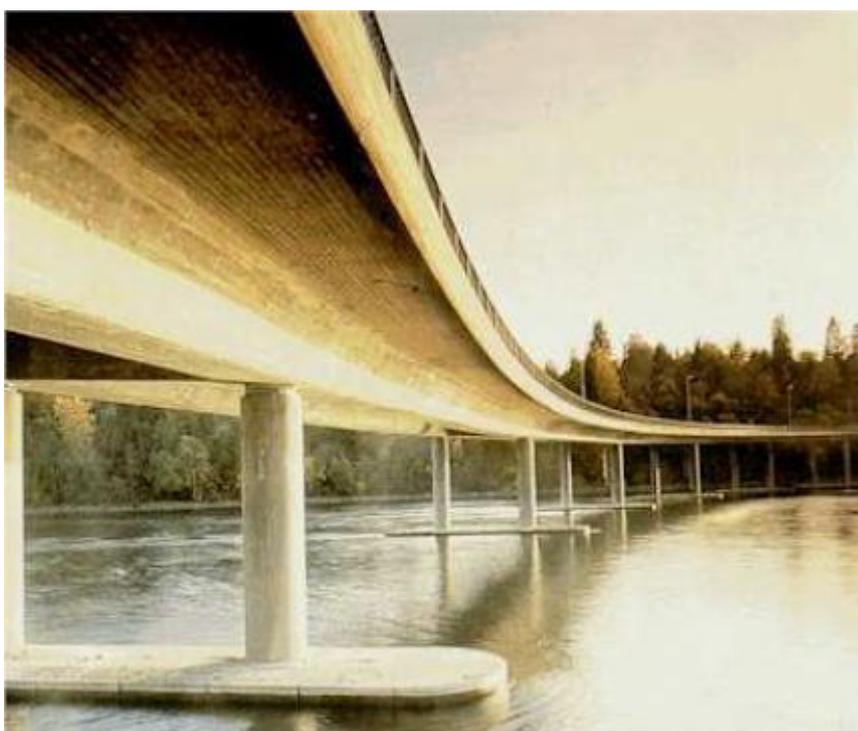
(fonte: ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005)

De acordo com o ACI 213R-87 (1999, tradução nossa), no início da década de 30, o concreto leve foi utilizado para construção da pista superior da ponte São Francisco (EUA), e sua utilização foi o ponto chave para a concepção econômica da ponte. Durante a Segunda Guerra Mundial, foram construídos mais 105 navios em concreto leve, permitindo uma grande economia de chapas de aço.

Outra ótima alternativa como aplicação do concreto estrutural leve é a construção e recuperação de pontes utilizando esse tipo de material. Normalmente, nas pontes de grandes vãos, o peso próprio da estrutura pode representar 70% dos esforços estruturais. Nesses casos, utilizando-se o concreto leve, torna-se possível reduzir as dimensões dos elementos estruturais e, assim, viabiliza-se o aumento dos vãos entre pilares (ROSSIGNOLO, 2009).

Construída na Noruega em 1992, a ponte New Eidsvoll (figura 7) desenvolve-se totalmente numa curva de raio igual a 278 metros e apresenta uma extensão total de 320 metros repartidos por vãos de 40 metros. Com a utilização de concreto leve em sua estrutura obteve-se uma redução no seu peso próprio, de forma a aliviar as cargas nas fundações (SILVA, 2007).

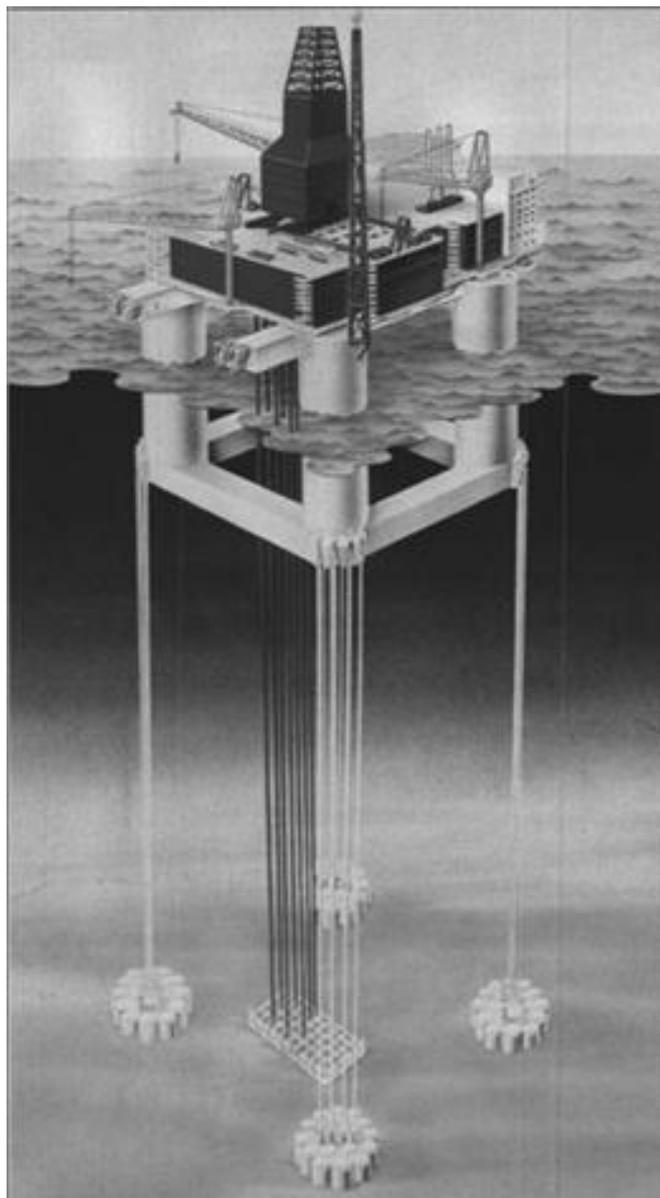
Figura 7 – Ponte New Eidsvoll na Noruega



(fonte: SILVA, 2007)

O concreto leve estrutural vem sendo utilizado muito em ambientes marítimos, como os tanques e as plataformas petrolíferas que são construídas em doca seca e, posteriormente, transportadas para o local de implantação, onde podem permanecer apoiadas no leito marinho ou flutuando (ancoradas) como é o caso da Plataforma Petrolífera Heidrun TLP ilustrada na figura 8. Essa plataforma foi construída na Noruega, em 1995, com concreto estrutural leve de 1950 kg/m^3 e com resistência à compressão de 70 MPa (ROSSIGNOLO, 2009).

Figura 8 – Plataforma Petrolífera Heidrun TLP



(fonte: ROSSIGNOLO, 2009)

A expansão do edifício de escritórios da *Southwestern Bell Telephone Company* (figura 9) foi a primeira aplicação do concreto estrutural leve em edifícios de múltiplos pavimentos. Ocorreu na cidade de Kansas, nos EUA, em 1929. Esse edifício possuía, inicialmente, 14 pavimentos com estrutura em concreto convencional e, por projeto, poderia receber mais 8 pavimentos. Porém, se fosse utilizado concreto estrutural leve ao invés do tradicional, os projetistas verificaram que seria possível executar seis pavimentos além dos oito já previstos. A estrutura executada em concreto leve atingiu resistência à compressão de 25 MPa aos 28 dias (ROSSIGNOLO, 2009).

Figura 9 – Edifício da Southwestern Bell Telephone Company



(fonte: ROSSIGNOLO, 2009)

A partir dos anos 60, importantes edifícios de múltiplos pavimentos foram executados com concreto estrutural leve moldado *in loco*, tais como Australia Square Tower (Austrália), em 1967, Park Regis (Austrália), em 1968, Standart Bank (África do Sul), em 1970 e o BMW Building (Alemanha) em 1972. A figura 10 ilustra essas edificações (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005).

Figura 10 – Edifícios de múltiplos pavimentos executados em concreto leve



(fonte: ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005)

A membrana que constitui a cobertura do Pavilhão de Portugal (figura 11) é feita em concreto leve de argila expandida. Possui espessura de 20 centímetros, 65 metros de comprimento e 50 metros de largura. É suspensa por cabos de aço ancorados, em ambos os lados, em lajes de ancoragem e, com a decisão de se utilizar concreto leve, foi possível reduzir as cargas permanentes e, assim, aliviar a componente horizontal das forças nos apoios (SILVA, 2007).

Figura 11 – Pavilhão de Portugal

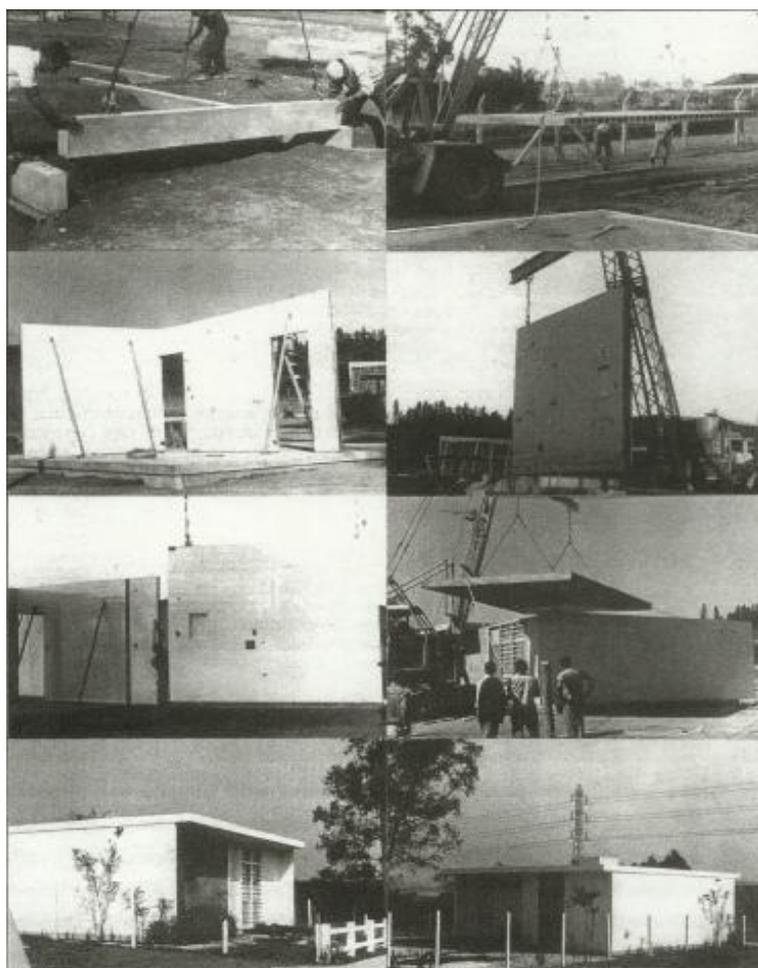


(fonte: SILVA, 2007)

No entanto, segundo Mehta e Monteiro (2008), por apresentarem menores custos de manuseio, transporte e construção, observa-se que a maioria das aplicações de concreto leve em todo mundo, continua a ser na produção de elementos e painéis pré-fabricados de concreto. Uma vez que os produtos de concreto leve são convenientes para esse tipo de construção.

No Brasil não é diferente, pois a modesta aplicação do concreto estrutural leve ocorre na maioria dos casos na produção de elementos construtivos pré-fabricados, sendo sua utilização concentrada no estado de São Paulo e em estados vizinhos, dada a localização da fábrica de argila expandida Cinexpan, em Várzea Paulista-SP. A figura 12 ilustra a seqüência de montagem de casas pré-fabricadas construídas com elementos em concreto leve (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005).

Figura 12 – Sequência de montagem de habitação pré-fabricada em concreto leve



(fonte: ROSSIGNOLO, 2009)

3.4 PROPRIEDADES

Muitos fatores influenciam o desempenho dos concretos leves. Porém, neste trabalho, serão analisados apenas aqueles relacionados com os agregados leves, isto é, as alterações provocadas nas propriedades dos concretos em função da substituição do agregado graúdo tradicional por agregado leve. São elas:

- a) trabalhabilidade;
- b) propriedades térmicas, acústicas e resistência ao fogo;
- c) durabilidade;
- d) interface entre agregado e a matriz de cimento;
- e) resistência à compressão;
- f) módulo de deformação (elasticidade).

