UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

BRUNO CARLOS DE SANTIS

**Concretos leves com agregados inovadores de argila
vermelha calcinada e subprodutos agroindustriais**

Pirassununga

2016

BRUNO CARLOS DE SANTIS

**Concretos leves com agregados inovadores de argila
vermelha calcinada e subprodutos agroindustriais**

“Versão corrigida”

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais Voltados à Agroindústria

Orientador: Prof. Dr. João Adriano Rossignolo

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Raymundo Morelli

Pirassununga

2016

BRUNO CARLOS DE SANTIS

**Concretos leves com agregados inovadores de argila
vermelha calcinada e subprodutos agroindustriais**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais Voltados à Agroindústria

Data de aprovação: 18/11/2016

Banca examinadora:

João Adriano Rossignolo - Presidente da Comissão Julgadora - Orientador
Professor Doutor – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP – FZEA/USP
Departamento de Engenharia de Biosistemas (ZEB)

Márcio Raymundo Morelli
Professor Doutor – Universidade Federal de São Carlos - UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Materiais

Antônio de Paulo Peruzzi
Professor Doutor – Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Faculdade de Engenharia Civil

César Fabiano Fioriti
Professor Doutor – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Jorge Luís Akasaki
Professor Doutor - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

BRUNO CARLOS DE SANTIS

**Concretos leves com agregados inovadores de argila
vermelha calcinada e subprodutos agroindustriais**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Desenvolvimento,
Caracterização e Aplicação de Materiais
Voltados à Agroindústria

Data de aprovação: 18/11/2016

Banca examinadora:

João Adriano Rossignolo - Presidente da Comissão Julgadora - Orientador
Professor Doutor – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP – FZEA/USP
Departamento de Engenharia de Biossistemas (ZEB)

Márcio Raymundo Morelli
Professor Doutor – Universidade Federal de São Carlos - UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Materiais

Antônio de Paulo Peruzzi
Professor Doutor – Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Faculdade de Engenharia Civil

César Fabiano Fioriti
Professor Doutor – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Jorge Luis Akasaki
Professor Doutor - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Ficha catalográfica elaborada pelo
Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

d236c de Santis, Bruno Carlos
Concretos leves com agregados inovadores de
argila vermelha calcinada e subprodutos
agroindustriais / Bruno Carlos de Santis ;
orientador João Adriano Rossignolo ; coorientador
Márcio Raymundo Morelli. -- Pirassununga, 2016.
110 f.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciência de Materiais) -- Faculdade de
Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade
de São Paulo.

1. concreto leve estrutural. 2. subprodutos
agroindustriais. 3. agregado leve de argila
calcinada. 4. agregado leve de alta eficiência. I.
Rossignolo, João Adriano, orient. II. Morelli,
Márcio Raymundo, coorient. III. Título.

*Ao meu filho, Tomás, e à minha
esposa, Samira.*

*Aos meus Pais, Luzia e Francisco,
e às minhas irmãs, Ligia e Paula.*

AGRADECIMENTOS

A toda a minha família, tios, tias, primos, primas, Vô Miro (*in memoriam*), Vó Nair, Vô Chico e Vó Lourdes e em especial aos meus Pais Francisco e Luzia, pela oportunidade de estar aqui hoje, por todas as oportunidades que me proporcionaram e proporcionam e pelo exemplo a ser seguido; às minhas irmãs Ligia e Paula, à minha esposa Samira e ao meu filho Tomás, pela ajuda, incentivo, companheirismo e principalmente pelo amor.

Ao Professor Doutor João Adriano Rossignolo, grande amigo, pela valiosa e imprescindível orientação, amizade e incentivo ao longo desses últimos anos, de fundamental importância para a conclusão desse trabalho e do meu crescimento e amadurecimento como pessoa, engenheiro e pesquisador.

Ao Professor Doutor Marcio Raymundo Morelli, pela valiosa contribuição ao trabalho, de fundamental importância para a conclusão do mesmo.

A todos os meus amigos, em especial aos amigos da Pró-Vida e do Parque Faber, pelo incentivo, companheirismo e principalmente pela Amizade, Amizade verdadeira. Amigos para todas as horas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento desta pesquisa.

À empresa Maristela Telhas Ltda. (Top Telha), pelo fornecimento da matéria-prima (amostra de solo) utilizada nesta pesquisa.

Ao Laboratório de Análise de solos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP, pela disponibilização de suas instalações para realização de ensaios nas matérias-primas.

Aos professores, amigos e funcionários do Laboratório de Construções Rurais e Ambiente da FZEA/USP, pela disponibilização de suas instalações para a confecção dos agregados leves de argila calcinada.

Aos professores do programa de pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo e à aluna de iniciação científica Letícia Missiatto Gavioli, pela contribuição para esta pesquisa.

Aos professores, amigos e funcionários do Laboratório de Construção Civil (LCC), pela disponibilização de suas instalações para realização de alguns ensaios para esta pesquisa.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente com a realização deste trabalho, os meus profundos agradecimentos.

RESUMO

SANTIS, B. C. Concretos leves com agregados inovadores de argila vermelha calcinada e subprodutos agroindustriais. 2016. 102 p. Tese (Doutorado). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

Este trabalho tem por objetivo o estudo de concretos leves com agregados inovadores de argila vermelha calcinada e subprodutos agroindustriais. A argila utilizada na pesquisa foi caracterizada por meio das técnicas de limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), análise granulométrica, análise química e difração de raios X (DRX). Foram confeccionados corpos de prova de argila vermelha calcinada com incorporações de serragem de madeira, cinza do bagaço da cana-de-açúcar e silicato de sódio. Os corpos de prova de argila vermelha calcinada, queimados à temperatura de 900 °C, foram caracterizados por meio da avaliação da retração linear, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, expansão por umidade e resistência à compressão. Após a caracterização dos corpos de prova de argila vermelha calcinada, foram produzidos dois tipos de agregados, sendo o primeiro composto por 57% de argila e 43% de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, conformados com água e silicato de sódio (proporção 1:1), e o segundo composto por 70% de argila e 30% de serragem de madeira. Os corpos de prova de concreto leve foram caracterizados pelos ensaios de *slump*, massa específica fresca, resistência à compressão, módulo de deformação, retração por secagem, absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente e condutividade térmica. Os resultados desta pesquisa indicam a viabilidade da produção de agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporações de subprodutos agroindustriais para utilização em concretos, uma vez que, mesmo com grande quantidade de utilização de subprodutos agroindustriais na produção dos agregados leves, os concretos produzidos com esses agregados apresentaram características similares aos concretos produzidos com agregados comerciais, apresentando um ganho econômico e energético significativo.

Palavras chave: concreto leve estrutural, subprodutos agroindustriais, agregado leve de argila calcinada, agregado leve de alta eficiência.

ABSTRACT

SANTIS, B. C. Lightweight concrete with innovative calcined clay lightweight aggregates with agro-industrial by-products. 2016. 102 p. Thesis (Doctorate). Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

This paper aims to study lightweight concrete with innovative calcined clay lightweight aggregates made with agro-industrial by-products. The clay used in this research was characterized by techniques of liquid and plastic limits, particle size analysis, chemical analysis and X-ray diffraction (XRD). Calcined clay specimens were made with incorporations of wood sawdust, sugar cane ash and sodium silicate. These specimens, burned at a temperature of 900°C, were characterized by evaluating of linear shrinkage, water absorption, apparent porosity, specific mass, moisture expansion and compressive strength. After characterization of calcined clay specimens, two types of calcined clay lightweight aggregates with agro-industrial by-products were produced, wherein the first made with 57% of clay and 43% of sugar cane ash, mixed with water and sodium silicate (proportion 1:1) and the second made with 70% clay and 30% wood sawdust, mixed with water and burned at 900 °C. Specimens of lightweight concrete were characterized by slump test, fresh specific mass, compressive strength, modulus of elasticity, water absorption, voids and bulk density and thermal conductivity. Results of this research indicates the viability to produce calcined clay lightweight aggregates made with agro-industrial by-products to use in concrete, even using large amount of agro-industrial by-products, once concretes made with lightweight aggregates with agro-industrial by-products presented similar characteristics than those made with commercial aggregates, presenting significant energetic gain.

Keywords: Lightweight concrete, agro-industrial by-products, calcined clay lightweight aggregate, high-efficient lightweight aggregate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Edifícios de múltiplos pavimentos em concreto leve estrutural.	17
Figura 2 – Ruptura de concreto confeccionado com agregados leves (esquerda) e com agregados convencionais (direita).	22
Figura 3 – Ilustração do comportamento dos valores de resistência à compressão dos concretos leves em relação à resistência da argamassa.	22
Figura 4 – Micrografia (MEV) de agregados produzidos pelo processo de sinterização. FONTE: ZHANG e GJφRV (1991)	28
Figura 5 – Micrografia (MEV) de agregados produzidos pelo processo de forno rotativo. FONTE: ZHANG e GJφRV (1991)	29
Figura 6 – Representação esquemática do arranjo espacial da estrutura dos geopolímeros. FONTE: Bezerra et al., 2013.	41
Figura 7 – Amostras de solo antes (a) e depois (b) do ensaio	48
Figura 8 – Filete de solo úmido rolado para frente e para trás, em movimentos contínuos	49
Figura 9 – Ensaio de sedimentação em andamento	49
Figura 10 – Picnômetros com amostra de solo e com água destilada colocados no aparelho de vácuo	50
Figura 11 – Preparação da massa para extrusão	54
Figura 12 – Extrusão dos corpos de prova de argila calcinada	55
Figura 13 – Corpos de prova cortados e identificados	55
Figura 14 – Corpos de prova separados em lotes (a) e imersos em água a 100 °C (b)	57
Figura 15 – Pesagem dos corpos de prova imersos em água	58
Figura 16 – Ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova queimados	59
Figura 17 – Agregados cortados e secando à temperatura do ambiente	60
Figura 18 – Moldagem dos corpos de prova retangulares e cilíndricos	62
Figuras 19 e 20 – Ensaio de abatimento do tronco de cone nos concretos	64
Figura 21 – Pesagem do concreto para ensaio de massa específica fresca	65
Figuras 22 e 23 – Corpo de prova de concreto preparado para o ensaio de compressão e rompido	66
Figura 24 – Ensaio de módulo de deformação dos concretos	67
Figura 25 – Fôrmas retangulares para produção dos corpos de prova para ensaio de retração linear de secagem dos concretos	68
Figura 26 – Difratograma de raios X da argila	71
Figura 27 – Análise térmica diferencial da amostra de argila	73
Figura 28 – Análise termogravimétrica da amostra de argila	73
Figura 29 – Análise granulométrica da serragem	75
Figura 30 – Imagens de microscopia eletrônica das peças queimadas produzidas com diferentes quantidades de serragem de madeira	79
Figura 31 – Porosidade aparente e absorção de água das peças produzidas com argila e serragem de madeira	80
Figura 32 – Porosidade aparente e absorção de água das peças produzidas com argila e serragem de madeira e silicato de sódio	81
Figura 33 – Porosidade aparente e absorção de água das peças produzidas com argila e cinza	81
Figura 34 – Porosidade aparente e absorção de água das peças produzidas com argila, cinza e silicato de sódio	82
Figura 35 – Massa específica aparente dos corpos de prova conformados com serragem de madeira	83
Figura 36 – Massa específica aparente dos corpos de prova conformados com cinza do bagaço da cana-de-açúcar	84
Figura 37 – Resistência à compressão dos corpos de prova conformados com serragem de madeira	85

<i>Figura 38 – Resistência à compressão dos corpos de prova conformados com cinza do bagaço da cana-de-açúcar</i>	85
<i>Figura 39 – Resistência à compressão dos concretos</i>	90
<i>Figura 40 – Resistência à compressão das argamassas</i>	90
<i>Figura 41 – Relação entre a resistência à compressão da argamassa e dos concretos confeccionados no traço rico</i>	91
<i>Figura 42 – Relação entre a resistência à compressão da argamassa e dos concretos confeccionados no traço pobre</i>	91
<i>Figura 43 – Fator de eficiência dos concretos</i>	93
<i>Figura 44 – Imagem da zona de transição pasta/agregado dos concretos produzidos com argila expandida no traço pobre (MEV – ampliação: 500 vezes)</i>	96
<i>Figura 45 – Imagem da zona de transição pasta/agregado dos concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada e cinza no traço pobre (MEV – ampliação: 500 vezes)</i>	96
<i>Figura 46 – Imagem da zona de transição pasta/agregado dos concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada e serragem de madeira no traço pobre (MEV – ampliação: 500 vezes)</i>	97
<i>Figura 47 – Imagem da zona de transição pasta/agregado dos concretos produzidos com argila expandida no traço rico (MEV – ampliação: 500 vezes)</i>	97
<i>Figura 48 – Imagem da zona de transição pasta/agregado dos concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada e cinza no traço rico (MEV – ampliação: 500 vezes)</i>	98
<i>Figura 49 – Imagem da zona de transição pasta/agregado dos concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada e serragem de madeira no traço rico (MEV – ampliação: 500 vezes)</i>	98
<i>Figura 50 – Evolução da retração linear de secagem dos corpos de prova de concreto</i>	99
<i>Figura 51 – Massa específica e condutividade térmica dos concretos</i>	102

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Valores de resistência e massa específica dos concretos leves</i>	16
<i>Tabela 2 – Relação aproximada de consumo de cimento e resistência à compressão de concretos estruturais leves. FONTE: adaptado de ACI 213-R87, 1999.</i>	18
<i>Tabela 3 – Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral e por flexão.</i>	24
<i>Tabela 4 – Equações para cálculo do módulo de deformação em concretos.</i>	25
<i>Tabela 5 – Características dos concretos produzidos com casca de palmeira como agregado.</i>	32
<i>Tabela 6 – Características dos concretos produzidos com diatomita e pedra-pomes.</i>	33
<i>Tabela 7 – Características dos agregados de argila expandida.</i>	34
<i>Tabela 8 – Característica dos agregados leves de argila calcinada.</i>	35
<i>Tabela 9 – Resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados pelotizados de diferentes diâmetros. FONTE: Lo et al., 2007.</i>	35
<i>Tabela 10 – Característica das amostras de argila e dos agregados produzidos na pesquisa.</i>	36
<i>Tabela 11 – Característica dos agregados leves de argila calcinada.</i>	37
<i>Tabela 12 – Característica dos concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada.</i>	37
<i>Tabela 13 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa.</i>	38
<i>Tabela 14 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa.</i>	39
<i>Tabela 15 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa</i>	40
<i>Tabela 16 – Características dos agregados produzidos na pesquisa</i>	40
<i>Tabela 17 – Porcentagem dos materiais utilizados na confecção dos agregados</i>	42
<i>Tabela 18 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa. FONTE: Bui et al. (2012).</i>	43
<i>Tabela 19 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa</i>	43
<i>Tabela 20 – Características dos agregados produzidos com geopolímeros</i>	44
<i>Tabela 21 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa</i>	45
<i>Tabela 22 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa</i>	45
<i>Tabela 23 – Resumo do programa experimental</i>	47
<i>Tabela 24 – Quantidade dos produtos utilizados para a moldagem dos corpos de prova de argila calcinada</i>	54
<i>Tabela 25 – Quantidades dos produtos utilizados para produção dos agregados leves de argila calcinada de alta eficiência</i>	60
<i>Tabela 26 – Propriedades e características do cimento utilizado na pesquisa</i>	61
<i>Tabela 27 – Características físicas dos agregados graúdos utilizados na produção dos concretos</i>	61
<i>Tabela 28 – Consumos teóricos de cimento, areia, agregado e água para produção de 1 m³ de concreto</i>	62
<i>Tabela 29 – Absorção de água dos agregados após 1 hora de imersão em água</i>	63
<i>Tabela 30 – Consumos de cimento, areia, agregado e água, levando-se em consideração a absorção de água dos agregados para produção de 1 m³ de concreto</i>	63
<i>Tabela 31 – Ensaio realizados nos corpos de prova de concreto</i>	64
<i>Tabela 32 – Análise granulométrica da argila</i>	71
<i>Tabela 33 – Composição química da argila obtida através do ensaio de FRX (% de massa)</i>	72
<i>Tabela 34 – Resultados obtidos através das análises térmicas</i>	74
<i>Tabela 35 – Análise granulométrica da serragem de madeira</i>	74
<i>Tabela 36 – Análise granulométrica da cinza do bagaço de cana utilizado na pesquisa</i>	75
<i>Tabela 37 – Análise química da cinza utilizada na pesquisa</i>	76
<i>Tabela 38 – Características do silicato de sódio utilizado na pesquisa. FONTE: ISOTEC Produtos para Metalurgia.</i>	76
<i>Tabela 39 – Absorção de água e porosidade aparente das peças queimadas</i>	78
<i>Tabela 40 – Massa específica aparente e resistência à compressão dos corpos de prova queimados</i>	82

<i>Tabela 41 – Características dos concretos no estado fresco</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 42 – Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto e argamassa</i>	<i>89</i>
<i>Tabela 43 – Massa específica aparente dos corpos de prova de concreto e de argamassa</i>	<i>92</i>
<i>Tabela 44 – Módulo de deformação dos corpos de prova de concreto</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 45 – Relação entre os valores experimentais e teóricos dos módulos de deformação dos concretos</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 46 – Absorção de água e índice de vazios dos concretos</i>	<i>95</i>
<i>Tabela 47 – Retração linear de secagem dos corpos de prova de concreto</i>	<i>99</i>
<i>Tabela 48 – Comparação entre a retração linear final (teórica) e a obtida aos 250 dias (experimental)</i>	<i>101</i>
<i>Tabela 49 – Condutividade térmica dos concretos</i>	<i>101</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa.....	14
1.2 Objetivos	15
2. CONCRETO LEVE.....	16
2.1 Introdução.....	16
2.2 Produção de concretos leves	18
2.3 Propriedades dos concretos leves.....	20
3. AGREGADOS LEVES PARA CONCRETO	27
3.1 Principais características dos agregados leves	28
a) Forma e textura superficial	28
b) Massa específica	29
c) Resistência à compressão e modulo de deformação.....	30
d) Porosidade e absorção de água	31
3.2 Principais tipos de agregados leves.....	32
4. METODOLOGIA	47
4.1 Caracterização das matérias-primas utilizadas na pesquisa	47
4.2 Confeção dos corpos de prova de argila calcinada	52
4.3 Ensaios realizados nos corpos de prova queimados.....	56
4.4 Produção dos agregados leves de argila calcinada.....	59
4.5 Produção dos corpos de prova de concreto.....	60
4.6 Ensaios realizados nos corpos de prova de concreto	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
5.1 Caracterização das matérias-primas	70
5.1.1 Amostra de solo (argila).....	70
5.1.1.1 Limites de consistência e massa específica dos sólidos.....	70
5.1.1.2 Análise granulométrica	70
5.1.1.3 Difração de raios – X (DRX)	71
5.1.1.4 Espectrometria e fluorescência de raios X (FRX)	71
5.1.1.5 Análises térmicas (ATD e TG)	72
5.1.2 Serragem de madeira	74
5.1.3 Cinza do bagaço da cana.....	75
5.1.4 Ativador alcalino	76
5.2 Caracterização dos corpos de prova de argila vermelha calcinada	77
5.3 Caracterização dos corpos de prova de concreto.....	86
6. CONCLUSÕES	103

7. CONTINUIDADE DA PESQUISA.....	105
8. REFERÊNCIAS.....	106

1. INTRODUÇÃO

O concreto com agregados leves, ou concreto leve estrutural, apresenta-se como um material de construção consagrado em todo o mundo, com aplicação em diversas áreas da construção civil. A ampla utilização desse material é particularmente atribuída aos benefícios promovidos pela redução da massa específica do concreto, como a redução de esforços na estrutura das edificações, a economia com fôrmas e cimbramento, bem como a diminuição dos custos com transporte e montagem de construções pré-fabricadas (ZHANG e GJØRV, 1991; ROSSIGNOLO, 2009).

Atualmente, devido à maior demanda da construção civil e ao déficit de agregados leves naturais, agregados leves de argila expandida aparecem como uma das únicas opções de agregados leves para a produção de concretos, tornando sua utilização modesta, frente ao seu potencial de utilização. A sua utilização está concentrada no estado de São Paulo e em estados vizinhos, dada a localização da fábrica de argila expandida CINEXPAN, em Várzea Paulista – SP, único fabricante de agregados leves no país. Por se tratar de uma única empresa produtora, o alto custo do transporte a longas distâncias dificulta a disseminação dessa tecnologia por todo o território nacional (ROSSIGNOLO, 2009a; TEZUKA, 1973). Uma alternativa para a disseminação desta tecnologia é a utilização de agregados leves de argila calcinada, produzidos a partir da argila, utilizando-se um polo empresarial composto por mais de 11.000 empresas produtoras de materiais cerâmicos, que, com pequenas modificações em seus processos produtivos, podem produzir agregados leves de argila calcinada (SEBRAE, 2008).

Estudos realizados a partir de 2000 no Laboratório de Construção Civil da Escola de Engenharia de São Carlos – USP demonstraram que há um grande potencial de utilização dos concretos leves na produção de elementos pré-fabricados, tais como painéis estruturais e de vedação (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2002 e 2004; ROSSIGNOLO e FERRARI, 2006; ROSSIGNOLO, 2009b). Além disso, desde a década de 1980 o Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – DNER (DNER, 1981) desenvolve pesquisas sobre a utilização de agregados de argila calcinada de cerâmica vermelha para aplicação em concreto asfáltico, devido à escassez de agregados naturais no norte do país. Os resultados dessas pesquisas indicaram a viabilidade da aplicação da argila calcinada em pavimentos asfálticos e resultaram na publicação de documentos normativos para fixar as condições dessa utilização (DNER-ES 227/89; DNER-EM 230/94; DNER-ME 225/94).

Cabral et al. (2008) e Santis (2012) desenvolveram estudos sobre a aplicação de agregados leves de argila calcinada de cerâmica vermelha em concreto estrutural, e os resultados preliminares indicaram a viabilidade desta aplicação. Esses estudos, realizado com solos do estado do Amazonas e de São Paulo, indicaram que é possível obter agregados artificiais de argila calcinada de cerâmica vermelha utilizando os materiais e processos produtivos (extrusão, tempo de secagem e temperatura de queima) normalmente empregados na produção de produtos de cerâmica vermelha, como blocos e telhas. Entretanto, esse assunto merece um aprofundamento significativo para se aprimorar essa tecnologia e se obter agregados leves de argila calcinada de alta eficiência, com redução dos

valores de massa específica (abaixo de 1.200 Kg/m^3) e dos valores de absorção de água (abaixo de 10%), além de um aumento na resistência mecânica dos mesmos.

Estudos realizados em países como o Kuwait e Argélia demonstram um grande potencial na utilização de pó de serragem de madeira misturado nas massas cerâmicas para a obtenção de agregados leves de argila calcinada, com o objetivo de diminuição da massa específica dos agregados. Porém, com a utilização desta técnica, os agregados tornam-se mais porosos e, conseqüentemente, mais absorventes (AL-BAHAR e BOGAHAWATTA, 2006; CHEMANI e CHEMANI, 2013).

Santis e Rossignolo (2014) desenvolveram estudos sobre a utilização de ativação alcalina em cerâmica vermelha para a diminuição da absorção de água em agregados leves de argila calcinada. Os pesquisadores descobriram que para alguns ativadores alcalinos, como o silicato de sódio, os valores de absorção de água dos agregados produzidos com esse ativador apresentou significativa queda, quando comparados aos valores observados para os agregados leves de argila calcinada produzidos apenas com argila e água.

Esse assunto ainda merece um aprofundamento significativo para se obter resultados conclusivos sobre a viabilidade técnica da produção de agregados leves de argila calcinada de alta eficiência para utilização concreto estrutural. Portanto, o objetivo desse trabalho é a avaliação da viabilidade técnica da produção de concretos estruturais leves com a utilização de agregados leves inovadores, desenvolvidos utilizando a argila vermelha calcinada com incorporações de serragem de madeira, cinza do bagaço de cana-de-açúcar e silicato de sódio.

1.1 Justificativa

A proposta de estudo apresentada neste trabalho justifica-se pelos seguintes motivos:

- Necessidade de desenvolvimento de agregados leves alternativos à argila expandida, único agregado leve produzido no Brasil;
- Pesquisas preliminares que indicam a viabilidade da produção de agregados artificiais de argila calcinada de cerâmica vermelha;
- Necessidade de produção de agregados leves de argila calcinada com baixos valores de absorção de água e altos valores de resistência à compressão;
- Possibilidade de utilizar um parque industrial instalado de cerca de 11.000 fabricantes de produtos de cerâmica vermelha (blocos e telhas) espalhados pelo país para produção dos agregados leves artificiais com pequenos ajustes no arranjo produtivo;
- Possibilidade de utilização de subprodutos agroindustriais e redução de consumo de matérias-primas para a produção de agregados leves;

- Possibilidade de viabilizar a tecnologia do concreto leve estrutural para todo o território nacional.

1.2 Objetivos

Esta pesquisa apresenta como objetivo o desenvolvimento de agregados leves inovadores de baixo impacto ambiental com uso de argila vermelha com incorporações de subprodutos agroindustriais (cinza do bagaço da cana-de-açúcar e serragem de madeira) e silicato de sódio, e a avaliação de sua influência no desempenho de concretos leves estruturais, buscando-se a alta eficiência por meio da redução da massa específica e da absorção de água dos agregados e dos concretos, além do aumento da resistência mecânica. Para isso, desenvolveu-se um programa experimental amplo, englobando a produção e a caracterização da massa cerâmica utilizada, dos agregados leves de argila vermelha calcinada, dos concretos leves estruturais, assim como a avaliação da influência desses agregados no desempenho dos concretos.

2. CONCRETO LEVE

2.1 Introdução

Os concretos com agregados leves, ou concretos leves, apresentam-se como uma alternativa viável para utilização na construção civil, com possibilidade de ganhos expressivos com a redução de cargas das estruturas, gerando uma economia nas fundações e em fôrmas e cimbramentos, com a possibilidade de aplicação em diversas áreas da construção civil, como em edificações pré-fabricadas, pontes e plataformas marítimas (SANTIS, 2012).

