BRUNO CARLOS DE SANTIS

Agregado leve de argila calcinada para uso em concreto estrutural: viabilidade da cerâmica vermelha do Estado de São Paulo

Dissertação apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo

Área de Concentração:
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientador: Prof. Dr. João Adriano Rossignolo

São Carlos
2012

Aos meus Pais, Luzia e Francisco, pela oportunidade de estar aqui hoje e por todas as oportunidades que me proporcionaram e me proporcionam e pelo exemplo de vida a ser seguido. Às minhas irmãs Ligia e Paula e à minha namorada, Samira, pelo incentivo, carinho e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

À toda a minha família, tios, tias, primos, primas, avôs e avós e em especial aos meus Pais Francisco e Luzia, às minhas irmãs Ligia e Paula e à minha namorada Samira, pela ajuda, incentivo, companheirismo e principalmente pelo amor.

Ao professor Doutor João Adriano Rossignolo, 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.

À 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.

Às empresas Cerâmica Josemar Ltda., Morandin Produtos Cerâmicos, Selecta Blocos (Grupo Estrutural), Maristela Telhas Ltda. (Top Telha) e Cerâmica Vale do Mogi, pelo fornecimento das matérias primas utilizadas nessa 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.

Ao Laboratório de Construções Rurais e Ambiência da FZEA/USP, pela disponibilização de suas instalações para a confecção dos agregados leves de argila calcinada.

Aos professores, amigos e funcionários do Laboratório de Construção Civil (LCC) e do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos (IAU-USP) e aos Alunos de iniciação científica Gabriel Ferreira e Rafael Thyssen, pela contribuição neste trabalho.

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

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ____ I

LISTA DE TABELAS ____ IV

RESUMO ____ VI

ABSTRACT ____ VII

1. INTRODUÇÃO ____ 1

1.1 JUSTIFICATIVAS ____ 3

1.2 OBJETIVOS ____ 4

2. CERÂMICA VERMELHA ____ 5

2.1 INTRODUÇÃO ____ 5

2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DE CERÂMICA VERMELHA ____ 8

2.3 PROPRIEDADES DA CERÂMICA VERMELHA ____ 15

2.3.1 ENSAIOS REALIZADOS NA MATÉRIA PRIMA ____ 16

2.3.2 ENSAIOS REALIZADOS NAS PEÇAS QUEIMADAS ____ 27

3. CONCRETO ESTRUTURAL LEVE ____ 33

3.1 INTRODUÇÃO ____ 33

3.2 AGREGADOS LEVES PARA CONCRETO ____ 37

3.2.1 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS LEVES ____ 39

3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS LEVES ____ 42

3.4 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS LEVES NO ESTADO ENDURECIDO ____ 44

4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL ____ 51

4.1 SELEÇÃO DAS EMPRESAS E COLETA DAS MATÉRIAS PRIMAS ____ 51

4.2 ENSAIOS REALIZADOS NAS MATÉRIAS PRIMAS COLETADAS ____ 52

4.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGILA CALCINADA ____ 65

4.4 ENSAIOS REALIZADOS NOS CORPOS DE PROVA DE ARGILA CALCINADA ____ 69

4.5 PRODUÇÃO DOS AGREGADOS DE ARGILA CALCINADA ____ 73

4.6 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ____ 75

4.7 ENSAIOS REALIZADOS NOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ____ 78

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS ____ 87

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS COLETADAS ____ 87

5.1.1 LIMITES DE CONSISTÊNCIA ____ 87

5.1.2 MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS ____ 88

5.1.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA ____ 89

5.1.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) ____ 90

5.1.5 ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX) 93
5.1.6 ANÁLISES TÉRMICAS (ATD E TG) 95
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGILA CALCINADA 100
5.2.1 RETRAÇÃO LINEAR 100
5.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA E POROSIDADE APARENTE 102
5.2.3 EXPANSÃO POR UMIDADE 110
5.2.4 MASSA ESPECÍFICA APARENTE 111
5.2.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 111
5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO 113
5.3.1 MASSA ESPECÍFICA FRESCA E TEOR DE AR INCORPORADO (ABNT NBR 9833:2008) 113
5.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MASSA ESPECÍFICA APARENTE (ABNT NBR 5739:2007 E ABNT NBR 9778:2005) 114
5.3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (ABNT NBR 7222:2011) 118
5.3.4 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO (ABNT NBR 8522:2008) 119
5.3.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS (ABNT NBR 9778: 2005) 120
5.3.6 RETRAÇÃO LINEAR DE SECAGEM 122
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 125
7. REFERÊNCIAS 127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais produtos cerâmicos, suas matérias primas e formas de produção. FONTE: MOTTA et al. 2001 apud in SEBRAE, 2008 7
Figura 2 - Armazenamento de matéria prima em uma pequena e em uma grande empresa 9
Figura 3 - Peças secando ao ar livre com o auxílio de ventiladores 12
Figura 4 - Blocos cerâmicos sendo queimados em forno de barro 12
Figura 5 - Estoque de blocos cerâmicos em uma grande empresa 13
Figura 6 - Fluxograma do processo de produção de produtos de cerâmica vermelha. FONTE: SEBRAE, 2008 14
Figura 7 - Diagrama granulométrico de Winkler. FONTE: PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997 17
Figura 8 - Exemplo de difratograma de raios-X. FONTE: VIEIRA et al. 2003b 21
Figura 9 - Exemplo de análises térmicas diferenciais em amostras de solos argilosos. FONTE: VIEIRA et al. 2003b 25
Figura 10 - Exemplos de curvas de análise termogravimétricas em amostras de argila. FONTE: VIEIRA et al. 2003b 27
Figura 11 - Representação da secagem de uma peça de cerâmica. FONTE: VIEIRA et al. 2003a 28
Figura 12 - Exemplo de uma curva de Bigot. FONTE: VIEIRA et al. 2003a 29
Figura 13 – Coliseu de Roma. FONTE: Chandra; Berntsson, 2002. 34
Figura 14 – Catedral de Santa Sofia. FONTE: Chandra; Berntsson, 2002. 35
Figura 15 – Hotel Chase-Park Plaza. Edifício com estrutura integralmente executada com concreto leve. FONTE: Rossignolo, 2009a. 36
Figura 16 – forma de ruptura dos concretos com agregados leves (à esquerda) e com agregados convencionais (à direita). FONTE: ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005 45
Figura 17 - Localização das empresas onde foram coletadas as matérias primas 52
Figura 18 - Amostras de solo secando ao ar livre 53
Figura 19 - Amostras levadas à estufa para determinação do teor de umidade 53
Figura 20 - Amostra de solo no aparelho de Casagrande com a ranhura feita pelo cinzel antes do início do ensaio 54
Figura 21 - Ensaio de limite de liquidez terminado 54
Figura 22 - Filete de solo úmido rolado para frente a para trás, em movimentos contínuos 55
Figura 23 - Cilindro com 3 mm de espessura e com presença de pequenas rachaduras 56
Figura 24 - Amostras sendo misturadas no agitador mecânico 57
Figura 25 - Ensaio de sedimentação em andamento 58
Figura 26 - Amostras de solo com água destilada 59
Figura 27 - Picnômetros com amostra de solo e com água destilada colocados no aparelho de vácuo 59
Figura 28 - Ar saindo das amostras colocadas no aparelho de vácuo 60
Figura 29 - Equipamento utilizado para a realização dos ensaios de DRX 61