3.4.1 Trabalhabilidade

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os fatores que afetam as propriedades do concreto fresco empregando agregado tradicional são, essencialmente, os mesmos que influenciam no concreto com agregado leve. Devido à baixa densidade e à textura áspera, característica do agregado poroso, principalmente quando é britado, a trabalhabilidade do concreto necessita de uma atenção especial.

Em concretos contendo agregado leve, o abatimento alto e a vibração excessiva são dois fatores normalmente responsáveis pela sedimentação da argamassa mais pesada, ficando em falta na superfície, onde é mais necessária para o acabamento. É o inverso do que acontece com o concreto normal, no qual a segregação resulta em um excesso de argamassa na superfície e é chamado de flutuação do agregado graúdo (figura 13). A perda de abatimento pode ser um problema sério, quando o agregado continua a absorver uma quantidade considerável de água, após a mistura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

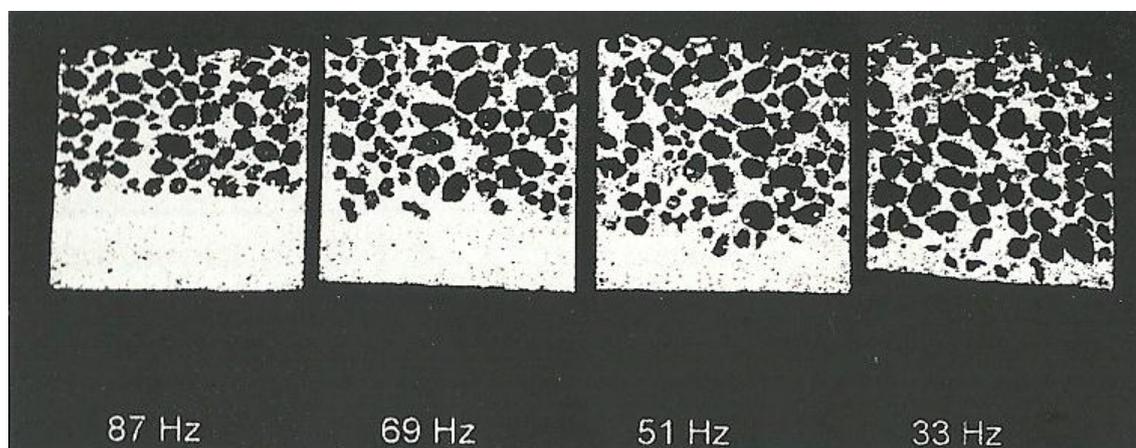
De acordo com Rossignolo (2009), uma forma de se controlar a flutuação do agregado leve é a utilização de vibradores com baixa frequência de vibração. Como ilustra, também, na figura 12, o ideal é trabalhar com frequência na faixa dos 33 Hz.

A segregação dos concretos leves pode ser evitada ou reduzida, também, tomando alguns cuidados no processo de dosagem. A substituição do agregado miúdo por areia natural, a

utilização de adições minerais, como a sílica ou maior controle sobre a granulometria dos agregados são alternativas (ROSSIGNOLO, 2009).

A trabalhabilidade da mistura será rapidamente diminuída se, no momento da colocação na betoneira, os agregados estiverem secos, pois, assim, eles absorverão muita água. Então, quando o concreto é preparado com agregados leves, de absorção elevada e rápida, mas com baixo teor de umidade, é recomendável misturar antes o agregado com pelo menos, metade da água de amassamento e depois colocar o cimento na betoneira (NEVILLE, 1997).

Figura 13 – Efeito da frequência de vibração na flutuação dos agregados leves



(fonte: VIEIRA, 2000)

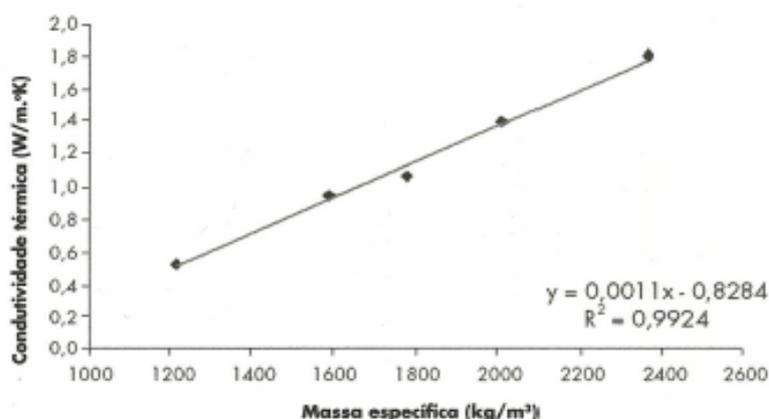
A respeito do bombeamento do concreto leve, a *Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete*¹ (2000 apud ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005) cita que, a umidade e a granulometria dos agregados leves tem grande influência, pois com o aumento da pressão de bombeamento aumenta a absorção de água do agregado. Com isso, para prevenir a perda brusca de trabalhabilidade no estado fresco, que pode provocar o entupimento dos dutos durante o lançamento, o pré-umedecimento do agregado leve mostra-se como uma medida importante a ser tomada. Em casos particulares de bombeamento em alturas elevadas, recomenda-se a saturação prévia dos agregados em câmeras hiperbáricas.

¹ECONOMIC DESIGN AND CONSTRUCTION WITH LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE. **Project BE96-3942/R9**: technical and economic mixture optimization of high strength lightweight aggregate concrete. Norway, 2000.

3.4.2 Propriedades térmicas, acústicas e resistência ao fogo

O concreto leve possui propriedades térmicas diferentes do concreto convencional. A transferência e a absorção de calor dos agregados leves em relação aos agregados tradicionais sofrem uma redução causada pelo ar aprisionado na estrutura porosa dos agregados leves, alterando assim as propriedades térmicas dos concretos, como, por exemplo, a redução da condutividade térmica. Por isso, algumas edificações utilizam o concreto leve na vedação de fachadas e na cobertura para reduzir a absorção e a transferência para o ambiente interno do calor proveniente da radiação solar (ECONOMIC DESIGN AND CONSTRUCTION WITH LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE², 1998 apud ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005). A figura 14 ilustra a variação da condutividade térmica em função da massa específica do concreto.

Figura 14 – Influência da massa específica do concreto com argila expandida no valor da condutividade térmica



(fonte: SACHT et al., 2007)

De acordo com Neville (1997), em relação ao congelamento e degelo, os concretos leves não oferecem nenhum problema. Isso ocorre porque os grandes poros do agregado não têm tendência a se saturar.

Sobre o desempenho acústico, Neville (1997) cita que pelo fato de que a energia sonora propagada pelo ar se transforma em calor nos pequenos vazios do agregado, a absorção dos sons através do concreto leve pode ser considerada satisfatória, resultando num coeficiente de

² ECONOMIC DESIGN AND CONSTRUCTION WITH LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE. Project BE96-3942/R2: LWAC materials properties, State-of-the-Art, Norway, 1998.

absorção acústica duas vezes maior do que o dos concretos normais. No entanto, uma superfície revestida pode refletir muito mais o som. Os concretos leves não tem boa isolamento acústica, pois essa isolamento aumenta com a massa específica do material.

Com relação à resistência ao fogo, Neville (1997) cita que o desempenho do concreto leve é, em geral, maior do que quando se usa concretos preparados com agregados convencionais, porque os concretos leves, com a elevação da temperatura, perdem uma menor fração da sua resistência inicial e apresentam menor tendência à fragmentação. A tabela 2 ilustra a resistência dos agregados em relação ao fogo.

Tabela 2 – Resistência ao fogo estimada para o concreto leve em função do agregado

AGREGADO	ESPESSURA EQUIVALENTE MÍNIMA (mm)			
	4 h	3 h	2 h	1 h
PEDRAS-POMES OU ESCÓRIA EXPANDIDA	119	102	81	53
ARGILA OU FOLHELHO EXPANDIDO	145	122	96	66
CALCÁRIO, CINZAS OU ESCÓRIA	150	127	102	69
SEIXO CALCÁRIO	157	135	107	71
SEIXO SILICOSO	170	145	114	76

(fonte: NEVILLE, 1997)

3.4.3 Durabilidade

A durabilidade do concreto é um conceito relativo que proporciona o conhecimento do comportamento desse material, sujeito à deterioração em maior ou menor grau em função de determinadas situações que podem conduzir a uma desagregação da estrutura. No entanto, esses processos destrutivos podem, muitas vezes, ser interrompidos saneando-se causas de destruição gradual, reconduzindo a estrutura a condições de sobrevivência (BAUER, 2000).

De acordo com Neville (1997), não existem efeitos adversos sobre a durabilidade do concreto leve, com exceção de quando os agregados saturados são submetidos ao congelamento e degelo. A suscetibilidade do concreto à deterioração por exposição a temperaturas muito baixas depende das propriedades da pasta de cimento hidratada como para concretos convencionais. Os repetidos ciclos de expansão e contração devido à alta variação da temperatura pode destruir a aderência entre o agregado e a matriz que a envolve.

Para o caso específico dos concretos leves, Rossignolo e Agnesini (2005, p. 1348-1349), citam que:

Nos concretos estruturais leves, os agregados podem apresentar grande influência na permeabilidade dos concretos caso apresentem a estrutura porosa comunicante, facilitando, assim, o fluxo de líquido e gases e, conseqüentemente, de agentes agressivos no concreto. Esse fato é mais comum nos agregados leves naturais, como a pedra pomes. No entanto, a maioria dos agregados leves artificiais, apesar de apresentarem valores de porosidade acima de 50%, como a argila expandida, apresentam baixa permeabilidade, pois a maioria dos poros não estão interligados, ou seja, apresentam porosidade fechada.

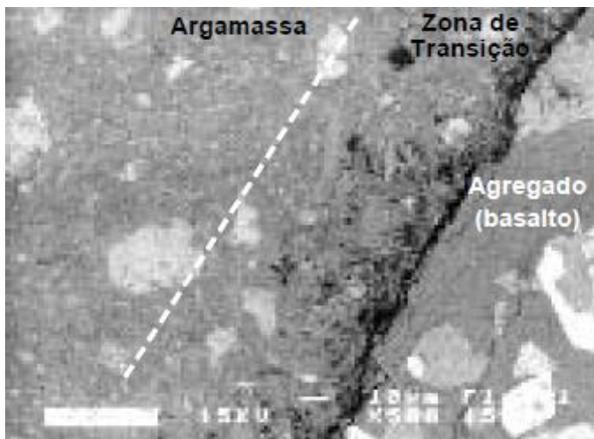
3.4.4 Interface entre agregado e a matriz de cimento

Existe uma forte relação entre a espessura e a qualidade da zona de transição com as propriedades mecânicas e a durabilidade dos concretos. As propriedades relacionadas à resistência mecânica, o módulo de deformação, o mecanismo de propagação de fissuras e a permeabilidade de agentes agressivos no concreto são diretamente influenciadas pela zona de transição, demonstrando, assim, a grande importância do seu estudo (PAULON, 2005).

A resistência da zona de transição em qualquer ponto depende do volume e do tamanho dos vazios presentes. Para concreto de baixa relação água/cimento, nas primeiras idades, o volume e tamanho de vazios na interface serão maiores do que na matriz de argamassa, tendo como consequência uma fraca resistência à compressão. Porém, com o aumento da idade, a resistência da zona de transição pode tornar-se igual ou maior do que a resistência da matriz de argamassa (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

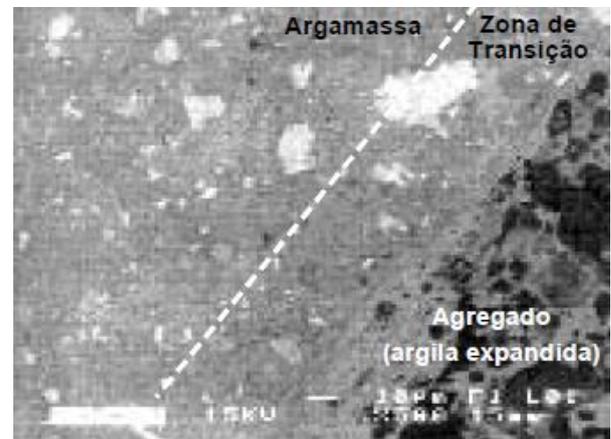
Rossignolo e Agnesini (2005) citam estudos que demonstram que a interação entre agregado leve e a matriz de cimento é diferente da ocorrida nos concretos tradicionais. De modo geral, a interface entre a matriz de cimento e o agregado leve, apresenta baixa porosidade e caracteriza-se pela alta ancoragem mecânica entre o agregado e a matriz de cimento, consequência da absorção de água e da rugosidade da superfície do agregado leve. As figuras 15 e 16 ilustram a zona de transição pasta-agregado dos concretos tradicionais e leves.