De acordo com Rossignolo (2003), os concretos leves são obtidos através da substituição total ou parcial dos agregados convencionais por agregados leves, sendo que os concretos leves devem apresentar, aos 28 dias de idade, resistência à compressão igual ou superior a 17 MPa, com uma massa específica compreendida entre 1.120 e 1.920 Kg/m³ (ACI 213-R03, 2003). Já a normatização brasileira define os concretos leves com a relação entre sua resistência e massa específica, como ilustra a Tabela 1. A mesma norma define que os agregados leves miúdos utilizados para a confecção de concretos leves devem apresentar massa unitária no estado solto abaixo de 1.120 Kg/m³, e os graúdos, abaixo de 880 Kg/m³ (ABNT NBR NM 35 (1995).

Tabela 1 – Valores de resistência e massa específica dos concretos leves

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Massa específica aparente (Kg/m ³)
28	1840
21	1760
17	1680

FONTE: ABNT NBR NM 35, 1995.

Como já mencionado, os concretos leves apresentam-se como um material de construção consagrado em todo o mundo, com utilização em diversos campos da indústria da construção civil, principalmente devido à redução de cargas nas estruturas. Porém, as primeiras aplicações desta tecnologia de que se tem conhecimento datam do início da Segunda Guerra Mundial, quando os Estados Unidos produziram embarcações com concreto leve (com resistência de 35 MPa e massa específica de 1.700 Kg/m³), confeccionados com xisto expandido. Estima-se que foram produzidas em torno de 488 embarcações com concreto leve, o que representou uma grande economia em chapas de aço durante as duas Grandes Guerras (ROSSIGNOLO, 2003). A partir de então, muitos estudos foram realizados acerca de concretos leves estruturais, que passaram a ser utilizados para a confecção de pontes, estruturas pré-fabricadas de concreto e edifícios de múltiplos pavimentos.

Segundo ESCSI (1971), a primeira aplicação de concreto leve para fins estruturais em edificações data de 1922, para a construção do ginásio da Westport High School, na cidade de Kansas, pois o solo do local tinha pouca capacidade de carga, necessitando-se assim de estruturas mais leves. Também na cidade de Kansas, em 1929, ocorreu a primeira utilização de concreto leve estrutural em

edifícios de múltiplos pavimentos, na expansão do edifício da Southwestern Bell Telephone Company, construído com 14 pavimentos com estrutura de concreto convencional projetada para receber mais oito pavimentos. A utilização de concreto leve estrutural possibilitou a construção de 14 pavimentos, em vez dos oito pavimentos previstos no projeto inicial, para utilização de concreto convencional (ROSSIGNOLO, 2009a).

A partir de então, a aplicação de concreto estrutural leve se difundiu para diferentes partes dos Estados Unidos e Canadá, até a expiração da patente de Hayde, em 1946. Ao término da Segunda Grande Guerra e o fim da patente, essa tecnologia se difundiu para diferentes países da Europa (pela necessidade de reconstrução de muitas cidades) e também para outros continentes, devido à necessidade de redução de carga das estruturas (SANTIS, 2012). Muitos edifícios de múltiplos pavimentos foram executados em diferentes partes do mundo, com destaque para o Australia Square Tower (1967) e o Park Regis (1968), na Austrália, o prédio do Standart Bank, em 1970, na África do Sul, e o BMW Building, em 1972, na Alemanha (ROSSIGNOLO, 2003).

Australia Square Tower

BMW Building

Figura 1 – Edifícios de múltiplos pavimentos em concreto leve estrutural.

FONTE: ROSSIGNOLO, 2009a.

Mesmo com a ampla difusão desta tecnologia por diferentes países do mundo, no Brasil, estudos sobre essa tecnologia iniciaram-se apenas em meados dos anos de 1970, com a implantação de uma fábrica produtora de argila expandida, a CINASITA S.A. (atual CINEXPAN S.A.). Entretanto, desde o início de sua utilização no Brasil, essa tecnologia sempre foi pouco difundida e utilizada no território nacional (ROSSIGNOLO, 2003).

Destaca-se a utilização de concreto leve na construção de Brasília, entre 1968 e 1972, e em algumas obras realizadas pelo grupo Rabello S.A. (grupo proprietário da empresa CINASITA S.A.). Atualmente no Brasil a utilização de concreto leve dá-se apenas para a confecção de lajes e/ou painéis de fechamento em edifícios de múltiplos pavimentos (SANTIS, 2012).

2.2 Produção de concretos leves

- Dosagem dos materiais

Segundo Rossignolo (2003), dosagem dos materiais consiste na determinação do traço do concreto, ou seja, da quantidade de cada material a ser utilizada para a confecção do concreto. Normalmente, a dosagem dos concretos leves pode ser feita da mesma forma que a dos concretos convencionais. Deve-se levar em consideração que para concretos leves existe a necessidade de projetar um concreto com massa específica particular, com a influência dos agregados leves nas propriedades do concreto, assim como a absorção de água dos agregados. A dosagem dos materiais apresenta influência decisiva nas propriedades finais dos concretos, como ilustra a Tabela 2.

Tabela 2 – Relação aproximada de consumo de cimento e resistência à compressão de concretos estruturais leves. FONTE: adaptado de ACI 213-R87, 1999.

Resistência à compressão aos 28 dias	Consumo de cimento (Kg/m ³)	
	Somente agregados leves	Agregados leves e areia natural
17,2	240-305	240-305
20,7	260-335	250-335
27,6	320-395	290-395
34,5	375-450	360-450
41,4	440-550	420-500

Vários são os métodos para a dosagem dos materiais para a confecção de concretos estruturais leves. Dentre eles, destacam-se os propostos por ACI 213-R87 (1999), EUROLIGHTCON (2000) e CEB/FIP (1977).

- Mistura dos materiais

Os materiais utilizados na dosagem dos concretos são cimento, areia, agregados e água. No caso dos concretos leves, existe a substituição (total ou parcial) dos agregados convencionais por agregados leves, que possuem massa específica bastante inferior aos agregados convencionais. Por esse motivo, durante a mistura dos materiais, em misturador de eixo inclinado, pode ocorrer a segregação dos agregados leves, que tendem a sair do misturador. No caso da utilização de misturador horizontal, esse problema pode não existir (ROSSIGNOLO, 2003).

Em alguns casos, os agregados leves apresentam grande quantidade de poros interligados, o que aumenta sua absorção de água. Nesses casos, no momento da mistura, os agregados leves podem absorver a água necessária para a hidratação do cimento, prejudicando algumas características dos concretos, principalmente no estado fresco. Em alguns casos, em que a absorção do agregado

leve é menor que 10%, após imersão de 24 horas (como na argila expandida), na maioria dos casos, pode-se adotar o mesmo procedimento para mistura que no caso dos concretos convencionais (HOLM e BREMNER, 2000).

Estudos realizados por Santis (2012) indicam que, no caso da utilização de agregados leves com altos valores de absorção de água, uma alternativa é utilizá-los com sua absorção de água máxima atingida – ou seja, 24 horas antes da utilização dos agregados, imergi-los em água, para que atinjam sua absorção máxima e não utilizem a água necessária para a hidratação do cimento durante a moldagem e cura dos concretos.

- Transporte, lançamento e adensamento do concreto

Por se tratar de um concreto especial com agregados leves, deve-se considerar o fato de que os agregados leves tendem a segregar, devido a sua baixa massa específica, uma vez que os equipamentos utilizados nesta etapa são os mesmos que os utilizados para concretos convencionais. Dessa forma, deve haver um rigoroso controle da relação água/cimento e do teor de agregados miúdos, assim como a utilização de alguns aditivos minerais (sílica ativa), bem como a utilização de mão de obra especializada (ROSSIGNOLO, 2003; BORJA, 2011).

A umidade e granulometria dos agregados é de fundamental importância quando do bombeamento de concretos leves que, devido aos altos valores de absorção de água, tender a apresentar perda de trabalhabilidade no estado fresco, o que pode provocar o entupimento dos tubos de transporte do concreto. Para evitar esse fenômeno, é importante utilizar os agregados umedecidos, buscando uma melhor trabalhabilidade do concreto (ROSSIGNOLO, 2003).

Normalmente, os concretos leves necessitam de maior energia de vibração do que os concretos convencionais, o que pode acarretar maior esforço nas fôrmas durante a etapa de vibração do concreto. Além disso, por se tratar de concreto com predominância de agregados com baixo valor de massa específica, pode ocorrer a segregação dos agregados, deixando a área superficial do concreto com pouca pasta de cimento, prejudicando as características finais do concreto (BORJA, 2011). O correto adensamento do concreto mostra-se de fundamental importância para que seja evitada a formação de bolhas nos concretos, advindas de pequenas bolhas internas dos agregados, que tendem a transferir-se aos concretos durante os processo de transporte e lançamento (ROSSIGNOLO, 2003).

- Cura dos concretos

De acordo com Borja (2011), o processo de cura dos concretos leves é similar ao dos concretos convencionais, e deve ser iniciado o mais cedo possível. Holm e Bremner (1994) argumentam que, apesar de os processos de cura serem similares, no caso de concretos leves deve-se atentar para a temperatura do concreto no processo de cura, uma vez que o calor liberado durante a hidratação do cimento acarreta um aumento na temperatura do concreto, o que pode formar fissuras térmicas no material. Portanto, recomenda-se atrasar a retirada das fôrmas, cobrir o concreto com uma manta térmica isolante ou, no caso de cura térmica, prolongar seu período de cura (ROSSIGNOLO, 2003).

2.3 Propriedades dos concretos leves

O concreto é um material que adquire resistência com o passar do tempo e, por isso, suas propriedades são divididas em dois estados: o estado fresco (momento da confecção dos corpos de prova) e o estado endurecido. Normalmente, no estado fresco a principal propriedade a ser analisada é a trabalhabilidade do concreto, mas em alguns casos a avaliação da massa específica aparente fresca e do teor de ar incorporado também fazem-se necessárias. No estado endurecido, as principais características dos concretos a serem analisadas são a resistência à compressão, resistência à tração, massa específica aparente, módulo de deformação, absorção de água e o índice de vazios.

Normalmente, mais da metade do volume dos concretos é composta por agregados; com a substituição dos agregados convencionais por agregados leves, algumas propriedades dos concretos podem ser alteradas, uma vez que a característica final dos concretos depende das características da pasta de cimento e também das características dos agregados.

2.3.1 Trabalhabilidade no estado fresco

As propriedades dos concretos leves no estado fresco e os fatores que as afetam são basicamente os mesmos que os dos concretos convencionais, mas, devido à baixa massa específica e à alta absorção de água dos agregados, a trabalhabilidade dos concretos leves merece cuidado especial. A trabalhabilidade do concreto fresco pode ser entendida como a propriedade que define o esforço necessário para sua manipulação (transporte, lançamento e adensamento) com perda mínima de homogeneidade. A consistência, que pode ser entendida como o grau de unidade de concreto relacionado com a plasticidade da massa é um dos principais índices para determinar a trabalhabilidade do concreto (ROSSIGNOLO, 2003; PEREIRA, 2008).

Os ensaios mais comumente utilizados para medir a trabalhabilidade dos concretos são o abatimento do tronco de cone e a mesa de espalhamento, sendo que, normalmente, a variação dos valores do índice de consistência dos concretos leves é menor que a dos concretos convencionais. Durante o ensaio de abatimento do tronco de cone, deve-se atentar para a densidade dos agregados leves, que, por ser menor que a dos agregados convencionais, pode fazer com que o abatimento do tronco de cone para concretos leves seja menor do que para concretos convencionais (ROSSIGNOLO, 2003).

Rossignolo (2003) ainda expõe que concretos leves com alto índice de consistência tendem a apresentar segregação dos agregados, e que os concretos com baixo índice de consistência podem apresentar dificuldades de adensamento. Já de acordo com Mehta e Monteiro (1994), a vibração excessiva dos concretos leves, adicionada à baixa coesão e aos altos valores de índice de consistência, são os principais fatores responsáveis pela segregação dos agregados leves no concreto, o que pode acarretar mudanças nas características finais dos concretos.

2.3.2 Resistência à compressão e massa específica

A resistência à compressão e a massa específica dos concretos são propriedade medidas no estado endurecido, ou seja, quando o concreto não é mais trabalhável e já atingiu sua forma final definida. Normalmente os concretos leves apresentam valores de resistência à compressão e massa específica inferiores aos concretos convencionais, para concretos com o mesmo traço, devido à baixa resistência mecânica e densidade dos agregados leves.

Os concretos leves apresentam seus valores finais de resistência à compressão estabilizados em idades inferiores aos concretos convencionais: aos 7 dias de idade os concretos leves já apresentam cerca de 80% da resistência observada aos 28 dias. Após os 28 dias de idade apresentam pouca variação (aumento) nos valores de resistência à compressão, já que os agregados leves apresentam baixos valores de resistência mecânica, o que limita o valor de resistência dos concretos leves (EUROLIGHTCON, 1998).

O ensaio de resistência à compressão é um ensaio destrutivo, ou seja, os corpos de prova submetidos ao ensaio não podem ser utilizados para outras finalidades após o processo. Ele consiste na aplicação de uma carga vertical longitudinal sobre o corpo de prova de concreto, que normalmente é cilíndrico. Na execução do ensaio não existem diferenças entre os concretos leves e os convencionais. Nos concretos leves, a pasta de cimento tem maior influência na resistência mecânica em comparação aos concretos convencionais, devido à baixa resistência dos agregados leves. Porém, com a utilização de agregados leves, que apresentam valor de módulo de deformação semelhante ao apresentado pela pasta de cimento, melhora-se muito a qualidade da zona de transição matriz-agregado, e, com isso, a ruptura nos concretos leves ocorre devido ao colapso da argamassa ao redor do agregado, e não devido a diferenças entre as deformações da pasta e dos agregados (SANTIS, 2012). De acordo com Rossignolo (2009a), o maior valor de resistência a compressão já registrado no Brasil, para concretos leves confeccionados com argila expandida, é de 73 MPa (e massa específica de 1.720 Kg/m³), no estudo apresentado por Gomes Neto (1998), em concretos confeccionados com consumo de cimento de 1.200 Kg/m³ e dimensão máxima dos agregados de 6,3 mm.

A grande diferença entre a ruptura dos concretos confeccionados com agregados leves e os confeccionados com agregados convencionais é que nos agregados leves a ruptura se dá através dos agregados, mais frágeis que a pasta, e nos concretos convencionais a ruptura ocorre ao redor dos agregados, que, por serem mais resistentes do que a pasta, não rompem, como ilustra a Figura 2:

Figura 2 – Ruptura de concreto confeccionado com agregados leves (esquerda) e com agregados convencionais (direita).

Fonte: ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005 apud in SANTIS, 2012

A relação entre a resistência do concreto leve e da argamassa pode ser descrita em duas fases distintas, sendo a primeira fase similar aos concretos convencionais. Nela, a resistência da pasta é a que determina, principalmente, a resistência do concreto; na segunda fase a resistência do concreto é determinada pela resistência do agregado leve, que tem módulo de deformação inferior ao da argamassa. Como existem duas tendências distintas, há uma mudança no tipo de distribuição das tensões internas do concreto, e o valor da resistência à compressão do concreto leve no ponto em que ocorre a mudança dessas tensões é denominado “resistência ótima” (f_g) do concreto, como ilustra a Figura 3:

Figura 3 – Ilustração do comportamento dos valores de resistência à compressão dos concretos leves em relação à resistência da argamassa.

FONTE: ROSSIGNOLO; PEREIRA, 2005 apud in ROSSIGNOLO, 2009a.

A relação entre a resistência à compressão e a massa específica dos concretos é denominada fator de eficiência (Equação 1), que está diretamente ligada ao tipo e a granulometria dos agregados.

$$FE = \frac{f_c}{\gamma} \quad (MPa \cdot dm^3 / Kg) \quad (1)$$

Onde,

f_c = resistência à compressão do concreto (MPa);

γ = massa específica do concreto (Kg/dm³).

A massa específica e a resistência à compressão dos concretos estão diretamente ligadas ao tipo e a granulometria dos agregados, à relação água/cimento da mistura, do tipo de mistura dos materiais e também da forma como é feita o lançamento do concreto (CHANDRA e BERNTSSON, 2002). Nos concretos leves, a massa específica cai com o aumento da idade deles, devido à perda de água dos agregados leves com o passar do tempo. A velocidade da perda de água dos agregados depende da temperatura, umidade e pressão do ambiente de cura do concreto, assim como da área do concreto exposta e seu volume (ACI 213R-03, 2003).

Estudos realizados por Santis (2012) indicam que existe uma relação direta entre a massa específica e a resistência à compressão dos concretos, uma vez que quanto maior a massa específica, mais densos e compactos são os concretos, resultando assim em um material mais resistente.

2.3.3 Resistência à tração

Devido ao grande número de vazios dos agregados, os valores de resistência à tração dos concretos leves, tanto para o ensaio de compressão diametral quanto para a flexão, são inferiores aos observados para os concretos convencionais (ROSSIGNOLO, 2009a). O tipo de fratura do concreto (que nos concretos leves ocorre no agregado), o teor de umidade dos concretos leves (mais elevado que dos concretos convencionais) e diferença entre os valores de resistência à tração por flexão e por compressão diametral dos concretos leves (valores menores na compressão diametral do que na flexão) são as três principais diferenças entre a resistência à tração dos concretos leves e dos concretos convencionais (EUROLIGHTCON, 1998).

De acordo com Rossignolo (2009a), os valores de resistência à tração por compressão diametral variam de 6% a 9% do valor da resistência à compressão dos concretos leves e os valores de resistência à tração por flexão variam de 8% a 11% dos valores da resistência à compressão dos concretos leves, para concretos produzidos com argila expandida nacional. O mesmo autor afirma que algumas expressões podem relacionar os valores de resistência à tração por compressão diametral com os valores de resistência à compressão dos concretos leves, como ilustra a Tabela 3:

Tabela 3 – Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral e por flexão.

Referência	Resistência à tração (MPa)		Observações
	Compressão diametral (f_{ib})	Flexão (f_{ctm})	
Slate et al. (1986)	$0,42.f_c^{0,5}$	$0,54.f_c^{0,5}$	$62 \geq f_c \geq 21$ MPa
Zhang e Gjrv (1991)	$0,23.f_{cu}^{0,67}$	$0,73.f_{cu}^{0,5}$	
CEB/FIP (1977)	$0,23.f_{cu}^{0,67}$	$0,46.f_{cu}^{0,67}$	
ACI 318 (2008)	$0,48.f_c^{0,5}$	$0,53.f_c^{0,5}$	

f_c = resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa)

f_{cu} = resistência à compressão em corpos de prova cúbicos (MPa)

FONTE: ROSSIGNOLO, 2009a.

Estudos realizados por Santis (2012) mostraram que a resistência à tração de concretos leves confeccionados com agregados leves de argila calcinada apresentaram valores de resistência à tração por compressão diametral muito próximos aos apresentados por concretos leves confeccionados com argila expandida, sendo que a relação resistência à tração/resistência à compressão dos concretos leves confeccionados com agregados leves de argila calcinada permaneceu próxima dos 10%, valor obtido para concretos convencionais.

2.3.4 Módulo de deformação

O módulo de deformação dos concretos depende diretamente do tipo e da quantidade de agregado utilizado quando de sua produção. Concretos produzidos com agregados leves, que apresentam grande quantidade de vazios em suas composições, tendem a apresentar valores de módulo de deformação inferiores ao observado para concretos mais densos, confeccionados com agregados convencionais (para uma mesma quantidade de cimento). Estudos realizados por Zhang e Gjrv (1991) indicam que o módulo de deformação dos concretos leves está diretamente relacionado com a resistência à compressão, a quantidade de agregado e a zona de transição agregado-matriz, sendo que quanto maior a resistência dos concretos, maiores seus valores de módulo de deformação.

De acordo com Rossignolo (2009a), o valor do módulo de deformação dos concretos leves varia entre 50% e 80% do valor do módulo de deformação dos concretos convencionais, para concretos com resistência à compressão entre 20 MPa e 50 MPa. O módulo de deformação dos concretos pode ser afetado diretamente pela zona de transição matriz-agregado e, por isso, quanto mais próximos forem os valores do módulo de deformação dos agregados e da pasta de cimento, melhor será o comportamento do concreto no regime elástico (ROSSIGNOLO, 2003.)

Os valores de módulo de deformação dos concretos podem ser estimados através dos seus valores de resistência à compressão e massa específica, como ilustra a Tabela 4:

Tabela 4 – Equações para cálculo do módulo de deformação em concretos.

Referência	Equação	Observações
Rossignolo (2005)	$E_c = 0,049 \cdot \gamma^{1,5} \cdot f_{cck}^{0,5}$ (MPa)	$f_c \leq 50$ MPa
ACI 318 (1998)	$E_c = 0,043 \cdot \gamma^{1,5} \cdot f_c^{0,5}$ (MPa)	$f_c \leq 41$ MPa
NS 3473 (1998)	$E_c = 9,5 \cdot f_{cck}^{0,3} \cdot (\gamma/2400)^{1,5}$ (GPa)	$f_{cck} \leq 85$ MPa
BS 8110 Part. 2 (1997)	$E_c = 1,7 \cdot (\gamma/1000)^2 \cdot f_{ck}^{0,3}$ (GPa)	
CEB (1978)	$E_c = 1,6 \cdot \gamma^2 \cdot (f_{cck} + 8)^{0,33} \cdot 10^{-6}$ (GPa)	

E_c = módulo de deformação; γ = massa específica (Kg/m³); f_c = resistência à compressão (150 x 300 mm – cilíndrico); f_{cck} = resistência à compressão (100 x 200 mm – cilíndrico); f_{ck} = resistência à compressão (cubo 100 mm).

FONTE: ROSSIGNOLO, 2009a

2.3.5 Retração por secagem

Como os agregados leves são menos resistentes que os convencionais, os concretos confeccionados com eles tendem a apresentar valores superiores de retração linear de secagem em relação aos concretos convencionais, uma vez que esses últimos, por serem mais resistentes que os leves, restringem mais a movimentação dos concretos. A NM35/95 estipula que a retração linear de secagem máxima para concretos leves deve ser de 0,10%, para concretos produzidos a partir de uma parte de cimento para seis partes de agregado, medidos em volume.

De acordo com Cabral et al. (2010), a principal característica que influencia na retração linear de secagem dos concretos é seu módulo de deformação: quanto maior esse valor, menor a retração linear dos concretos. Os mesmos autores afirmam que a porosidade dos agregados leves também influencia na retração por secagem dos concretos, uma vez que agregados mais porosos tendem a restringir menos a retração dos concretos do que agregados menos porosos. Além disso, concretos confeccionados com agregados porosos necessitam de mais água para sua produção, o que pode contribuir para um aumento da retração linear de secagem dos concretos.

Segundo ACI 209R-92 (1997, apud Rossignolo, 2009a), a retração por secagem dos concretos pode ser prevista para uma idade qualquer t , de acordo com a retração linear observada, como ilustra a Equação 2.

$$S_{ult} = ((35 + t)/t) \cdot S_t \quad (2)$$

Onde,

S_{ult} = valor estimado para a retração linear de secagem ($\times 10^{-6}$);

t = tempo em dias;

S_t = valor medido da retração linear de secagem ($\times 10^{-6}$).

2.3.6 Durabilidade

A durabilidade dos concretos está diretamente ligada à permeabilidade dos mesmos, causada pelo excesso de água livre, ocasionando a formação de poros capilares. Além disso, a permeabilidade dos concretos também pode ser causada pela ocorrência de fissuras internas nos concretos, causadas pelos diferentes

valores de módulo de deformação de seus materiais constituintes (SANTIS, 2012). Segundo Rossignolo (2009a), a durabilidade dos concretos está ligada a sua estrutura porosa e à conectividade dos poros. Dessa forma, a durabilidade está ligada à permeabilidade dos concretos, e não apenas à porosidade, sendo que a melhoria da zona de transição pasta-agregado contribui significativamente para a redução da permeabilidade, uma vez que a origem das microfissuras dos concretos ocorre nesta região. Isso fica evidente quando se estuda a carbonatação dos concretos, que ocorre intensamente em regiões de maior permeabilidade nos concretos.

3. AGREGADOS LEVES PARA CONCRETO

O concreto é um material composto por cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo. Para a confecção de concretos leves, utiliza-se a substituição total ou parcial dos agregados graúdos convencionais para agregados de baixa massa específica, tornando o produto final mais leve que o convencional.

Os agregados representam cerca de 55% a 88% do volume dos concretos, sendo que os agregados graúdos representam aproximadamente de 30% a 50% de todo o volume dos concretos. Assim, os agregados apresentam influência direta nas características finais dos concretos, ainda mais quando se trata de agregados leves, que por serem mais porosos e terem menores valores de módulo de deformação do que os agregados convencionais, podem alterar muito as propriedades dos concretos.

De acordo com Rossignolo (2003), as principais características dos concretos alteradas pela substituição dos agregados convencionais por agregados leves são a trabalhabilidade, a massa específica, o módulo de elasticidade, a resistência à compressão, a retração linear e, em alguns casos, as propriedades térmicas. Segundo a NM 35 (1995), os agregados leves são agregados que apresentam massa unitária inferior a 1.120 Kg/m^3 . Já para RILEM (1975), os agregados leves são classificados como agregados que apresentam massa unitária inferior a 1.200 Kg/m^3 ou massa específica inferior a 2.000 Kg/m^3 .

Os agregados leves podem ser classificados em naturais e artificiais. Os primeiros são obtidos através de extração direta de jazidas, seguida de uma classificação granulométrica; já os agregados artificiais são obtidos por meio de processos industriais, e são classificados, normalmente, de acordo com a matéria-prima utilizada para sua produção e o seu processo de fabricação, com destaque para a argila expandida e para agregados leves de argila calcinada (ROSSIGNOLO, 2003).

Segundo Santos (1989), dois processos são utilizados para a produção de agregados leves artificiais: a sinterização, que consiste na mistura da matéria-prima com algum tipo de combustível (como o carvão finamente moído) e posterior queima em altas temperaturas, provocando expansão; e o de forno rotativo. Esse processo aproveita as características expansivas de algumas argilas que, quando submetidas a altas temperaturas (entre $1.000 \text{ }^\circ\text{C}$ e $1.350 \text{ }^\circ\text{C}$), formam gases que ficam “aprisionados” pela parte externa do agregado, que está vitrificada, tornando assim o agregado poroso.