Figura 30 - Interface do programa MATCH! 62
Figura 31 - Ajuste programável da precisão, distancia entre picos, intensidade e número de fases do programa MATCH 63
Figura 32 - Equipamento utilizado no ensaio de FRX 63
Figura 33 – Equipamento utilizado para a realização do ensaio 64
Figura 34 – Corpos de prova extrudados e marcados de acordo com suas temperaturas de queima, números e locais de extração das matérias primas 66
Figura 35 - Preparação da massa para extrusão 67
Figura 36 - Massas extrudadas em formato cilíndrico 68
Figura 37 - Corte das barras 69
Figura 38 - Barras cortadas 69
Figura 39 - Corpos de prova separados para imersão em água 71
Figura 40 - Corpos de prova imersos em água à temperatura de 100 ^{o}C 71
Figura 41 - Corpos de prova pesados imersos em água 72
Figura 42 - Corpo de prova sendo rompido no ensaio de compressão 73
Figura 43 – Mistura das massas cerâmicas 74
Figura 44 – Extrusão das massas cerâmicas 74
Figura 45 – Corpos de prova sendo cortados e armazenados para secagem 75
Figura 46 – Mistura dos materiais na betoneira 77
Figura 47 – Moldagem dos corpos de prova 77
Figura 48 – (a) Moldagem do corpo de prova no tronco de cone; (b) Retirada do tronco de cone; (c) Medida do abatimento do tronco de cone 79
Figura 49 – Pesagem do recipiente com concreto para determinação da massa específica fresca 80
Figura 50 - Corpo de prova capeado 81
Figura 51 – (a) Corpo de prova preparado para ensaio de compressão; (b) Corpo de prova sendo rompido; (c) Corpo de prova rompido 82
Figura 52 – Ensaio de resistência à compressão por compressão diametral 82
Figura 53 – Ensaio de módulo de deformação 83
Figura 54 – Corpos de prova moldados para o ensaio de retração linear de secagem 84
Figura 55 – (a) Corpo de prova com os inserts; (b) Tomada de medida de retração 84
Figura 56 – aparelho utilizado para tomada de medidas de retração 85
Figura 57 – corpos de prova na estufa 85
Figura 58 – corpo de prova imerso em água 86
Figura 59 - Difratograma de raios-X da amostra de Tambaú 90
Figura 60 - Difratograma de raios-X da amostra de Porto Ferreira 91
Figura 61 - Difratograma de raios-X da amostra de Ubarana 91
Figura 62 - Difratograma de raios-X da amostra de Leme 92
Figura 63 - Difratograma de raios-X da amostra de Itu 92

Figura 64 - Ternário da composição química das massas cerâmicas 94
Figura 65 – Análise térmica diferencial da amostra de Tambaú 95
Figura 66 – Análise termogravimétrica da amostra de Tambaú 96
Figura 67 – Análise térmica diferencial da amostra de Porto Ferreira 96
Figura 68 – Análise termogravimétrica da amostra de Porto Ferreira 96
Figura 69 – Análise térmica diferencial da amostra de Ubarana 97
Figura 70 – Análise termogravimétrica da amostra de Ubarana 97
Figura 71 – Análise térmica diferencial da amostra de Leme 97
Figura 72 – Análise termogravimétrica da amostra de Leme 98
Figura 73 – Análise térmica diferencial da amostra de Itu 98
Figura 74 – Análise termogravimétrica da amostra de Itu 98
Figura 75 - Diagrama de gresificação dos corpos de provas de Tambaú 104
Figura 76 - Diagrama de gresificação dos corpos de provas de Porto Ferreira 105
Figura 77 - Diagrama de gresificação dos corpos de provas de Ubarana 105
Figura 78 - Diagrama de gresificação dos corpos de provas de Leme 105
Figura 79 - Diagrama de gresificação dos corpos de provas de Itu 106
Figura 80 - Absorção de água e porosidade aparente dos corpos de prova queimados à 800 ^{o}C. 107
Figura 81 - Absorção de água e porosidade aparente dos corpos de prova queimados à 900 ^{o}C. 107
Figura 82 - Absorção de água e porosidade aparente dos corpos de prova queimados à 1000 ^{o}C. 108
Figura 83 – Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto com 91 dias de idade 115
Figura 84 – Evolução da resistência à compressão com o aumento da idade 116
Figura 85 – Fator de eficiência (Fe) dos corpos de prova de concreto aos 91 dias de idade 117
Figura 86 – Absorção de água dos corpos de prova de concreto 121
Figura 87 – Evolução da retração linear de secagem dos corpos de prova de concreto 122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição granulométrica dos produtos de cerâmica vermelha. FONTE: PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997 17
Tabela 2 - Água de plasticidade para conformação de argilas de acordo com o argilomineral presente nas amostras. FONTE: WHITE, 1949, 1965 apud in SANTOS, 1989a 20
Tabela 3 – Valores de resistência à compressão de acordo com a massa específica aparente dos concretos 34
Tabela 4 – Tipos de agregados leves utilizados nos diferentes países. FONTE: EuroLightCon, 2000b 38
Tabela 5 – Processo de fabricação de agregados leves de argila expandida 39
Tabela 6 – Propriedades dos agregados leves de argila expandida nacional. FONTE: Rossignolo, 2009a 41
Tabela 7 – Relações entre a resistência à compressão e as resistências a tração por compressão diametral e por flexão dos concretos leves. FONTE: ROSSIGNOLO, 2009a. 47
Tabela 8 – Equações para o cálculo do módulo de deformação em concretos leves. FONTE: ROSSIGNOLO, 2009a 48
Tabela 9 - Resumo do programa experimental 51
Tabela 10 - Ensaios químicos e físicos realizados nas matérias primas 52
Tabela 11 - Umidade das amostras de solo 65
Tabela 12 - Legenda de identificação dos locais de extração das matérias primas das amostras 65
Tabela 13 - Legenda de identificação da temperatura de queima das amostras 66
Tabela 14 - Legenda de identificação do número das amostras 66
Tabela 15 – Valores do teor de umidade e dos limites de plasticidade das amostras para extrusão 68
Tabela 16 - Ensaios realizados nos corpos de prova queimados 69
Tabela 17 – Características e propriedades do cimento CPII-Z-32 76
Tabela 18 – Características físicas dos agregados graúdos utilizados nos corpos de prova de concreto 76
Tabela 19 – Consumos teóricos de cimento, areia, agregado e água para a moldagem dos corpos de prova de concreto 77
Tabela 20 - Consumos reais de cimento, areia, agregado e água para a moldagem dos corpos de prova de concreto 77
Tabela 21 – Ensaios realizados nos corpos de prova de concreto 78
Tabela 22 - Limites de consistência e massas específicas aparentes das matérias primas coletadas 88
Tabela 23 - Resultados da análise granulométrica nas matérias primas coletadas 89
Tabela 24 - Composição química das amostras obtida através do ensaio de FRX (% de massa) 93
Tabela 25 - Resultados obtidos através das análises térmicas 100
Tabela 26 - Retração linear dos corpos de prova queimados 101
Tabela 27 - Porosidade aparente e absorção de água dos corpos de prova queimados 103
Tabela 28 - Porosidade aparente e absorção de água das peças queimadas em função da viscosidade da matéria fundente 109

Tabela 29 - Expansão por umidade e massa específica aparente dos corpos de prova ensaiados 110
Tabela 30 - Resistência à compressão dos corpos de prova 112
Tabela 31 – Consumo de materiais (real), massa específica fresca, slump e teor de ar incorporado nos corpos de prova de concreto 114
Tabela 32 – Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto 115
Tabela 33 – Massa específica aparente e fator de eficiência dos corpos de prova de concreto (91 dias) 117
Tabela 34 - Valores de resistência à tração dos corpos de prova de concreto 118
Tabela 35 – Relação entre os valores experimentais e teóricos de resistência à tração dos corpos de prova 119
Tabela 36 – Módulo de deformação dos corpos de prova de concreto 119
Tabela 37 – Relação entre os valores experimentais e teóricos dos módulos de deformação dos corpos de prova de concreto 120
Tabela 38 – Absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova de concreto 121
Tabela 39 – Retração linear de secagem dos corpos de prova de concreto 122
Tabela 40 – Estimativa da retração linear de secagem final dos corpos de prova de concreto 124

RESUMO

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.