Figura 15 – Zona de transição agregado-pasta do concreto com agregado tradicional



(fonte: ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005)

Figura 16 – Zona de transição agregado-pasta do concreto com agregado leve



(fonte: ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005)

A boa aderência entre o agregado leve e a pasta de cimento, decorre de vários fatores. Tais como: a textura áspera da superfície de muitos agregados leves, resultando no intertravamento mecânico entre os dois materiais; os módulos de elasticidade das partículas de agregado leve e da pasta de cimento não são muito diferentes e, conseqüentemente, não são induzidas tensões diferenciais entre os dois materiais pelas cargas aplicadas ou por variação térmica; a água absorvida pelo agregado no momento da mistura se torna, com o tempo, disponível para a hidratação do cimento não hidratado remanescente, o que torna mais forte a aderência entre o agregado e a matriz de cimento (NEVILLE, 1997).

3.4.5 Resistência à compressão

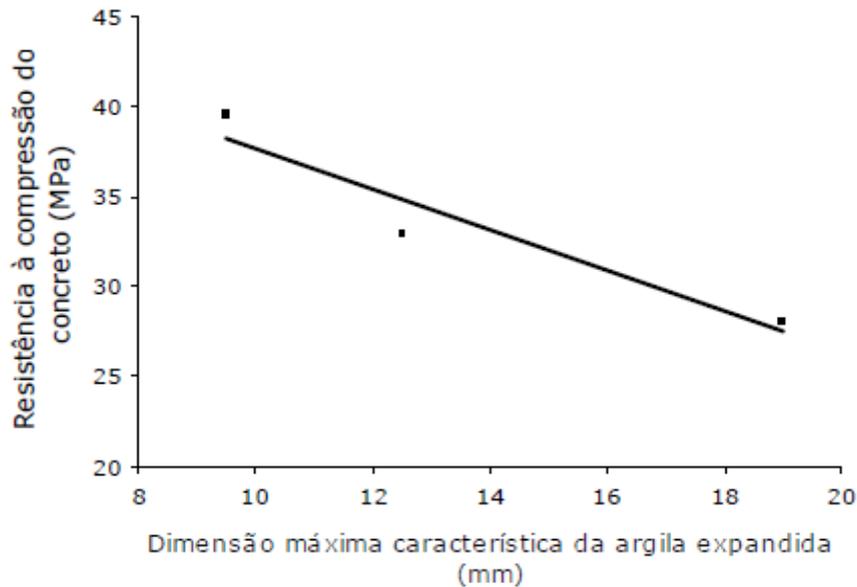
De acordo com Rossignolo (2003), a resistência à compressão é a propriedade utilizada na caracterização dos concretos leves estruturais que tem maior importância e está relacionada com o tipo de agregado leve e a sua granulometria, conforme ilustra a figura 17. A granulometria dos agregados tem maior influência na resistência à compressão dos concretos leves do que nos concretos convencionais, uma vez que o valor da massa específica dos agregados leves, como é o caso da argila expandida, é inversamente proporcional à dimensão.

Na análise das propriedades dos concretos leves, deve-se considerar que os agregados apresentam resistência à compressão relativamente baixa. Com isso, a resistência à

compressão dos concretos está mais relacionada com a resistência à compressão da matriz de cimento (ROSSIGNOLO, 2003).

Resistências à compressão de projeto entre 20 a 34 MPa, aos 28 dias, são comuns, apesar de que, usando-se alto teor de cimento e agregado de boa qualidade e de pequena dimensão (isto é, 9 à 13 mm, no máximo), é possível em algumas usinas de pré-fabricados e de protendido, produzir concreto com resistências na faixa de 40 a 48 MPa. A tabela 3 demonstra a relação entre resistência à compressão e o teor de cimento, com e sem areia natural como agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 17 – Relação entre resistência à compressão e granulometria da argila expandida



(fonte: EVANGELISTA et al., 1996)

Tabela 3 – Relação entre resistência à compressão e o teor de cimento

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)	
	AGREGADO LEVE SOMENTE	AGREGADO LEVE E AREIA NATURAL
17,24	240 - 305	240 - 305
20,68	260 - 335	250 - 335
27,58	320 - 395	290 - 395
34,47	375 - 450	360 - 450
41,37	440 - 500	420 - 500

(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008)

Mehta e Monteiro (2008) complementam que a resistência à compressão dos concretos com agregado leve está diretamente relacionada com o teor de cimento. Podendo, então, ser aumentada substituindo-se o agregado miúdo leve por areia natural de boa qualidade.

3.4.6 Módulo de deformação (elasticidade)

As características elásticas de um material são uma medida de sua rigidez. Apesar do concreto não possuir um comportamento linear, é necessário estimar o módulo de elasticidade (relação entre a tensão aplicada e a deformação sofrida) para se determinarem as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), em materiais homogêneos existe uma relação direta entre massa específica e módulo de deformação. Em materiais heterogêneos, multifásicos como o concreto, a fração volumétrica, a massa específica e o módulo de deformação dos principais constituintes e as características da zona de transição é que definem o seu comportamento elástico. Sendo a massa específica, inversamente proporcional à porosidade, obviamente que os fatores que afetam a porosidade do agregado, da matriz da pasta de cimento e da zona de transição serão importantes. Para o concreto, a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade provém do fato de que ambas propriedades são afetadas pelas fases constituintes.

De acordo com ACI 213R-87 (1999, tradução nossa), o módulo de elasticidade do concreto depende da relação entre as quantidades de argamassa e agregado graúdo com seus respectivos módulos. O concreto estrutural convencional possui um maior módulo de elasticidade do que o concreto estrutural leve, pois o módulo do agregado convencional é maior do que o do agregado leve. Geralmente, o módulo de elasticidade do concreto estrutural leve varia entre 50 e 75% do módulo do concreto estrutural convencional para concretos de mesma resistência à compressão.

Testes em testemunhos de rochas mostram que o módulo de deformação de agregados naturais de baixa porosidade, tais como granito, rochas vulcânicas e basalto, está na faixa entre 69 e 138 GPa, enquanto em arenitos, calcários e cascalho do tipo poroso, ele varia entre 21 e 48 GPa. Agregados leves são altamente porosos e dependendo do grau de porosidade,

seu módulo de elasticidade pode ser tão baixo quanto 7 GPa ou tão alto quanto 28 GPa. Geralmente, o módulo de deformação de um concreto leve varia de 14 a 21 GPa (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

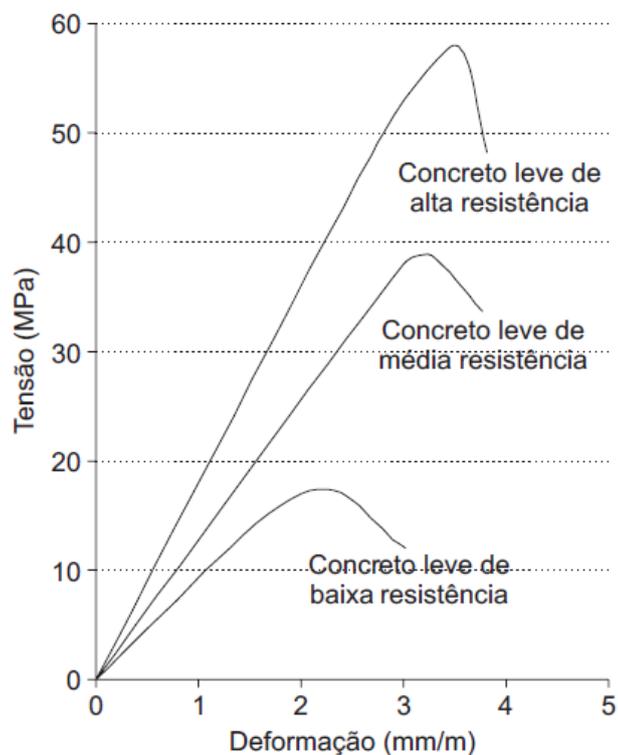
De acordo com Neville (1997), a boa aderência entre o agregado leve e a matriz, é a causa da ausência de microfissuras na aderência às primeiras idades. Isso faz com que se tenha uma linearidade da relação tensão x deformação até 90 % da resistência final.

Através de estudos, Zhang e Gjorv (1991, tradução nossa) constataram que a parte ascendente da curva tensão-deformação dos concretos leves torna-se mais linear à medida que a resistência do concreto aumenta, e a parte descendente torna-se mais íngreme depois da ruptura. De acordo com esses autores, a respeito da deformação do concreto leve:

- a) com o aumento do consumo de cimento, têm-se um decréscimo da deformação última;
- b) com o uso de sílica nos concretos, é possível observar uma curva tensão-deformação mais linear do que os sem sílica, provavelmente devida a melhoria de desempenho da zona interfacial entre o agregado e a matriz de cimento;
- c) a curva tensão-deformação não sofre alteração significativa ao se substituir parcialmente o agregado miúdo leve por areia natural.

A figura 18 apresenta o comportamento da curva tensão-deformação dos concretos leves de acordo com o seu nível de resistência à compressão.

Figura 18 – Comportamento da curva tensão-deformação dos concretos com agregados leves



(fonte: CARRASQUILLO et al.³, 1981 apud ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005)

3.5 MATERIAIS

Através da figura 5, sabe-se que é possível se produzir concretos estruturais leves a partir de uma série de agregados. Além disso, existem diversos tipos de adições, cada uma com o objetivo de melhorar uma ou mais propriedades do concreto. Porém, tendo em vista que a proposta deste estudo se restringe aos concretos estruturais com argila expandida como agregado graúdo e que a adição utilizada é a sílica de casca de arroz, os próximos itens têm o objetivo de analisar esses materiais com vistas a acrescentar algum conhecimento quando utilizados em concretos estruturais.

³ CARRASQUILLO, R. L.; NILSON, A. H.; SLATE, F. O. Properties of high strength concrete subject to short-term loads. **Journal of American Concrete Institute**, Farmington Hills, EUA, 1981.

3.5.1 Argila expandida

De acordo com Neville (1997, p. 677):

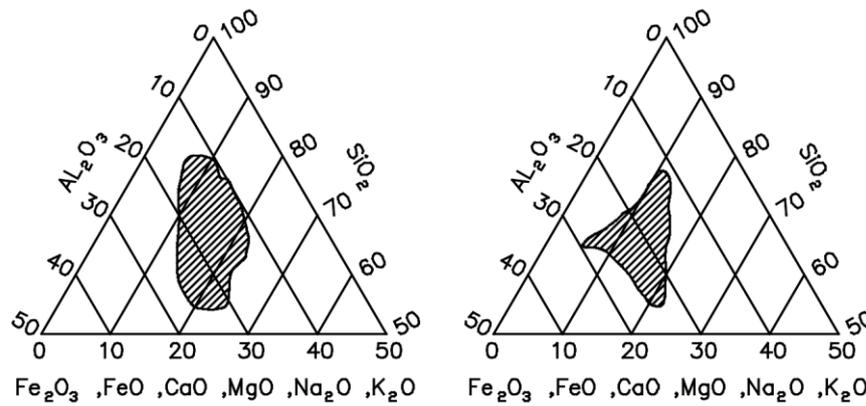
As argilas expandidas são obtidas por aquecimento de diversas variedades de argilas em um forno rotativo, até a fusão incipiente a temperatura de 1000 a 1200 °C, quando ocorre a expansão do material por causa da geração de gases que ficam retidos em uma massa que resulta viscosa e plástica pelo calor. Essa estrutura porosa se mantém após o resfriamento, de modo que a massa específica aparente do material resultante é menor do que antes do aquecimento. Muitas vezes o material é reduzido ao tamanho desejado antes da calcinação, mas pode-se obter essa redução por britamento subsequente. Pode-se, também, conseguir a expansão por sinterização contínua. Nesse caso, o material bem umedecido é transportado numa esteira, sob queimadores, de modo que o calor atinge gradualmente toda espessura da camada. Sua viscosidade é tal que os gases permanecem retidos no seu interior.