Portanto, os agregados obtidos pelo processo de sinterização apresentam os poros abertos, o que pode contribuir para uma alta absorção de água, o que não ocorre com os agregados obtidos pelo processo de forno rotativo, que apesar de serem porosos, têm uma camada externa vitrificada, diminuindo-se assim a absorção de água dos agregados. Os agregados leves naturais têm sua utilização um pouco limitada, uma vez que, por serem extraídos diretamente de jazidas naturais, apresentam grande variação de suas propriedades. Porém, em alguns locais da Europa, devido à grande presença de vulcões e jazidas para exploração,

alguns tipos de agregados leves artificiais são utilizados, com destaque para a pedra-pomes e as escórias vulcânicas.

Devido às características absorventes e de baixa massa específica e módulo de deformação dos agregados, mostra-se de fundamental importância a correta dosagem dos concretos leves estruturais, assim como o conhecimento das principais características dos agregados leves, de modo a produzir concretos que, com a utilização de agregados diferentes dos convencionais, possam apresentar características semelhantes aos usuais ou até mesmo características melhores que as dos concretos convencionais. Em seguida são apresentadas algumas das principais características e propriedades dos agregados leves utilizados para a produção de concreto estrutural.

3.1 Principais características dos agregados leves

a) Forma e textura superficial

Os agregados leves podem apresentar grande variação de forma e de textura superficial, estando essas características diretamente ligadas ao tipo de matéria-prima e ao processo de produção utilizado, sendo que a forma e a textura superficial dos agregados apresentam grande influência nas características dos concretos.

A forma e a textura superficial dos agregados leves influenciam mais as propriedades do concreto no estado fresco, como a trabalhabilidade e a quantidade de água para conformação (BORJA, 2011). De acordo com Rossignolo (2003), os agregados produzidos pelo processo de sinterização apresentam textura superficial com muita rugosidade, formas angulares e alta porosidade, proporcionando uma boa aderência entre o agregado e a pasta de cimento, mas apresentando altos valores de absorção de água devido à grande quantidade de poros conectados com os poros internos, como ilustra a Figura 4:

Figura 4 – Micrografia (MEV) de agregados produzidos pelo processo de sinterização. FONTE: ZHANG e GJΦRV (1991)

Além disso, devido à grande quantidade de poros superficiais, os agregados leves produzidos por sinterização apresentam altos valores de absorção da pasta de cimento (30 a 100 Kg de cimento para cada m³ de concreto), aumentando o consumo de cimento. Rossignolo (2003) afirma que os agregados produzidos pelo processo de forno rotativo apresentam normalmente forma arredondada e uma camada externa vitrificada e pouco absorvente, diminuindo-se a absorção da água utilizada

para a conformação dos concretos, melhorando sua trabalhabilidade (Figura 5). Porém, por apresentar forma arredondada, esse tipo de agregado tende a apresentar maior facilidade de segregação.

Figura 5 – Micrografia (MEV) de agregados produzidos pelo processo de forno rotativo.
FONTE: ZHANG e GJØRV (1991)

b) Massa específica

Os agregados leves, por apresentarem grande quantidade de poros, apresentam massa específica inferior aos agregados convencionais, com valores variando de 1.200 Kg/m³ a 2.000 Kg/m³, sendo que quanto maior o agregado leve, maior sua quantidade de poros e, conseqüentemente, menor sua massa específica (RILEM, 1795). A massa específica dos agregados leves está diretamente ligada à matéria-prima utilizada para sua produção, uma vez que agregados confeccionados com matérias-primas com altas quantidades de matéria orgânica em sua composição apresentam menores valores de massa específica do que agregados confeccionados com matérias-primas com baixos valores de matéria orgânica em sua composição, já que a matéria orgânica tende a se volatilizar em temperaturas inferiores do que as utilizadas para a produção dos agregados leves.

Estudos realizados por Santis (2012), quando da produção de agregados leves de argila calcinada para concreto estrutural, apresentaram agregados leves de argila calcinada, produzidos com diferentes tipos de matéria-prima, com massa específica variando de 1,55 g/cm³ a 1,79 g/cm³, quando queimados à temperatura de 900 °C. Já os agregados leves de argila expandida apresentam valores de massa específica inferiores aos apresentados por Santis (2012), variando de 0,6 g/cm³ (para agregados com diâmetro máximo de 5 mm) a 1,5 g/cm³ (para agregados com diâmetro entre 15 mm e 22 mm) porém, esse tipo de agregado é produzido utilizando-se temperaturas de queima superiores a 1.200 °C.

Uma alternativa para a diminuição dos valores de massa específica dos agregados leves é a incorporação de materiais que se volatilizam a temperaturas inferiores às temperaturas de queima dos agregados leves, que variam de 900 °C a 1.300 °C. Estudos realizados por Dutra e Pontes (2002), que incorporaram serragem de madeira (0% a 30% em peso) nas massas cerâmicas para a produção de agregados leves de argila calcinada e obtiveram agregados com massa específica variando de 1,92 g/cm³ a 1,20 g/cm³, para temperatura de queima de 1.100 °C. Já estudos realizados por Mori et al. (2011), que também incorporaram serragem de madeira para a produção de materiais leves de cerâmica vermelha, obtiveram

resultados de massa específica dos testemunhos variando de 1,6 g/cm³ a 1,4 g/cm³, para testemunhos com incorporação de 10% e 33% em volume de serragem nas massas cerâmicas, queimadas a 950 °C. Rossignolo et al. (2014) também estudaram a incorporação de serragem de madeira nas massas cerâmicas para a produção de agregados leves para concreto. Quando da incorporação de 30% em massa de serragem de madeira nas massas cerâmicas, obtiveram agregados leves com massa específica de 1,150 g/cm³, valor muito abaixo ao observado pelos autores para agregados leves produzidos apenas com massa cerâmica (1,755 g/cm³), para agregados queimados a 900 °C.

Além da incorporação de algum tipo de material volátil nas massas cerâmicas, as características das massas cerâmicas utilizadas também podem influenciar nos valores de massa específica dos agregados leves, uma vez que agregados confeccionados com massas cerâmicas com grandes quantidades de matéria orgânica tendem a ser mais leves do que os produzidos com massas cerâmicas com pouca matéria orgânica. Porém, com a incorporação de materiais nas massas cerâmicas para a produção de agregados mais leves, estes tornam-se produtos muito porosos e, conseqüentemente, podem apresentar diminuição nos valores de resistência à compressão e aumento nos valores de absorção de água. Por isso alguns estudos vêm sendo realizados de modo a se obter agregados mais leves mas mantendo-se (ou até mesmo aprimorando-se) suas outras características.

c) Resistência à compressão e módulo de deformação

A resistência à compressão e o módulo de deformação dos concretos são características que estão diretamente ligadas às dos agregados utilizados quando da produção dos concretos. Os agregados leves, por apresentarem grande quantidade de poros, tendem a apresentar valores de resistência à compressão inferiores aos agregados convencionais. De acordo com Holm e Bremner (1994), o tamanho e a distribuição dos poros dos agregados também influenciam muito na resistência, uma vez que, para um mesmo grau de porosidade, agregados com grande quantidade de pequenos poros apresentam maior resistência que agregados com pequena quantidade de grandes poros. Segundo Chandra e Berntsson (2002), a resistência dos agregados depende das matérias-primas utilizadas para sua confecção e do tipo de processo utilizado para produção, uma vez que agregados leves confeccionados com a mesma massa cerâmica podem apresentar valores de resistência diferentes de acordo com o processo de produção utilizado.

A temperatura de queima também é um fator que influencia na resistência dos agregados leves, uma vez que com o aumento da temperatura de queima dos agregados, aumenta-se a compactação da matéria-prima, diminuindo-se assim a quantidade de poros dos agregados, tornando-os mais resistentes. Estudos realizados por Santis (2002) mostram que, para uma mesma matéria-prima, o aumento da temperatura de queima dos agregados pode proporcionar um aumento significativo na resistência à compressão dos agregados leves.

Segundo Holm e Bremner (1994), os valores do módulo de deformação dos agregados leves variam de 10 GPa a 18 GPa, sendo que existe uma relação direta entre o valor do módulo de deformação do agregado e do concreto leve, uma vez que quanto maior o valor do módulo de deformação do agregado, maior o valor do módulo de deformação do concreto leve. Os agregados leves apresentam módulo

de deformação inferior aos convencionais, uma vez que têm estrutura muito porosa e valores de resistência à compressão inferiores.

Segundo ACI 213R 03 (2003), o módulo de deformação dos agregados leves pode ser estimado a partir dos valores de massa específica dos agregados leves, como ilustra a Equação 3:

$$E_d = 0,008 \cdot \rho^2 \quad (3)$$

Onde,

E_d = módulo de deformação do agregado, em MPa;

ρ = massa específica do agregado, em Kg/m³.

d) Porosidade e absorção de água

A porosidade e a absorção de água dos agregados leves são características que interferem significativamente nas propriedades do concreto no estado fresco e no processo de hidratação do cimento, sendo que a velocidade com que o agregado absorve água depende da porosidade total do agregado, da conectividade dos poros e da porosidade superficial do agregado (ROSSIGNOLO, 2003).

Existem 2 tipos de poros: os interconectados, em que os poros internos estão conectados aos externos, favorecendo a permeabilidade do concreto; e os poros fechados, que são internos e não conectados com a camada externa do agregado, não afetando a permeabilidade dos agregados (CHANDRA e BERNTSSON, 2002).

Os agregados leves são normalmente materiais muito porosos e, por isso, absorvem de 5% a 25% de seu peso em água, nas primeiras 24 horas de imersão; agregados convencionais absorvem cerca de 2% do seu peso em água, para o mesmo período de tempo (HOFF, 2002). Este comportamento não é favorável para a produção de concreto, uma vez que os agregados leves tendem a absorver a água necessária para a hidratação do cimento. Dessa forma, em alguns casos, faz-se necessária uma pré-saturação dos agregados antes da moldagem dos concretos, para que os agregados não absorvam a água de moldagem dos concretos (SANTIS, 2012). Segundo Rossignolo (2009), a alta absorção de água dos agregados pode afetar também as características dos concretos endurecidos, proporcionando um aumento da retração linear e da massa específica dos concretos. Porém, os altos valores de absorção de água dos agregados podem melhorar a zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento. Atualmente, existem alguns estudos acerca da diminuição da absorção de água dos agregados, seja através do aumento da temperatura de queima (o que pode causar um aumento da massa específica dos agregados) ou através da incorporação de produtos nas massas cerâmicas.

Santis et al. (2014) produziram agregados leves de argila calcinada com a incorporação de diferentes tipos de ativadores alcalinos nas massas cerâmicas e obtiveram, quando da utilização de silicato de sódio na proporção 1:1 (água:ativador), agregados com absorção de água de 9,1% (quando queimados a 900 °C) e de 10,9% (quando queimados a 600 °C), representando uma grande redução nos valores de absorção de água dos agregados leves de argila calcinada produzidos pelos autores (em torno de 27% para a agregados queimados a 900 °C)

e também uma possibilidade de redução na temperatura de queima dos agregados, gerando um ganho energético no processo de produção.

Já a argila expandida, principal agregado leve utilizado no Brasil, tem como característica uma estrutura interna muito porosa mas uma camada externa vitrificada, devido às altas temperaturas de queima do processo de produção (acima de 1.150 °C), gerando assim um produto final muito poroso mas pouco absorvente, com valores de absorção de água variando de 6% (peças com diâmetro máximo de 5 mm) a 10% (peças com diâmetro variando de 15 mm a 22 mm) (ROSSIGNOLO, 2009a).

3.2 Principais tipos de agregados leves

3.2.1 Agregados leves naturais

Os agregados leves naturais são aqueles encontrados na natureza e que não passam pelo processo de conformação ou modificação industrial. São os agregados utilizados da forma que encontrados, sem nenhum tipo de beneficiamento. Normalmente, esse tipo de agregado leve é pouco utilizado no Brasil e mais utilizado em países Europeus. Alguns exemplos de agregados leves naturais são as pedras vulcânicas, como a perlite e a pedra-pomes, e também alguns resíduos, como cascas e sobras da indústria produtora de óleos.

Shafigh et al. (2014) estudaram a utilização de cascas de palmeiras como agregados leves para concreto. No estudo, foram produzidos concretos com 500 Kg/m³ de cimento, 190 Kg/m³ de água e 300 Kg/m³ de agregado graúdo. Os concretos produzidos no estudo apresentaram massa específica de 1.900 Kg/m³ e resistência à compressão de 38 MPa aos 28 dias de idade, além de uma absorção de água de 4% após 24 horas de imersão. Já Teo et al. (2006), que também estudaram a utilização de cascas de palmeiras como agregado leve para concreto estrutural, produziram concretos com a seguinte relação de materiais: 510 Kg/m³ de cimento, 848 Kg/m³ de areia como agregado miúdo e 308 Kg/m³ de casca de palmeira como agregado graúdo, e uma relação água-cimento de 0,38. Os agregados utilizados tinham dimensão máxima de 12,5 mm, espessura variando de 0,5 mm a 3 mm e absorção de água após 24 horas de imersão de 33%. A Tabela 5 apresenta as características do concreto produzido com esse tipo de agregado, aos 28 dias de idade:

Tabela 5 – Características dos concretos produzidos com casca de palmeira como agregado.

Característica	Valor
Massa específica (Kg/m ³)	1963
Resistência à compressão (MPa)	28,12
Módulo de elasticidade (GPa)	5,31

FONTE: Teo et al. (2006)

Já Topçu e Uygunoğlu (2007) estudaram a utilização de diatomita e pedra-pomes, dois tipos de pedras naturais, para a produção de concretos leves. A diatomita e a pedra-pomes utilizadas tinham massa específica de 540 Kg/m³ e 910 Kg/m³, respectivamente. Para a produção dos concretos, com utilização de 300 Kg/m³ de cimento e relação água-cimento igual a 0,2, foram utilizados os agregados saturados, ou seja, os agregados foram imersos em água por 30 minutos antes do

início da moldagem dos concretos. Foram utilizados 930 Kg/m³ de pedra-pomes e 580 Kg/m³ de diatomita para a moldagem. A Tabela 6 ilustra a característica dos concretos produzidos no estudo:

Tabela 6 – Características dos concretos produzidos com diatomita e pedra-pomes.

Característica	Tipo de cura	Diatomita	Pedra-pomes
Porosidade aparente (%)	Imersa em água	65,0	28,3
	Ar livre	60,5	26,4
Absorção de água (%)	Imersa em água	74,9	18,9
	Ar livre	66,6	17,9
Massa específica (Kg/m ³)	Imersa em água	890	1500
	Ar livre	900	1490
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Imersa em água	6,0	9,0
	Ar livre	3,0	7,0

FONTE: Topçu e Uygunoğlu, 2007.

Os autores concluem que a utilização de um agregado muito poroso como a diatomita, que tem massa específica muito inferior à pedra-pomes, contribui para a produção de um concreto muito leve, mas com baixos valores de resistência à compressão e altos valores de porosidade aparente e absorção de água. O contrário acontece quando da utilização de um agregado menos poroso e de maior massa específica, como a pedra-pomes, que produziu um concreto mais denso mas também mais resistente e menos absorvente.

3.2.2 Agregados leves artificiais

Os agregados leves artificiais são aqueles que passam por processos de conformação para serem produzidos. Nesse tipo de agregados, algumas características podem ser melhoradas com a introdução de produtos nas massas de produção. São exemplos de agregados leves artificiais a argila expandida, os agregados de argila calcinada, agregados produzidos a partir de cinzas e os agregados com diferentes tipos de incorporações.

3.2.2.1 Argila expandida

A argila expandida é o único tipo de agregado leve artificial produzido comercialmente no Brasil e um dos mais utilizados no mundo para a produção de concreto estrutural. Sua grande utilização se dá devido a suas características pouco absorventes e altamente porosas, promovendo-se grandes ganhos na redução da massa específica dos concretos.

Segundo Santos (1989), o processo de fabricação da argila expandida pode ser dividido em oito etapas:

a) Homogeneização: as matérias-primas coletadas são colocadas em depósitos para homogeneização;

b) desintegração: as matérias-primas são tratadas de modo que os torrões fiquem com dimensão máxima de 5 cm;

c) Mistura e homogeneização: matérias-primas são transportadas para um misturador, onde são misturadas nas proporções adequadas de trabalhabilidade para extrusão.

d) laminação: eliminação dos torrões de 5 cm, deixando a matéria pronta para extrusão;

e) extrusão: as matérias-primas, com umidade adequada, são extrudadas e cortadas nos tamanhos finais dos agregados;

f) secagem e queima: os agregados são primeiramente secos e em seguida queimados em temperaturas variando de 1.100 °C a 1350 °C em um forno rotativo, quando adquirem forma arredondada;

g) resfriamento: após a queima, as peças são resfriadas através de ventilação na saída do forno;

h) Classificação e estocagem final: Os agregados são classificados de acordo com seus diâmetros e em seguida são armazenados para comercialização.

Os agregados de argila expandida são produzidos em diversas granulometrias diferentes, sendo que as mais utilizadas em concreto leve estrutural apresentam diâmetro variando de 0 a 4,8 mm, 6,0 mm a 12,5 mm, e de 12,5 mm a 19,0 mm. Por se tratar de um agregado produzido com um tipo de argila piro-expansiva, os agregados de argila expandida apresentam núcleo muito esponjoso (poroso) e uma camada externa vitrificada. A Tabela 7 ilustra alguma das características da argila expandida nacional.

Tabela 7 – Características dos agregados de argila expandida.

Característica	Diâmetro (mm)		
	0 a 4,8	6,0 a 12,5	12,5 a 19,0
Absorção de água após 24 horas de imersão (%)	6,0	7,0	10,3
Massa específica (Kg/dm ³)	1,51	1,11	0,64
Massa unitária seca no estado solto (Kg/dm ³)	0,86	0,59	0,47
Módulo de deformação (Gpa)	18,2	9,9	3,3
Resistência à compressão (MPa)	20,5	12,7	8,4

FONTE: Rossignolo, 2009a.

3.2.2.2 Agregados leves de argila vermelha calcinada

Os agregados leves de argila vermelha calcinada são uma alternativa aos agregados leves de argila expandida, uma vez que, em alguns casos, como ocorre no Brasil, onde existe apenas uma empresa produtora de argila expandida, a utilização de concretos leves nas construções fica muito limitada. Há então a necessidade da produção de algum tipo de agregado leve alternativo à argila expandida que possa ser fabricado e utilizado em todo o território nacional.

Lo et al. (2007) produziram agregados leves de argila calcinada através do método de pelotização, que consiste na produção de agregados de forma

arredondada através da colocação de argila em pó em um prato rotativo inclinado. De acordo com a inclinação e a velocidade do prato, e com a inserção de água no sistema, inicia-se a formação das “pelotas” e, conseqüentemente, dos agregados. Na pesquisa, foram confeccionados agregados com 5 mm, 15 mm e 25 mm de diâmetro, queimados à temperatura de 1.300 °C. A Tabela 8 ilustra a característica dos agregados produzidos na pesquisa:

Tabela 8 – Característica dos agregados leves de argila calcinada.

Diâmetro do agregado (mm)	Densidade aparente (Kg/m ³)	Absorção de água (imersão de 30 minutos) (%)	Resistência à compressão (MPa)
5	620	9,3	4,27
15	830	8,2	5,79
25	440	8,7	1,69

FONTE: Lo et al., 2007.

Os autores produziram concretos leves utilizando a mesma quantidade de cimento para todas as moldagens (450 Kg/m³) e variando os tipos de agregado e a relação água cimento. A resistência à compressão apresentada pelos concretos produzidos na pesquisa é ilustrada na Tabela 9.

Tabela 9 – Resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados pelotizados de diferentes diâmetros. FONTE: Lo et al., 2007.

Diâmetro do agregado (mm)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)		
	a/c = 0,4	a/c = 0,44	a/c = 0,48
5	37	33	33
15	46	36	36
25	23	19	16

Cabral et al. (2008) produziram agregados leves de argila calcinada a partir de dois tipos diferentes de argilas coletadas *in natura* no estado do Amazonas. Para a produção dos agregados, as argilas foram umedecidas com água próximo aos seus limites de plasticidade e moldadas em um moinho adaptado, que continha em sua saída boquilhas com orifícios de dimensões variando entre 4,8 mm e 12,5 mm. Após a moldagem, os agregados foram queimados à temperatura de 850 °C, 950 °C, 1.050 °C e 1.150 °C, expostos à temperatura de patamar por 1 hora.

Após a queima, os agregados foram submetidos aos ensaios de absorção de água e massa específica aparente, conforme ilustra a Tabela 10.

Tabela 10 – Característica das amostras de argila e dos agregados produzidos na pesquisa.

Amostra	Limite de plasticidade (%)	Argila (%)	Silte (%)	Temperatura de queima (°C)	Massa específica aparente (g/cm³)	Absorção de água (%)
Solo 1	55	43,96	50,27	850	1,80	18,0
				950	1,85	17,5
				1050	2,02	12,5
				1150	2,25	5,0
Solo 2	28	43,53	44,22	850	1,70	19,0
				950	1,80	17,5
				1050	1,90	13,0
				1150	2,08	6,0

FONTE: Cabral et al., 2008.

Nawel et al. (2011) estudaram a produção de agregados leves de argila calcinada com uma argila altamente plástica (índice de plasticidade igual a 50,48%) proveniente da Tunísia. Foram produzidos, em escala laboratorial, agregados de argila calcinada à temperatura de 1.150 °C. Eles apresentaram, com diâmetro variando de 10 mm a 12,5 mm, absorção de água de 3,76% (após 48 horas de imersão), massa específica aparente de 870 Kg/m³ e resistência à compressão variando de 2,4 MPa (agregados com diâmetro de 10 mm) a 3,99 MPa (agregados com diâmetro de 12,5 mm).

Santis (2012) estudou a possibilidade de produção de agregados leves de argila calcinada alternativos à argila expandida, com 5 diferentes tipos de argila extraídas de cidades do interior do estado de São Paulo, conformadas apenas com água e produzidos pelo processo de extrusão, os agregados foram queimados em diferentes temperaturas. A Tabela 11 ilustra as principais característica dos 5 tipos de agregados produzidos para a pesquisa.

Tabela 11 – Característica dos agregados leves de argila calcinada.

Amostra	Temperatura de queima (°C)	Porosidade aparente (%)	Massa específica aparente (Kg/m³)	Absorção de água (%)	Resistência à compressão (MPa)
Tambaú	800	35,69	1,632	21,86	17,9
	900	34,16	1,689	20,23	43,5
	1000	28,26	1,842	15,36	51,6
Porto Ferreira	800	37,55	1,540	24,39	14,1
	900	37,59	1,555	24,18	18,0
	1000	37,06	1,582	23,43	22,0
Ubarana	800	30,09	1,791	16,80	43,6
	900	29,16	1,785	16,34	55,8
	1000	27,97	1,813	15,43	35,9
Leme	800	35,36	1,608	21,99	18,9
	900	31,75	1,695	18,73	38,6
	1000	19,50	1,949	10,00	59,4
Itu	800	31,21	1,743	17,91	26,2
	900	29,64	1,791	16,55	39,5
	1000	18,93	1,973	9,60	56,2

FONTE: Santis, 2012.

A partir dos resultados apresentados, o autor decidiu confeccionar concretos leves utilizando agregados leves de argila calcinada, produzidos com argilas da região de Porto Ferreira/SP e Itu/SP, conformados apenas com água e queimados à temperatura de 900 °C. Os concretos foram confeccionados mantendo-se o consumo de cimento (cerca de 380 Kg/m³), areia (cerca de 960 Kg/m³) e agregados graúdos (537 Kg/m³ para agregados produzidos com argila de Itu e 480 Kg/m³ para agregados produzidos com argila de Porto Ferreira) em um mesmo patamar, com uma relação água-cimento de 0,5, de modo a variar apenas o tipo de agregado em cada tipo de moldagem. As principais características dos concretos moldados para a pesquisa são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Característica dos concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada.

Característica	Tipo de argila utilizada para produção dos agregados	
	Itu	Porto Ferreira
Massa específica (Kg/m³)	1948	1896
Índice de vazios (%)	21,46	22,97
Absorção de água (24 horas de imersão) (%)	10,53	11,31
Resistência à compressão (28 dias) (MPa)	23,94	19,79

FONTE: Santis, 2012.

Chen et al. (2012) produziram agregados leves de argila calcinada com uma argila coletada de sedimentos de uma barragem de água em Taiwan. A argila

apresentava limite de plasticidade e índice de plasticidade iguais a 40,4% e 14,8%, respectivamente, com grandes presenças de SiO_2 (59,31%) e Al_2O_3 (19,97%). Os agregados foram conformados com umidade variando de 20% a 25% e, em seguida, extrudados e queimados em um forno rotativo, com temperatura máxima variando de 1.100 °C a 1.150 °C. Tinham diâmetro variando de 9,5 mm a 12,5 mm, apresentaram massa específica de 1,01 g/cm³, absorção de água igual a 12,3% (após 24 horas de imersão) e resistência à compressão de 7,2 MPa.

Hwang et al. (2012) produziram agregados leves de argila calcinada pura e também de argila calcinada misturada com diferentes teores de cinzas. Os agregados foram conformados pelo processo de pelotização, com teor de umidade variando de 16% a 24%. Após a conformação, os agregados foram secos em estufa à temperatura de 105 °C e queimados em diferentes temperaturas, variando de 1.070 °C a 1.120 °C. A Tabela 13 ilustra as características dos agregados produzidos na pesquisa.

Tabela 13 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa.

Tipo de agregado	Temperatura de queima (°C)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)
90% argila e 10% cinza	1070	1,69	10,39	11,5
	1100	1,67	11,02	9,6
	1120	1,11	8,32	8,1
70% argila e 30% cinza	1070	1,37	5,89	21,0
	1100	1,40	8,30	16,6
	1120	1,48	13,42	8,4
50% argila e 50% cinza	1070	1,38	5,32	29,0
	1100	1,46	5,73	25,6
	1120	1,48	5,99	20,8

FONTE: Hwang et al., 2012.