Este trabalho tem por objetivo o estudo da viabilidade da utilização de cerâmica vermelha para a confecção de agregados leves de argila calcinada para utilização em concretos estruturais. Inicialmente, foram coletadas amostras de solo de cinco diferentes empresas produtoras de cerâmica vermelha do estado de São Paulo. As massas cerâmicas foram caracterizadas por meio das técnicas de limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), análise granulométrica, análise química e difração de raios X (DRX). Os corpos de prova confeccionados com essas massas cerâmicas, 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 cerâmica vermelha, foram escolhidas duas amostras para a confecção dos agregados leves de argila calcinada. Os corpos de prova de concreto leve foram caracterizados pelos ensaios de slump, massa específica fresca, teor de ar incorporado, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de deformação, retração por secagem, absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente. Os resultados desta pesquisa indicaram a viabilidade da produção de agregados leves de argila calcinada para utilização em concretos e os valores da massa específica (1.555 a 1.785 kg/m^3) e da resistência à compressão (18,0 a 55,8 MPa) apresentaram-se em um patamar intermediário entre os valores observados para concretos com argila expandida e com basalto.

Palavras chave: massas cerâmicas, agregados leves, argila calcinada, concretos leves

ABSTRACT

SANTIS, B. C. Calcined clay lightweight aggregate for use in structural concrete: Viability of São Paulo state red ceramic. 2012. 132 p. Dissertation (Masters). Institute of Architecture and urbanismo of São Carlos, São Paulo's university, São Carlos, 2012.

This paper aims the study the viability of using red ceramic to make calcined clay lightweight aggregates in order to use in structural concrete. At first, soil sample were collected from five different red ceramic producing companies from São Paulo State. The ceramic materials were characterized by techniques of liquid and plastic limits, particle size analysis, chemical analysis and X-ray diffraction (XRD). The specimens made from these ceramic materials, 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 the red ceramic specimens characterization, two samples were chosen for the manufacture of calcined clay lightweight aggregates. Specimens of lightweight concrete were characterized by slump test, fresh specific mass, incorporated air content, compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, water absorption, voids and bulk density. Results of this research indicated the viability of production of calcined clay lightweight aggregate for use in concrete and the values of specific mass (1.555 and 1.785 Kg/m^3) and compressive strength (18,0 to 55,8 MPa) presented at a intermediated level between those observed for the expanded clay and basalt.

Key words: ceramic material, lightweight aggregate, calcined clay, lightweight concrete

1. INTRODUÇÃO

Pode-se afirmar que o peso das estruturas em concreto armado é elevado quando comparado às cargas aplicadas, especialmente em estruturas de grandes vãos, como as pontes e em edifícios de múltiplos pavimentos. Nesses casos, melhorias consideráveis no desempenho da estrutura em concreto podem ser geradas com a redução do peso total, por exemplo, com o uso de agregados leves (ROSSIGNOLO, 2009a).

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, como edificações pré-fabricadas, pontes e plataformas marítimas. A ampla utilização desse material em todo o mundo 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 GJϕRV, 1991; HOLM e BREMNER, 1994; ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005; ROSSIGNOLO, 2009a).

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 et al., 2001; ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2002 e 2004; ROSSIGNOLO e FERRARI, 2006; ROSSIGNOLO, 2003, 2005, 2007, 2009b).

Entretanto, pode-se afirmar que no Brasil a utilização dos concretos com agregados leves ainda é modesta, frente ao seu potencial de utilização, estando concentrada no estado de São Paulo e em estados vizinhos, dada a localização da fábrica de argila expandida CINEXPAN, em Várzea Paulista – SP, único fabricando de agregados leves no país. Desde o início da produção de argila expandida no Brasil, em 1968, a maioria das aplicações dos concretos leves estruturais no setor da construção civil nacional ocorre em elementos estruturais pré-fabricados e na estrutura de edificações de múltiplos pavimentos moldado in loco, em especial nas lajes (TEZUKA, 1973; SOBRAL, 1996; EVANGELISTA et al., 1996; ROSSIGNOLO, 2009a).

Uma alternativa para disseminar a tecnologia do concreto leve estrutural por todo território nacional seria a produção de agregados leves de argila calcinada, utilizando a

cerâmica vermelha, tendo como referencial estudos preliminares de Cabral (2005), Cabral et al.(2008), Soares et al. (1998), Santos (2007) e Nascimento (2005), que indicam a viabilidade de produção e utilização desse tipo de agregado leve na construção civil e o parque industrial de cerâmica vermelha já instalado no país, que segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (SEBRAE, 2008) representa cerca de 11.000 empresas espalhados por todo o território nacional. Essas empresas estariam aptas a produzir agregados leves artificiais de argila calcinada, como mais um produto comercial, com pequenos ajustes em seu processo produtivo.

Desde meados da década de 80 o Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – DNER desenvolve pesquisas sobre a utilização de agregados de argila calcinada de cerâmica vermelha para aplicação em concreto asfáltico, em especial para a região norte do país considerando a escassez de agregados naturais. Os resultados dessas pesquisas indicaram a viabilidade da aplicação da argila calcinada em pavimentos asfálticos e resultaram na publicação de documentos normativos (DNER-ES 227/89; DNER-EM 230/94; DNER-ME 225/94) para fixar as condições dessa utilização.

Estudos realizados nos últimos dez anos corroboraram os resultados obtidos nas pesquisas do DNER sobre a viabilidade da aplicação dos agregados de argila calcinada de cerâmica vermelha em concreto asfáltico (SOARES et al. 1998; COSTA et al.; 2000; VIEIRA; 2000; BATISTA et al., 2004; CABRAL, 2005; NASCIMENTO, 2005; FROTA et al., 2006; SANTOS, 2007)

Vislumbrando a aplicação da argila calcinada de cerâmica vermelha em concreto de cimento Portland, Cabral et al. (2008) desenvolveram um estudo sobre essa aplicação e os resultados preliminares indicam a viabilidade da utilização de agregados de argila calcinada em concretos estruturais. Esse estudo, realizado com solos do estado do Amazonas, indicou 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.

Na pesquisa desenvolvida por Cabral et al. (2008), foram confeccionados agregados de argila calcinada com dimensão máxima de 12,5mm, massa específica igual a 1.730kg/m^3 e absorção de água de 18,9% em massa após 24 horas de imersão. Os concretos dosados com esse agregado, com consumo de cimento entre 350 e 390 kg/m3, apresentaram valores de resistência à compressão em torno de 28MPa aos 28 dias.

Os resultados obtidos por Cabral et al. (2008) assim como os resultados das pesquisas sobre aplicação da argila calcinada em concreto asfáltico, indicam a viabilidade da utilização da cerâmica vermelha para produção de agregados leves para concreto estrutural, considerando os baixos valores de massa específica desse agregado, cerca da 50% dos observados para os agregados graúdos convencionais (da ordem de 3.000kg/m3).

Entretanto esse assunto merece um aprofundamento significativo para se obter resultados conclusivos sobre a viabilidade técnica e econômica da aplicação de agregados artificiais de argila calcinada, utilizando cerâmica vermelha, em concreto estrutural.

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho é avaliar a viabilidade da utilização da cerâmica vermelha, com foco inicial nos solos da região central do estado de São Paulo, para a produção de agregados leves de argila calcinada para utilização em concreto estrutural. Para isso, desenvolveu-se um programa experimental amplo, englobando a seleção e caracterização das amostras de solos, a produção e a caracterização dos agregados de argila calcinada assim como a avaliação da influência desses agregados no desempenho dos concretos.

1.1 JUSTIFICATIVAS

A proposta de estudo apresentada nesse projeto de pesquisa justifica-se pelos seguintes motivos:

- Necessidade de desenvolvimento de agregados leves alternativos à argila expandida, atualmente único agregado leve produzido no país;
- Pesquisas preliminares que indicam a viabilidade da produção de agregados artificiais de argila calcinada de cerâmica vermelha;
- 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 viabilizar a tecnologia do concreto leve estrutural para todo o território nacional.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa apresenta como objetivo a análise da viabilidade da utilização da cerâmica vermelha para a produção de agregados leves de argila calcinada para utilização em concreto estrutural.