Os agregados de argila expandida produzidos pelo processo de sinterização contínua têm massa específica entre 650 e 900 kg/m³ e os produzidos em forno rotativo, entre 300 e 650 kg/m³. Os concretos com estes agregados resultam em massas específicas, normalmente, entre 1400 e 1800 kg/m³, embora se possam obter massas específicas de até 800 kg/m³. Geralmente, os concretos preparados com agregados de argila expandida têm maior resistência do que com qualquer outro agregado leve (NEVILLE, 1997).

De acordo com Coutinho⁴ (1988 apud MORAVIA et al., 2006), para que a argila tenha características expansivas, a composição química da matéria-prima deve estar dentro das zonas apresentadas na figura 19.

⁴ COUTINHO, A. S. **Fabrico e Properties do betão**. 2. ed Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988.

Figura 19 – Zonas que se encontram as composições químicas das argilas com característica expansiva



(fonte: COUTINHO⁵, 1988 apud MORAVIA et al., 2006)

No Brasil, a produção de argila expandida restringe-se a um único fabricante, sendo sua produção voltada, principalmente, para a estonagem de jeans, atendendo a indústria têxtil, o paisagismo e jardinagem. Porém, com o avanço da tecnologia de concretos e dos estudos e pesquisas em diversas universidades, houve um crescimento pela demanda do material no mercado da construção civil nos últimos anos (MAYCÁ et al., 2009).

A argila expandida nacional é produzida a 50 km da cidade de São Paulo, na cidade de Várzea Paulista. Em fornos rotativos, sua matéria prima, retirada do Recôncavo Baiano, é processada em resultando em dois tipos de argila expandida que podem ser utilizadas como agregados graúdos em concretos estruturais conforme ilustram as figuras 20 e 21 (MAYCÁ et al., 2009).

De acordo com Maycá et al. (2009), a argila expandida 2215, equivale à brita comercialmente denominada como 1 e apresenta dimensões entre 15 e 22 mm. Já a argila expandida 1506, equivale à brita comercialmente denominada como 0 e possui dimensões entre 6 e 15 mm.

⁵ COUTINHO, A. S. **Fabrico e Properties do betão**. 2. ed Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988.

Figura 20 – Argila expandida Cinexpan 2215



(fonte: MAYCÁ et al., 2009)

Figura 21 – Argila expandida Cinexpan 1506



(fonte: MAYCÁ et al., 2009)

A maioria dos agregados leves tem absorção de água elevada e rápida, para que isso não ocorra é possível impermeabilizá-los com um revestimento betuminoso aplicado por um processo especial. Se isso não for feito, durante a mistura, pode ser absorvida uma grande quantidade de água. Fato que pode resultar em um aumento de massa específica do concreto, o que por consequência reduz sua capacidade de isolamento térmica (NEVILLE, 1997).

O concreto leve com argila expandida, como já registrado nesse trabalho, quando bombeado, absorve uma quantidade adicional de água em função das altas pressões utilizadas. A tabela 4 apresenta os valores de absorção de água e de outras características de alguns agregados leves norte-americanos e europeus, além da argila expandida brasileira (ROSSIGNILO; AGNESINI, 2005).

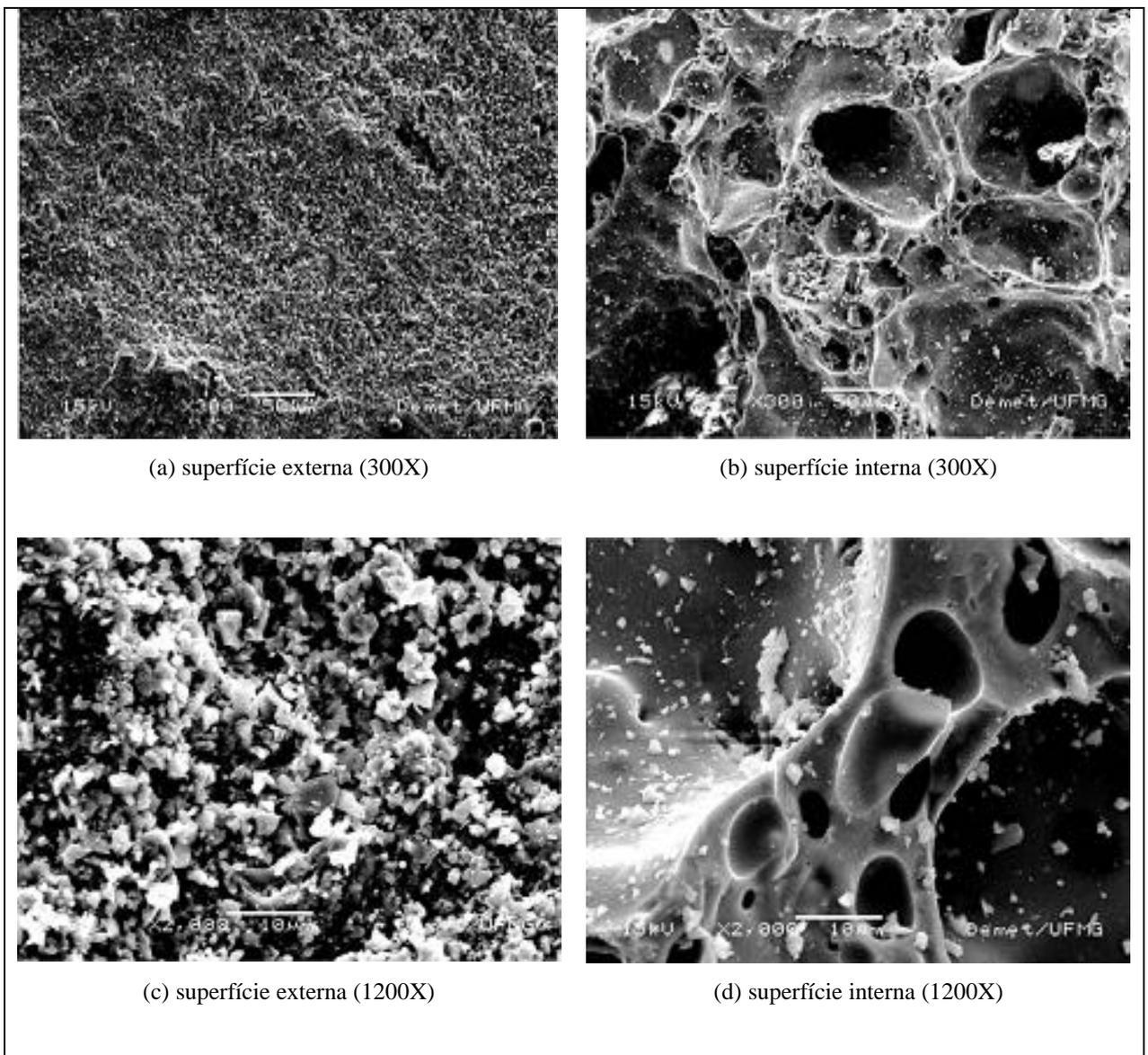
Tabela 4 – Características de alguns agregados leves comerciais

NOME COMERCIAL	PAÍS	MATÉRIA-PRIMA	FABRICAÇÃO	MASSA ESPECÍFICA (kg/dm ³)	MASSA UNITÁRIA (kg/dm ³)	DIMENSÃO (mm)	ABSORÇÃO DE ÁGUA 24 H (%)
Lytag	Inglaterra	Cinzas volantes	Sinterização	1,3 - 2,1	0,6 - 1,1	0,5 - 19	15 - 20
Solite	Estados Unidos	Folhelo	Forno Rotativo	1,4	0,8	4,0 - 16	15
Liapor	Alemanha	Argila	Forno Rotativo	0,6 - 1,8	0,3 - 0,9	2,0 - 19	11 - 17
Leca	Áustria e Noruega	Argila	Forno Rotativo	0,6 - 1,8	0,3 - 0,9	0,5 - 16	11 - 30
Arlita	Espanha	Argila	Forno Rotativo	1,4	0,8	1,0 - 10	13
Cinexpan 0500	Brasil	Argila	Forno Rotativo	1,5	0,9	0,5 - 5,0	6
Cinexpan 1506	Brasil	Argila	Forno Rotativo	1,1	0,6	6,0 - 15	7
Cinexpan 2215	Brasil	Argila	Forno Rotativo	0,7	0,5	15 - 22	10

(fonte: ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005)

Moravia et al. (2006), realizaram estudo de caracterização da argila expandida nacional, na figura 22 estão apresentadas micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), ilustrando a morfologia da argila expandida. Os autores apontam na figura 22a e 22c a que a superfície externa da argila expandida apresenta textura mais lisa. Nas figuras 22b e 22d pode ser visualizada a superfície interna da amostra apresentando maior quantidade de poros, não ocorrendo a interconectividade dos mesmos. Para os autores, a maior porosidade da superfície interna está relacionada ao surgimento de bolhas de gases originados no processo de fabricação da argila expandida.

Figura 22 – Imagem por MEV da argila expandida



(fonte: MORAVIA et al., 2006)

3.5.2 Sílica de casca de arroz

De acordo com Tashima (2006), do processo de obtenção do arroz, gera-se uma enorme quantidade de casca de arroz. O aproveitamento da casca como combustível já é uma prática comum, porém o resíduo da casca de arroz ainda é depositado a céu aberto por algumas empresas de beneficiamento do arroz, demonstrando uma prática que não satisfaz às crescentes preocupações ambientalistas.

Por outro lado, devido ao elevado teor de sílica (90 a 95%) presente na composição química da cinza de casca de arroz, este material pode ser empregado tanto na construção civil, como pozolana agregada em cimentos, concretos e argamassas ou ainda na fabricação de tijolos prensados e estabilização de solos, como na indústria cerâmica, no processo de obtenção de refratários, porcelanas e isolantes térmicos e também, na fabricação de vidros (POUEY, 2006). A tabela 5 apresenta a composição química da cinza de casca de arroz, variando a temperatura de queima, conforme diversos autores.

Tabela 5 – Composição química da cinza de casca de arroz, conforme diversos autores

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	COOK (1976)	SALAS (1986)	CINCOTTO (1988)	GUEDERT (1989)	FARIAS (1990)	SUGITA (1992)
TEMPERATURA DE QUEIMA	450°C	1000°C	500 - 600°C	sem controle	não informado	600°C
SiO ₂	93,15	91,26	94,70	93,11	91,78	90,00
Al ₂ O ₃	0,41	0,94	0,09	0,92	0,60	0,10
Fe ₂ O ₃	0,20	0,37	1,46	0,40	0,34	0,40
CaO	0,41	2,15	0,99	0,52	0,50	0,40
MgO	0,45	0,88	0,95	0,85	0,52	0,30
SO ₃	nd	nd	0,21	nd	0,02	nd
Na ₂ O	0,08	nd	0,04	0,12	0,11	0,06
K ₂ O	2,31	nd	1,75	1,12	1,30	2,41
Perda ao fogo	2,77	nd	7,29	nd	nd	4,20

(fonte: SILVEIRA, 1996)

Observa-se que os resultados obtidos em cinzas de casca de arroz de diferentes origens são semelhantes, com pequena variação conforme a temperatura de queima. Os teores de sílica

variam entre 91 e 95%, os álcalis K_2O e Na_2O são as principais impurezas encontradas e os compostos CaO e MgO ocorrem em teores inferiores a 1% (SILVEIRA, 1996).

Segundo Silveira (1996), a cinza pode apresentar coloração entre o branco rosado até o preto. Essas mudanças de cor estão associadas com o processo de combustão e com as transformações estruturais que ocorrem no material frente a variação da temperatura. Quanto mais escura, maior o teor de carbono, ou seja, maior a quantidade de matéria orgânica não queimada.

Tiboni (2007) apresentou um histórico (quadro 1) dos principais trabalhos referentes à utilização da cinza de casca de arroz. Tal histórico deixa evidente a crescente utilização desta adição mineral, em pesquisas científicas, ao longo dos anos.