3.2.2.3 Agregados leves produzidos com cinzas

Nos últimos anos, devido à grande preocupação com o desempenho ambiental dos materiais e a necessidade de suas reutilizações, muitos autores estudaram e estudam a incorporação de diferentes tipos de materiais nos concretos ou nos agregados para concretos. Kayali et al. (2003) estudaram a utilização de cinzas para a produção de agregados leves para concreto estrutural. Na moldagem dos concretos, foram utilizados 550 Kg/m³ de cimento e, em cada uma das moldagens, utilizou-se 55 Kg/m³ de sílica ativa, para melhorar a trabalhabilidade do concreto. As cinzas foram utilizadas como agregado miúdo, e as cinzas conformadas e queimadas à temperatura de 1.100 °C foram utilizadas como agregado graúdo. Os concretos produzidos para a pesquisa apresentaram massa específica seca média de 1.650 Kg/m³, com resistência à compressão média de 58 MPa. Chi et al. (2003) estudaram a utilização de agregados produzidos com cinzas e cimento para a produção de concretos. Foram produzidos 3 tipos de agregados, variando-se as quantidades, em peso, de cimento e de cinza, sendo o primeiro tipo com 10% de cimento e 90% de cinza, o segundo com 15% de cimento e 85% de cinza e o terceiro tipo com 20% de cimento e 80% de cinza. Os autores constataram que quanto maior a quantidade de cimento nas amostras, maiores os valores de

massa específica dos agregados, que variaram de 857 Kg/m³ a 972 Kg/m³. Com o aumento da massa específica dos agregados, observou-se um aumento da resistência dos mesmos, variando de 6,01 MPa a 8,57 MPa. Quando da produção de concreto com os agregados confeccionados com cinza e cimento, os autores constataram que os concretos confeccionados com agregados com mais cimento que cinza em sua composição apresentaram valores de resistência superiores aos concretos com agregados com menos cimento em sua composição.

Cheeseman e Viridi (2005) estudaram a utilização de cinzas lodo de estação de tratamento de esgoto para a confecção de agregados leves para concreto. No trabalho, foram confeccionados agregados leves com lodo misturados com pequenas quantidades de argila, para melhorar a consistência da mistura. Os agregados foram queimados à temperatura de 1.020 °C, 1.040 °C, 1.060 °C e 1.080 °C. Os autores constataram um decréscimo dos valores de absorção de água dos agregados com o aumento da temperatura de queima, uma vez que os agregados queimados a 1.020 °C apresentaram valores de absorção de água da ordem de 35%, e aqueles queimados a 1.080 °C apresentaram valores de absorção de água da ordem de 8%. Também foi constatado que a massa específica dos agregados aumentou com o aumento da temperatura de queima, até a temperatura de 1.060 °C; a partir dessa temperatura, a massa específica dos agregados começou a diminuir, muito provavelmente devido à perda de massa dos agregados e formação de poros. Da mesma forma, a resistência dos agregados aumentou gradativamente até a temperatura de 1.060 °C, e começou a diminuir para temperaturas de queima superiores a esse valor.

Cheeseman et al. (2005) estudaram a utilização de cinzas de fornos para a confecção de agregados leves. No trabalho, foram confeccionados agregados leves com cinzas residuais de fornos pelo processo de pelotização, com adição de 24% de água. Os agregados confeccionados com diâmetro de 8mm a 10 mm foram secos em estufa à temperatura de 105 °C e depois queimados em um forno rotativo, com temperatura variando entre 1.000 °C e 1.050 °C. A Tabela 14 ilustra a característica dos agregados produzidos na pesquisa.

Tabela 14 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa.

Temperatura de queima (°C)	Resistência à compressão (MPa)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)
1000	4,1	1,56	16
1010	4,9	1,56	15
1020	5,3	1,58	13
1030	5,0	1,60	12
1040	5,0	1,58	11
1050	5,2	1,57	10

FONTE: Cheeseman et al., 2005.

Kourti e Cheeseman (2010) produziram agregados leves com cinzas volantes e também com cinzas volantes e incorporação de pó de vidro (20% e 40%, em massa), sempre utilizando 30% em massa de água. Os agregados produzidos tinham de 8 mm a 10 mm de diâmetro, e após sua produção passaram pelos processos de secagem, à temperatura ambiente, e depois de queima, em um forno rotativo, com temperaturas variando de 1.040 °C a 1.120 °C (Tabela 15).

Tabela 15 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa

Tipo de agregado	Temperatura queima (°C)	Resistência à compressão (MPa)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção de água (%)
Apenas cinzas	1100	0,4	0,96	55,0
	1120	0,5	0,97	53,0
80% cinza e 20% pó de vidro	1040	1,9	1,13	36,0
	1060	2,0	1,13	36,0
	1080	2,1	1,13	36,0
	1100	2,1	1,14	37,0
	1120	2,2	1,14	36,0
	1040	4,4	1,20	24,0
60% cinza e 40% pó de vidro	1060	4,1	1,18	32,0
	1080	4,5	1,19	25,0
	1100	4,2	1,20	24,0
	1120	7,0	1,35	19,0

FONTE: Kourti e Cheeseman, 2010.

Kockal e Ozturan (2010) também produziram agregados leves utilizando cinza como matéria-prima e o processo de pelotização para conformação dos agregados. Foram produzidos agregados leves apenas com cinzas e também agregados leves com cinzas e algum tipo de material ligante (10%), como cimento, bentonita e pó de vidro. Foi utilizado um disco pelotizador com 14 cm de diâmetro e 15 cm de profundidade, operando em um ângulo de 43° e com velocidade de rotação de 45 rpm. Os agregados foram produzidos com uma quantidade de água variando de 22% a 25% em peso de material, e os agregados produzidos apenas com cinza, com cinza e bentonita e com cinza e pó de vidro foram queimados em três diferentes temperaturas (1.100 °C, 1.150 °C, 1.200 °C). Os agregados produzidos com cinza e cimento foram apenas secos. A Tabela 16 ilustra as características dos agregados.

Tabela 16 – Características dos agregados produzidos na pesquisa

Agregado	Temperatura de queima (°C)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Resistência à compressão (MPa)	Absorção de água (%)
Apenas cinza	1100	1,51	5,1	18,4
	1150	1,74	8,6	10,4
	1200	1,92	19,3	2,2
Cinza e bentonita	1100	1,77	13,7	6,9
	1150	1,93	23,1	0,8
	1200	1,56	12,0	0,7
Cinza e pó de vidro	1100	1,77	11,5	8,2
	1150	1,85	14,7	2,6
	1200	1,59	9,6	0,7
Cinza e cimento	-	1,89	3,7	25,5

FONTE: Kockal e Ozturan, 2010.

Gomathi e Sivakumar (2012) produziram agregados leves com cinzas, utilizando o processo de pelotização. Foram produzidos agregados com cinzas, água e ativador alcalino (NaOH) e agregados com 80% de cinza e 20% de cimento, misturados apenas com água. Os agregados produzidos com cinza, água e ativador alcalino apresentaram absorção de água na ordem de 38%, e resistência à compressão em torno de 2,4 MPa. Já os agregados produzidos com cinza, cimento e água apresentaram valores de absorção de água próximos de 37% e resistência a compressão média de 2,3 MPa.

3.2.2.4 Agregados leves com incorporações

A produção de agregados leves de argila calcinada pode ser aprimorada, de modo a se produzir agregados leves com características específicas, como baixa absorção de água e alta resistência. Dentre os principais produtos incorporados às matérias-primas para a produção de agregados leves com características específicas, destacam-se a serragem de madeira e os ativadores alcalinos. Os primeiros normalmente são adicionados com o objetivo de se reduzir a massa específica dos agregados, e os segundos, com o objetivo de se reduzir a absorção de água e se aumentar a resistência dos agregados.

Uma das maneiras de se aprimorar as características de agregados leves de argila calcinada é com a utilização de ativadores alcalinos nas massas cerâmicas, que, a partir de uma reação exotérmica e em um ambiente alcalino, produzem rapidamente e a baixas temperaturas um material com propriedades cimentícias. Os geopolímeros podem ser vistos como o equivalente amorfo de certos zeólitos sintéticos, como afirmam Bezerra et al. (2013). De acordo com os autores, os geopolímeros são constituídos por uma malha tridimensional em que átomos de silício alternam com os de alumínio em coordenação tetraédrica, com o compartilhamento de todos os oxigênios. Sua estrutura compreende uma rede polimérica Si-O-Al, com tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados alternadamente por átomos de oxigênio, sendo que a presença de cátions na estrutura dos geopolímeros é essencial para o balanceamento da carga negativa do AlO_4 , como ilustra a Figura 6:

Figura 6 – Representação esquemática do arranjo espacial da estrutura dos geopolímeros.
FONTE: Bezerra et al., 2013.

O modelo das reações geopoliméricas é composto por um conjunto de reações de dissolução, coagulação, condensação e cristalização. O primeiro passo consiste na quebra das ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Si que ocorre quando o pH da solução alcalina aumenta, de modo que esses grupos são transformados em uma fase coloidal. Em seguida, ocorre a acumulação dos produtos da quebra das ligações e a interação simultânea entre eles, formando uma estrutura coagulada, levando a uma terceira etapa que corresponde à formação de uma estrutura condensada e cristalizada (BEZERRA et al., 2013). O processo de geopolimerização é rápido, sendo que após a mistura dos sólidos e a aplicação do ativador alcalino, em poucos segundos inicia-se a dissolução das partículas. O tempo de pega médio é de aproximadamente 90 minutos, e o endurecimento completo da matriz leva cerca de 4 horas, dependendo da matéria-prima inicial, do tipo de mistura e do ativador (SANTA, 2012).

Para a produção dos geopolímeros, as principais matérias-primas utilizadas são materiais com grande quantidade de Si e Al presentes em sua estrutura, tais como escórias de alto forno (resíduos gerados pela indústria do aço), cinzas de carvão mineral, cinzas volantes e cinzas pesadas, metacaulim e argilas (SANTA, 2012). Bui et al. (2012) produziram agregados leves com três tipos diferentes de cinzas e dois tipos de ativadores alcalinos, silicato de sódio e NaOH. Os agregados foram produzidos pelo processo de pelletização, e foram utilizados apenas os ativadores alcalinos como agentes aglomerantes. A quantidade de ativador em cada uma das amostras foi determinada de acordo com a necessidade de cada uma das cinzas para aglomeração, como ilustra a Tabela 17:

Tabela 17 – Porcentagem dos materiais utilizados na confecção dos agregados

Agregado	Cinzas volantes (%)	Cinzas de fornos (%)	Cinza da casca do arroz (%)	NaOH (10M) (g)	Silicato de sódio (g)
T1	100	-	-	703,7	1148,3
T2	75	25	-	603,2	984,2
T3	50	50	-	502,7	820,2
T4	75	-	25	754,0	1230,3
T5	50	-	50	804,3	1312,3
T6	75	13	12	678,6	1107,3
T7	50	25	25	653,5	1066,3

FONTE: Bui et al. (2012).

Após a confecção dos agregados, eles foram apenas secos em temperatura ambiente por 28 dias e depois submetidos aos ensaios de absorção de água, massa específica e resistência à compressão, como ilustra a Tabela 18:

Tabela 18 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa. FONTE: Bui et al. (2012).

Agregado	Absorção de água (%)	Massa específica (Kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)
T1	10,6	903,1	5,7
T2	8,3	1002,5	15,5
T3	7,8	1059,7	15,7
T4	10,8	833,2	8,1
T5	20,5	768,5	6,0
T6	10,1	894,0	8,8
T7	9,8	855,0	8,1

FONTE: Bui et al. (2012).

Bezerra et al. (2013) estudaram a influência da quantidade de ativadores alcalinos na resistência de peças cerâmicas produzidas a partir de resíduos de produtos cerâmicos moídos. Foram produzidos três tipos de peças cerâmicas, variando-se apenas a quantidade de ativador alcalino (NaOH) em cada uma das amostras, que posteriormente foram apenas secas em estufa à temperatura de 50 °C. Os resultados da pesquisa indicaram que quanto maior a quantidade de ativador na mistura, maiores os valores de resistência das peças queimadas.

Liao et al. (2013) produziram agregados leves com argila proveniente de uma barragem de água em Taiwan e com a adição de hidróxido de sódio com diferentes molaridades como ativador alcalino. As amostras de argila foram coletadas, secas e moídas e, em seguida, pelletizadas com a adição do ativador alcalino, na proporção 1:4,5 (sólido:líquido) para a produção dos agregados com diâmetro variando de 10 mm a 20 mm. Depois de confeccionados, os agregados foram secos à temperatura de 120 °C por um período de 1 hora e, em seguida, queimados a temperaturas de 1.085 °C, 1.100 °C, 1.115 °C, 1.130 °C e 1.145 °C (Tabela 19).

Tabela 19 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa

Agregado	Concentração de NaOH (M)	Temperatura de queima (°C)	Absorção de água (%)	Massa específica (Kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)
DCN 9,52	9,52	1085	1,1	1,25	5,7
		1100	0,8	1,15	5,5
		1115	0,9	1,10	3,6
		1130	1,0	1,10	2,5
		1145	1,1	1,15	2,0
DCN 8,2	8,2	1085	0,5	1,30	7,0
		1100	0,6	1,20	5,2
		1115	0,7	1,15	5,1
		1130	0,6	1,14	4,0
		1145	0,7	1,18	3,5
DCN 7,2	7,2	1085	0,6	1,40	7,9
		1100	0,6	1,30	6,5
		1115	0,7	1,25	5,5
		1130	0,5	1,20	4,5
		1145	0,6	1,25	4,0

FONTE: Liao et al., 2013.

Santis et al. (2014) estudaram a produção de agregados leves de argila calcinada produzidos com diferentes tipos de ativadores alcalinos. Na pesquisa, foram utilizados como ativadores o silicato de potássio, o silicato de sódio com NaOH, o ácido fosfórico, o silicato de sódio, o KOH e o NaOH. Para a produção dos agregados, utilizou-se água misturada com ativador, na proporção 1:1, e os agregados foram queimados a temperaturas de 600 °C e 900 °C. A Tabela 20 ilustra as características dos agregados produzidos na referida pesquisa.

Tabela 20 – Características dos agregados produzidos com geopolímeros

Amostra	Absorção de água (%)		Resistência à compressão (MPa)	
	600 °C	900 °C	600 °C	900 °C
Massa cerâmica	-	27,8	-	5,62
Massa cerâmica + silicato de potássio	30,3	30,1	0,24	0,32
Massa cerâmica + silicato de sódio c/ NaOH	18,3	14,4	3,28	5,58
Massa cerâmica + silicato de sódio	10,9	9,1	7,19	7,04
Massa cerâmica + KOH	25,1	27,2	1,06	1,53
Massa cerâmica + NaOH	24,1	20,7	1,15	2,97

FONTE: Santis et al., 2014.

Percebe-se, analisando os resultados do referido trabalho, que para a matéria-prima utilizada e ativação realizada com silicato de sódio, além de ganhos na resistência à compressão dos agregados e nos baixos valores de absorção de água dos mesmos, pode-se conseguir um ganho energético no processo de produção do agregado. Isso se dá porque à temperatura de 600 °C as características dos agregados produzidos com silicato de sódio foram similares às características dos mesmos agregados quando queimados a 900 °C.

Dutra e Pontes (2002) estudaram a obtenção de produtos de cerâmica vermelha leves com a moldagem de massas cerâmicas com incorporação de serragem de madeira, nas proporções de 10%, 20% e 30% em peso. Após a conformação, os corpos de prova foram secos em estufa à temperatura de 110 °C por 24 horas e depois queimados a temperaturas de 1.100 °C, 1.150 °C e 1.200 °C. A Tabela 21 ilustra a característica dos produtos confeccionados na pesquisa.

Tabela 21 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa

Agregado	Argila (%)	Serragem (%)	Temperatura de queima (°C)	Massa específica (g/cm ³)	Absorção de água (%)
1	100	0	1100	1,92	12,79
			1150	2,08	9,64
			1200	2,19	7,41
2	90	10	1100	1,52	18,61
			1150	1,71	16,86
			1200	1,80	14,69
3	80	20	1100	1,50	25,33
			1150	1,45	23,65
			1200	1,53	21,45
4	70	30	1100	1,20	31,30
			1150	1,27	29,01
			1200	1,33	27,12

FONTE: Dutra e Pontes, 2002.

Al-Bahar e Bogahawatta (2006) produziram agregados leves de argila calcinada com a incorporação de serragem de madeira nas massas cerâmicas. Foram produzidos agregados leves apenas com argila (330 g) e água (152,3 g) e agregados leves compostos por argila (550 g), serragem de madeira (35 g) e água (253,8 g). Os agregados leves produzidos na pesquisa foram secos à temperatura de 110 °C por 24 horas e depois queimados às temperaturas de 900 °C, 925 °C, 950 °C e 1.000 °C, ficando expostos à temperatura máxima por 120 minutos. Após a queima, os agregados foram submetidos aos ensaios de massa específica aparente e absorção de água, após 24 horas de imersão. As características dos agregados produzidos na pesquisa são ilustradas na Tabela 22.

Tabela 22 – Característica dos agregados produzidos na pesquisa

Tipo de agregado	Temperatura de queima (°C)	Absorção de água (%)	Massa específica aparente (g/cm ³)
Cerâmica	900	-	2,0
	925	-	2,5
	950	-	1,8
	1000	-	1,9
Cerâmica com serragem	900	8,74	1,64
	925	7,17	1,67
	950	14,5	1,58
	1000	40,6	1,56

FONTE: Al-Bahar e Bogahawatta, 2006.

Mori et al. (2011) produziram produtos de cerâmica vermelha com diferentes quantidades de serragem incorporada nas massas cerâmicas, variando de 33,33% a 9,09% em volume. As peças foram extrudadas com umidade variando de 20% a 25% em massa, secas em estufa à temperatura de 110 °C e queimadas à temperatura de 950 °C. Os ensaios realizados nas peças queimadas mostraram que o aumento da quantidade de serragem nas misturas provocou uma diminuição nos valores de massa específica das peças queimadas, que variaram de 1,6 g/cm³, para

amostras de argila pura, a $1,4 \text{ g/cm}^3$, para amostras de argila e 33,33% de serragem. Apesar de uma diminuição nos valores de massa específica das amostras, os autores observaram que o aumento da quantidade de serragem nas massas cerâmicas provocou um significativo aumento no valor de absorção de água das peças queimadas. A absorção variou de 25,5%, para as peças conformadas apenas com argila, a 36,0%, para as peças conformadas com argila e 33,33% de serragem nas massas cerâmicas.

Chemani e Chemani (2013) estudaram a influência do teor de umidade na produção de cerâmicas vermelhas com incorporação de serragem de madeira. Na pesquisa, foram produzidos produtos cerâmicos com incorporação de 9% em massa de serragem de madeira, com umidades de 22%, 24% e 26%, queimados à temperatura de $950 \text{ }^\circ\text{C}$. Os resultados obtidos na pesquisa mostraram que o aumento do teor de umidade das misturas provocou um aumento nos valores de retração linear de queima e de massa específica aparente das peças queimadas, que variaram de $1,4 \text{ g/cm}^3$ (massas conformadas com 22% de umidade) a $1,57 \text{ g/cm}^3$ (massas conformadas com 26% de umidade). Já a absorção de água diminuiu com o aumento do teor de umidade das massas cerâmicas, variando de 15% para as peças conformadas com 22% de umidade a 14,1% para as peças conformadas com 26% de umidade.

Analisando-se as pesquisas já realizadas acerca de utilização de argila ou outros tipos de matérias-primas para a produção de agregados leves, optou-se, para o desenvolvimento desta pesquisa, pela produção de agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporações de serragem de madeira e cinza do bagaço da cana-de-açúcar, levando-se em consideração a grande quantidade destes tipos de matérias-primas disponíveis no Brasil. Para a produção de agregados leves de argila vermelha calcinada com baixos valores de absorção de água e massa específica, e com elevados valores de resistência, optou-se também por utilizar silicato de sódio como ativador alcalino, buscando-se a melhora das características dos produtos finais produzidos. Com a utilização de argila vermelha e das incorporações de serragem de madeira, cinza do bagaço da cana-de-açúcar e silicato de sódio, acredita-se ser possível a produção de agregados leves com baixos valores de absorção de água (abaixo de 10%) e massa específica e altos valores de resistência à compressão. Busca-se então produzir um agregado leve com características similares à argila expandida, mas que possa ser disseminado por todo o território nacional.

4. METODOLOGIA

De acordo com os objetivos desta pesquisa, descritos nos capítulos anteriores, este capítulo descreve os procedimentos experimentais adotados para o estudo da viabilidade da produção de agregados leves de argila calcinada com incorporações para a utilização em concretos estruturais, que podem ser divididos em 7 etapas, como ilustra a Tabela 23:

Tabela 23 – Resumo do programa experimental

Etapa	Descrição
1	Caracterização das matérias-primas utilizadas na pesquisa
2	Confecção corpos de prova de argila calcinada
3	Ensaio realizados nos corpos de prova queimados
4	Confecção dos agregados leves de argila calcinada
5	Ensaio realizados nos agregados leves de argila calcinada
6	Produção de concretos com agregados de argila calcinada
7	Ensaio realizados nos concretos com agregados de argila calcinada

Para a realização da pesquisa, foram coletadas amostras de argila provenientes de uma fábrica chamada Maristela Telhas Ltda. (Top Telha), fabricante de produtos de cerâmica vermelha (telhas) localizada na cidade de Leme, no interior do estado de São Paulo.

4.1 Caracterização das matérias-primas utilizadas na pesquisa

4.1.1 Amostra de solo (argila)

A argila utilizada na pesquisa, proveniente da região de Leme – SP, foi submetida aos ensaios de limite de liquidez (ABNT NBR 6459:1984) e de plasticidade (ABNT NBR 7180:1984), análise granulométrica (ABNT NBR 7181:1984), massa específica dos sólidos (ABNT NBR 6508:1984), difração de raios X (DRX) e espectrometria e fluorescência de raios X (FRX).

a) Limite de liquidez

O limite de liquidez refere-se ao ponto de umidade limite em que o solo perde suas características plásticas e passa para o estado líquido. Para o início do ensaio, o solo foi primeiramente destorroado e passado na peneira número 40, com o auxílio do pilão e do almofariz. O solo passante pela peneira foi separado e dividido em duas amostras: uma seca, colocada em um saco plástico, e uma umedecida, colocada em um pote plástico. Todas as amostras ficaram descansando por no mínimo 72 horas. Após o período de descanso, uma quantidade de solo úmido foi misturado em uma placa de vidro e, em seguida, foram preenchidos 2/3 do volume da concha do aparelho de Casagrande com o solo. Com o auxílio do cinzel, fez-se uma ranhura na parte central do solo na concha, que foi colocada novamente no aparelho de Casagrande. Com movimentos contínuos, a manivela foi girada com uma frequência de 2 voltas por segundo. Quando uma parte do solo se encontra com a outra parte, o ensaio foi encerrado, como ilustra a Figura 7 (a) e (b).

(a) (b)
Figura 7 – Amostras de solo antes (a) e depois (b) do ensaio

Quando do término do ensaio, um pouco da amostra do ensaio foi recolhida e colocada em uma cápsula para a pesagem – procedimento repetido por 5 vezes para cada uma das amostras, com intervalos distintos entre 15 e 35 golpes. Ressalta-se aqui que quando as amostras não se “juntam” após 35 golpes ou antes de 15 golpes, o ensaio deve ser reiniciado. As amostras pesadas foram colocadas na estufa para secarem por 24 horas e, após esse período, uma nova pesagem foi realizada. Com os valores da massa de solo seco e úmido pode-se determinar o teor de umidade do solo para cada um dos 5 pontos ensaiados, e com esses valores e os valores dos números de golpes de cada ponto pode-se traçar um gráfico (número de golpes X umidade). O valor da umidade correspondente a 25 golpes é o valor do limite de liquidez do solo.

b) Limite de plasticidade

O limite de plasticidade de um solo refere-se ao ponto de umidade limite em que o solo perde suas características semissólidas e passa para o estado plástico. Primeiramente, o solo passou pelo processo de destorroamento, passando pela peneira número 40. O solo passante pela peneira foi separado e dividido em duas amostras, uma seca e uma úmida, que ficaram descansando por 72 horas. Após o descanso, separou-se um pouco de solo úmido e adicionou-se, quando necessário, um pouco de solo seco, até a amostra ficar moldável à mão. Em seguida, amassou-se o solo com a palma da mão, formando-se uma superfície quase plana. Com o auxílio de uma espátula, foram cortadas pequenas tiras de solo úmido com largura aproximada de 3 mm. Em seguida, essas tiras foram roladas e transformadas em filetes de solo com a palma da mão, com movimentos para frente e para trás, até o filete transformar-se em um cilindro com diâmetro aproximado de 3 mm, como ilustra a Figura 8.

Figura 8 – Filete de solo úmido rolando para frente e para trás, em movimentos contínuos

Após a confecção do cilindro procurou-se observar, com o auxílio de uma lupa, a formação de pequenas rachaduras no molde. Quando da presença de pequenas rachaduras, o ensaio pode ser concluído, cortando-se as extremidades das amostras e fazendo-se a pesagem antes e depois da colocação em estufa. Em alguns casos, quando não ocorrem as rachaduras ou quando elas ocorrem antes de o cilindro atingir a espessura de 3 mm, o ensaio deve ser interrompido e iniciado novamente. Após a pesagem das amostras úmidas e secas, determinou-se o teor de umidade dos solos e, com isso, seu limite de plasticidade, que corresponde à média aritmética das umidades obtidas no ensaio.

c) Análise granulométrica

O ensaio de análise granulométrica divide-se em duas etapas: a sedimentação e o peneiramento. A análise granulométrica tem como objetivo determinar as principais faixas granulométricas das amostras analisadas. Primeiramente, separou-se cerca de 50 g de amostra de solo e adicionou-se 125 ml de hexametáfosfato de sódio (45,7 g de sal para cada litro de água destilada) na amostra, que ficou descansando por um período de 5 dias. Após esse período, a amostra foi colocada em um agitador mecânico por 15 minutos, para completa homogeneização. Após o processo de agitação, a amostra passou pela peneira número 10. A matéria que passou pela peneira foi depositada na proveta de 1.000 ml, que foi preenchida com água destilada até completar volume total. O material retido na peneira foi colocado na estufa para secar, e a amostra permaneceu em descanso por 3 dias. O material foi agitado por aproximadamente dois minutos e, depois de bem misturado, iniciou-se a tomada dos valores de densidade da amostra, com o auxílio do densímetro. Foram feitas 11 leituras em um intervalo de 8 horas em um mesmo dia e uma última leitura no dia seguinte ao do início do ensaio, como ilustra a Figura 9.