2. CERÂMICA VERMELHA

2.1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Enciclopédia Itaú Cultural, o termo argila, que descende do grego (*"Keramos")*, refere-se à manufatura de objetos em barro, em estado plástico, para posterior cozimento. A cerâmica pode ser classificada, de acordo com o material utilizado e a técnica empregada para sua produção, em:

- terracota (peça de argila cozida no forno, sem ser vidrada);
- cerâmica vidrada (cuja peça mais comum é o azulejo);
- grés (cerâmica vidrada, às vezes pintada);
- Faiança, termo que significa louça fina obtida de pasta porosa cozida em altas temperaturas, envernizada ou revestida de esmalte e pintura.

A história da cerâmica acompanha a história das civilizações, desde a descoberta do fogo. A argila queimada sempre foi utilizada em todas as sociedades - das mais antigas às consideradas "primitivas", passando pelo Oriente e Ocidente - para a realização de objetos decorativos, utilitários e outros de fins rituais. Os estudiosos localizam as primeiras cerâmicas no século 5.000 a.C., na região de Anatólia (Ásia Menor), que passam a integrar, a partir daí, as mais diversas culturas, distantes no tempo e no espaço. Em cada uma delas, por sua vez, alcança diferentes segmentos sociais: das camadas mais pobres e inferiores na hierarquia social, aos estratos superiores. Na Grécia, entre 1.000 e 330 a.C., oleiros e decoradores, sempre homens, realizavam peças de cerâmica, pintadas em geral com cenas de batalhas e de conquistas. A cerâmica chinesa, entre 550 e 480 a.C., liga-se à tradição religiosa, aos ritos e cultos. O viajante Marco Polo (1254 - 1354) chamava a atenção para a beleza da porcelana chinesa, que se difundiu na Europa através de Veneza, nos séculos XIV e XV. Não apenas objetos, mas também técnicas chinesas chegaram ao Ocidente, que começou a fazer uso delas já no século XVI. Os procedimentos de confecção da porcelana chinesa chegaram logo ao Japão, que auxiliou também a difundi-los (SEBRAE, 2008).

No Brasil, há mais de 2000 anos, antes mesmo da sua "descoberta" pelos portugueses, já existia a atividade de fabricação de cerâmicas, representada por potes, baixelas e outros artefatos cerâmicos simples moldados pelos indígenas.

A cerâmica mais elaborada foi encontrada na Ilha de Marajó, do tipo marajoara, com sua origem na avançada cultura indígena da Ilha. Entretanto, estudos arqueológicos indicam que a presença de uma cerâmica mais simples ocorreu na região amazônica, há mais de 5000 anos.

No que tange à cerâmica vermelha, as escassas e imprecisas informações referem-se à utilização no período Colonial, a partir de técnicas de produção rudimentares introduzidas pelos jesuítas, que necessitavam de tijolos para construção de colégios e conventos. A partir de 1549, com a chegada de Tomé de Sousa ao País, estimulou-se a produção de material de construção para o desenvolvimento das cidades mais bem planejadas e elaboradas (SEBRAE, 2008).

Existem indícios de que, em 1575, utilizaram-se telhas para a formação de uma vila, que posteriormente viria a ser a cidade de São Paulo. A partir de então, começou-se o desenvolvimento das atividades cerâmicas de forma mais intensa, sendo as olarias o marco inicial da indústria cerâmica Paulista.

Nas últimas décadas do século XIX, a produção nas olarias se dava por meio de processos manuais, em pequenos estabelecimentos, que tinham como produto final tijolos, telhas, tubos, manilhas, vasos, potes e moringas, os quais eram comercializados nos comércios locais (SEBRAE, 2008).

A primeira grande fábrica de produtos cerâmicos do Brasil foi fundada em São Paulo, em 1893, por quatro irmãos franceses, naturais de Marselha, com o nome de “Estabelecimentos Sacoman Frères”, posteriormente alterado para “Cerâmica Sacoman S.A.”, a qual encerrou suas atividades em 1956. O nome das telhas conhecidas por “francesas” ou “marselhesas” é devido à origem dos quatro empresários.

Nos últimos anos do século XIX e início do XX houve um processo de especialização nas empresas cerâmicas, o que gerou uma separação entre olarias (produtoras de tijolos e telhas) e “cerâmicas” (produtoras de itens mais sofisticados, como manilhas, tubos, azulejos, louças, potes, talhas etc.). A figura 1 ilustra alguns dos produtos cerâmicos, com suas matérias primas e formas de produção (SEBRAE, 2008).

Classificação			Produto	Matéria-prima									Moagem via úmida	Moagem via seca	Processo de				Temperatura de Queima (C)					
							Não -Plástica																	
Tipo de	Grupo**/ Setor			Argila	Argila	Caulim	Feldspato	Filito	Talco	Calcário	Quartzo	Outros			Extrusão	Tornearia	Prensagem	Colagem	800	900	1.000	1.100	1.200	> 1.200
Cerâmica silicática de base argilosa (ou tradicional)	1	Cerâmica Vermelha	Blocos, lages	P											P									
			Telha	P				O							P		P							
			Agregado leve	P								O			P									
	2	Cerâmica Branca	Grês Sanitário		P	S	P		O		S	O	P											
			Porcelana Mesa		P		P				P		P		S	S		O						
			Porcelana Eletr.		P		P				P		P		S	S		O						
			Faiança		P	O	S	S	S	P	S		P					P						
	3	Revesti-mentos	Pisos Rústicos	P								O			P									
			Pisos via Seca	P										P			P							
			Azulejo		P	P			O	S	S		P				P							
			Piso Gresificado	O	P	S	S	P	O		S		P		O		P							
			Grês Porcelânico		P	S	P		O		S	O	P				P							
Outros	4	Refratários				O					O	P												
	5	Isolantes					O				O	P												
	6	Especiais									O	P												
	7	Cimento		S						P	S	O		P										
	8	Vidro								S	P	P												
P = Processo ou composição principal (> 20 %)				S = Processo ou composição segundária (< 10%)											O = Processo ou composição ocasional									

(*) e (**) Classificação de Schuller & Henniche apud in Motta et al. 2001
(***) Feldspato, ou concentrado de feldspato é usado apenas nas porcelanas e, eventualmente, no grés porcelânico, enquanto que nos demais produtos são utilizadas rochas feldspáticas.

Figura 1 - Principais produtos cerâmicos, suas matérias primas e formas de produção. FONTE: MOTTA et al. 2001 apud in SEBRAE, 2008

As argilas de queima vermelha ou argilas comuns são as que mais se destacam no mercado nacional entre outras substancias minerais, em função do volume de produção e do maior consumo, sendo especialmente utilizadas na produção de cerâmica vermelha e de revestimento.

A Associação Brasileira de Cerâmica, ABC, contabiliza que, especificadamente para a cerâmica vermelha, existem cerca de 11.000 empresas de pequeno porte distribuídas em todo o território nacional, empregando cerca de 300.000 pessoas e gerando um faturamento da ordem de R$ 2,8 bilhões, com uma produção de aproximadamente 70 milhões de toneladas ao ano (SEBRAE, 2008).

Porém, pela grande quantidade de empresas existentes, pelo pequeno tamanho dessas empresas, e pela grande informalidade do setor, destaca-se aqui que o mercado carece de dados precisos quanto aos valores de produção. Um estudo realizado pela União Nacional da Construção, UNC, em 2006, aponta que 22,5% do valor adicionado ao PIB daquele ano pelo setor de construção civil foi oriundo de atividades informais (SEBRAE, 2008).

No início do século XIX, a indústria cerâmica brasileira participava com aproximadamente 1% do PIB nacional, sendo aproximadamente 40% desta participação representada pelo setor de cerâmica vermelha estrutural (BUSTAMANTE e BRESSIANI, 2000).

Por se tratar de uma matéria prima de baixo valor agregado, considera-se inviável seu transporte a grandes distâncias, o que gera um grande número de pequenas indústrias espalhadas uniformemente por todo território nacional. De acordo com SEBRAE, 2008, o raio médio de envio de produtos de cerâmica vermelha é de 250 Km, sendo que para telhas esse valor pode chegar a até 700 Km, no caso de telhas especiais.