Quadro 1 – Histórico dos principais trabalhos com uso de cinza de casca de arroz

ANO	LOCAL	AUTOR (ES)	TRABALHO (S)
1924	Alemanha	BEAGLE	Utilização de casca de arroz no concreto
1940 e 1950	-	DIVERSOS	Blocos confeccionados com cimento Portland e cinza de casca de arroz
1973	Bélgica	METHA	Primeira patente no assunto
1976	-	PITT	Controle de combustão em leito fluidizado
1978	Índia	METHA e PIRTZ	Substituição de cimento Portland por CCA em concreto
1979	Índia	PRAKASH	Utilização de CCA em trabalhos de alvenaria e fundações
1979	Paquistão	-	Primeiro workshop sobre o assunto
1981	Ásia	COOK	Estudo da fluência e retração de concretos de cimento Portland com adição de CCA
1982	Japão	-	Produção e emprego de CCA como material cimentício
1984	Israel	HANA YOUSIF	Efeito da queima e moagem nas propriedades de argamassa
1986	Índia	JAMES e RAO	Morfologia e características químicas e físicas da CAA
1989	Tailândia	HWANG e WU	Hidratação e microestrutura de pastas de cimento produzidas com diferentes CCA
1994	EUA	METHA	Patente relativa a produtos altamente duráveis com cinzas, com o emprego de 5 a 30% de CCA substituindo o cimento
1995	Brasil	ISAIA	Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concretos de alto desempenho
1999	Brasil	GAVA	Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação de atividade pozolana
2001	Espanha	PAYA	Determinação da sílica amorfa na CCA por um rápido método analítico
2003	Brasil	PRUDÊNCIO, SANTOS e DAFICO	Revisão sobre CCA, incluindo processos de queima e tratamentos realizados para a obtenção de sílica de casca de arroz
2005	Brasil	ISAIA	Cinza de casca de arroz in: Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações
2006	Brasil	POUEY	Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico

(fonte: TIBONI, 2007)

A adição da sílica de casca do arroz misturada ao cimento permite a elaboração do concreto com menor quantidade de vazios, diminuindo assim sua porosidade, vulnerabilidade ao ataque de agentes agressivos e promovendo maior durabilidade desse concreto. Segundo estudos, esses concretos poderão ser utilizados em obras que necessitam de materiais com ótimas características mecânicas, tais como obras a grandes profundidades, celas de presídio, pistas

de pouso de aviões e outras construções que exijam material de grande resistência (BEZERRA, 2010).

Conforme Silveira e Dal Molin (1995), ao serem adicionadas ao cimento ou substituindo parte deste, a cinza de casca de arroz modifica a microestrutura da pasta do cimento, pois ao se combinarem com o hidróxido de cálcio livre, geram uma pasta menos heterogênea, mais compacta, mais resistente e com menor calor de hidratação. Além da reação química, provocam efeito microfíler, devido ao tamanho das partículas, que se introduzem entre os grãos do cimento e se alojam nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como ponto de nucleação, dificultando a orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a cinza de casca de arroz é um material extremamente atrativo quando usado como cimentante suplementar, principalmente em países onde a indústria de cimento Portland é pouco suprida. A cinza de casca de arroz, obtida através da combustão controlada da casca, tem no concreto o seu uso mais nobre, já que, por apresentar uma área superficial muito alta e ser constituída essencialmente de sílica amorfa, é considerada uma pozolana altamente reativa. A tabela 6 apresenta suas características físicas.

Tabela 6 – Caracterização física da cinza de casca de arroz

SUPERFÍCIE ESPECÍFICA	18 m ² /g
MASSA ESPECÍFICA	2,0 g/cm ³
TEOR DE CARBONO	12%
DIÂMETRO MÉDIO	31,25 µm

(fonte: SILVEIRA, 1996)

No entanto, segundo Santos (2006), é preciso evidenciar que, mesmo com as vantagens acima citadas, oriundas da utilização de pozolanas junto ao cimento Portland, o uso do material apresenta também algumas desvantagens. Exemplo disso é a necessidade do uso de aditivos redutores de água em função do aumento da demanda de água nas misturas e a necessidade de cura adequada para que a reação pozolânica aconteça por completo.

4 DOSAGEM

A dosagem é um processo que consiste em definir um traço, através do qual se obtém a quantidade de cada componente da mistura do concreto. O concreto final deverá atender a certos requisitos considerados importantes como trabalhabilidade, resistência e durabilidade (PEREIRA, 2008).

Segundo Rossignolo (2009), de maneira geral, os métodos utilizados para dosagem de concretos leves, são os mesmos aplicados nos concretos convencionais. No entanto, quatro fatores adicionais devem ser considerados:

- a) a necessidade de projetar um concreto com massa específica particular;
- b) a absorção de água dos agregados leves;
- c) a variação da massa específica do agregado leve em função de sua dimensão;
- d) a influência das características dos agregados leves nas propriedades dos concretos.

Também, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), devem ser conhecidas as seguintes informações para se determinar a quantidade de materiais em quilos por metro cúbico de concreto:

- a) granulometria dos agregados miúdos e graúdos;
- b) massa unitária do agregado seco;
- c) massa específica dos materiais;
- d) absorção e umidade livre dos agregados;
- e) variação aproximada da água requerida com o abatimento do tronco de cone, com o teor de ar incorporado e com a granulometria dos agregados disponíveis;
- f) condições do canteiro de obras (máxima relação água/cimento, mínimo teor de ar, mínimo abatimento, dimensão máxima característica do agregado graúdo e resistência nas primeiras idades).

Dosagens otimizadas de concretos leves podem ser obtidas com a utilização conjunta de agregado graúdo leve e agregado miúdo convencional. O ajuste granulométrico desses dois tipos de agregados, utilizando o agregado miúdo com dimensão máxima igual à dimensão mínima do agregado, possibilita o aumento da coesão, a redução da segregação e o aumento

da resistência à compressão do concreto, em relação aos concretos com agregado miúdo leve. Por outro lado, com a utilização de agregados miúdos convencionais pode-se ter um aumento da massa específica do concreto, em comparação com o agregado miúdo leve (ROSSIGNOLO, 2009).

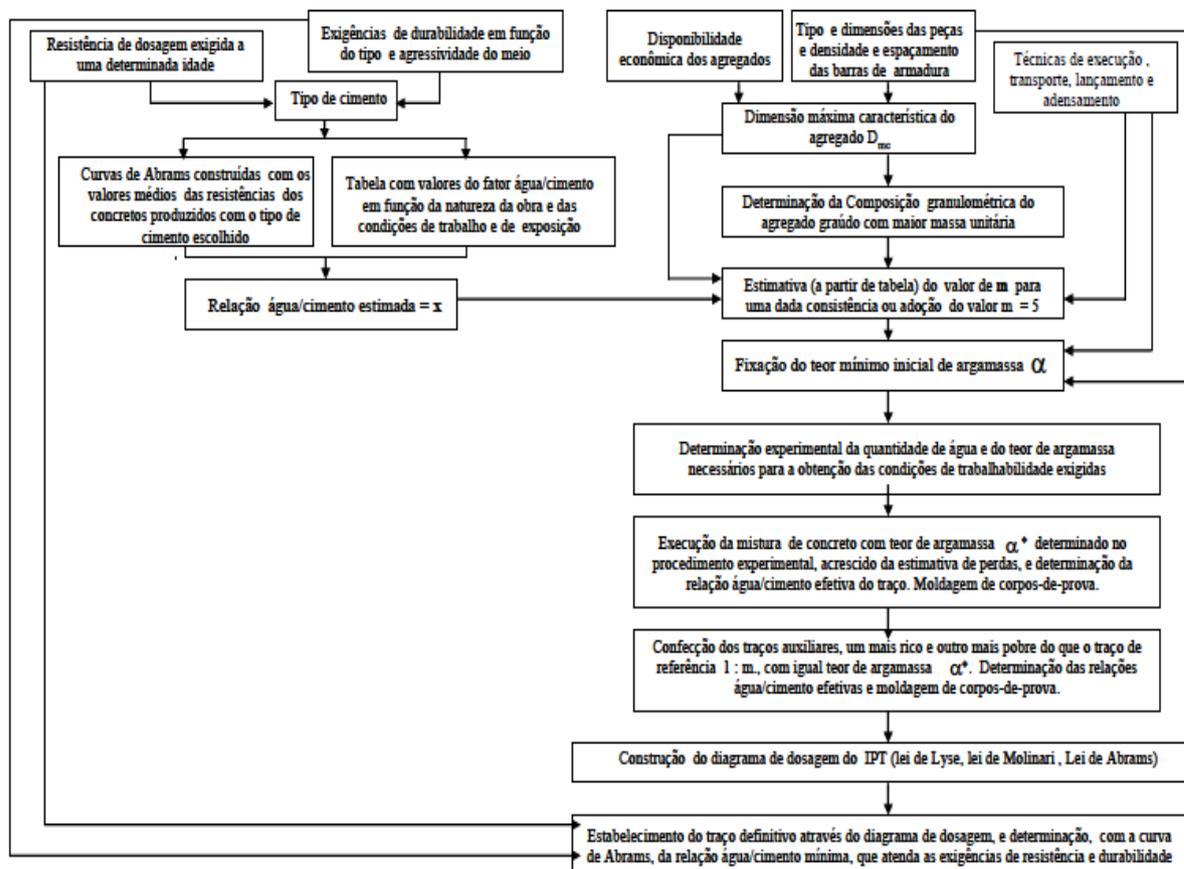
De acordo com Rossignolo (2009), em função da alta absorção de água dos agregados leves, um ponto importante do processo de dosagem desses concretos é a definição da relação água/cimento efetiva. No caso dos concretos com agregados convencionais, a quantidade de água disponível para hidratação do cimento é definida no momento da mistura dos materiais. Com isso, a água presente nos agregados deve ser descontada da água a ser adicionada no momento da mistura.

No Brasil, ainda não há um consenso sobre um método definido de dosagem de concreto. Essa indefinição de norma brasileira sobre os procedimentos e parâmetros de dosagem tem levado vários pesquisadores a proporem seus próprios métodos de dosagem e muitas vezes são confundidos com recomendações da instituição para a qual trabalham (TUTIKIAN et al., 2011).

O método do IPT/EPUSP (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) é um método de dosagem que, pelas instituições que os desenvolveram, tem apresentado uma grande difusão quanto ao seu conhecimento e uso. Esse método foi desenvolvido com o objetivo de possibilitar sua aplicação em qualquer região do País e a materiais diversos. Tal método tem como objetivo principal determinar, experimentalmente, uma quantidade mínima de argamassa que permita o preenchimento dos vazios do agregado graúdo e a lubrificação dos seus grãos, além da trabalhabilidade da mistura. Permite alcançar, com mínimos recursos e de forma ágil, soluções adequadas às necessidades da obra como a adaptabilidade das misturas dosadas em laboratório (BOGGIO, 2000).

Os dados de entrada são apresentados no fluxograma representado na figura 23.

Figura 23 – Fluxograma simplificado do método de dosagem IPT/EPUSP



(fonte: BOGGIO, 2000)

De acordo com Helene e Terzian (1992), o método define que a consistência do concreto fresco depende da composição granulométrica do agregado graúdo, de sua forma e da consistência da argamassa que, por sua vez, está condicionada à forma, granulometria do agregado miúdo e consistência da pasta de cimento, que depende da relação água/cimento. O método prevê a busca do teor ideal de argamassa seca, através de estudo experimental de um traço intermediário, que será utilizado para o traço mais rico e mais pobre em argamassa seca. A determinação do teor ideal de argamassa é realizada por meio de observações visuais da mistura, combinadas com o manuseio do concreto para verificar sua trabalhabilidade e acabamento. Além disso, deve-se realizar o ensaio de abatimento de tronco de cone, para visualização da coesão do concreto no estado fresco.

Segundo Giacomini (2005), por empregarem agregados com menor massa específica, os concretos estruturais leves requerem um maior teor de argamassa do que os concretos

convencionais, pois necessitam melhorar sua trabalhabilidade. Na dosagem de concretos convencionais, o teor de argamassa seca fica compreendido entre 49 e 54%, com pequenas variações em função do tipo de materiais utilizados. Nos concretos leves estruturais, esse teor de argamassa seca corresponde, no mínimo, a 65% para que o concreto apresente as mesmas características de trabalhabilidade do concreto convencional.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados na produção dos concretos leves, o desenvolvimento da sua dosagem e sua produção. Nos próximos itens são descritos as características da argila expandida, da areia média, da areia fina, do cimento e da sílica de casca de arroz utilizada.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir está apresentada a caracterização dos materiais utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

5.1.1 Cimento Portland CPV-ARI

Por adquirir maior resistência em menor tempo, optou-se por utilizar o cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CPV-ARI. Segundo as especificações do fabricante, o mesmo possui massa específica de 3100 kg/m^3 , superfície específica (Blaine) igual a $4190 \text{ cm}^2/\text{g}$, início de pega ocorre após 110 minutos e fim após 200 minutos.