Figura 9 – Ensaio de sedimentação em andamento

Após o término do ensaio de sedimentação, iniciou-se a segunda etapa do ensaio de análise granulométrica conjunta, com o peneiramento da amostra de solo que foi utilizada para sedimentação. Esse peneiramento foi realizado com uma peneira de número 200 (aberturas de 0.074 mm). Para a execução do ensaio, retirou-se da estufa a amostra de solo que havia ficado retida na peneira número 10 (após a amostra passar pelo agitador mecânico). Em seguida, o material que estava na proveta do ensaio de sedimentação foi agitado e, com ele, fez-se o peneiramento. O material que ficou retido na peneira número 200 foi adicionado ao material retido na peneira número 10 e colocado na estufa para uma nova secagem.

Para completar o ensaio de análise granulométrica, foi executado mais um peneiramento com as amostras de solo que haviam sido peneiradas depois da sedimentação e ficaram retidas na peneira número 200, juntamente com o material retido na peneira número 10 do início do ensaio. Nesse peneiramento, as amostras passaram por um jogo de peneiras (números 4, 10, 16, 30, 50, 70, 100, 140, 200). Após o peneiramento, as amostras retidas em cada uma das peneiras e no fundo foram pesadas; com esses valores pôde-se concluir o ensaio de granulometria.

d) Massa específica dos sólidos

Para o início do ensaio, adicionou-se água destilada em aproximadamente 50 g de material. Além disso, uma pequena quantidade de amostra de solo foi separada e pesada antes e depois da colocação em estufa, para a determinação do teor de umidade da amostra. A mistura de solo e água destilada permaneceu em descanso por 24 horas e, em seguida, foi levada para dispersão, em dispersor eletrônico, por 10 minutos. Após a dispersão, a mistura foi levada ao picnômetro; o picnômetro com a mistura foi levado ao aparelho de vácuo, juntamente com um picnômetro apenas com água destilada. Depois da retirada do ar da mistura e da água destilada, utiliza-se a água destilada sem ar para completar o volume do picnômetro da mistura, conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10 – Picnômetros com amostra de solo e com água destilada colocados no aparelho de vácuo

Após o término da saída do ar das amostras, o picnômetro com a amostra de solo e água foi completado com a água destilada sem ar. Em seguida, a mistura no picnômetro foi levada ao freezer até atingir temperatura próxima de 15 °C, quando foram medidos o peso e a temperatura. Em seguida, acrescentou-se um pouco mais de água e homogeneizou-se a mistura, então esquentou-se a mistura no picnômetro – esse acréscimo deve ser na ordem de aproximadamente 2,5 a 3 °C – e tomaram-

se novas medidas de temperatura e peso. Esse procedimento foi repetido 4 vezes e, com isso, obtiveram-se 5 conjuntos de diferentes temperaturas e pesos das misturas. Terminadas as tomadas de temperatura e peso, a mistura foi colocada em um pote e levada à estufa para secar. Depois de seca, a amostra passou por uma simples conferência de peso, comparando-se com o peso inicial do para determinar se houve muita perda de massa.

e) Difração de raios X (DRX)

A análise estrutural foi realizada no laboratório de cristalografia do Instituto de Física de São Carlos – USP, com o auxílio de um difratômetro de raios X da marca Rigaku Rotaflex, modelo Ru200B, com radiação $\text{CuK}\alpha$, com monocromador de grafite no feixe secundário, operando a 50 kV/50 mA. A amostra, que foi preparada em forma de disco compactado, foi triturada, pulverizada, homogeneizada por peneiramento e depositada em lâmina de vidro com pequena cavidade circular. Todas as medidas foram feitas sob as mesmas condições experimentais, ângulo de varredura $5^\circ \leq 2\theta \leq 100^\circ$ e passo $0,02^\circ/2s$ em temperatura ambiente. As fases cristalinas foram identificadas através do programa Match, com o banco de dados PDF2 (2010), utilizando-se somente a seção de minerais.

f) Espectrometria e fluorescência de raios X (FRX)

O ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X foi realizado no laboratório de Fluorescência de Raios X (FRX) do Instituto de Geociências da USP (IGC). O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi o espectro de fluorescência de raios X, da marca Philips, modelo PW 2400. Para a realização do ensaio, foi utilizado o método de pastilha de pó prensado (PPP).

Foram analisados os 10 principais óxidos, sendo eles o dióxido de silício (SiO_2), dióxido de titânio (TiO_2), óxido de alumínio III (Al_2O_3), óxido de ferro III (Fe_2O_3), óxido de manganês (MnO), óxido de magnésio (MgO), óxido de cálcio (CaO), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O), pentóxido de fósforo (P_2O_5) e a perda ao Fogo.

g) Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD e TG)

Os ensaios de análise térmica diferencial e termogravimétrica foram realizados pela empresa BP Engenharia Indústria e Comércio Ltda., localizada na cidade de Campinas – SP. A análise térmica diferencial foi executada em alíquotas de 1 g pulverizadas, empregando-se equipamento de sistema de análises térmicas da marca BP engenharia, modelo RB 3000, com taxa de aquecimento de $12,4^\circ\text{C}/\text{min.}$, até a temperatura máxima de 1.000°C exposta à atmosfera.

Já a análise termogravimétrica foi realizada utilizando-se alíquotas de 15 g de amostra pulverizada, empregando-se o mesmo aparelho utilizado para as análises térmicas diferenciais, com taxa de aquecimento de $12,4^\circ\text{C}/\text{min.}$ até a temperatura máxima de 1.000°C exposta à atmosfera.

4.1.2 Serragem de madeira

A serragem utilizada na pesquisa foi coletada em uma serraria localizada na cidade de São Carlos – SP. A serragem foi coletada da serra de corte de toras de madeira de eucalipto vermelho.

a) Umidade natural

Para a determinação da umidade natural da serragem de madeira, a serragem foi passada pela peneira 4,75 mm para retirada das partículas maiores. O material passante na peneira foi pesado e então colocado em uma estufa ventilada a (103 ± 2) °C por até 24 horas, quando atingiu uniformidade de peso. Após a secagem, o material foi novamente pesado. Em seguida, o material foi imerso em água por 30 minutos e depois passado por uma filtragem a vácuo até o momento em que não houvesse mais gotejamento. Após a filtragem, a serragem foi novamente pesada.

b) Granulometria

O ensaio de granulometria da serragem de madeira utilizada na pesquisa foi realizado pelo processo de sedimentação e peneiramento. Aproximadamente 1 Kg de serragem foi seco em estufa e em seguida submetido à passagem por um conjunto de peneiras vibratórias, com período de vibração de 5 minutos. A partir dos pesos retidos em cada peneira, pôde-se construir a curva de granulometria da serragem.

4.1.3 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar utilizada na pesquisa foi coletada na empresa Baldin Bioenergia S.A., na cidade de Pirassununga – SP. Ela foi coletada no estado úmido, com teor de umidade de 90,06%, e então submetida à secagem em estufa ventilada à temperatura de 60 °C, por um período de 72 horas.

4.1.4 Silicato de sódio

O silicato de sódio utilizado nesta pesquisa foi produzido pela empresa ISOTEC Produtos Para Metalurgia, situada na cidade de São Carlos – SP. As características físicas do silicato de sódio utilizado na pesquisa são apresentadas no item 5.1.4 deste trabalho.

4.2 Confeção dos corpos de prova de argila calcinada

Os corpos de prova de argila calcinada foram produzidos no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente da FZEA/USP, na cidade de Pirassununga – SP. Os corpos de prova foram extrudados em formato de barras cilíndricas com 1,5 cm de diâmetro. Após a extrusão, foram cortados em seu tamanho final, com 10 cm de comprimento. Por se tratar de uma amostra de argila previamente utilizada por uma empresa para a produção de produtos de cerâmica vermelha, a amostra já estava destorroada e moída. Para se determinar a quantidade de água a ser adicionada em cada mistura, a argila foi submetida ao ensaio de determinação de umidade natural. Foram coletadas três amostras da argila, que foram pesadas e, em seguida, colocadas na estufa para secarem por 24 horas a 100 °C. Após estarem secas, as

amostras foram pesadas novamente e o teor de umidade da amostra foi determinado.

Foram produzidos corpos de prova de argila pura, apenas com água e também corpos de prova de argila com a incorporação de serragem de madeira, cinza proveniente da queima do bagaço da cana-de-açúcar e de silicato de sódio (ativador alcalino) nas massas cerâmicas. Foram incorporados 10%, 20% e 30% em massa de serragem nas massas cerâmicas, respectivamente, 10%, 20%, 30% e 40% em massa de cinza nas massas cerâmicas, respectivamente, e, quando da utilização de silicato de sódio, utilizou-se 50% de água e 50% de silicato em cada uma das moldagens.

O silicato de sódio utilizado foi do tipo alcalino C112, produzido pela empresa Isotec Produtos Para Metalurgia, localizada na cidade de São Carlos – SP, e a serragem utilizada era de eucalipto vermelho, coletada em uma serraria chamada Serraria Itapuã, também localizada na cidade de São Carlos – SP.

Para a preparação das massas, em um primeiro momento, estipulou-se que a quantidade de água a ser adicionada às amostras de argila seria a mínima para a extrusão, ou seja, a correspondente ao limite de plasticidade da amostra. Como a amostra já continha um pouco de água, determinada pelo ensaio de determinação da umidade da amostra, utilizou-se uma formulação para a determinação da quantidade mínima de água a ser adicionada a cada uma das amostras para se atingir o valor do limite de plasticidade, conforme ilustra a Equação 4.

$$V = \frac{P}{1 + \left(\frac{w}{100}\right)} * \left[\left(\frac{LP}{100}\right) - \left(\frac{w}{100}\right) \right] \quad (4)$$

Onde,

V = volume de água a ser adicionado, em mililitros;

P = quantidade de matéria-prima utilizada, em gramas;

w = quantidade de água na amostra, em porcentagem;

LP = valor do limite de plasticidade da amostra, em porcentagem.

A serragem de madeira estava com apenas 30% de umidade; como é um material muito absorvente, ela foi molhada de modo a atingir sua absorção máxima (91,5% de absorção de água) e não utilizar a água necessária para a moldagem dos corpos de prova. No caso das moldagens com cinza, como este material estava seco, fez-se um ensaio prévio para determinação da quantidade de água para que a mistura argila-cinza se tornasse moldável, chegando-se a um valor ótimo próximo de 1.400 g de água para todos os casos. Após a adição da água e dos produtos que foram incorporados na massa, as amostras foram misturadas, durante 5 minutos, em uma batedeira planetária, produzida pela empresa Irmãos Amadio Ltda., número 6542, modelo 20, série LA, para a confecção das massas para a extrusão, como ilustra a Figura 11.

Figura 11 – Preparação da massa para extrusão

A Tabela 24 ilustra as quantidades finais de cada um dos produtos utilizados nas moldagens.

Tabela 24 – Quantidade dos produtos utilizados para a moldagem dos corpos de prova de argila calcinada

	Amostra	Argila (g)	Serragem/ cinza (%)	Água (g)	Ativador (silicato de sódio) (g)
Argila e serragem	100A-0Se	5210	0	1221	-
	90A-10Se	5210	10	1221	-
	80A-20Se	5210	20	921	-
	70A-30Se	5210	30	657	-
Argila, serragem e ativador	100A-0Se-Si	5210	0	675	675
	90A-10Se-Si	5210	10	675	675
	80A-20Se-Si	5210	20	361,5	361,5
	70A-30Se-Si	5210	30	435	435
Argila e cinza	100A-0Ci	5000	0	1450	-
	90A-10Ci	4500	10	1425	-
	80A-20Ci	4000	20	1420	-
	70A-30Ci	3500	30	1452	-
	60A-40Ci	3000	40	1400	-
Argila, cinza e ativador	90A-10Ci-Si	4500	10	750	750
	80A-20Ci-Si	4000	20	725	725
	70A-30Ci-Si	3500	30	725	725
	57A-43Ci-Si	3000	30	750	750

Depois de preparadas, as massas foram extrudadas em uma extrusora de porte laboratorial, produzida pela empresa Indústria de Marombas Gelenski Ltda., modelo MVIG-05, número 00659, série C4-2007. Para a extrusão, utilizou-se boquilha de formato cilíndrico, com diâmetro de 15 mm, como ilustra a Figura 12.

Figura 12 – Extrusão dos corpos de prova de argila calcinada

Conforme eram extrudados, os corpos de prova eram cortados em tamanho aproximado de 40 cm de comprimento e armazenados em bandejas, ficando assim preparados para serem cortados. Em seguida, os corpos de prova foram cortados, ficando cada um com 10 cm de comprimento e 15 mm de diâmetro, como ilustra a Figura 13.

Figura 13 – Corpos de prova cortados e identificados

Após a identificação e o corte dos corpos de prova, eles foram levados à estufa ventilada, a uma temperatura de 60 °C, por um período de 72 horas. Após secos, os corpos de prova foram queimados em uma mufla da marca Fornos Jung, modelo 10013, número 6192, do ano de 2009, com potência de 7 KW, com temperatura de 900 °C. A queima foi realizada com rampa de aquecimento de 4 °C/min. e de resfriamento de 6 °C/min., sendo que os corpos de prova foram submetidos à temperatura máxima por 60 minutos. Após a queima, alguns corpos de prova foram selecionados aleatoriamente e foram submetidos a um banho de silicato de sódio, que foi pulverizado externamente nas amostras, de modo a se determinar a influência deste tipo de aplicação externa nos corpos de prova de argila calcinada.

Os corpos de prova confeccionados com serragem de madeira foram submetidos aos ensaios de absorção de água, retração linear, expansão por umidade, massa específica aparente, porosidade aparente e resistência à compressão. Os corpos de prova confeccionados com cinza foram submetidos aos ensaios de absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente e resistência à compressão.

4.3 Ensaios realizados nos corpos de prova queimados

Para a determinação das características físicas das peças queimadas, para posterior escolha das melhores formulações para a produção de agregados leves de argila calcinada de alta eficiência para concreto, os corpos de prova queimados foram submetidos a uma série de ensaios, que serão descritos a seguir.

a) Retração linear de queima

Após a secagem dos corpos de prova, eles foram medidos em três pontos distintos de seus comprimentos, com a utilização de um paquímetro digital. Após a queima, foram medidos novamente nos mesmos três pontos e, através da Equação 5 calculou-se a retração linear de cada uma das amostras.

$$RL = \left(\frac{Lo - Lf}{Lo} \right) * 100 \quad (5)$$

Onde,

Lo = comprimento médio dos corpos de prova antes da queima, em milímetros;

Lf = comprimento médio dos corpos de prova após a queima, em milímetros.

b) Absorção de água e expansão por umidade

Os ensaios de absorção de água e expansão por umidade nos corpos de prova queimados foram realizados baseados nos ensaios realizados para placas cerâmicas (ABNT NBR 13818:1997). Os corpos de prova já queimados foram pesados, com uma balança da marca Marte Balanças e Aparelhos de Precisão Ltda., modelo AS 5500, e medidos com um paquímetro digital, em três pontos distintos de seus comprimentos. Após isso, eles foram separados em lotes e colocados imersos em água a temperatura de aproximadamente 100 °C, durante 24 horas, conforme ilustra a Figura 14 (a) e (b).

(a)

(b)

Figura 14 – Corpos de prova separados em lotes (a) e imersos em água a 100 °C (b)

Depois de imersos, os corpos de prova foram secos apenas superficialmente, e foram novamente pesados e medidos em três pontos distintos, com os mesmos aparelhos. A partir desses valores e das Equações 6 e 7, calculou-se a absorção de água e a expansão por umidade dos corpos de prova queimados.

$$AA = \left(\frac{Mu - Ms}{Ms} \right) * 100 \quad (6)$$

Onde,

Mu = massa úmida dos corpos de prova, em gramas;

Ms = massa seca dos corpos de prova, em gramas.

$$EPU = \left(\frac{l_f - l_o}{l_o} \right) * 100 \quad (7)$$

Onde,

Lf = comprimento dos corpos de prova após a imersão em água, em milímetros;

Lo = comprimento dos corpos de prova antes da imersão em água, em milímetros.

c) Porosidade aparente e massa específica aparente

Para os ensaios de porosidade aparente e massa específica aparente, os corpos de prova foram pesados secos e, em seguida, foram colocados imersos em água à temperatura ambiente, por 48 horas. Após o período de imersão em água, foram pesados úmidos e também imersos em água (Figura 15) e, com as Equações 8 e 9, calcularam-se os valores de porosidade aparente e massa específica aparente dos corpos de prova.

Figura 15 – Pesagem dos corpos de prova imersos em água

$$PA = \left(\frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} \right) * 100 \quad (8)$$

$$MEA = \left(\frac{Ms}{Mu - Mi} \right) \quad (9)$$

Onde,

Mu = massa úmida dos corpos de prova (após imersão por 24 horas em água);

Ms = massa seca dos corpos de prova;

Mi = Massa imersa dos corpos de prova (saturados e pesados imersos em água).

d) Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova queimados foi realizado baseado em uma adaptação do ensaio de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto (ABNT NBR 5739:2007). Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram cortados com 3 cm de comprimento, de modo que ficaram com o comprimento duas vezes maior que o diâmetro. Após cortados, os corpos de prova foram submetidos à força de compressão, aplicada através de um equipamento de ensaio de compressão, produzido pela empresa EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaio, como ilustra a Figura 16.

Figura 16 – Ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova queimados

e) Agregados selecionados para produção dos concretos

De acordo com as características dos corpos de prova cerâmicos analisados, para a produção dos agregados leves de argila vermelha calcinada foram escolhidos os agregados leves produzidos com argila vermelha, 30% em massa de serragem e água (70A-30Se) e também os agregados produzidos com argila vermelha, 43% em massa de cinza do bagaço de caba de açúcar e silicato de sódio (50% de silicato de sódio e 50% de água) (57A-43Ci-Si). Os agregados produzidos com serragem de madeira receberam um banho com uma solução composta por água e silicato de sódio (1:1) após a queima, com o objetivo de reduzir a absorção de água desse tipo de agregado. As características dos agregados produzidos serão enumeradas no Capítulo 5 deste trabalho.

4.4 Produção dos agregados leves de argila calcinada

Os agregados leves de argila calcinada foram confeccionados no Laboratório de Construções Rurais e Ambientais da FZEA/USP, na cidade de Pirassununga – SP, com os mesmos procedimentos utilizados para a produção dos corpos de prova de argila calcinada, descritos no item 4.2 deste trabalho. Ao final do processo de produção, os corpos de prova foram cortados em seus tamanhos finais (15 mm de diâmetro – tamanho da boquilha durante a extrusão – e 15 mm de comprimento), conforme ilustra a Figura 17:

Figura 17 – Agregados cortados e secando à temperatura do ambiente

Analisando-se os resultados obtidos na caracterização dos corpos de prova confeccionados com diferentes teores de serragem de madeira e cinza proveniente da queima do bagaço da cana-de-açúcar, optou-se por produzir agregados com o maior teor de serragem de madeira possível sem prejuízo no processo de extrusão (30% em massa), de modo a se obter agregados com baixos valores de massa específica e também com o maior teor de cinza possível, acrescido de silicato de sódio, de modo a se obter agregados com baixos valores de absorção de água, conforme ilustra a Tabela 25.

Tabela 25 – Quantidades dos produtos utilizados para produção dos agregados leves de argila calcinada de alta eficiência

	Amostra	Argila (g)	Serragem (%)	Água (g)	Ativador (g)
Serragem	70A-30Se	4200	30	1550	-
Cinza	57A-43Ci-Si	5210	43	860	860

Foram produzidos agregados com 70% de argila e 30% de serragem de madeira (70A-30Se) e agregados com 57% de argila, 43% de cinza proveniente da queima do bagaço de cana-de-açúcar e silicato de sódio (57A-43Ci-Si). Por tratarem-se de agregados porosos, com altos valores de absorção de água, aqueles produzidos com serragem (70A-30Se) passaram por um processo de banho em solução de silicato de sódio e água, na proporção de 1:1 (silicato de sódio:água), antes de serem utilizados nos concretos, a fim de se diminuir a absorção de água desse tipo de agregado.

4.5 Produção dos corpos de prova de concreto

Para a realização dessa pesquisa foram confeccionados corpos de prova de concreto com agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporações (item 4.4) e argila expandida. Os corpos de prova foram moldados no Laboratório de Construções Civil (LCC) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP – São Carlos. Para a moldagem, utilizou-se areia proveniente do rio Mogi, com dimensões máximas dos grãos de 4,8 mm, massa específica saturada de 2.624 Kg/m³ e massa unitária no estado solto de 1.551 Kg/m³, além de cimento tipo CP II-Z-32, produzido

pela empresa Votorantim Cimentos Brasil S/A, cujas características são apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26 – Propriedades e características do cimento utilizado na pesquisa

Características e propriedades		Unidade	Valor
Finura	Resíduo #200 (NBR 11579)	%	1,30
	Blaine	cm ² /g	3605
Tempo de pega	Início	h:min	3:56
	Fim	h:min	4:54
Resistência à compressão (NBR 7215)	3 dias	MPa	24,44
	7 dias	MPa	29,40
	28 dias	MPa	-

A Tabela 27 ilustra as características físicas dos três tipos de agregados graúdos, com tamanho superior a 12,5 mm e inferior a 19 mm, utilizados para a produção dos corpos de prova de concreto.

Tabela 27 – Características físicas dos agregados graúdos utilizados na produção dos concretos

Agregado	Resistência à compressão (MPa)	Massa específica aparente (Kg/m ³)	Absorção de água (%)
Argila expandida	8,40*	640*	10,30*
Serragem	8,01	1149	11,77
Cinza	13,95	1691	15,50

*Rossignolo (2009a)

Analisando-se a Tabela 27, percebe-se que os agregados possuem características distintas, com diferentes valores de absorção de água, massa específica e resistência à compressão, o que pode refletir diretamente nas características finais dos concretos produzidos com cada um dos diferentes tipos de agregados. Para cada um dos três tipos de agregados analisados neste trabalho, foram confeccionados dois tipos de concreto: traço rico (consumo de cimento aproximado de 475 Kg/m³) e traço pobre (consumo de cimento aproximado de 335 Kg/m³). Ao final da produção foram confeccionados seis tipos diferentes de concreto. Conhecendo-se as características de cada um dos agregados, procurou-se manter em um mesmo patamar os consumos de cimento e areia para os três tipos de concreto rico e os três tipos de concreto pobre, com relação água/cimento variando de 0,40 a 0,50 para os traços ricos e de 0,55 a 0,60 para os traços pobres, como ilustra a Tabela 28, de modo a analisar as alterações promovidas nos concretos para cada tipo de agregado.

Tabela 28 – Consumos teóricos de cimento, areia, agregado e água para produção de 1 m³ de concreto

CP	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Agregado (kg)	Água (Kg)	Relação água/cimento
Argila expandida (Rico)	467,89	818,80	280,73	233,94	0,5
Serragem (Rico)	490,22	882,40	343,15	200,25	0,41
Cinza (Rico)	487,20	876,98	511,58	199,02	0,41
Argila expandida (Pobre)	337,32	1045,68	286,72	185,52	0,55
Serragem (Pobre)	338,55	1015,66	338,55	204,89	0,60
Cinza (Pobre)	336,50	1009,50	504,75	203,65	0,60

A mistura dos materiais foi realizada utilizando-se uma betoneira, e a moldagem das fôrmas se deu com o auxílio de uma mesa vibratória. Para cada tipo de concreto foram moldados 28 corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, 20 corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e 3 corpos de prova retangulares com base quadrada, com 75 mm de lado e comprimento de 250 mm, como ilustra a Figura 18:

Figura 18 – Moldagem dos corpos de prova retangulares e cilíndricos

Foram moldados também, além dos corpos de prova de concreto, 20 corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura de argamassa extraída do concreto, através do processo de peneiramento do concreto, com o objetivo de comparar a evolução da resistência das argamassas e dos concretos, para avaliar a influência dos agregados leves na resistência mecânica dos concretos.

Como os agregados produzidos com serragem e cinza são propensos à absorção de água, por serem muito porosos, decidiu-se adicionar aos concretos a quantidade de água que cada tipo de agregado absorve na sua primeira hora de imersão, considerando-se que nessa primeira hora os agregados poderiam absorver parte da água necessária para a moldagem do concreto. Esse procedimento foi

adotado para que não houvesse alteração na relação água/cimento efetiva da moldagem dos concretos. A Tabela 29 ilustra os valores de absorção de água de cada agregado depois de 1 hora de imersão em água.

Tabela 29 – Absorção de água dos agregados após 1 hora de imersão em água

Agregado	Absorção de água (1 hora) (%)	Quantidade de água acrescida nos concretos (Kg)*
Argila expandida	5,75	16,14 (Rico) e 16,49 (Pobre)
Serragem	14,38	49,34 (Rico) e 48,68 (Pobre)
Cinza	10,75	54,99 (Rico) e 54,26 (Pobre)

*Para produção de 1 m³ de concreto

A Tabela 30 ilustra o consumo de cada produto na moldagem dos concretos, conhecendo-se as quantidades de água que cada agregado absorve em sua primeira hora de imersão.

Tabela 30 – Consumos de cimento, areia, agregado e água, levando-se em consideração a absorção de água dos agregados para produção de 1 m³ de concreto

CP	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Agregado (kg)	Água (Kg)	Relação água/cimento
Argila expandida (Rico)	467,89	818,80	280,73	250,08	0,534
Serragem (Rico)	490,22	882,40	343,15	249,59	0,509
Cinza (Rico)	487,20	876,98	511,58	254,01	0,521
Argila expandida (Pobre)	337,32	1045,68	286,72	202,01	0,599
Serragem (Pobre)	338,55	1015,66	338,55	253,57	0,749
Cinza (Pobre)	336,50	1009,50	504,75	257,91	0,766

Os corpos de prova moldados foram curados dentro da fôrma no ambiente do laboratório por um período de 24 horas. Após esse período, os corpos de prova foram desformados e submetidos ao processo de cura úmida, em uma câmara úmida com umidade variando de 90% a 95% e temperatura variando de 20 °C a 23 °C, até atingirem a idade de 28 dias. Transcorrido esse período, os corpos de prova foram transferidos para uma sala climatizada, com temperatura variando de 22 °C a 26 °C e umidade variando entre 62% e 78%, onde permaneceram até 91 dias de idade. Os corpos de prova retangulares utilizados para o ensaio de retração linear de secagem permaneceram na sala climatizada até o término do ensaio.