Pela sua matéria prima ser de tão baixo valor agregado, as empresas deste setor se localizam próximas à sua fonte, grandes reservas de argila vermelham que se distribuem por praticamente todas as regiões do país. Deste modo, existem inúmeras fábricas, que são, em sua grande maioria, de mini e micro porte, que ainda utilizam técnicas rudimentares em todo o processo produtivo.

Destaca-se aqui que, pela grande quantidade de empresas existentes e principalmente pelo pequeno tamanho dessas empresas, o mercado ainda carece de dados mais precisos quanto aos valores de produção dos produtos de cerâmica vermelha.

2.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PRODUTOS DE CERÂMICA VERMELHA

No Brasil, estima-se que existam cerca de 11.000 unidades produtoras de peças de cerâmica vermelha (SEBRAE, 2008) e, a grande maioria dessas empresas são empresas familiares de pequeno porte, com produção pouco industrializada. Porém, as etapas do processo de produção de produtos de cerâmica vermelha são as mesmas, independentemente do porte das empresas produtoras, sendo que, nas pequenas

empresas, normalmente a produção é manual e com baixo controle tecnológico e, nas grandes empresas, a produção e industrializada e com alto controle tecnológico.

O processo de produção de produtos de cerâmica vermelha está dividido em cinco grandes etapas, sendo elas: coleta da matéria prima, beneficiamento, conformação, tratamento térmico e transporte final.

A conformação dos produtos cerâmicos difere da conformação dos produtos metálicos pois, como os produtos cerâmicos são produtos frágeis, passiveis de fissuras quando submetidos à esforços, eles não podem ser conformados por processos de deformação, como ocorre com os produtos metálicos (CABRAL, 2005).

a) Coleta ou extração da matéria prima

A coleta de matéria prima acontece, normalmente, em locais próximos das empresas produtoras, ou até mesmo dentro das próprias empresas. As matérias primas coletadas são armazenadas, algumas vezes a céu aberto, no caso de algumas pequenas empresas, ou em grandes galpões cobertos, no caso de grandes empresas. Normalmente, as empresas utilizam mais de um tipo de matéria prima e, com isso, existem diferentes locais de armazenamento, para que não haja uma mistura das matérias durante a armazenagem, conforme ilustrado na figura 2.

Figura 2 - Armazenamento de matéria prima em uma pequena e em uma grande empresa

A extração da matéria prima é feita utilizando-se maquinários pesados, ou seja, retro-escavadeiras ou equipamentos similares, normalmente a céu aberto.

Na etapa de extração da matéria prima, a conscientização ambiental deve gerar esforços para tornar o processo de coleta um processo mais racional. A utilização de novas tecnologias na coleta da matéria prima é de fundamental importância para a transformação

desse processo, assim como o monitoramento das jazidas para o controle de esgotamento e reposição do solo arável (CABRAL, 2005).

b) Beneficiamento

A etapa de beneficiamento é dividida em britagem e moagem, dosagem, desintegração, mistura e laminação da massa.

Segundo Cabral (2005), a estocagem de matéria prima argilosa a céu aberto traz algumas vantagens, causadas pelo processo de intemperismo (sol e chuva), no produto final de cerâmica vermelha, aliviando as tensões nos produtos conformados, melhorando a homogeneidade e a trabalhabilidade da argila, assim como a umidade das massas.

A britagem e moagem ocorrem quando as matérias primas são “duras” e, por isso, necessitam passar por um primeiro destorroamento, a fim de se diminuir, grosseiramente, o tamanho dos grãos do solo. Quando as matérias primas são “moles”, os processos de britagem e moagem podem ser eliminados do processo.

Após a britagem e moagem, os solos passam pelo processo de dosagem, que consiste em se separar, proporcionalmente, quantidades distintas de diferentes matérias primas, para se obter a mistura ideal. Após a dosagem, inicia-se a etapa de desintegração, em que os torrões maiores são desmanchados e o solo fica pronto para a mistura.

Na mistura, em alguns casos se faz necessário o acréscimo de água, para se atingir um teor de umidade que propicie a fabricação das peças. Geralmente nessa etapa, mistura-se um solo “gordo”, ou seja, com muita matéria orgânica e conseqüentemente com alta plasticidade com um solo “magro”, rico em quartzo e de baixa plasticidade.

Após a mistura, a massa passa pelo processo de homogeneização, feito manualmente ou por pás carregadeiras. Após a homogeneização, as massas passam pelo processo de laminação, em que a mistura é “amassada”, ou seja, comprimida, melhorando a sua homogeneização.

A conformação, terceira etapa do processo, consiste na extrusão e corte das peças. Nessa etapa, a mistura passará de massa disforme para uma peça com forma definida. Esta etapa é constituída pela extrusão da massa, em que se coloca a massa misturada em uma extrusora (ou “maromba”) e, com o auxílio de uma boquilha colocada na saída da extrusora, a massa toma uma forma definida, de acordo com o produto a ser produzido. Conforme o produto é extrudado, ele é cortado, adquirindo sua forma final.

De acordo com Cabral (2005), existem três diferentes sistemas para extrusão, sendo eles:

- Pistão: confere grande uniformidade de velocidade e pressão na saída da massa, porém, não pode ser utilizado à vácuo pois não tem fluxo contínuo;
- Cilindros: apresenta diferenças de velocidade e pressão na seção de saída da massa e não confere boa homogeneização da mistura. Porém, por apresentar fluxo contínuo de alimentação, permite sua utilização à vácuo;
- Hélice: permite utilização à vácuo, confere boa homogeneização à massa e também uma boa distribuição de pressão na saída do material.

c) Tratamento térmico e expedição

Após a etapa de conformação, inicia-se a etapa de tratamento térmico das peças. Na produção das telhas, essa etapa é precedida por uma prensagem das peças, tornando-as mais compactas e homogêneas. A etapa de tratamento térmico é dividida em duas fases, a secagem e a queima.

A secagem é uma das etapas mais delicadas do processo de produção de produtos cerâmicos. Esta etapa consiste na eliminação da água de conformação das peças, sendo que ela pode ser feita em estufas, no próprio forno de queima (que serve como estufa) ou em galpões abertos, ao ar livre, como ocorre em muitas das pequenas empresas, como ilustra a figura 3.

Segundo Cabral (2005), quando se utiliza a secagem em estufa, é recomendável a análise da curva de *Bigot*[1] das argilas, para se conhecer o momento em que se é permitido acelerar a secagem, sem causar danos nos produtos finais.

[1] A curva de *Bigot* é uma representação gráfica da retração linear de secagem em função da perda de água das massas cerâmicas conformadas.

Figura 3 - Peças secando ao ar livre com o auxílio de ventiladores

Depois de secas, as peças partem para o processo de queima[2], que é feito em fornos tipo túnel – em grandes empresas – ou em fornos de barro, sem controle preciso de temperatura – normalmente em pequenas empresas. A figura 4 ilustra blocos cerâmicos sendo queimados em um forno de barro.

Figura 4 - Blocos cerâmicos sendo queimados em forno de barro

Segundo Cabral (2005), a queima é a operação fundamental e que define as características dos produtos cerâmicos, já que é nessa fase que eles sofrem transformações físico-químicas que alteram suas propriedades mecânicas.

Depois de queimadas, as peças passam pelo processo de inspeção, que normalmente é visual, para em seguida serem encaminhadas para o estoque e por fim a

[2] Por motivos didáticos, neste trabalho se utilizará a palavra queima ao invés de calcinação, que corresponde à queima em altas temperaturas, ocasionando uma mudança na estrutura do objeto queimado

expedição. Nas grandes empresas esses processos são mais controlados que nas pequenas empresas sendo o estoque também mais organizado e bem dimensionado, conforme ilustra a figura 5.

Figura 5 - Estoque de blocos cerâmicos em uma grande empresa

A figura 6 ilustra um diagrama com todas as etapas do processo produtivo de produtos de cerâmica vermelha.