5.1.2 Agregado graúdo

Para a realização desse trabalho foi utilizado, como agregado graúdo, a argila expandida nacional, produzida pela empresa Cinexpan, de Várzea Paulista/SP. Com base na revisão da literatura percebe-se que com menores granulometrias, melhores resultados frente a resistência à compressão são obtidos. Por isso, adotou-se a argila expandida comercialmente denominada de 1506.

Para sua caracterização, primeiramente a amostra de um saco de argila expandida foi seca, em estufa à 200°C por 24 horas. Posteriormente a amostra inicial foi reduzida através do método do quarteamento, conforme a NBR NM 27 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS, 2001) que consistiu em colocar a amostra inicial, que se deseja reduzir, empilhada em forma de cone. Logo após achatou-se o topo do cone com uma pá, formando-se um círculo. Esse círculo foi dividido em quatro partes iguais (figura 24) e, posteriormente excluídas duas partes opostas (figura 25). As frações restantes foram unidas e o processo é repetido até chegar à amostra final.

Figura 24 – Redução da amostra inicial pelo método do quarteamo



(fonte: foto do autor)

Figura 25 – Exclusão de parte da amostra inicial pelo método do quarteamo



(fonte: foto do autor)

Efetuada a redução da amostra, foi iniciada a determinação da composição granulométrica do agregado com base na NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) que consiste em peneirar todo o material resultante da amostra final do quarteamo através de sucessivas peneiras (figura 26), definidas em Norma.

Figura 26 – Sequência de peneiras para análise da granulometria



(fonte: foto do autor)

Com os resultados obtidos através do ensaio de granulometria, têm-se o módulo de finura e a máxima dimensão característica (DMC). A massa específica do agregado graúdo e sua absorção de água foram identificadas através da NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), a massa unitária através da NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006). A caracterização física da argila expandida está descrita na tabela 7.

Tabela 7 – Caracterização física da argila expandida 1506

ABERTURA DA PENEIRA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% RETIDA INDIVIDUAL		% RETIDA ACUMULADA	MÉTODO DE ENSAIO
19,00	0	0	0	0	NBR NM 248
12,50	424,5	17,04	17	17	
9,50	937,3	37,64	38	55	
6,30	774,3	31,09	31	86	
4,75	213,2	8,56	9	95	
2,36	21,8	0,87	1	96	
1,18	20,7	0,83	1	97	
0,60	21,2	0,85	1	98	
0,30	12	0,48	0	98	
0,15	12,8	0,51	0	98	
< 0,15	52,5	2,11	2	100	
TOTAL	2490,3	100	100		
MÓDULO DE FINURA	6,37				NBR NM 248
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm)	19				
MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	0,945				NBR NM 53
MASSA UNITÁRIA (g/cm ³)	0,54				NBR NM 45
ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 24 HORAS (%)	9				NBR NM 53

(fonte: elaborado pelo autor)

5.1.3 Agregado miúdo

Baseado no trabalho prévio de Maycá et al. (2009), visando a melhora da trabalhabilidade do concreto sem aumentar o consumo de cimento, optou-se por substituir parte da areia média por areia fina. A proporção utilizada foi de 80% de areia comercialmente denominada como média e 20% de areia comercialmente denominada como fina do total de areia, proporção que gerou os melhores resultados apontados pelo autor. A figura 27 ilustra a aparência do concreto tendo apenas a areia média como agregado miúdo.

Figura 27 – Aparência do concreto com apenas areia comercialmente denominada como média como agregado miúdo



(fonte: foto do autor)

A areia quartzosa comercialmente denominada como média utilizada no trabalho foi previamente seca e é proveniente do Rio Jacuí. Sua caracterização encontra-se na tabela 8.

Tabela 8 – Caracterização da areia comercialmente denominada como média

ABERTURA DA PENEIRA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% RETIDA INDIVIDUAL		% RETIDA ACUMULADA	MÉTODO DE ENSAIO
9,5	0	0	0	0	NBR NM 248
6,3	0	0	0	0	
4,75	1,9	0,1	0	0	
2,36	154,3	8,28	8	8	
1,18	273,8	14,69	15	23	
0,60	641,7	34,43	34	57	
0,30	531,6	28,52	29	86	
0,15	225,3	12,08	12	98	
< 0,15	35,4	1,9	2	100	
TOTAL	1864	100	100		
MÓDULO DE FINURA	2,72				NBR NM 248
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm)	4,75				
MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	2,62				NBR NM 52
MASSA UNITÁRIA (g/cm ³)	1,58				NBR NM 45

(fonte: elaborado pelo autor)

A areia comercialmente denominada como fina proveniente do Rio Jacuí foi devidamente seca antes de utilizada e caracterizada. A caracterização física da areia fina encontra-se na tabela 9.

Tabela 9 – Caracterização da comercialmente denominada como areia fina

ABERTURA DA PENEIRA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% RETIDA INDIVIDUAL		% RETIDA ACUMULADA	MÉTODO DE ENSAIO
9,5	0	0	0	0	NBR NM 248
6,3	0	0	0	0	
4,75	0	0	0	0	
2,36	0	0	0	0	
1,18	0	0	0	0	
0,60	0	0	0	0	
0,30	203,8	16,16	16	16	
0,15	972	77,08	77	93	
< 0,15	85,2	6,75	7	100	
TOTAL	1261	100	100		
MÓDULO DE FINURA	1,09				NBR NM 248
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm)	0,6				
MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	2,64				NBR NM 52
MASSA UNITÁRIA (g/cm ³)	1,43				NBR NM 45

(fonte: elaborado pelo autor)

5.1.4 Sílica de casca de arroz

Optou-se pela utilização da sílica de casca de arroz por ser uma adição com início recente de comercialização no mercado nacional, anteriormente sua aplicação se restringia a trabalhos científicos. A sílica utilizada nessa pesquisa foi proveniente da cidade de Alegrete/RS, com queima realizada em fornos com temperatura controlada. De acordo com o fabricante, a sílica utilizada possui massa específica de 1,6 g/cm³, massa unitária de 0,40 g/cm³ e superfície específica de 10197 cm²/g.

5.1.5 Aditivo

Tornou-se necessário o uso de aditivo superplastificante, a fim de obter-se uma consistência adequada de uso. Neste trabalho foi utilizado um aditivo superplastificante de terceira geração com base química de éter policarboxílico.

5.1.6 Água

Foi utilizada a água da rede pública de abastecimento local.

5.2 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

A seguir estão descritas as etapas de produção do concreto.

5.2.1 Mistura dos materiais

A operação de mistura dos materiais foi realizada em betoneira de eixo inclinado, de 120 litros, previamente imprimada com argamassa de cimento e areia. Após isso, os materiais iniciais (secos e identificados, conforme figura 28) foram colocados em seu interior, seguindo sempre a seguinte ordem: areia média, 40% da água, cimento, sílica de casca de arroz (quando presente), areia fina, agregado graúdo, restante da água (conforme necessidade) e, por fim, o aditivo superplastificante (somente a quantidade necessária para atingir o abatimento pré-estabelecido em $80 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$). Após a colocação da argila na betoneira, deixou-se misturar por 10 minutos até que parte da água fosse absorvida por parte da argila para que então fosse verificado o abatimento de tronco de cone.

Figura 28 – Materiais separados para mistura em betoneira



(fonte: foto do autor)

5.2.2 Moldagem dos corpos de prova

Para cada traço, foram moldados oito corpos de prova, três para ensaio à compressão aos 7 dias, três para ensaio à compressão aos 28 dias e outros dois para ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias. Os corpos de prova utilizados eram cilíndricos com dimensões de 9,5 cm de diâmetro por 19,5 cm de altura.

O processo de adensamento utilizado foi o manual (figura 29), com haste metálica de 16 mm de diâmetro por 600 mm de comprimento. No molde foram colocadas duas camadas de amostra e executados apenas 15 golpes por camada, medida tomada visando que não ocorresse a segregação do concreto. Como desmoldante, foi utilizado óleo e foi aplicado com esponja.

Figura 29 – Processo de adensamento manual



(fonte: foto do autor)

5.2.3 Cura

Conforme a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), após a concretagem, os corpos de prova foram cobertos com material não absorvente (figura 30), permanecendo assim por 24 horas. Em seguida, foram desmoldados e colocados imersos em solução saturada de cal com temperatura controlada de 23 ± 2 °C conforme ilustra a figura 31.

Figura 30 – Corpos de prova cobertos com material não absorvente



(fonte: foto do autor)

Figura 31 – Câmara com umidade e temperatura controladas



(fonte: foto do autor)

5.3 DOSAGEM EXPERIMENTAL

Na dosagem do concreto foi adotado o método do IPT/EPUSP, que consiste em ajustar o teor de argamassa e a quantidade de água para um traço intermediário tendo um valor de abatimento de tronco de cone pré-fixado. Após isso, são executados mais dois traços, um mais rico e outro mais pobre em consumo de cimento.

Nesse trabalho, cada traço, rico ($m=3,8$), intermediário ($m=4,2$) e pobre ($m=4,6$) tiveram duas versões, uma com a adição de sílica de casca de arroz e outra sem, resultando em um total de seis misturas. Estas proporções foram realizadas em função do exposto em Maycá et al., (2009).

Os parâmetros de dosagem utilizados foram um abatimento de tronco de cone, fixado previamente em $80 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ e um teor de argamassa de 67% determinado experimentalmente. As adições de sílica foram fixadas em 5 % sobre a massa de cimento. A quantidade de água e de aditivo superplastificante não foram fixadas, sendo adicionados conforme a necessidade de atingir um abatimento de tronco de cone fixado inicialmente. A tabela 10 especifica os valores resultantes da dosagem experimental. A figura 32 ilustra a verificação do abatimento de tronco de cone. As quantidades de aditivo e os valores obtidos no ensaio de abatimento de tronco de cone estão apresentados na tabela 11.

Tabela 10 – Resultado da dosagem experimental

RELAÇÃO a/agl.	TEOR DE MATERIAIS SECOS (m)	TEOR DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	TRAÇO	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)	MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO FRESCO (kg/m ³)
0,49	3,8	0%	1:2,216:1,584	277,85	1.469,80
0,47		5%	1:0,05:2,216:1,584	288,67	1.541,52
0,59	4,2	0%	1:2,484:1,716	242,27	1.402,76
0,56		5%	1:0,05:2,484:1,716	262,19	1.531,18
0,68	4,6	0%	1:2,751:1,848	236,69	1.486,17
0,65		5%	1:0,05:2,751:1,848	244,36	1.546,59

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 32 – Verificação do abatimento de tronco de cone



(fonte: foto do autor)

Tabela 11 – Abatimento de tronco de cone e quantidade de aditivo

RELAÇÃO a/agl.	TEOR DE MATERIAIS SECOS (m)	TEOR DE SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE (mm após 10 min)	ADITIVO (% sobre massa de cimento)
0,49	3,8	0%	70	0,49
0,47		5%	180	0,7
0,59	4,2	0%	70	0,42
0,56		5%	90	0,45
0,68	4,6	0%	80	0,3
0,65		5%	80	0,3

(fonte: elaborado pelo autor)

Durante a produção do concreto com teor de materiais secos de 3,8 com adição de sílica, houve um excesso na quantidade de aditivo, proporcionando um abatimento de tronco de cone acima do especificado previamente. Em virtude da falta de tempo e material para a repetição do traço, optou-se por não fazê-lo.

6 ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade. Além disso, é efetuada uma análise dos resultados obtidos e da relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade.

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão axial é uma propriedade de extrema importância na avaliação das estruturas de concreto, uma vez que ela está relacionada com a pasta de cimento endurecida, fornecendo uma boa indicação da qualidade do material. Logo, em projetos estruturais, tal resistência é o parâmetro mais utilizado, pois está relacionado à capacidade do elemento em resistir a esforços sem entrar em colapso.