4.6 Ensaios realizados nos corpos de prova de concreto

Para a realização desta pesquisa, foram realizados ensaios nos corpos de prova de concreto nos estados fresco e endurecido, como ilustra a Tabela 31.

Tabela 31 – Ensaios realizados nos corpos de prova de concreto

Ensaio	Idade (dias)	Normatização
Abatimento do tronco de cone	Moldagem	NBRNM 67:1998
Massa específica fresca	Moldagem	ABNT NBR 9833:2009
Resistência à compressão (concreto e argamassa)	7, 14, 28 e 91	ABNT NBR 5739:2007
Módulo de deformação	28	ABNT NBR 8522:2008
Retração linear de secagem	7, 14, 28, 56, 91, 160, 250	-
Absorção de água	91	ABNT NBR 9778:2005
Índice de vazios	91	Versão corrigida: 2009
Massa específica	91	
Condutividade térmica	250	-

4.6.1 *Slump* – NBRNM 67:1998

O *slump* do concreto foi obtido através do ensaio de abatimento do tronco de cone. No momento da moldagem dos corpos de prova, uma quantidade de concreto foi colocada dentro do cone metálico apoiado sobre uma placa metálica. A colocação foi feita em três etapas; em cada uma delas usou-se uma haste metálica para adensar o concreto. Depois de estar completamente cheio de concreto, o cone foi retirado. A diferença entre a altura do cone metálico e a altura do concreto fresco representa o *slump* do concreto, como ilustram as Figuras 19 e 20.

Figuras 19 e 20 – Ensaio de abatimento do tronco de cone nos concretos

4.6.2 Massa específica fresca – ABNT NBR 9833:2008

A massa específica fresca do concreto foi obtida através da divisão entre a massa e o volume do concreto. Para o ensaio, utilizou-se um recipiente de 3 litros de volume, como ilustra a Figura 21.

Figura 21 – Pesagem do concreto para ensaio de massa específica fresca

4.6.3 Teor de ar incorporado – ABNT NBR 9833:2008

O teor de ar incorporado na moldagem do foi determinado a partir da Equação 10:

$$\text{Teor de ar} = \left(\frac{Met - Mer}{Met} \right) * 100 \quad (10)$$

Onde,

Met = massa específica teórica do concreto;

Mer = Massa específica real do concreto.

A massa específica teoria é obtida a partir das massas específicas dos materiais utilizados para confeccionar os corpos de prova de concreto e a massa específica real corresponde à massa específica fresca do concreto.

4.6.4 Resistência à compressão – ABNT NBR 2739:2007

Para o ensaio de resistência à compressão foram preparados 20 corpos de prova para cada um dos tipos de concreto e de argamassa confeccionados. O ensaio foi realizado em quatro idades diferentes (7, 14, 28 e 91 dias). Para cada tipo de concreto e argamassa foram rompidos 5 corpos de prova em cada uma das idades. Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram no ambiente do laboratório por 24 horas, apenas para poderem ser desmoldados. Após esse período, os corpos de prova passaram pelo processo de capeamento, que consiste na aplicação de massa nas extremidades superiores e inferiores para o nivelamento. Após o capeamento, os corpos de prova foram transferidos para a câmara úmida, onde permaneceram até 91 dias de idade.

Nas datas dos ensaios, os corpos de prova foram retirados da estufa e submetidos a esforços de compressão diametral, através do equipamento de ensaio

de compressão fabricado pela empresa Alfred J. Amsler & Co, como ilustram as figuras:

Figuras 22 e 23 – Corpo de prova de concreto preparado para o ensaio de compressão e rompido

4.6.5 Módulo de deformação – ABNT NBR 8522:2008

O ensaio de módulo de deformação dos corpos de prova de concreto foi realizado com base na Norma Brasileira ABNT NBR 8522:2008. Para o ensaio, foram utilizados três corpos de prova de cada um dos tipos de concreto confeccionados. Os corpos de prova foram moldados e capeados, como os corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à compressão, e após 28 dias de cura foram ensaiados para a determinação dos valores módulo de deformação. O ensaio de determinação do módulo de deformação dos corpos de prova de concreto consiste na aplicação lenta da carga de compressão, a fim de se medir a deformação do corpo de prova em decorrência do aumento da carga de compressão. Esse ensaio foi realizado no laboratório de estruturas do curso de engenharia civil da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), com a utilização de uma máquina de ensaio de compressão da marca SATEC SYSTEMS, com capacidade de carga de até 690 MPa, como ilustra a Figura 24.

Figura 24 – Ensaio de módulo de deformação dos concretos

Para o ensaio de módulo de deformação dos concretos, foram utilizados três corpos de prova de concreto para cada um dos tipos de concreto utilizados nesta pesquisa. Para cada um dos corpos de prova foram tomadas duas medidas de deformação, sendo uma medida inicial (sem aplicação de carga) e a outra medida com a aplicação de uma carga correspondente a 40% da carga média resistida pelos corpos de prova quando submetidos a esforços de compressão. Após a tomada das medidas, os corpos de prova foram submetidos à carga de compressão suficiente para o rompimento. Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão foram comparados aos obtidos pelos corpos de prova rompidos após o ensaio de módulo de deformação, sendo que todos os corpos de prova obtiveram valores de resistência à compressão compatíveis aos valores observados no ensaio de compressão.

4.6.6 Retração linear de secagem

Para o ensaio de retração por secagem dos corpos de prova de concreto foram confeccionados três corpos de prova retangulares para cada tipo de concreto utilizado na pesquisa, utilizando-se fôrmas retangulares com base quadrada de 75 mm e comprimento de 250 mm, conforme a Figura 25.

Figura 25 – Fôrmas retangulares para produção dos corpos de prova para ensaio de retração linear de secagem dos concretos

Após a moldagem e desforma dos corpos de prova, foram colados (com cola tipo *Super Bonder*) dois *inserts* em cada um dos corpos de prova. Foram então tomadas as medidas iniciais, a partir do centro de cada um dos *inserts*, utilizando-se o aparelho modelo H 3231, produzido pela empresa Humboldt MFG. CO., cedido pelo Laboratório de Sistemas Estruturais do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. Com idades de 7, 14, 28, 56, 91, 160 e 250 dias foram tomadas medidas de retração linear de secagem dos corpos de prova de concreto. A diferença entre a medida final (em cada uma das idades) e a medida inicial (logo após a colagem dos *inserts*), dividida pelo tamanho total do corpo de prova, representa a retração linear de secagem dos corpos de prova de concreto.

4.6.7 Absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente dos concretos – ABNT 9778:2005

Os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente dos corpos de prova de concreto foram realizados baseados na norma brasileira ABNT NBR 9778:2005. Para os ensaios, foram utilizados três corpos de prova de cada um dos tipos de concretos confeccionados.

Primeiramente, os corpos de prova foram colocados na estufa ventilada por 72 horas (a cada 24 horas eram tomadas medidas de peso dos corpos de prova), a uma temperatura de 100 °C, para a eliminação da água contida em cada um dos corpos de prova de concreto. Após o período de 72 horas em estufa, os corpos de prova foram colocados imersos em água à temperatura ambiente, também por 72 horas. Após o período de imersão, foram tomadas medidas de peso dos corpos de prova saturados e imersos em água. A absorção de água, o índice de vazios e a massa específica aparente dos corpos de prova foram obtidos através das equações 11, 12 e 13, respectivamente.

$$\left(\frac{M_u - M_s}{M_s} \right) * 100 \quad (11)$$

$$\left(\frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \right) * 100 \quad (12)$$

$$\left(\frac{M_s}{M_u - M_i} \right) \quad (13)$$

Onde,

Mu = Massa do corpo de prova após 72 horas de imersão em água;

Ms = Massa do corpo de prova após 72 horas de secagem em estufa;

Mi = Massa do corpo de prova imerso em água.

4.6.8 Condutividade térmica

O ensaio de condutividade térmica dos concretos foi realizado no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente da FZEA/USP, na cidade de Pirassununga – SP. O ensaio foi realizado através do aparelho de ensaio de condutividade térmica DTC 300, produzido pela empresa TA Instruments – Waters Technologies do Brasil Ltda. Para sua realização, foram confeccionados corpos de prova de concreto cilíndricos com 5 cm de base e 10 cm de altura. Depois de curados, os corpos de prova foram cortados de forma a ficarem com 5 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura para a realização do ensaio, que foi realizado com taxa de transferência de calor variando de $8,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$ a $5,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$, e com uma variação de temperatura de 30 °C.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados desta pesquisa, acerca da produção de agregados leves de argila calcinada de alta eficiência para uso em concreto estrutural. A apresentação e análise dos resultados dar-se-á em três etapas: a primeira, referente à caracterização das matérias-primas utilizadas para na pesquisa; a segunda, acerca dos corpos de prova queimados de cerâmica vermelha; e a terceira, dos concretos leves confeccionados.

5.1 Caracterização das matérias-primas

5.1.1 Amostra de solo (argila)

Para um melhor conhecimento das características da argila utilizada para a confecção dos corpos de prova de cerâmica vermelha, a argila utilizada nesta pesquisa foi submetida aos ensaios de análise granulométrica, limites de consistência e massa específica dos sólidos, que foram realizados no laboratório de solos do Departamento de Geotecnia EESC – USP. A difração de raios X foi realizada no Laboratório de DRX do grupo de pesquisa de cristalografia de Instituto de Física de São Carlos – USP. A espectrometria de fluorescência de raios X foi executada no laboratório de fluorescências de raios X (FRX) do Instituto de Geociências de São Paulo – USP, e as análises térmicas diferencial e termogravimétrica foram realizadas na empresa BP Engenharia Indústria e Comércio Ltda., em sua matriz localizada na cidade de Campinas – SP.

5.1.1.1 Limites de consistência e massa específica dos sólidos

O limite de plasticidade representa a quantidade mínima de água a ser adicionada a uma amostra de argila para que a mesma obtenha características moldáveis, ou seja, quanto maior o limite de plasticidade da amostra, maior a quantidade de água necessária para moldagem da massa cerâmica. A argila utilizada apresentou limite de liquidez de 58%, limite de plasticidade igual a 25,9% e índice de plasticidade (que consiste na subtração do valor de limite de liquidez do valor do índice de plasticidade) igual a 32,1%. Com índice de plasticidade superior a 15%, a argila é classificada como altamente plástica (PÉREZ et al., 2010).

Os valores das massas específicas dos sólidos foram determinados segundo as recomendações da ABNT NBR 6508:1984, e a amostra apresentou massa específica do sólido igual a 2,675 g/cm³.

5.1.1.2 Análise granulométrica

Considerando-se a Tabela 32, que apresenta a análise granulométrica da argila coletada, percebe-se que os teores de areia média (3,0%) e areia grossa (1,0%) na amostra são muito baixos, sendo predominantes os teores de argila (48,5%) e silte (37,5%). Dessa forma, percebe-se que a amostra se apresenta como um material predominantemente argiloso, composto por 86% de grãos finos.

Tabela 32 – Análise granulométrica da argila

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)	Pedregulho (%)
Argila	48,5	37,5	10,0	3,0	1,0	-

5.1.1.3 Difração de raios – X (DRX)

A identificação das fases cristalinas presentes na amostra de argila estudada foi realizada através do ensaio de difração de raios X. O difratograma (Figura 26) foi obtido utilizando-se a amostra na forma de pó, compactada manualmente no porta-amostras de difração e em seguida analisada pelo programa Match!, utilizando-se a biblioteca PDF2 (2010) – seção de minerais.

Figura 26 – Difratograma de raios X da argila

Analisando-se o difratograma, percebe-se que a amostra não apresenta picos claros que representem a presença de montmorilonita (argilomineral com características expansivas). Porém, a amostra apresentara picos característicos de muscovita, argilomineral com características expansivas. Percebe-se também que a amostra apresentou como principal característica a presença de argilominerais, com pico acentuado na faixa de $2\theta = 27^\circ$, o que pode ser um indício da presença de quartzo livre em sua composição, sendo o quartzo livre um dos principais formadores da fase vítrea dos produtos cerâmicos. Percebe-se também a presença de picos claros de magnetita, explicada pela presença de ferro nas amostras, e que pode ser responsável pela coloração avermelhada dos corpos de prova após a queima.

5.1.1.4 Espectrometria e fluorescência de raios X (FRX)

A análise de espectrometria e fluorescência de raios X da argila é apresentada na Tabela 33:

Tabela 33 – Composição química da argila obtida através do ensaio de FRX (% de massa)

SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)
68,18	0,614	14,42	4,88	0,088	1,81	0,32	0,31	4,20	0,110

A amostra analisada apresentara altos teores de dióxido de silício (SiO₂) em sua composição (68,18%). Como o teor de dióxido de silício nas matérias-primas influencia diretamente a resistência à compressão das peças queimadas, pode-se esperar que as peças produzidas com essa argila apresentem valores de resistência à compressão superiores a peças produzidas com argilas com baixos teores de dióxido de silício. De acordo com Cabral (2005), a presença de dióxido de silício nas argilas pode comprometer sua plasticidade, mas, mesmo apresentando altos teores de SiO₂ em sua composição, a amostra se apresenta como plástica, uma vez que seu índice de plasticidade (32,1%) é superior a 15%. Esse fato pode ser explicado pela grande presença de argila e silte na composição da amostra (86%) e pela baixa quantidade de areia (que é um dos principais materiais desplastificantes) e pedregulho (14%).

Em análise da Tabela 33, percebe-se que a amostra apresenta alto teor de SiO₂ + Al₂O₃ (82,6%), o que pode ser um indício de que os corpos de prova queimados confeccionados com essa argila poderão apresentar altos valores de resistência à compressão, uma vez que SiO₂ e Al₂O₃ são formadores da fase vítrea. Como a amostra de argila é rica em SiO₂ e Al₂O₃, e os geopolímeros são constituídos por uma malha tridimensional em que átomos de silício alternam com os de alumínio em coordenação tetraédrica, com o compartilhamento de todos os oxigênios, espera-se que a amostra de argila, quando em contato com ativador alcalino, possa formar cadeias geopoliméricas, e assim melhorar as características dos agregados, tornando-os menos absorventes e mais resistentes.

A amostra apresentou valor de perda ao fogo de 4,64%, o que pode ser um indício de baixa quantidade de material orgânico em sua composição.

5.1.1.5 Análises térmicas (ATD e TG)

As análises térmicas diferencial e termogravimétrica da amostra de argila são apresentadas nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Análise térmica diferencial da amostra de argila

Figura 28 – Análise termogravimétrica da amostra de argila

De acordo com Grun (2007), existem quatro principais fenômenos térmicos a serem analisados nas análises térmicas:

- Entre 0 °C e 200 °C: perdas de massa relacionadas à perda de umidade superficial. Essa perda de água corresponde a uma depressão endotérmica causada pela energia necessária para mudar o estado físico das moléculas de água;
- Entre 200 °C e 400 °C: perda de massa que geralmente pode estar relacionado à perda da matéria orgânica presente nas amostras (depressão endotérmica);
- Entre 400 °C e 600 °C: perda de massa relacionada à decomposição dos argilominerais, com a consequente perda de hidroxilas (água intersticial). Isto está diretamente ligado à plasticidade da massa, já que quanto maior a perda de hidroxilas, menores os valores de plasticidade das massas cerâmicas (depressão endotérmica).

As perdas de massa são acentuadas até a temperatura de 600 °C, sendo que de 600 °C a 800 °C a perda não é considerável.

- Entre 900 °C e 1.000 °C: pico energético relativo à perda de matéria orgânica composta por metais pesados e ácido húmico. Esse pico é comum em solos de coloração preta, já que solos ricos em turfas possuem abundância de ácido húmico.

A Tabela 34 apresenta os resultados obtidos através das análises térmicas da amostra.

Tabela 34 – Resultados obtidos através das análises térmicas

0-200 °C		200-400 °C		400-600 °C		900-1000 °C		Total
Perda em massa (%)	ΔE^* (cal)	Perda em massa (%)	ΔE^* (cal)	Perda em massa (%)	ΔE^* (cal)	Perda em massa (%)	ΔE^* (cal)	Perda em massa (%)
1,8	17,9	2,1	0,0	2,2	7,5	0,02	0,0	7,69

Analisando a Tabela 34, percebe-se que a grande perda em massa da amostra se dá até a temperatura de 600 °C; a partir dessa temperatura, a perda é muito baixa. Dessa forma, pode-se concluir que a escolha de queima das massas cerâmicas à temperatura de 900 °C é viável, uma vez que até essa temperatura ocorre a grande perda de massa da matéria-prima.

5.1.2 Serragem de madeira

A serragem utilizada na pesquisa foi coletada em uma serraria localizada na cidade de São Carlos – SP, oriunda da serra de corte de toras de madeira de eucalipto vermelho. A Tabela 35 apresenta a análise granulométrica da serragem utilizada na pesquisa.

Tabela 35 – Análise granulométrica da serragem de madeira

Abertura (mm)	4,8	2,4	1,2	0,6	0,3	-
Massa retida (g)	1,29	9,47	21,60	106,11	517,30	296,02
%	0,14	0,99	2,27	11,15	54,35	31,10

Após análise da Tabela 35, percebe-se que a serragem utilizada na pesquisa apresentou predominância de grãos inferiores a 0,6 mm (96,6%), sendo que mais de 30% dos grãos da serragem apresentavam dimensões inferiores a 0,3 mm, como ilustra a Figura 29:

Figura 29 – Análise granulométrica da serragem

5.1.3 Cinza do bagaço da cana

A cinza utilizada na pesquisa foi coletada na empresa Baldin Bioenergia S.A., localizada na cidade de Pirassununga – SP. A Tabela 36 apresenta a análise granulométrica da cinza utilizada na pesquisa:

Tabela 36 – Análise granulométrica da cinza do bagaço de cana utilizado na pesquisa

Abertura (mm)	4,0	0,5	0,3	0,15	0,074	0,045	-
Peneira	5	35	50	100	200	325	prato
%	2,2	7,98	11,39	33,29	31,98	9,28	3,88

Pela Tabela 36 percebe-se que a cinza utilizada na pesquisa apresentou predominância de grãos inferiores a 0,3 mm (78,43%), sendo que mais de 40% dos grãos da serragem apresentaram dimensões inferiores a 0,15 mm.

A tabela 37 ilustra a análise química da cinza utilizada na pesquisa. Os teores apresentados foram determinados por análise sem padrões de elementos químicos de flúor e urânio, em espectrômetro por fluorescência de raios X Axios Advanced, da marca PANalytical. A perda ao fogo foi determinada a 1.050 °C, por um período de 1 hora.

Tabela 37 – Análise química da cinza utilizada na pesquisa

Elemento	Quantidade (%)
SiO ₂	69,6
Fe ₂ O ₃	11,7
Al ₂ O ₃	7,84
TiO ₂	3,75
K ₂ O	2,53
CaO	1,17
P ₂ O ₅	0,63
MgO	0,58
Cr ₂ O ₃	0,13
MnO	0,11
SO ₃	0,1
ZrO ₂	0,08
V ₂ O ₅	0,06
Cl	0,03
Na ₂ O	0,02
CuO	0,02
ZnO	0,02
NiO	0,01
SrO	0,01
Nb ₂ O ₅	0,01
Rb ₂ O	-
Y ₂ O ₃	-
Perda ao fogo	1,16

Analisando-se a Tabela 37, percebe-se uma predominância de SiO₂ na cinza utilizada, o que pode ser um indício de que esse produto pode reagir com o ativador alcalino, produzindo reações geopoliméricas, podendo formar produtos mais densos e menos absorventes.

5.1.4 Ativador alcalino

Com o intuito de melhorar as características físicas dos agregados leves de argila calcinada, utilizou-se como ativador alcalino nas massas cerâmicas o silicato de sódio alcalino produzido pela empresa ISOTEC Produtos Para Metalurgia, situada na cidade de São Carlos – SP. As características físicas do silicato de sódio utilizado na pesquisa são apresentadas na Tabela 38:

Tabela 38 – Características do silicato de sódio utilizado na pesquisa. FONTE: ISOTEC Produtos para Metalurgia.

Análise	Unidade	Especificação	Resultado
Densidade 25° C	g/cm ³	1,560 a 1,580	1,567
Massa Especifica 25° C	°Bé	52,00 a 53,00	52,500
SiO ₂	cp	32,50 a 33,50	33,490
Na ₂ O	%	14,50 a 15,30	15,210
Relação (SiO ₂ /Na ₂ O)	%	2,12 a 2,31	2,200
Viscosidade (25° C) cp	%	900 A 1.200	1.100,00

5.2 Caracterização dos corpos de prova de argila vermelha calcinada

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente da FZEA/USP, na cidade de Pirassununga – SP. Os ensaios de expansão por umidade, absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente foram realizados no Laboratório de Construção Civil (LCC) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos – USP. Tiveram o objetivo de se determinar as principais características dos corpos de prova cerâmicos queimados, para a escolha das misturas utilizadas para a produção dos agregados leves de argila calcinada de alta eficiência para utilização nessa pesquisa.

5.2.1 Absorção de água e porosidade aparente

A Tabela 39 apresenta os valores de absorção de água e porosidade aparente das peças queimadas. Com o intuito de se diminuir a absorção de água das peças queimadas produzidas com serragem de madeira, sem a incorporação de silicato de sódio nas massas cerâmicas, foram produzidas peças apenas com argila e serragem e, após a queima, essas peças foram banhadas com silicato de sódio, de modo a se avaliar a influência deste tipo de acabamento na absorção de água das peças de cerâmica vermelha.

Analisando-se os dados da Tabela 39, percebe-se que a impermeabilização das peças cerâmicas com banho de silicato de sódio mostrou-se eficaz quanto à diminuição da absorção de água, uma vez que as peças queimadas e banhadas com silicato de sódio apresentaram valores de absorção inferiores aos observados para as peças produzidas apenas com argila e sem o tratamento com o silicato. Percebe-se ainda que a quantidade de serragem de madeira nas peças queimadas e banhadas com o silicato de sódio pouco influenciou na absorção de água dessas peças, uma vez que os valores de absorção dessas peças pouco variaram com o aumento da quantidade de serragem de madeira nas massas cerâmicas.

Tabela 39 – Absorção de água e porosidade aparente das peças queimadas

Amostra	Absorção de água (%)	Desvio padrão	Porosidade aparente (%)	Desvio padrão
100A	18,21	0,25	30,40	0,22
90A-10Se	25,27	1,46	31,68	1,64
80A-20Se	35,83	1,33	37,09	1,09
70A-30Se	47,27	0,69	44,02	0,55
100A-0Se-Si	9,80	0,67	15,26	1,07
90A-10Se-Si	18,42	0,41	22,42	0,31
80A-20Se-Si	25,84	0,35	26,47	0,43
70A-30Se-Si	43,87	0,84	43,19	1,06
100A-0Se + banho de silicato	12,58	0,55	15,26	1,07
90A-10Se + banho de silicato	14,52	1,08	22,42	0,31
80A-20Se + banho de silicato	15,09	1,81	26,47	0,43
70A-30Se + banho de silicato	11,77	1,71	43,19	1,06
90A-10Ci	22,03	0,16	33,04	0,47
80A-20Ci	22,42	0,21	33,27	0,17
70A-30Ci	22,32	0,10	33,05	0,33
60A-40Ci	26,11	0,14	36,00	0,15
90A-10Ci-Si	13,55	0,48	20,20	0,53
80A-20Ci-Si	15,38	0,43	22,29	0,46
70A-30Ci-Si	15,07	0,26	21,07	0,67
57A-43Ci-Si	15,50	0,61	20,87	0,45

Analisando-se a Tabela 39, percebe-se que o incremento na quantidade de serragem de madeira nas peças cerâmicas contribui diretamente para seu aumento da absorção de água, uma vez que as peças produzidas apenas com argila apresentaram valores de absorção de água iguais a 18,21%, e as peças confeccionadas com argila e 30% de serragem apresentaram valores de absorção de água iguais a 47,27%. Percebe-se também que a utilização de silicato de sódio nas massas cerâmicas contribui para a diminuição da absorção de água das peças, que variou de 9,80%, para as peças produzidas apenas com argila e silicato de sódio, a 43,87%, para as peças produzidas com argila, silicato de sódio e 30% de serragem de madeira.

Fica evidente que o aumento da quantidade de serragem nas misturas provoca um aumento significativo nos valores de absorção de água das peças queimadas, mesmo com a utilização de ativador alcalino nas massas cerâmicas; o aumento da quantidade de serragem nas misturas ocasiona uma diminuição na quantidade de argila para reação com silicato, fazendo com que o processo de geopolimerização seja afetado. Além disso, o aumento da quantidade de serragem de madeira nas massas de produção promove um aumento na porosidade aparente das peças queimadas, deixando-as assim menos densas e mais porosas, como ilustra a Figura 30.

Figura 30 – Imagens de microscopia eletrônica das peças queimadas produzidas com diferentes quantidades de serragem de madeira

Analisando-se os resultados obtidos para as peças cerâmicas produzidas com argila e cinza, percebe-se que o incremento na quantidade de cinza das misturas promove um incremento nos valores de absorção de água das peças queimadas. Fica evidente também que adições de até 30% em massa de cinza promovem aumentos similares nos valores de absorção de água das peças, sendo que adições acima de 40% em massa promovem valores mais acentuados de absorção de água das peças queimadas. As peças produzidas com até 30% em massa de cinza apresentaram valores de absorção de água da ordem de 22,0%, e as peças produzidas com 40% de cinza apresentaram valores de absorção de água da ordem de 26,11%.

Fica evidente também que a utilização de ativador alcalino nas massas confeccionadas com argila e cinza é eficaz quanto à redução dos valores de absorção de água e porosidade aparente das peças queimadas. Com a utilização do silicato de sódio nas massas observou-se diminuição na absorção de água das peças queimadas, com uma consequente diminuição de sua porosidade aparente, causada pela reação do silicato de sódio com a cinza existente nas massas cerâmicas – o que produz peças mais densas e menos absorventes.