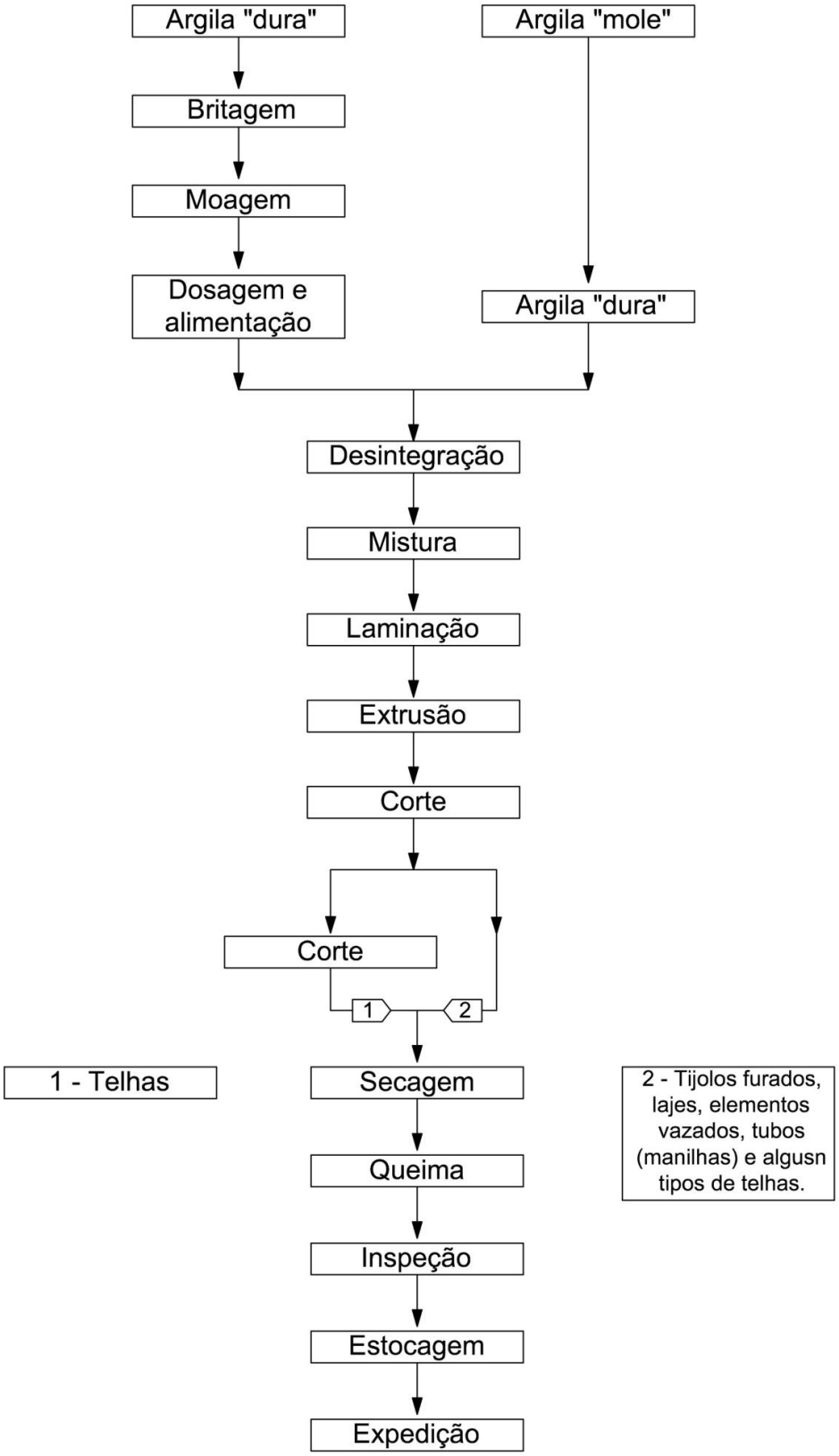


Figura 6 - Fluxograma do processo de produção de produtos de cerâmica vermelha. FONTE: SEBRAE, 2008

2.3 PROPRIEDADES DA CERÂMICA VERMELHA

Por apresentar melhoria de desempenho da resistência mecânica após a queima, ser facilmente moldável na presença de água em quantidades adequadas, por ser de fácil processamento e, principalmente, ser disponível em grandes quantidades e em quase todo o território nacional, mesmo que com diferentes qualidades, os solos com tamanho de grãos inferiores à 2 μm , classificados como argilosos são a principal matéria prima para a confecção de peças cerâmicas[3] (VIEIRA et al. 2000).

Porém, as matérias primas (solos) utilizadas para a fabricação de peças cerâmicas são muito heterogêneas, visto que são extraídas diretamente da natureza, com baixo nível de controle e, por isso, apresentam diversos tamanhos de grãos de partículas, presença de muita matéria orgânica e impurezas.

Devido à grande variabilidade de características dos solos e também pela necessidade de se produzir peças com padrões normativos, mostra-se de fundamental importância conhecer as influências que alguns aspectos, como a plasticidade, o teor de umidade, a absorção de água e a temperatura de queima podem causar nas propriedades dos produtos cerâmicos.

Vários são os ensaios a serem realizados na matéria prima argilosa e nas peças de cerâmica vermelha para a determinação de suas características. Esses ensaios dividem-se em dois grandes grupos: antes da queima, na matéria prima, e após a queima, nas peças cerâmicas.

Os ensaios realizados na matéria prima têm por objetivo a determinação das características envolvidas no processo de produção de produtos cerâmicos, com o intuito de se conhecer as diferentes matérias utilizadas, obtendo-se as melhores configurações de misturas para a produção. Os ensaios mais utilizados são:

- Análise granulométrica;
- Determinação da umidade natural;
- Determinação dos limites de consistência (Limite de plasticidade e de liquidez);

[3] Neste trabalho, as palavras peças cerâmicas referem-se à blocos e tijolos, telhas comuns e especiais e manilhas cerâmicas

- Análise química (espectrometria e fluorescência de raios-x);
- Análise térmica diferencial;
- Análise termogravimétrica;
- Difração de raios-x.

Já os ensaios realizados nas peças cerâmicas têm como objetivo analisar as características e propriedades dos produtos finais de cerâmica vermelha, observando seus comportamentos quando submetidos à diferentes solicitações, comparando-os com parâmetros normativos mínimos para cada tipo de produto de cerâmica vermelha.

2.3.1 ENSAIOS REALIZADOS NA MATÉRIA PRIMA

As propriedades dos produtos cerâmicos e as suas características dependem da natureza e da quantidade dos minerais (compostos químicos) presentes em suas matérias primas e de outros parâmetros próprios da matéria prima como a granulometria, o comportamento térmico e o comportamento em presença de água (GRUN, 2007).

Portanto, faz-se de fundamental importância se conhecer todas as características das matérias primas utilizadas para a fabricação de produtos cerâmicos. Essas características podem ser obtidas através das seguintes análises:

a) Análise granulométrica

A análise granulométrica consiste em, basicamente, se determinar os tamanhos das diferentes partículas constituintes de uma amostra. Com a análise granulométrica busca-se determinar a quantidade de cada uma das diferentes matérias constituintes de cada amostra.

Normalmente, as matérias primas coletadas e utilizadas para a produção de produtos de cerâmica vermelha apresentam diferentes materiais em sua composição. Além disso, uma peça de cerâmica vermelha que apresenta um desempenho adequado é, normalmente, obtida a partir da junção de vários tipos de materiais em quantidades pré-determinadas, obtendo-se assim, uma peça com as características ideais ou mais próximas

de ideais para cada tipo de utilização. Para a composição de uma massa cerâmica[4] a partir de diversos tipos de materiais, utiliza-se o diagrama de Winkler.

De acordo com o diagrama de Winkler, é possível determinar a melhor composição granulométrica para a produção dos diferentes tipos de produtos cerâmicos, como ilustram a tabela 1 e a figura 7.