A tabela 12 apresenta os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, eles correspondem ao maior valor entre 3 corpos de prova para cada traço.

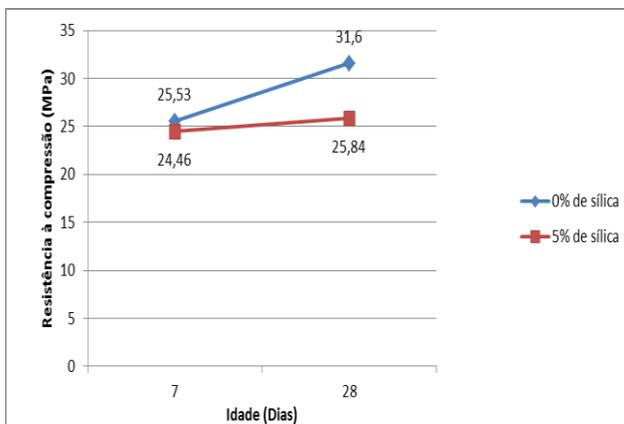
Tabela 12 – Resultados de resistência à compressão

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO						
			7 DIAS		28 DIAS	
			resist. por cp (MPa)	maior resist. (MPa)	resist. por cp (MPa)	maior resist. (MPa)
m=3,8	0% de sílica	cp 1	24,75	25,53	28,69	31,6
		cp 2	23,26		31,6	
		cp 3	25,23		25,06	
	5% de sílica	cp 1	22,29	24,46	25,84	25,84
		cp 2	24,46		19,92	
		cp 3	24,26		25,44	
m=4,2	0% de sílica	cp 1	20,74	20,74	23,62	23,62
		cp 2	19,8		21,23	
		cp 3	19,86		21,09	
	5% de sílica	cp 1	22,97	23,93	27,12	27,12
		cp 2	22,79		25,94	
		cp 3	23,93		25,12	
m=4,6	0% de sílica	cp 1	15,24	17,35	19,8	19,8
		cp 2	16,36		15,46	
		cp 3	17,35		18,38	
	5% de sílica	cp 1	20,11	20,72	24,85	24,85
		cp 2	20,72		23,92	
		cp 3	20,25		24,32	

(fonte: elaborado pelo autor)

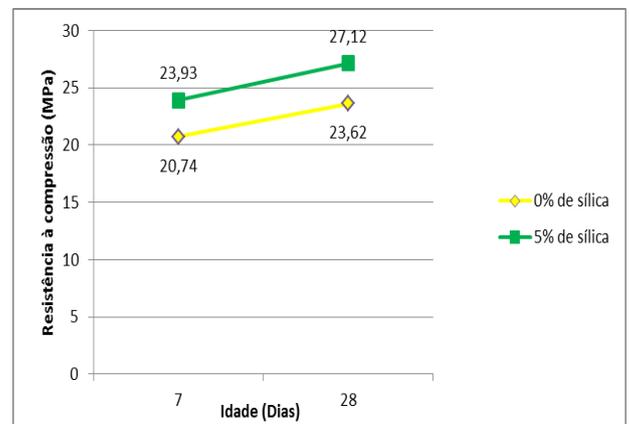
Foram analisados os resultados dos ensaios de resistência à compressão e gerados os gráficos, nos quais são apresentados o maior valor de resistência entre 3 corpos de prova em função da sua idade. Em cada gráfico estão apresentados os resultados com e sem a adição de sílica. A figura 33 apresenta o gráfico de resistência à compressão com o teor de materiais secos (m) igual a 3,8, a figura 34 com o teor de materiais secos igual a 4,2 e, por fim, a figura 35 apresenta o gráfico com o teor de 4,6.

Figura 33 – Resultados de resistência à compressão com teor de materiais secos (m) = 3,8



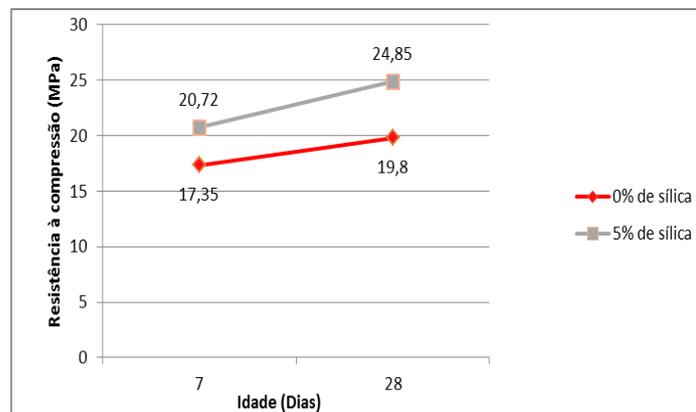
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 – Resultados de resistência à compressão com teor de materiais secos (m) = 4,2



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 35 – Resultados de resistência à compressão com teor de materiais secos (m) = 4,6



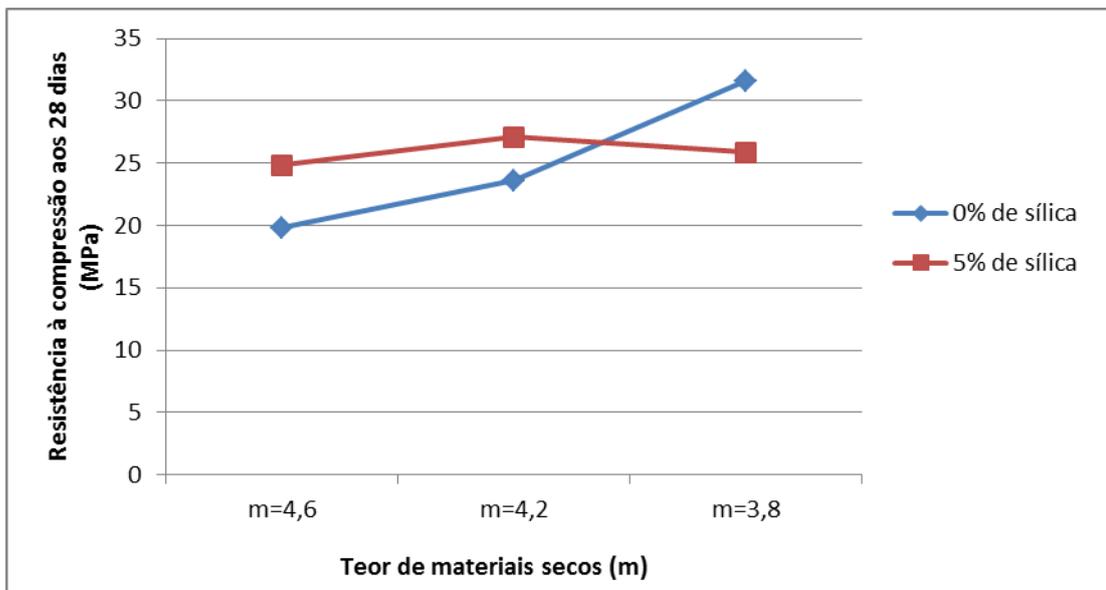
(fonte: elaborado pelo autor)

Nota-se que todos os traços, desde o mais rico (m=3,8) até o mais pobre (m=4,6), apresentaram uma resistência aos 28 dias acima do mínimo para serem caracterizados como

concretos estruturais leves. Além disso, pode-se observar que, com exceção do traço mais rico com sílica, a resistência à compressão dos concretos confeccionados aumentou com a elevação da idade. Essa tendência era esperada, já que é de consenso em tecnologia do concreto. O concreto com $m=3,8$ e com 5% de adição de sílica apresentou um comportamento inesperado, pois não seguiu essa tendência de acréscimo na resistência com o aumento da idade. Fato que pode ser explicado pelo excesso de aditivo utilizado no momento da mistura, visto que este traço apresentou um abatimento de tronco de cone superior aos demais concretos (tabela 11), o que pode ter ocasionado em problemas de moldagem destes concretos, e, por consequência, comprometido os resultados. Cabe salientar que em função do curto tempo para realização desta pesquisa, não foi possível efetuar a repetição do traço mencionado.

O concreto que obteve maior crescimento de resistência com o aumento da idade (28 dias) foi o com traço mais rico sem adição de sílica, apresentando um acréscimo de 23,8%. Na figura 36 são apresentados os valores da resistência à compressão aos 28 dias em função da variação do teor de materiais secos.

Figura 36 – Resultados de resistência à compressão em função do teor de materiais secos (m)

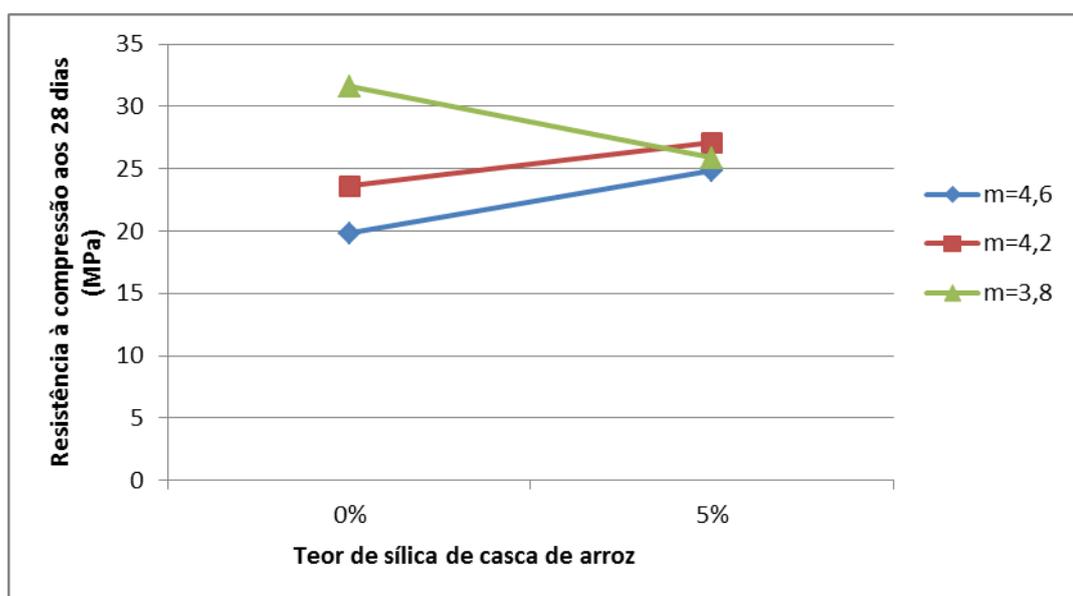


(fonte: elaborado pelo autor)

Através da figura é possível observar um comportamento semelhante de sua resistência quando os concretos diminuem seu teor de materiais secos de 4,6 para 4,2, onde se verificam acréscimos na resistência de 19,3% para os concretos sem a presença de sílica e de 9,14% para os concretos com a adição com a mudança do traço mais pobre (1:4,6) para o traço intermediário (1:4,2). Porém, nota-se que os comportamentos dos concretos para o traço mais rico (1:3,8), não seguiu a mesma tendência mencionada, uma vez que a presença da sílica acarretou em um decréscimo da resistência. Este fato pode ter ocorrido devido a problemas no proporcionamento do aditivo utilizado, conforme já abordado anteriormente.

Outro aspecto importante a ser considerado é a relação da resistência à compressão dos concretos, aos 28 dias, em função do teor de sílica nos concretos. A figura 37 apresenta o gráfico que mostra a influência dessa adição na resistência.

Figura 37 – Resultados de resistência à compressão em função do teor de sílica de casca de arroz



(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a figura é possível verificar que os concretos produzidos a partir dos traços pobre (1:4,6) e intermediário (1:4,2) apresentaram aumento em sua resistência com a adição de 5% de sílica de casca de arroz, perfazendo 25,5% e 14,8%, respectivamente, em relação aos concretos referência. O ganho de resistência era esperado, e está relacionado aos efeitos químico ou pozolânico e físico que esta adição mineral promove na microestrutura dos compostos cimentícios. O efeito químico promovido pela sílica na matriz de concreto está

ligado à reação pozolânica entre o SiO_2 e o Ca(OH)_2 resultante da hidratação do cimento, aumentando a resistência da pasta. Já o efeito físico, ou efeito fíler, corresponde ao preenchimento dos vazios existentes na interface agregado-pasta, aumentando a coesão interna da matriz de concreto, que por consequência aumenta a resistência à compressão do material (NEVILLE, 1997).