De acordo com Rossignolo (2009a), os valores de absorção de água de agregados leves de argila expandida são 6% (para agregados com dimensões variando de 0 a 4,8 mm), 7% (para agregados com dimensões variando de 6,3 a 12,5 mm) e 10% (para agregados com dimensões variando de 12,5 a 19 mm). Comparando-se os valores de absorção de água da argila expandida e os

apresentados na Tabela 39, percebe-se que as peças cerâmicas produzidas apenas com argila e silicato de sódio apresentaram valores de absorção de água (9,80%) em um mesmo patamar dos valores observados para os agregados leves de argila expandida. As peças banhadas com solução de silicato de sódio e as peças produzidas com argila, cinza e silicato de sódio apresentaram valores de absorção de água ligeiramente superiores aos observados para a argila expandida, sendo assim viáveis para a utilização em concretos estruturais, com cuidados durante a moldagem dos concretos, de modo a se evitar que os agregados absorvam a água necessária para a hidratação do cimento.

A utilização desses tipos de agregados para a produção de concretos estruturais pode gerar um possível ganho energético no processo de produção, uma vez que os agregados produzidos na pesquisa foram queimados à temperatura de 900 °C, cerca de 300 °C abaixo da temperatura de queima utilizada quando da produção de agregados leves de argila expandida. Quando não existe um tratamento superficial, a absorção de água dos produtos cerâmicos está diretamente ligada à porosidade aparente das peças, uma vez que quanto maior quantidade de poros, maior a capacidade de absorção de água das peças queimadas, como ilustram as Figuras 31, 32, 33 e 34.

Figura 31 – Porosidade aparente e absorção de água das peças produzidas com argila e serragem de madeira

Figura 32 – Porosidade aparente e absorção de água das peças produzidas com argila e serragem de madeira e silicato de sódio

Figura 33 – Porosidade aparente e absorção de água das peças produzidas com argila e cinza

Figura 34 – Porosidade aparente e absorção de água das peças produzidas com argila, cinza e silicato de sódio

Percebe-se que a utilização de silicato de sódio nas massas cerâmicas promove uma diminuição considerável nos valores de absorção de água e porosidade aparente das peças queimadas. Para peças produzidas com serragem de madeira, essa diminuição é observada até uma quantidade máxima de 20% de serragem de madeira nas misturas. A partir desta concentração, a quantidade de serragem torna-se muito grande em relação à quantidade de argila, diminuindo-se assim o processo de geopolimerização.

5.2.2 Massa específica aparente

Tabela 40 – Massa específica aparente e resistência à compressão dos corpos de prova queimados

Amostra	Massa específica aparente (g/cm ³)	Desvio padrão	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão
100A-0	1,76	0,02	21,11	4,29
90A-10Se	1,51	0,04	17,92	3,94
80A-20Se	1,32	0,03	13,12	1,04
70A-30Se	1,15	0,02	8,30	1,18
100A-0Se-Si	1,92	0,02	25,81	3,95
90A-10Se-Si	1,58	0,01	16,81	3,05
80A-20Se-Si	1,44	0,01	14,16	2,57
70A-30Se-Si	1,16	0,01	7,72	1,12
90A-10Ci	1,64	0,01	21,57	2,41
80A-20Ci	1,61	0,01	19,30	3,33
70A-30Ci	1,61	0,01	14,36	1,50
60A-40Ci	1,51	0,01	6,56	0,82
90A-10Ci-Si	1,79	0,01	28,11	3,30
80A-20Ci-Si	1,72	0,01	16,93	4,85
70A-30Ci-Si	1,72	0,02	17,85	5,83
57A-43Ci-Si	1,69	0,04	13,95	5,03

A tabela 40 apresenta os valores da massa específica e resistência à compressão dos corpos de prova queimados. Pelos dados da Tabela 40, percebe-se que os valores de massa específica aparente dos corpos de prova diminuem com o aumento da quantidade de serragem de madeira nas massas cerâmicas, variando de 1,76 g/cm³ para as peças conformadas apenas com argila, a 1,15 g/cm³ para as peças conformadas com argila e 30% de serragem. Esse fato pode ser explicado pela grande quantidade de poros existentes nas peças com grandes quantidades de serragem (responsável pela criação dos poros nas peças quando da queima), que se tornam mais porosas e, conseqüentemente, mais leves. Nas peças conformadas com argila, serragem e silicato de sódio o mesmo fato pode ser percebido, sendo que o valor da massa específica das peças queimadas com argila e silicato de sódio (1,92 g/cm³) é muito superior ao valor observado para as peças conformadas com argila, 30% de serragem e silicato de sódio (1,16 g/cm³), como ilustra a Figura 35.

Após análise da Figura 35, percebe-se que a utilização de silicato de sódio nas massas cerâmicas conformadas com serragem de madeira não exerce muita influência nos valores de massa específica aparente das peças queimadas, independentemente da utilização ou não de serragem de madeira durante a moldagem das peças.

Figura 35 – Massa específica aparente dos corpos de prova conformados com serragem de madeira

O mesmo comportamento é observado para as peças moldadas com argila e cinza proveniente da queima do bagaço da cana, e também com argila, cinza e silicato de sódio. Porém, a diminuição dos valores de massa específica com o aumento das quantidades de cinza nas misturas é menos acentuada, uma vez que a cinza, por ser proveniente da queima da cana-de-açúcar, não se volatiliza com tanta facilidade quanto a serragem de madeira.

Ainda analisando-se a Tabela 40, percebe-se que a utilização de silicato de sódio nas amostras contribui para o aumento da massa específica aparente das peças queimadas, uma vez que com a utilização do ativador alcalino, as massas cerâmicas podem se tornar, após a queima, mais densas e menos porosas. Percebe-se também que a amostra conformada apenas com argila e silicato de

sódio (100A-0Se-Si) foi a que apresentou o maior valor de massa específica entre todas as amostras analisadas ($1,92 \text{ g/cm}^3$), sendo que a mesma amostra também foi a que apresentou os menores valores de absorção de água (9,80%) e porosidade aparente (15,26%), o que pode ser um indício de que o processo de geopolimerização pode ter ocorrido, tornando a amostra mais densa e menos porosa, como ilustra a Figura 36:

Figura 36 – Massa específica aparente dos corpos de prova conformados com cinza do bagaço da cana-de-açúcar

De acordo com Rossignolo (2009a), agregados leves de argila expandida apresentam massa específica variando de $1,51 \text{ g/cm}^3$ (para agregados com diâmetro de até 4,8 mm) a $0,64 \text{ g/cm}^3$ (para agregados com diâmetro entre 12,5 mm e 19 mm). Comparando-se os valores obtidos e apresentados na Tabela 41 com os valores de massa específica apresentados pelos agregados de argila expandida e pelos agregados convencionais (basalto), que apresentam massa específica igual a $2,95 \text{ g/cm}^3$, percebe-se que as amostras de argila calcinada analisadas apresentam valores de massa específica intermediários entre agregados leves de argila expandida e agregados de basalto. Em alguns casos, principalmente quando da utilização de serragem nas massas cerâmicas, os valores de massa específica das peças queimadas apresentam-se inferiores a alguns tipos de argila expandida.

5.2.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão nas peças cerâmicas foi realizado com base no ensaio de resistência à compressão em corpos cilíndricos de concreto (ABNT NBR 5739:2007), com o objetivo de se obter uma ordem de grandeza dos valores de resistência à compressão dos corpos de prova cerâmicos. Assim se determina a influência dos aditivos colocados nas massas cerâmicas na resistência à compressão dos corpos de prova queimados.

Percebe-se pela análise da Tabela 40 que os valores de resistência à compressão dos corpos de prova diminuem com o aumento da quantidade de serragem de madeira ou cinza proveniente da queima do bagaço de cana nas

massas cerâmicas. Isso acontece porque com o aumento da quantidade de desses produtos nas massas, aumentam-se a quantidade de poros nas peças queimadas, tornando-as mais leves e porosas e menos densas e resistentes.

Percebe-se também que a utilização de silicato de sódio nas massas cerâmicas contribui para o aumento da resistência à compressão das peças queimadas, uma vez que com o processo de geopolimerização as peças tornam-se mais compactas, com menos poros, e consequentemente mais resistentes. A utilização de silicato de sódio para promover melhora na resistência à compressão dos corpos de prova cerâmicos mostra-se mais eficaz quando de sua utilização nos corpos de prova confeccionados com cinza proveniente da queima do bagaço da cana. Esse produto é rico em SiO_2 , o que promove uma melhor interação com o silicato de sódio, favorecendo-se assim o processo de geopolimerização, produzindo-se peças mais compactas e resistentes, como ilustram as Figuras 37 e 38.

Figura 37 – Resistência à compressão dos corpos de prova conformados com serragem de madeira

Figura 38 – Resistência à compressão dos corpos de prova conformados com cinza do bagaço da cana-de-açúcar

De acordo com Rossignolo (2009a), agregados leves de argila expandida apresentam valores estimados de resistência à compressão de 8,4 MPa, para dimensão variando de 12,5 mm a 19 mm, e agregados convencionais de basalto apresentam valores de resistência à compressão de 120 MPa. Portanto os corpos de prova de argila calcinada apresentam valores intermediários de resistência à compressão, quando comparados aos agregados de argila expandida e de basalto. Em alguns casos desta pesquisa puderam-se observar peças cerâmicas com valores de massa específica similares aos observados para a argila expandida, mas com resistência à compressão superior.

Ressalta-se aqui a importância dessas propriedades dos corpos de prova para a confecção dos agregados leves de argila calcinada, já que quanto maior a massa específica dos agregados, maiores suas resistências à compressão e menores as absorções de água e porosidades aparentes. Em contrapartida, quanto menores os valores de massa específica dos agregados, menores seus valores de resistência à compressão e maiores as absorções de água e porosidades aparentes.

Concretos confeccionados com agregados leves de argila com alta massa específica poderão portanto apresentar maiores valores de resistência à compressão do que os concretos confeccionados com agregados leves de argila calcinada com baixos valores de massa específica. Porém, maiores valores de resistência à compressão estão diretamente ligados a maiores valores de massa específica dos concretos. Dessa forma, com a incorporação de serragem de madeira, cinza proveniente da queima do bagaço da cana e de silicato de sódio nas massas cerâmicas procurou-se aprimorar as características das peças de cerâmica vermelha, de modo a se produzir agregados leves de argila calcinada de alta eficiência, com menores valores de absorção de água e de massa específica aparente e maiores valores de resistência à compressão que os apresentados pelos agregados leves de argila calcinada pura (produzidos apenas com argila e água e sinterizados em forno). Pode-se assim produzir agregados leves com características similares à argila expandida, mas com um processo de produção com gasto energético abaixo do processo de produção da argila expandida.

Para a produção dos concretos para a pesquisa foram escolhidos os agregados produzidos com argila, 30% em massa de serragem de madeira e água (70A-30Se), que por serem muito porosos e terem os poros conectados, receberam um banho de silicato de sódio após a queima e antes de sua utilização nos concretos. Foram também escolhidos os agregados produzidos com argila, 43% em massa de cinza proveniente da queima do bagaço da cana, água e silicato de sódio (57A-43Ci-Si), por tratarem-se de agregados com baixos valores de absorção de água, porosidade aparente e massa específica e altos valores de resistência à compressão, quando comparados aos agregados leves de argila expandida, além de serem agregados produzidos com grande quantidade de subprodutos agroindustriais, promovendo redução no consumo de matérias-primas.

5.3 Caracterização dos corpos de prova de concreto

A avaliação das propriedades dos concretos produzidos nesta pesquisa foram realizadas em duas etapas, no estado fresco e no estado endurecido. A caracterização no estado fresco foi realizada no momento da confecção dos corpos de prova e a caracterização no estado endurecido foi realizada com os corpos de

prova curados. As propriedades analisadas no estado fresco foram o *slump*, a massa específica fresca e o teor de ar incorporado e a massa específica fresca apenas da argamassa utilizada para a produção dos concretos. No estado endurecido os concretos foram caracterizados através dos ensaios de resistência à compressão, massa específica aparente, módulo de deformação, absorção de água, índice de vazios e condutividade térmica. Como citado anteriormente, foram produzidos concretos com argila expandida, concretos com agregados leves de argila vermelha calcinada e incorporação de serragem de madeira e um banho de silicato de sódio (chamados de agora em diante de serragem) e concretos com agregados leves de argila vermelha calcinada e incorporação de cinza do bagaço de cana – de – açúcar e silicato de sódio (chamados de agora em diante de cinza).

5.3.1 *Slump*, massa específica aparente e teor de ar incorporado (estado fresco) – ABNT NBR 9833:2008

Conforme citado no item 5.5 deste trabalho, procurou-se manter o consumo de cimento, areia e o volume de agregados em um mesmo patamar para os três tipos de concreto nos traços ricos e também para os três tipos de concreto nos traços pobres. Desta forma, procurou-se manter fixas as condições de moldagem dos concretos e, quando necessário, a quantidade de água devido à absorção de água dos agregados.

A Tabela 41 ilustra as características dos concretos e a massa específica aparente da argamassa no estado fresco.

Tabela 41 – Características dos concretos no estado fresco

Concreto		Massa específica aparente - concreto (Kg/m ³)	<i>slump</i> (mm)	Massa específica aparente - argamassa (Kg/m ³)
Traço	Agregado			
Rico	Argila expandida	1744	70	2225
	Serragem	2038	20	2163
	Cinza	2102	60	2226
Pobre	Argila expandida	1726	60	2145
	Serragem	1970	150	2128
	Cinza	2031	110	2135

Analisando-se a Tabela 41, percebe-se que os valores de massa específica no estado fresco dos concretos variam de 1726 Kg/m³ (corpos de prova produzidos com argila expandida no traço pobre) a 2102 Kg/m³ (corpos de prova produzidos com agregados com incorporação de serragem no traço rico). Os concretos produzidos com os agregados de argila calcinada incorporados com serragem de madeira e cinza proveniente da queima do bagaço da cana-de-açúcar apresentaram valores de massa específica no estado fresco superiores aos observados para os concretos confeccionados com argila expandida, tanto para o traço rico quanto para o pobre, uma vez que os agregados leves de argila calcinada possuem massa específica superiores à argila expandida.

Isso fica evidente quando analisamos a massa específica aparente das argamassas utilizadas para a produção dos concretos. Percebe-se que as três argamassas utilizadas para a produção dos concretos nos traços ricos e as três

utilizadas nos traços pobres apresentam valores de massa específica aparente no estado fresco em um mesmo patamar, evidenciando que os agregados possuem grande influência na massa específica fresca dos concretos, assim como em outras inúmeras características.

5.3.2 Resistência à compressão e massa específica aparente - ABNT NBR 5739:2007 e ABNT NBR 9778:2005

Para os ensaios realizados nos concretos no estado endurecido, foram utilizados corpos de prova de concreto cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Já os ensaios realizados nos corpos de prova de argamassa foram realizados utilizando-se corpos de prova cilíndricos com 50 mm de base e 100 mm de altura.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 5739:2007, em quatro diferentes idades, 7, 14, 28 e 91 dias. Para cada idade foram utilizados 5 corpos de prova. A tabela 42 apresenta os valores de resistência à compressão dos corpos de prova de concreto e dos corpos de prova de argamassa.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 42, percebe-se que a resistência à compressão dos concretos e da argamassa aumentam com o aumento da idade dos concretos, fato este que está relacionado ao ganho de capacidade da pasta de cimento, que aumenta sua capacidade resistiva com o aumento da idade dos corpos de prova. Dessa forma, os concretos analisados apresentaram maiores valores de resistência à compressão aos 91 dias de idade, assim como as argamassas.

Tabela 42 – Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto e argamassa

CONCRETO									
Traço	Agregado	7 dias	Desv.	14 dias	Desv.	28 dias	Desv.	91 dias	Desv.
		(MPa)	Pad.	(MPa)	Pad.	(MPa)	Pad.	(MPa)	Pad.
Rico	Argila expandida	23,53	1,51	25,99	1,31	28,66	1,93	30,48	0,6
	Serragem	12,74	0,62	13,64	0,7	12,46	2,83	16,23	1,68
	Cinza	26,2	2,14	26,92	0,88	30,5	1,88	32,78	0,71
Pobre	Argila expandida	15,63	1,68	17,52	1,42	21,38	0,59	22,83	1,04
	Serragem	5,42	0,46	7,19	0,47	7,69	0,64	10,53	0,99
	Cinza	15,64	0,73	17,11	0,81	19,85	0,74	20,94	1,26
ARGAMASSA									
Rico	Argila expandida	34,02	2,56	39,46	1,41	44,61	1,62	53,8	2,09
	Serragem	23,24	1,28	24,87	2,2	28,89	1,78	33,14	2,68
	Cinza	33,8	1,15	40,17	0,82	44,88	2,42	58,04	3,16
Pobre	Argila expandida	18,15	0,75	21,92	0,93	26,63	0,88	31,02	1,44
	Serragem	10,92	0,61	13,47	1,36	15,48	0,76	18,42	1,19
	Cinza	18,5	0,81	19	1,71	24,73	0,95	25,95	1,93

Os corpos de prova de argamassa extraídos dos concretos confeccionados com agregados com incorporação de serragem de madeira apresentaram valores de resistência à compressão muito inferiores aos outros dois tipos de corpos de prova de argamassa analisados, tanto para o traço rico quanto para o pobre. Esse fato pode ser explicado por problemas durante a moldagem dos concretos, uma vez que quando da moldagem desses corpos de prova, devido ao movimento giratório da betoneira e à fragilidade dos agregados produzidos com serragem de madeira, os mesmos os mesmos se quebraram e absorveram água dos concretos, que por sua vez absorveram argila dos agregados, fazendo com que a argamassa tivesse sua resistência prejudicada, como ilustram as Figuras 39 e 40.

Da mesma forma, percebe-se que, para todas as idades analisadas, os corpos de prova de concreto produzidos com agregados com incorporação de serragem de madeira apresentaram os menores valores de resistência à compressão dentre todos os concretos analisados, devido à quebra dos agregados durante a moldagem dos concretos e também às características desse tipo de agregado, que apresentou-se como o mais leve porém o mais frágil dentre os agregados analisados.

Figura 39 – Resistência à compressão dos concretos

Figura 40 – Resistência à compressão das argamassas

Já os corpos de prova de concreto produzidos com agregados com incorporação de cinza proveniente da queima do bagaço da cana apresentaram os maiores valores de resistência à compressão dentre todos os analisados, uma vez que esse tipo de agregado apresentou também os maiores valores de resistência dentre os agregados analisados (13,95 MPa).

Ainda analisando-se a Tabela 42, fica evidente que a quantidade de cimento influencia diretamente na resistência final dos concretos, uma vez que, para todas as idades analisadas, os concretos produzidos com mais cimento (traço rico) apresentaram valores de resistência à compressão superiores aos concretos produzidos com menos cimento (traço pobre).

De acordo com Rossignolo (2009a), a relação entre a resistência do concreto e da argamassa pode ser dividida em duas fases para os concretos leves, sendo a primeira similar aos concretos convencionais, em que a resistência do concreto é determinada principalmente pela resistência da argamassa e a segunda em que a resistência do concreto é determinada principalmente pela resistência do agregado leve, que normalmente apresenta valores de módulo de deformação inferiores aos apresentados por agregados convencionais. Essas duas tendências indicam a mudança no tipo de distribuição de tensões internas do concreto e, o valor da resistência à compressão do concreto no ponto onde ocorre essa mudança de tendência é denominado resistência ótima do concreto (Fg).

Esse comportamento fica evidente ao analisarmos as Figuras 41 e 42, que apresentam a relação entre as resistências dos concretos e das argamassas.

Figura 41 – Relação entre a resistência à compressão da argamassa e dos concretos confeccionados no traço rico

Figura 42 – Relação entre a resistência à compressão da argamassa e dos concretos confeccionados no traço pobre

Analisando-se as Figuras 41 e 42, percebe-se que os três tipos de agregados analisados atuam de forma similar quando da resistência dos concretos, que é limitada, nos três casos, pela resistência dos agregados utilizados.

Os concretos confeccionados com agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporação de serragem de madeira apresentaram pequenas variações nos valores de resistência à compressão, sendo o ponto de resistência ótima não pode ser observado até a data do último ensaio de resistência à compressão. Os concretos produzidos com agregados com incorporação de cinza proveniente da queima do bagaço da cana apresentaram valores de resistência à compressão em um mesmo patamar dos concretos produzidos com agregados leves de argila expandida. Como as resistências das argamassas extraídas desses concretos também estão em um mesmo patamar, pode-se concluir que a utilização de agregados produzidos com incorporação de cinza para a produção dos concretos pode ser viável do ponto de vista de resistência, uma vez que esse tipo de concreto apresentou as mesmas características dos concretos produzidos com argila expandida.

Os valores de massa específica aparente e fator de eficiência (Fe) (relação entre a resistência à compressão e a massa específica dos concretos) dos corpos de prova são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 – Massa específica aparente dos corpos de prova de concreto e de argamassa

CP	MEA (Kg/m ³) Concreto	Desvio Padrão	Fator de eficiência (MPa.dm ³ /Kg)
Argila expandida (Rico)	1643	18,48	18,59
Serragem (Rico)	1840	10,81	8,82
Cinza (Rico)	1963	7,46	16,72
Argila expandida (Pobre)	1647	17,38	13,84
Serragem (Pobre)	1770	10,54	5,95
Cinza (Pobre)	1880	4,88	11,14

Analisando-se a Tabela 43, percebe-se que os concretos produzidos com argila expandida apresentaram, tanto para o traço rico quanto para o pobre, os menores valores de massa específica aparente dentre todos os concretos produzidos, devido aos baixos valores de massa específica da argila expandida (menores que os apresentados para os agregados produzidos com serragem de madeira e também com cinza do bagaço de cana).

Ainda analisando-se a Tabela 43, percebe-se que os concretos produzidos com argila expandida apresentaram os melhores valores de fator de eficiência dos concretos tanto para o traço rico quanto para o pobre. Os concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada com incorporação de cinza do bagaço de cana e silicato de sódio apresentaram valores de fator de eficiência próximos aos apresentados pelos concretos produzidos com argila expandida, demonstrando que a utilização desse tipo de agregado pode ser viável para a produção de concretos estruturais leves.

Em contrapartida, concretos produzidos com agregados com incorporação de serragem de madeira apresentaram valores de fator de eficiência abaixo dos

apresentados pelos outros dois tipos de concreto analisados nesta pesquisa, uma vez que esse tipo de concreto apresentou baixos valores de resistência à compressão e altos valores de massa específica, reduzindo os valores do fator de eficiência. A Figura 43 ilustra a variação do fator de eficiência dos concretos.

Figura 43 – Fator de eficiência dos concretos

5.3.3 Módulo de deformação – ABNT NBR 8522:2008

A Tabela 44 apresenta os valores dos módulos de deformação dos corpos de prova de concreto. A determinação do módulo de deformação dos corpos de prova de concreto foi realizada com corpos de prova com 28 dias de idade, de acordo com as recomendações da Norma Brasileira ABNT NBR 8522:2008. Para a realização desse ensaio, foram confeccionados 3 corpos de prova para cada um dos concretos. O valor do módulo de deformação foi calculado utilizando-se a tensão correspondente a 40% do valor do carregamento.

Tabela 44 – Módulo de deformação dos corpos de prova de concreto

CP	Módulo de deformação (GPa)	Desvio Padrão
Argila expandida (Rico)	19,03	1,19
Serragem (Rico)	12,27	0,55
Cinza (Rico)	18,50	0,87
Argila expandida (Pobre)	15,60	1,25
Serragem (Pobre)	9,07	0,49
Cinza (Pobre)	13,07	0,64

Analisando-se a Tabela 44, percebe-se que os valores dos módulos de deformação dos concretos produzidos com agregados com incorporação de serragem de madeira apresentaram, tanto para o traço rico quanto para o pobre, valores de módulo de deformação inferiores aos observados para os outros dois tipos de concreto, uma vez que os agregados produzidos com esse tipo de agregado apresentaram os menores valores de resistência à compressão dentre todos os concretos analisados, tanto para o traço rico quanto para o pobre.

Como os concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada produzidos com cinza do bagaço de cana e silicato de sódio apresentaram valores de resistência à compressão próximos aos apresentados pelos concretos produzidos com argila expandida, esses dois tipos de concreto também apresentaram valores de módulo de deformação muito próximos, tanto para o traço rico quanto para o traço pobre.

A Tabela 45 apresenta uma comparação entre os valores do módulo de deformação dos concretos obtidos experimentalmente, de acordo com a ABNT NBR 8522:2008 e os valores teóricos, propostos por ROSSIGNOLO e AGNESINI (2005), relacionando o módulo de deformação dos concretos leves, suas resistências à compressão e suas massas específicas, ajustada para concretos com argila expandida, conforme ilustra a Equação 14.

$$E_c = (0,049 \cdot \gamma^{1,5} \cdot F_c^{0,5}) / 1000 \text{ (MPa)} \quad (14)$$

Onde,

γ = massa específica dos concretos (Kg/m³);

F_c = Resistência à compressão dos concretos (MPa).

Tabela 45 – Relação entre os valores experimentais e teóricos dos módulos de deformação dos concretos

CP	Módulo de deformação experimental (GPa)	Módulo de deformação teórico (GPa) (equação 14)
Argila expandida (Rico)	19,03	18,02
Serragem (Rico)	12,27	15,58
Cinza (Rico)	18,50	24,40
Argila expandida (Pobre)	15,60	15,65
Serragem (Pobre)	9,07	11,84
Cinza (Pobre)	13,07	18,28

Analisando-se a Tabela 45, percebe-se que os valores experimentais e teóricos para os concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada com cinza de bagaço de cana e silicato de sódio e os agregados produzidos com serragem de madeira apresentaram pequenas variações mas, em contrapartida, os valores experimentais e teóricos apresentados para os concretos produzidos com

argila expandida foram muito próximos, o que indica que a equação não está ajustada para concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada e está ajustada para utilização em concretos produzidos com argila expandida.

5.3.4 Absorção de água e índice de vazios – ABNT NBR 9778:2005

A Tabela 46 apresenta os resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios nos concretos. Os ensaios foram realizados com três corpos de prova de cada um dos tipos de concreto, com idade de 91 dias e 72 horas de imersão, de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 9778:2005.