Tabela 1 - Composição granulométrica dos produtos de cerâmica vermelha. FONTE: PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997

Tipos de Produtos	Composição granulométrica (%)		
	<2 µm	2 µm a 20 µm	>20 µm
A - Materiais com dificuldade de produção	40 a 50	20 a 40	20 a 30
B - Telhas, capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
C - Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
D - Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	25 a 55

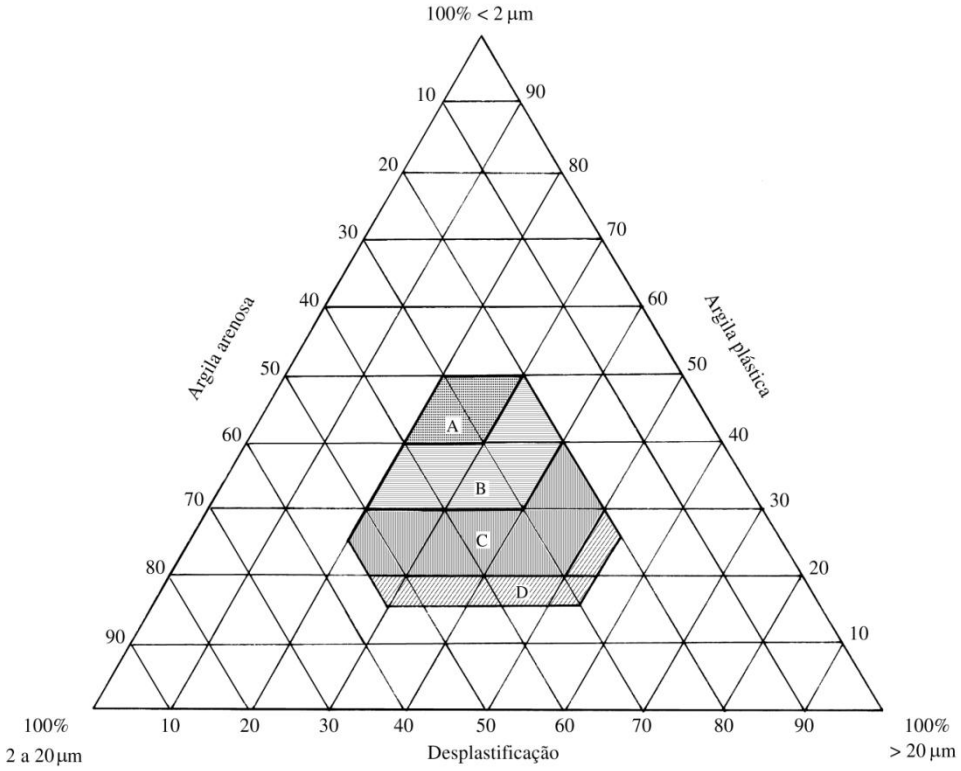


Figura 7 - Diagrama granulométrico de Winkler. FONTE: PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997

As argilas de granulometria muito fina, com diâmetro dos grãos menores que 2 µm, apresentam ótima plasticidade e uma boa resistência mecânica a seco, devido ao seu alto grau de compactação. Porém, elas necessitam de grandes quantidades de água para serem

[4] Massa cerâmica corresponde a um tipo de matéria prima ou à mistura de diferentes matérias primas, acrescidos de água para a conformação

processadas e, devido à boa compactação, essa água sofre dificuldades para ser eliminada durante o processo de secagem (PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997).

Por isso, uma massa cerâmica para a produção de produtos cerâmicos não pode ser constituída apenas de solos com de granulometria muito fina pois, apresentaria grandes dificuldades de processamento e de queima das peças (PÉREZ et al. 2010).

Portanto, é de fundamental importância a utilização dos ensaios de granulometria para se conhecer as quantidades de cada material presentes nos solos e, a partir desses valores, se obter uma mistura adequada para o processamento, conformação, queima e secagem dos produtos cerâmicos, atingindo-se assim os requisitos necessários do produto após a queima.

b) Determinação da umidade natural

O ensaio de determinação da umidade natural de solos consiste basicamente na pesagem do solo úmido (*"in natura"*) e após a secagem, normalmente em estufa. A umidade do solo dá-se pela diferença de peso entre as duas pesagens. Esse ensaio se faz importante para o conhecimento da quantidade de água existente no solo antes da conformação. Com esse dado, é possível se determinar a quantidade de água necessária para a conformação a partir do limite de plasticidade ou de liquidez de cada amostra de solo.

c) Limites de consistência

Os limites de consistência medem a plasticidade do material, ou seja, a capacidade de um material ou uma mistura de materiais de se deformarem, a partir da aplicação de uma força e de se manterem deformados quando da retirada dessa força. Os limites de consistência são divididos em limites de liquidez e de plasticidade, sendo que a diferença entre eles corresponde ao índice de plasticidade. O limites de liquidez e de plasticidade são obtidos através das Normas Brasileiras ABNT NBR 6459:1984 e 7180:1984, respectivamente.

De acordo com Santos (1989a), a plasticidade das argilas é resultante das forças de atração entre as partículas de argilominerais e das partículas de água. Ela se desenvolve quando a argila tem água cobrindo toda a superfície dos argilominerais, facilitando assim, o deslizamento das placas umas sobre as outras, quando da aplicação de uma força tangencial.

A plasticidade é um importante parâmetro para a cerâmica vermelha, já que indica as quantidades máximas e mínimas de água a serem adicionadas a uma mistura de solos para sua conformação. A adição de quantidades superiores de água pode não permitir a conformação da massa, por esta estar muito líquida e, pouca adição de água pode fazer com que a massa não tenha coesão suficiente para ser moldada e extrudada.

Os limites de consistência, ou limites de Attenberg são classificados em limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL) e, conhecendo-se esses limites, obtém-se o índice de plasticidade (IP) da amostra. O limite de plasticidade corresponde à quantidade mínima de água que deve ser adicionada à uma massa cerâmica para que ela possa ser conformada e, o limite de liquidez corresponde à quantidade máxima de água que pode ser adicionada à uma massa para ela poder ser conformada e o índice de plasticidade corresponde à diferença entre o limite de liquidez e o de plasticidade de uma amostra (VIEIRA et al. 2003a).

De acordo com Ribeiro et al. (2004), a plasticidade das argilas pode ser afetada pelo seu teor de água, a temperatura da água, a dimensão das partículas sólidas, a agregação e a área superficial dessas partículas, a origem das argilas e seus possíveis tratamentos térmicos.

De acordo com Wilson (1927, 1936) apud Santos (1989a), a plasticidade de minerais finamente moídos deve-se à presença de água na superfície das partículas. Minerais com destorroamento definido, ou seja, com clivagem ordenada de suas partículas têm maior plasticidade do que os minerais sem clivagem ordenada de suas partículas, já que a orientação das partículas de água é facilitada quando há uma orientação das partículas dos argilominerais. O autor conclui ainda que os argilominerais são os mais plásticos dentre os minerais de morfologia lamelar,

Segundo Pérez et al. (2010), os valores adequados para a moldagem por extrusão de peças cerâmicas são de 15% a 25% para o limite de plasticidade e de 10% a 35% para o índice de plasticidade, sendo que as amostras com índice de plasticidade superior a 15% podem ser classificadas como altamente plásticas.

De acordo com Santos (1989a), a água necessária para tornar uma argila moldável, ou seja, para uma argila atingir seu limite de plasticidade, á a água de plasticidade.

Matérias primas com um alto limite de plasticidade necessitam de maiores adições de água para serem extrudadas. Com isso, a etapa de secagem pode ser mais demorada e

problemática, gastando mais energia e aumentando o risco de defeitos nas peças (VIEIRA et al. 2003a).

Em contrapartida, matérias primas com baixo índice de plasticidade necessitam de pouca água para serem extrudadas. Com isso, o tempo de queima desses materiais pode ser diminuída, reduzindo-se assim possíveis defeitos causados durante a queima das peças, assim como o tempo gasto durante a queima e, conseqüentemente, os gastos de energia dessa etapa.