6.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Mesmo que a resistência mecânica seja o parâmetro básico do projeto de estruturas de concreto, é necessário levar em consideração o comportamento tensão-deformação dos materiais empregados. A tabela 13 apresenta os resultados de módulo de elasticidade tangente inicial dos concretos leves aos 28 dias. Cabe ressaltar que os valores de módulo de elasticidade tangente inicial dos concretos estudados correspondem à deformação produzida no intervalo de 5 MPa até 30% da resistência à compressão aos 28 dias.

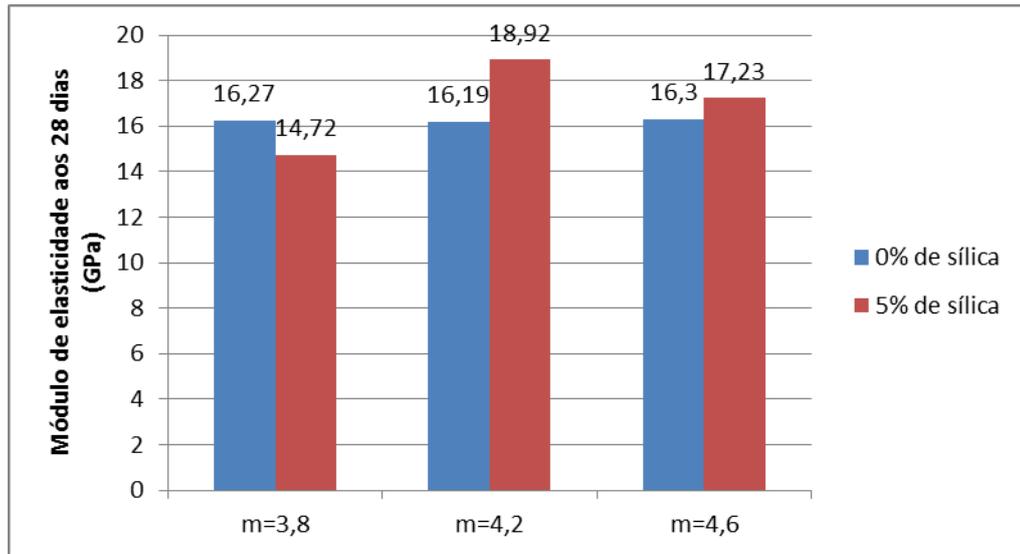
Tabela 13 – Resultados de módulo de elasticidade

MÓDULO DE ELASTICIDADE AOS 28 DIAS				
		valores por cp (GPa)		maior módulo (GPa)
m=3,8	0% de sílica	cp 1	11,2	16,27
		cp 2	16,27	
	5% de sílica	cp 1	14,72	14,72
		cp 2	14,58	
m=4,2	0% de sílica	cp 1	16,19	16,19
		cp 2	14,29	
	5% de sílica	cp 1	16,47	18,92
		cp 2	18,92	
m=4,6	0% de sílica	cp 1	15,22	16,3
		cp 2	16,3	
	5% de sílica	cp 1	16,13	17,23
		cp 2	17,23	

(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 38 apresenta o gráfico gerado a partir dos resultados da tabela 13, o qual demonstra os valores de módulo de elasticidade aos 28 dias em função do teor de materiais seco(m).

Figura 38 – Resultados de módulo de elasticidade dos concretos



(fonte: elaborado pelo autor)

Com exceção do concreto mais rico, os concretos apresentaram um ganho no módulo de elasticidade de 16,86% para $m=4,2$ e de 5,7% para $m=4,6$ em relação aos mesmos concretos, porém sem a sílica. Através da fórmula 1, conforme NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), foram calculados os módulos de elasticidade previstos para os concretos convencionais com mesma resistência à compressão dos concretos estudados. Os valores encontrados são apresentados na tabela 14.

$$E_{ci} = 5600 (f_{ck})^{1/2} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

E_{ci} = módulo de elasticidade tangente inicial;

f_{ck} = resistência à compressão do concreto.

Tabela 14 – Estimativa de módulo de elasticidade para concretos convencionais

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Estimativa do módulo de elasticidade do concreto convencional (GPa)
31,6	31,47
25,84	28,47
23,62	27,21
27,12	29,16
19,8	24,92
24,85	27,91

(fonte: elaborado pelo autor)

Como pode se observar, os módulos de elasticidade dos concretos leves estruturais com argila expandida como agregado graúdo são inferiores aos dos concretos convencionais, isso pode ser explicado pelo baixo módulo de elasticidade do agregado graúdo de argila expandida.

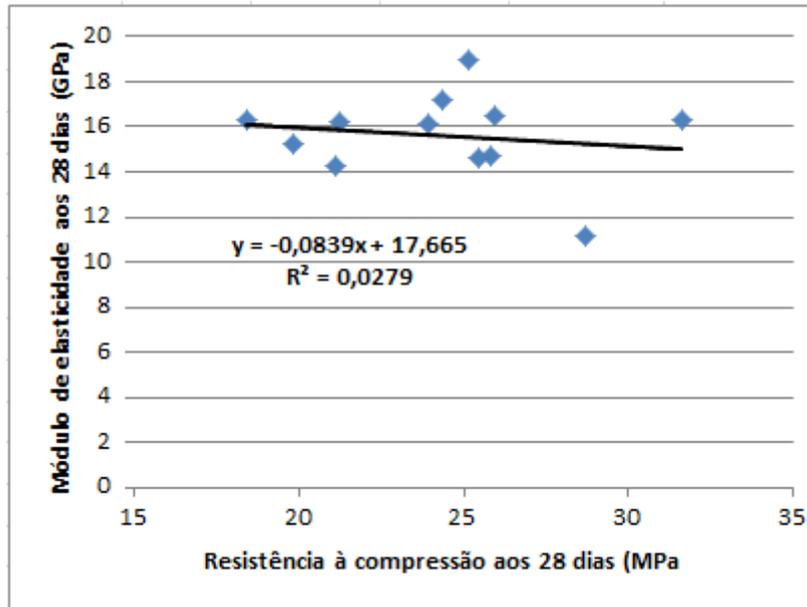
Considerando que o método descrito na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007) para estimar o módulo de elasticidade dos concretos convencionais é válido, todos os concretos leves apresentaram valores de módulo de deformação entre 52 e 66% dos concretos convencionais, assim como o ACI 213R-87 (1999, tradução nossa) prevê, onde o instituto cita que, normalmente, o valor do módulo de deformação dos concretos leves varia entre 50 e 75% do valor do módulo de deformação dos concretos convencionais com mesma resistência à compressão.

6.3 RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Nem sempre os concretos de maior resistência à compressão são os que apresentam o maior módulo de elasticidade, tal fato foi verificado nos resultados obtidos nesta pesquisa experimental, onde o concreto que atingiu a maior resistência à compressão, 31,6 MPa, apresentou apenas 16,27 GPa de módulo e o que atingiu 27,12 MPa de resistência, apresentou 18,92 GPa de módulo de elasticidade. Na tentativa de encontrar uma possível correlação entre as resistências à compressão aos 28 dias e seus respectivos módulos de elasticidade, gerou-se

um diagrama de dispersão (figura 39), no qual foram plotados os resultados obtidos para as propriedades mencionadas.

Figura 39 – Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos concretos



(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando a figura é possível observar que não existe uma correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos leves estudados. Fato explicado através do Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (R^2), o qual pode variar entre -1 e 1, sendo que para resultado $R^2=1$ obtem-se uma correlação positiva forte e para resultado $R^2= -1$ uma correlação negativa forte. O coeficiente resultante R^2 dos dados dos concretos ensaiados nesse programa experimental teve como resultado $R^2=0,0279$, indicando uma correlação positiva fraca.

7 CONCLUSÕES

Este estudo buscou produzir concreto estrutural leve com argila expandida como agregado graúdo tendo como objetivo encontrar uma relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos produzidos. Para tal, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias e módulo de elasticidade aos 28 dias.

As conclusões expostas a seguir não devem ser tomadas de forma absoluta, uma vez que estão relacionadas a resultados de concretos que foram produzidos com tipos de materiais e técnicas de execução específicas. Ainda, é importante ressaltar que a representatividade do comportamento destes concretos deve ser complementada pela realização de novos estudos, buscando confirmar os resultados encontrados.

Analisando-se os resultados obtidos no programa experimental, pode-se relacionar as seguintes conclusões:

- a) todos concretos apresentaram resistência à compressão acima da mínima, estabelecida pelo ACI 213R-87, para que sejam caracterizados como estruturais;
- b) com a elevação da idade, os concretos apresentaram um aumento de sua resistência, sendo que o concreto que apresentou maior resistência, 31,6 MPa aos 28 dias, foi o com traço mais rico porém sem a adição de sílica. No entanto este resultado deverá ser reavaliado;
- c) os concretos produzidos com o traço pobre e intermediário apresentaram um aumento de 25,5% e 14,8% respectivamente em suas resistências à compressão com a adição de sílica de casca de arroz.
- d) o módulo de elasticidade dos concretos apresentaram valores entre 52 e 66% dos módulos estimados para concretos convencionais, conforme a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), com mesma resistência à compressão;
- e) os concretos produzidos não apresentaram relação direta entre resistência à compressão e módulo de elasticidade, o concreto com maior resistência à compressão não foi o que apresentou o maior módulo de elasticidade.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 213R-87**: guide for structural lightweight aggregate concrete. Farmington Hills, USA, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 35**: agregados leves para concreto estrutural: especificação. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR NM 27**: agregados: redução da amostra de campo para ensaios em laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 8522**: concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BEZERRA, I. M. T. **Cinza da casca de arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

BOGGIO, J. A. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concreto de cimento Portland**. 2000. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

ECONOMIC DESIGN AND CONSTRUCTION WITH LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE. **Project BE96-3942/R2**: LWAC materials properties, State-of-the-Art., Norway, 1998.

ECONOMIC DESIGN AND CONSTRUCTION WITH LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE. **Project BE96-3942/R9**: technical and economic mixture optimization of high strength lightweight aggregate concrete. Norway, 2000.

EVANGELISTA, A. C. J.; SHEHATA, L. C. D.; ALMEIDA, I. R. Características mecânicas de concretos leves de alta resistência com argila expandida, produzidos no Brasil. In:

INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF STRUCTURES, 1996, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1996. p. 170-189.

GIACOMIN, R.C. **Estudo das propriedades do concreto com argila expandida**. 2005. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

MAYCÁ, J.; CREMONINI, R. A.; RECENA, F. A. P. Estudo da resistência à compressão de concretos leves produzidos com argila expandida nacional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., 2009, Curitiba. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2009. Não paginado. Disponível em: <http://www.allquimica.com.br/arquivos/websites/artigos/concreto_leve-Mayca-Recena-Cremonini2009101315555.pdf>. Acesso em: 21 maio. 2011.

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

MORAVIA, W. G.; OLIVEIRA, C. A. S.; GUMIERI, A. G.; VASCONCELOS, W. L. Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. **Revista Cerâmica**, v. 52, p. 193-199, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

PAULON, V. A. A microestrutura do concreto convencional. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: ensino, pesquisas e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 583-604.

PEREIRA, M. R. **Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves**. 2008. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1995.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto ou pozolânico**. 2006. 320 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos: dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. 220 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

_____. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. São Paulo: Pini, 2009.

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

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. A influência do teor de argila expandida na condutividade térmica do concreto leve. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007. Não paginado.

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho.** 2006. 267 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SILVA, M. M. S. **Betão leve estrutural com agregados de argila expandida.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Lisboa, 2007.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos:** estudo do ataque por sulfatos. 1996. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SILVEIRA, A. A.; DAL MOLIN, D. C. **A influência do tratamento térmico da cinza de casca de arroz na pozolanidade e na resistência à compressão de argamassas.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 1., 1995, Goiânia.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa:** método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland. 2006. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

TIBONI, R. A. **Utilização da cinza da casca de arroz de termoeétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto:** ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 415-452.

VIEIRA, M. G. **Betões de elevado desempenho com agregados leves:** durabilidade e microestrutura. 2000. 217 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2000.

ZHANG, M. H.; GJORV, O. E. Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 2, p. 150-158, 1991.