Tabela 46 – Absorção de água e índice de vazios dos concretos

CP	Absorção de água (%)	Desvio Padrão	Índice de vazios (%)	Desvio Padrão
Argila expandida (Rico)	7,52	0,06	12,35	0,06
Serragem (Rico)	9,55	0,76	17,56	1,30
Cinza (Rico)	7,84	0,14	15,40	0,21
Argila expandida (Pobre)	7,51	0,34	12,37	0,02
Serragem (Pobre)	9,29	0,23	16,45	0,34
Cinza (Pobre)	9,29	0,17	17,47	0,28

Analisando-se a Tabela 46, percebe-se que, para todos os concretos analisados, a absorção de água sempre esteve abaixo dos 10%, sendo que os concretos confeccionados com argila expandida apresentaram os menores valores de absorção de água dentre os concretos analisados, tanto para o traço rico quanto para o pobre, uma vez que, devido à seu processo de produção e queima à temperaturas superiores a 1.000 °C, a argila expandida torna-se um produto bastante poroso mas com uma camada externa vitrificada, o que diminui sua absorção de água.

Percebe-se também que, para o traço rico, os concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada com incorporação de cinza do bagaço de cana e silicato de sódio apresentaram valores de absorção de água (7,84%) muito próximos aos apresentados pelos concretos produzidos com argila expandida (7,52%), indicando que o silicato de sódio reagiu com a cinza do bagaço de cana e, depois da queima, contribuiu para uma melhor densificação desse agregado.

Já para o traço pobre, esse comportamento não se manteve, e os concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada com incorporação de cinza do bagaço de cana e silicato de sódio apresentaram valores de absorção de água (9,29%) superiores aos observados para os concretos produzidos com argila expandida (7,51%), uma vez que no traço pobre esse tipo de concreto apresentou índice de vazios (17,47%) superior ao apresentado no traço rico (15,40%).

Percebe-se também ao analisar os dados da Tabela 46 que o incremento na quantidade de cimento na produção dos concretos não contribui diretamente para a absorção de água dos concretos, uma vez que os concretos produzidos com menos cimento apresentaram valores de absorção de água próximos aos observados para os concretos produzidos com mais cimento.

As Figuras 44 a 49 apresentam as imagens das zonas de transição pasta/agregado dos concretos nos traços rico e pobre, obtidas através de microscopia eletrônica de varredura, com ampliação de 500 vezes.

Figura 44 – Imagem da zona de transição pasta/agregado dos concretos produzidos com argila expandida no traço pobre (MEV – ampliação: 500 vezes)

Figura 45 – Imagem da zona de transição pasta/agregado dos concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada e cinza no traço pobre (MEV – ampliação: 500 vezes)

Figura 46 – Imagem da zona de transição pasta/agregado dos concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada e serragem de madeira no traço pobre (MEV – ampliação: 500 vezes)

Figura 47 – Imagem da zona de transição pasta/agregado dos concretos produzidos com argila expandida no traço rico (MEV – ampliação: 500 vezes)

Figura 48 – Imagem da zona de transição pasta/agregado dos concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada e cinza no traço rico (MEV – ampliação: 500 vezes)

Figura 49 – Imagem da zona de transição pasta/agregado dos concretos produzidos com agregados leves de argila calcinada e serragem de madeira no traço rico (MEV – ampliação: 500 vezes)

Analisando-se as Figuras 44 a 49, percebe-se que, tanto para os concretos produzidos com traço rico quanto para os produzidos com traço pobre, a zona de transição é bem definida. Percebe-se também, analisando-se as imagens, que a argila expandida apresenta uma camada externa vitrificada bem definida, o que dificulta a absorção de água dos agregados. Esse comportamento não é observado para os agregados leves de argila calcinada produzidos nesta pesquisa, o que favorece a absorção de água dos agregados. Portanto, quando da moldagem dos concretos, é importante que essa água absorvida pelos agregados seja acrescentada à água de moldagem dos concretos ou que os agregados sejam utilizados saturados, de forma a não absorverem a água necessária para a hidratação do cimento.

5.3.5 Retração linear de secagem

Para o ensaio de retração linear de secagem dos concretos foram confeccionados três corpos de prova retangulares, com base quadrada de 7,5 cm e 25 cm de comprimento para cada tipo de concreto. A retração linear de secagem dos corpos de prova foi mensurada através de um aparelho modelo H 3231, da empresa Humboldt MFG. CO., com precisão de 0,002mm, nas idades de 7, 14, 28, 56, 91, 160 e 250 dias. A Tabela 47 e a Figura 50 ilustram as retrações lineares de secagem dos corpos de prova de concreto até a idade de 250 dias.

Tabela 47 – Retração linear de secagem dos corpos de prova de concreto

CP	Retração linear (mm) ($\times 10^{-6}$)						
	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias	160 dias	250 dias
Argila expandida (Rico)	80	150	165	234	239	275	352
Serragem (Rico)	-53	86	135	214	268	334	371
Cinza (Rico)	82	118	170	185	212	257	307
Argila expandida (Pobre)	65	132	140	178	290	305	365
Serragem (Pobre)	-68	106	167	234	283	342	451
Cinza (Pobre)	59	98	139	156	192	237	295

Figura 50 – Evolução da retração linear de secagem dos corpos de prova de concreto

Analisando-se os resultados de retração linear de secagem dos concretos percebe-se que os concretos produzidos com agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporação de serragem de madeira apresentaram valores negativos para a retração na idade de 7 dias. Esse valor refere-se a expansão sofrida por esses corpos de prova, uma vez que os agregados produzidos com serragem de madeira são muito porosos e com grande conectividade entre os poros, fazendo com que os agregados absorvam parte da água da cura dos concretos.

Analisando-se a Figura 50, percebe-se que os valores de retração linear de secagem dos concretos são similares, até a idade de 50 dias. A partir dessa idade, o concreto confeccionado com agregados leves de argila calcinada com incorporação de serragem de madeira e menor teor de cimento para a moldagem apresentou o maior valor de retração linear de secagem dentre todos os concretos analisados, uma vez que esse concreto foi o que apresentou o menor valor de módulo de deformação dentre os concretos analisados (9,07 GPa).

Da mesma maneira, o concreto confeccionado com agregados leves de argila vermelha calcinada e incorporação de cinza do bagaço de cana e silicato de sódio e confeccionado no traço pobre apresentou o menor valor de retração linear de secagem dentre os concretos analisados, para idade de 250 dias, uma vez que esse concreto também apresentou um dos maiores valores de módulo de deformação dentre os concretos estudados (18,50 GPa). Ressalta-se aqui que, tanto para o traço rico quanto para o traço pobre, os concretos confeccionados com agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e silicato de sódio apresentaram os menores valores de retração linear de secagem dentre todos os concretos analisados.

Os concretos confeccionados com agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporação de serragem de madeira apresentaram os maiores valores de retração linear de secagem para idades a partir de 140 dias, o que pode ser explicado pelos altos valores de absorção de água apresentados por esse tipo de agregado e por esses tipos de concreto.

Os concretos confeccionados com argila expandida apresentaram valores intermediários de retração linear de secagem quando comparados com os concretos confeccionados com agregados leves de argila calcinada com incorporação, tanto para o traço rico quanto para o pobre, uma vez que, apesar desse tipo de concreto apresentar valores de absorção de água similares aos concretos confeccionados com agregados leves de argila vermelha calcinada, a argila expandida é um agregado pouco absorvente, diminuindo assim a retração linear dos concretos.

Até a idade de 70 dias, percebe-se que os concretos apresentam acentuados valores de retração linear de secagem, sendo que, com o avanço da idade dos mesmos, os valores de retração linear de secagem tendem a estabilizar, devido à perda de água dos concretos para o ambiente e estabilização da umidade dos concretos.

Uma estimativa para os valores finais da retração linear de secagem dos corpos de prova pode ser feita utilizando-se a Equação 15 (ACI 209R-92 (1997)), em que S_t representa o valor da retração de secagem ($\times 10^{-6}$) aos t dias e S_{utt} representa o valor final da retração linear de secagem ($\times 10^{-6}$).

$$S_{ult} = ((35 + t) / t) \cdot S_t \quad (15)$$

A Tabela 48 apresenta os valores estimados através da equação 15 para a retração linear final dos concretos analisados.

Tabela 48 – Comparação entre a retração linear final (teórica) e a obtida aos 250 dias (experimental)

CP	Retração linear final ($\times 10^{-6}$) (mm/m) (ACI 209-R92)	Retração linear experimental aos 250 dias
Argila expandida (Rico)	402	352
Serragem (Rico)	423	371
Cinza (Rico)	350	307
Argila expandida (Pobre)	416	365
Serragem (Pobre)	514	451
Cinza (Pobre)	336	295

5.3.6 Condutividade Térmica

Para o ensaio de condutividade térmica dos concretos foram confeccionados corpos de prova cilíndricos com 5 cm de base e 10 cm de altura. Os corpos de prova, depois de curados, foram cortados de forma a ficarem com 5 cm de diâmetros e 2,5 cm de altura para a realização do ensaio. O ensaio foi realizado com taxa de transferência de calor variando de $8,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$ a $5,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$. A Tabela 49 apresenta os resultados da condutividade térmica dos concretos.

Tabela 49 – Condutividade térmica dos concretos

CP	Condutividade térmica ($\text{W/m}^0\text{K}$)	Desvio Padrão	Umidade do CP (%)
Argila expandida (Rico)	0,992	0,024	4,47
Serragem (Rico)	0,964	0,064	5,14
Cinza (Rico)	1,283	0,066	4,00
Argila expandida (Pobre)	0,831	0,022	3,31
Serragem (Pobre)	0,781	0,043	4,00
Cinza (Pobre)	1,169	0,041	2,67

De acordo com Rissignolo (2009a), o ar existente na estrutura celular dos agregados e concretos reduz a absorção e transferência de calor dos concretos, fazendo com que os concretos confeccionados com agregados mais porosos sejam menos condutores de calor. Esse fato fica evidente quando analisamos os resultados apresentados na Tabela 49, uma vez que o concreto confeccionado com agregados leves de argila calcinada com incorporação de serragem de madeira (agregado mais poroso dentre os analisados) no traço pobre foi o que apresentou menor valor (0,781 $\text{W/m}^0\text{K}$) de condutividade térmica dentre os concretos analisados.

Da mesma maneira, o concreto confeccionado com agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporação de cinza do bagaço de cana e silicato de

sódio (agregado mais denso), confeccionado no traço rico, apresentou o maior valor de condutividade térmica ($1,283 \text{ W/m}^\circ\text{K}$) dentre todos os concretos analisados.

Figura 51 – Massa específica e condutividade térmica dos concretos

A Figura 51 apresenta um comparativo entre a massa específica e a condutividade térmica dos concretos, evidenciando que a condutividade térmica dos concretos está diretamente ligada à massa específica dos mesmos, uma vez as curvas de condutividade e massa específica dos concretos apresentadas na Figura 51 seguem a mesma tendência, ou seja, concretos com massa específica maior apresentaram condutividade térmica maior e concretos com massa específica menor apresentaram condutividade térmica menor.

Ressalta-se aqui que, para todos os concretos analisados no traço rico e no traço pobre, a condutividade térmica observada foi menor do que a apresentada para os concretos convencionais, que apresentam condutividade térmica variando de $1,5$ a $2,9 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, uma vez que os concretos leves estudados apresentam grande quantidade de ar incorporado, diminuindo a condutividade térmica dos concretos.

6. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nesta pesquisa, há indicações de que a utilização de agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporações de serragem de madeira, cinza do bagaço da cana-de-açúcar e silicato de sódio pode ser viável, com destaque para os seguintes aspectos:

Viabilidade de produção de agregados inovadores, com desempenho similar ao comercial (argila expandida), contando, ainda, com ganho ambiental significativo promovido pela utilização de subprodutos agroindustriais e redução do consumo de matérias-primas, além da possibilidade de disseminação dessa tecnologia por todo o território nacional, utilizando-se as mais de 11.000 empresas produtoras de produtos cerâmicos espalhadas por todo o Brasil.

- Os agregados leves de argila vermelha calcinada confeccionados com incorporações cinza do bagaço de cana-de-açúcar e silicato de sódio apresentaram características compatíveis com as apresentadas pelos agregados leves convencionais, sendo que a utilização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e silicato de sódio nas massas cerâmicas possibilitou uma redução na absorção de água e aumento na resistência dos agregados.

- Já os agregados leves de argila vermelha calcinada produzidos com serragem de madeira apresentaram grande quantidade de poros e, por isso, apresentaram também altos valores de absorção de água e baixos valores de massa específica, características essas fundamentais para o desempenho dos concretos confeccionados com esse tipo de agregado.

- Os concretos produzidos com agregados leves de argila vermelha calcinada apresentaram valores de massa específica próximos aos observados para os concretos produzidos com argila expandida, tanto para os traços rico quanto para o pobre, estando todos abaixo dos 2.000 Kg/m³.

- Os concretos confeccionados com agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporação de cinza e silicato de sódio apresentaram valores de resistência à compressão similares aos apresentados pelos concretos confeccionados com argila expandida, para os traços rico e pobre. Os concretos confeccionados com agregados leves de argila calcinada com incorporação de serragem de madeira apresentaram valores de resistência à compressão inferiores aos outros tipos de concreto, devido à maior fragilidade desse tipo de agregado. Como a resistência à compressão está diretamente ligada ao módulo de deformação dos mesmos, essa tendência também foi observada para os valores de módulo de deformação dos concretos.

- Os agregados leves apresentam grande importância na resistência dos concretos estruturais, uma vez que, por conta dos baixos valores de módulo de deformação desses agregados, a resistência dos concretos leves é determinada principalmente pela resistência da argamassa até a resistência do concreto atingir o ponto de resistência ótima. A partir desse ponto, o acréscimo de cimento nos concretos não apresenta grande influência na resistência dos concretos, que passa a ser limitada pela resistência dos agregados. Dessa forma, a resistência ótima dos

concretos leves é um fator muito importante para a dosagem dos concretos leves, uma vez que, com esse conhecimento, pode-se economizar cimento durante a moldagem dos concretos.

- Os concretos confeccionados com argila expandida e agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporação de cinza e silicato de sódio apresentaram valores próximos de absorção de água e índice de vazios, sendo esses inferiores aos observados para os concretos confeccionados agregados leves de argila calcinada com incorporação de serragem de madeira, uma vez que esse tipo de agregado mostrou-se mais poroso e menos impermeável que os outros dois tipos de agregados analisados.

- Os concretos apresentaram valores de retração linear de secagem próximos, com exceção para os concretos confeccionados com agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporação de serragem de madeira, nos traços rico e pobre, que apresentaram os maiores valores de retração linear de secagem dentre todos os concretos analisados, devido à grande porosidade desse tipo de agregado.

- Devido aos grandes valores de porosidade apresentados pelos agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporação de serragem de madeira, os concretos confeccionados com esse tipo de agregado apresentaram, para os traços rico e pobre, os menores valores de condutividade térmica dentre os concretos analisados. Já os concretos confeccionados com agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporação de cinza do bagaço de cana e silicato de sódio apresentaram os maiores valores de condutividade térmica, devido à maior densidade desse tipo de agregado.

Portanto, pode-se concluir que os agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporações de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e silicato de sódio confeccionados para essa pesquisa apresentaram características próximas às da argila expandida, e que a utilização de agregados leves de argila vermelha calcinada com incorporações pode ser viável para a produção de concretos estruturais leves, sendo que a escolha do tipo de incorporação para a produção dos agregados pode ser definida de acordo com a finalidade de sua utilização para o projeto.

- Ressalta-se aqui a importância da utilização de subprodutos industriais como serragem de madeira e cinza do bagaço de cana-de-açúcar para a produção dos agregados leves de argila vermelha calcinada, promovendo a utilização de matérias que seriam descartadas para a produção de produtos com possibilidade de utilização em diversas áreas da construção civil, gerando economias quanto ao descarte e possíveis armazenamentos desses subprodutos, além de economias na quantidade de matéria-prima utilizada e um ganho energético significativo, uma vez que esses agregados foram queimados a 900 °C, cerca de 300 °C a menos do que o necessário para a produção de argila expandida.

7. CONTINUIDADE DA PESQUISA

Em função dos resultados obtidos nessa pesquisa, observa-se a necessidade de continuidade desse projeto, especialmente nos itens listados abaixo:

- produção de agregados de cerâmica com maiores teores de cinza, promovendo assim economia na utilização de matéria-prima e utilização de maiores quantidades de subprodutos industriais;
- produção de agregados com resíduos de madeiras com diferentes granulometrias, com foco na redução da absorção de água e aumento da resistência dos agregados;
- avaliação de processos de queima de menor demanda energética, como a utilização de micro-ondas para a queima dos agregados, promovendo significativo ganho energético.

8. REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI Guide for structural lightweight aggregate concrete. ACI – 213R-87. ACI Manual of Concrete Practice, Part1, 27p., 1999.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI Guide for structural lightweight aggregate concrete. ACI – 213R-03. ACI Manual of Concrete Practice, Part1, 38p., 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 35**: Agregados leves para concreto estrutural – Especificações. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818**: Placas Cerâmicas Para Revestimento – Especificação e Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos de Concreto. Rio de Janeiro, 2007.

AL-BAHAR, S.; BOGAHAWATTA, V. T. L. Development of lightweight aggregates in Kuwait. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 31, n. 1C, p. 231-239, Junho, 2006.

BEZERRA, I. M. T., COSTA, D. L., VITORINO, J. P. M., MENEZES, R. R., NEVES, G. A., “Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais ativados alcalinamente”. **Revista eletrônica de materiais e processos**, v. 8, n. 2, pp. 101-105, 2013.

BORJA, E. V. Efeito da adição de argila **expandida e adições na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. 2011. 230 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2011.

BUI, L. A-T.; HWANG, C-L.; CHEN, C-T.; LIN, K-L.; HSIEH, M-Y.; Manufacture and performance of cold bonded lightweight aggregate using alkaline activators for high performance concrete. **Construction and building materials**. v. 35, p. 1056-1062, 2012.

CABRAL, E. M.; SÁ, R. J.; VIEIRA, R. K., VASCONCELOS, R. P. Utilização de massas cerâmicas na produção de agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto. **Cerâmica**, v. 54, n. 332, p 404-410, Outubro / Dezembro, 2008.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D.; RAVINDRARAJAH, R. S. Modelagem da retração por secagem de concretos produzidos com agregados reciclados. **Ibracon**, v. 3, n. 1, p. 1-23, Março, 2010.

CHANDRA, S.; BERNTSSON, L. *Lightweight aggregate concrete: science, technology and applications*. Noyes Publications, USA, 409 p. 2002.

CHEESEMAN, C. R.; VIRDI, G. S. Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 45, p. 18-30, 2005.

CHEESEMAN, C. R.; MAKINDE, A.; BETHANIS, S. Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 43, p. 147-162, 2005.

CHEMANI, H.; CHEMANI, B. Valorization of wood sawdust in making porous clay brick. **Scientific research and Essays**, v. 8, n. 15, p. 609-614, Abril, 2013.

CHEN, H-J.; YANG, M-D.; TANG, C-W.; WANG, S.Y. Producing synthetic lightweight aggregates from reservoir sediments. **Construction and building materials**. v. 28, p. 387-394, 2012.

CHI, J. M.; HUANG, R.; YANG, C. C.; CHANG, J. J. Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 25, p. 197-205, 2003.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON AND FÉDÉRATION INTERNACIONALE DE LA PRÉCONTRAÎTE – CEB/FIP. Lightweight aggregate concrete – Manual of design and technology. The Construction Press, 169p. 1977.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ES 227: Agregados sintéticos graúdos de argila calcinada – emprego em obras rodoviárias, 1989.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 225. Agregado sintético de argila calcinada – determinação de perda de massa após fervura, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-EM 230. Agregados sintéticos graúdos de argila calcinada – especificação de material, 1994.

DUCMAN, V.; MLADENOVIC, A.; ŠUPUT, J. S. Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity. **Cement and Concrete Research**, v. 32, pp. 223-226, 2002.

DUTRA, R. P. S.; PONTES, L. R. A. Obtenção e análise de cerâmicas porosas com a incorporação de produtos orgânicos ao corpo cerâmico. **Cerâmica**, v. 48, n. 308, p 223-230, Outubro / Dezembro, 2002.

EUROLIGHTCON.Project BE96-3942/R2.LWAC Material Properties, State of the Art, 111p.1998.

EUROLIGHTCON.Project BE96-3942/R9.Technical and economic mixture optimization of high strength lightweight aggregate concrete.64p. 2000.

HOFF, G. C. Guide for the use of low-density concrete in civil works projects. *Innovations for navigation projects research program*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington – DC, 2002.

HOLM, T.A.; BREMNER, T.W. High Strength Lightweight Aggregate Concrete. In: SHAH, S.P.; AHAMAD, S.H. *High Performance Concrete: Properties and Applications*. Great Britain, McGraw-Hill, p. 341-374, 1994.

HOLM, T.A.; BREMNER, T.W. State-of-the-art report on high strength, high durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments. US Army Corps of Engineers – Engineer Research on Development Center. ERCD/SL TR-00-3. 116p. 2000.

KWANG, C-L.; BUI, L. A-T.; LIN, K-L.; LO, C-T. Manufacture and performance of lightweight aggregate from municipal solid waste incinerator fly ash and reservoir sediment for self-consolidating lightweight concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 34, p. 1159-1166, 2012.

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

KOCKAL, N. U.; OZTURAN, T. Effects of lightweight fly ash aggregates properties on the behavior of lightweight concretes. **Journal of Hazardous Materials**. v. 179, p. 954-965, 2010.

KOURTI I.; CHEESEMAN, C. R. Properties and microstructure of lightweight aggregates produced from ignite coal fly ash and recycled glass. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 54, p. 769-775, 2010.

LO, T. Y.; TANG, W. C.; CUI, H. Z. The effects of aggregate properties on lightweight concrete. **Building and Environment**. v. 42, pp. 3025-3029, 2007.

LIAO, Y-C.; HUANG, C-Y.; CHEN, Y-M. Lightweight aggregates from water reservoir sediment with added sodium hydroxide. **Construction and building materials**. v. 46, p. 79-85, 2013.

MEHTA, K. MONTEIRO, J.M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. PINI. São Paulo, 1994.

MORI, F. A.; COVEZZI, M. M.; MORI, C. L. S. de O. Utilização de serragem de *Eucalyptus spp.* para a produção de tijolo maciço cerâmico. **Floresta**, v. 41, n. 3, p. 641-654, Julho / Setembro, 2011.

NAWEL, S.; MOUNIR, L.; HEDI, H. Study of mechanical behavior of lightweight aggregates concrete of Tunisian clay. **Procedia Engineering**, v. 10, pp. 936-941, 2011.

PEREIRA, M. R. **Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos**. 2008. 82 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2008.

PÉREZ, C. A. S.; PADUANI, C.; ARDISSON, J.D.; GOBBI, D.; THOMÉ, A. Caracterização de massas cerâmicas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha em São Domingos do Sul – RS. **Cerâmica Industrial**, v. 15, n. 1, p. 38-43, Janeiro / Fevereiro 2010.

RILEM. **Terminology and definitions of lightweight concrete**. Recommendation LCI, 1st edition, 1975.

ROSSIGNOLO, J. A., AGNESINI, M. V. C. Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, pp. 329-334, 2002.

ROSSIGNOLO, J. A.. Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré – fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo - USP, São Carlos - SP, 211p., 2003

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete. **Cement & concrete composites**, v. 26, pp. 375-380, 2004.

ROSSIGNOLO, J. A.; FERRARI, C. Desenvolvimento de concreto leve para execução de habitações de interesse social: sistema construtivo de painéis monolíticos moldados in loco. In: **ENCONTRO NACIONAL SOBRE QUALIDADE E INOVAÇÃO NA CONSTRUÇÃO - QIC2006**. Anais... Lisboa, v.2. p.827-37, 2006.

ROSSIGNOLO, J.A. **Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. 1 ed., São Paulo, Ed. PINI, 2009a.

ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve estrutural: influência da argila expandida na microestrutura da zona de transição pasta-agregado. **Ambiente Construído (Online)**, v. 9, pp. 119-127, 2009b.

ROSSIGNOLO, J. A.; GAVIOLI, L. M.; SANTIS, B.C. Avaliação da influência da adição de serragem de madeira nas massas cerâmicas para produção de agregados leves de argila calcinada. In: **15 th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies**. Anais...Pirassununga, 2014.

SANTA, R. A. A. B., Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de

resíduo da indústria de papel. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2012.

SANTIS, B. C. **Agregado leve de argila calcinada para uso em concreto estrutural: viabilidade da cerâmica vermelha do estado de São Paulo**. 2012. 132 p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SANTIS, B. C.; ROSSIGNOLO, J. A. Avaliação da absorção de água em agregados leves de argila calcinada produzidos com diferentes tipos de ativadores alcalinos. In: **II Workshop Internacional de Materiais Compósitos Não Convencionais**. Anais...Pirassununga, 2014.

SANTIS, B. C.; ROSSIGNOLO, J. A.; GAVIOLI, L. M.; MORELLI, M. R. Evaluation of calcined clay lightweight aggregates made with alkali activators. In: **15 th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies**. Anais...Pirassununga, 2014.

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia das Argilas. 2 ed. Ver. Atual. Volume 1. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda. 1989. 496 p. Il.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS – SEBRAE. **Cerâmica vermelha para construção: telhas, tijolos e tubos**. Estudos de Mercado SEBRAE/ESPM, 40p., 2008.

SHAFIGH, P.; MAHMUD, H. B.; JUMAAT, M. Z. B.; AHMMAD, R.; BAHRI, S. Structural lightweight aggregate concrete using two types of waste from the palm oil industry as aggregate. **Journal of cleaner Production**. v. 80, pp. 187-196, 2014.

TEO, D. C. L.; MANNAN, M. A.; KURIAN, V. J. Structural Concrete using oil palm shell (OPS) as lightweight aggregate. **Turkish Journal of Engineering and Environmental Science**. v. 30, pp. 251-257, 2006.

TEZUKA, Y. *Concreto leve à base de argila expandida*, Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 1973.

TOPÇU, İ. B.; UYGUNOĞLU, T. Properties of autoclave lightweight aggregate concrete. **Building and Environment**. v. 42, pp. 4108-4116, 2007.

ZHANG, M.N.; GJØRV, O. E. Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete. *ACI Materials Journal*, v.88, n.3, p.240-247, 1991.