De acordo com White (1949, 1965) *apud* Santos (1989a), a quantidade de água para que uma argila adquira características plásticas depende dos diversos grupos de argilominerais existentes, como ilustra a tabela 2.

Tabela 2 - Água de plasticidade para conformação de argilas de acordo com o argilomineral presente nas amostras. FONTE: WHITE, 1949, 1965 apud in SANTOS, 1989a

Argilomineral	Água de plasticidade (%)
Caulinita	8,9 a 56,3
Ilita	17,0 a 38,5
Esmectita	82,9 a 250

Os solos com granulometria inferior à 2 μm (argilas) são materiais altamente plásticos e, em alguns casos, faz-se necessária a adição de materiais não plásticos (areias, micas, óxido de ferro e outros) para agirem como desplastificantes nas composições das massas cerâmicas (PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997).

Ainda de acordo com Pracidelli e Melchiades (1997), as argilas apresentam boa plasticidade, porém, normalmente necessitam de muita água para seu processamento. Além disso, por causa de seu alto grau de compactação, a eliminação da água durante a secagem é complicada. Com isso, a umidade da peça aumenta, provocando retrações e deformações, causando perdas e gastos extras durante o processo de produção. Por isso a importância da utilização de desplastificantes, que devem ter granulometria acima de 60 μm e serem utilizados em quantidades moderadas. Os desplastificantes mais utilizados são:

- Areia (granulometria entre 50 μm e 500 μm)
- Chamoto (granulometria entre 80 μm e 800 μm)
- Pó de carvão

Os desplastificantes provocam a desagregação das matérias primas das massas que é responsável pela criação dos poros, que auxiliam na eliminação da água das peças, tornando a etapa de secagem mais fácil de ser executada.

Porém, para a adição de desplastificantes ou até mesmo para a produção de massas, é de fundamental importância o conhecimento da granulometria das matérias primas utilizadas.

d) Difração de raios X (DRX)

Com o ensaio de difração de raios X, pode-se determinar os diferentes minerais cristalinos presentes em uma amostra de solo. O ensaio consiste na aplicação de raios X, variando o ângulo de incidência, em uma certa quantidade de amostra de solo colocada sobre uma placa de apoio. Os raios X entram em contato com a amostra e se difratam com uma angulação até atingirem um contador Geiger. O contador registra o ângulo θ e as difrações correspondentes a este ângulo θ (SANTOS, 1989a).

A identificação dos argilominerais presentes na amostra dá-se pela presença de picos no difratograma de raio x, como exemplificado na figura 8. Na figura, percebem-se picos claros que indicam a presença de caulinita (C) e quartzo (Q), com um pico muito acentuado próximo a 27º.

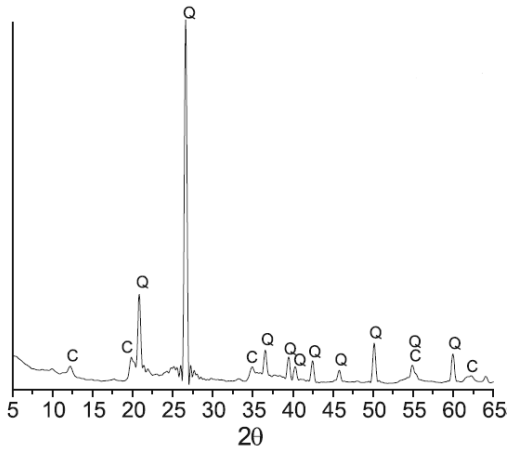


Figura 8 - Exemplo de difratograma de raios-X. FONTE: VIEIRA et al. 2003b

e) Espectrometria e fluorescência de raios X (FRX)

Além de análises granulométricas, a análise química dos materiais presentes na matéria prima do produto cerâmico é fundamental para a confecção de uma massa cerâmica com boas características de conformação e queima.

De acordo com Cabral (2005), utiliza-se a espectrometria de fluorescência de raios x pois, com este método, consegue-se uma análise química menos complexa e mais rápida, já que elimina-se a etapa da fusão e insolubilização da sílica, seguida por separação dos elementos.

De acordo com Vieira et al. (2003b), a presença em grandes quantidades de hidróxidos na massa não é recomendada pois, hidróxidos necessitam de muita energia para serem decompostos. Além disso, no caso da gibsita, acarreta uma maior refratariedade da massa, ocasionada pela liberação da alumina (Al_2O_3). Já a decomposição de hidróxidos de ferro libera Fe_2O_3, que se mantendo na forma oxidada, também aumenta a refratariedade da massa.

O conhecimento dessas características das massas cerâmicas para a fabricação de produtos de cerâmica vermelha é de fundamental importância para o controle de qualidade dos produtos finais, desde a confecção da massa para a produção até a queima dos produtos. Essas características têm grande influência durante o processo de produção, principalmente na etapa de queima dos produtos. Parâmetros como a absorção de água, retração linear, resistência mecânica e plasticidade estão diretamente ligados a essas características (PRACIDELLI e MELCHIADES, 1997).

Dentre os compostos obtidos na FRX, analisaremos os compostos abaixo por serem os mais comuns em massas cerâmicas:

- Dióxido de Silício (SiO_2)

Segundo Grun (2007), a existência de SiO_2 nas matérias primas indica a presença de silicatos e sílica livre. Os silicatos são os argilominerais, as micas e os feldspatos e, a sílica livre provém do quartzo, opala, ágata e calcedônia.

A presença de sílica livre em uma argila causa a redução da plasticidade da mesma, assim como a redução da retração linear das peças conformadas com essas argilas. Outra influência da sílica livre se dá no ponto de fusão das argilas. Argilas com grande presença de fundentes e também de sílica livre apresentam ponto de fusão mais elevado, ao passo que argilas com a mesma composição química, porém com sílica combinada, apresentam ponto de fusão mais baixo (CABRAL, 2005).

Já Grun (2007) explicita que a presença desse mesmo óxido na forma de quartzo durante o processo de sinterização pode gerar o aparecimento de defeitos nas peças (trincas), causada pela maior retração linear, o que pode acarretar uma maior absorção de

água e menor resistência à compressão das mesmas, causada pela transformação do quartzo α em quartzo β.

- Óxido de Alumínio (Al_2O_3)

A alumínia ou óxido de alumínio presente nas massas argilosas está, em sua maior parte, combinado formando os argilominerais, normalmente a caulinita. As massas com altos teores de alumínio em sua composição são denominadas de altamente aluminosas e são de interesse de utilização na fabricação de materiais refratários (SANTOS, 1989a).

- Dióxido de Titanio (TiO_2)

O dióxido de titânio está presente em quase todas as argilas, sendo que sua presença dá-se normalmente em argilas sedimentares. Em muitos dos casos, o dióxido de titânio encontra-se incluído no teor de Al_2O_3. Quando o dióxido de titânio apresenta-se em quantidades baixas, abaixo de 1%, praticamente não há alterações nas propriedades das argilas porém, quando encontram-se teores altos de TiO_2, a percentagem de $Al2O_3$ indicada na análise deixa de ter precisão, além da argila apresentar a coloração acinzentada (SANTOS, 1989a).

- Óxido de Ferro II e Óxido de Ferro III (FeO Fe_2O_3)

Os minerais de ferro mais freqüentemente encontrados nas argilas são a hematita, magnetita, limonita, lepidocrocita, goetita e pirita, sendo que suas principais características são a coloração avermelhada da argila queimada e a diminuição da refratariedade da mesma. As argilas que não contém óxido de ferro em suas composições geram produtos de cor branca (SANTOS, 1989a).

Segundo Grun (2007), a presença de ferro nas massas reduz a plasticidade das mesmas, assim como sua retração de secagem, facilitando esta etapa. A presença de ferro não fundido diminui a resistência mecânica dos produtos queimados mas, a pequena parte que se funde na sinterização proporciona dureza ao produto.

- Óxido de Cálcio e Óxido de Magnésio (CaO e MgO)

De acordo com Grun (2007), os óxidos de cálcio e magnésio são agentes fundentes e suas presenças nas massas cerâmicas tendem a diminuir sua refratariedade. Esses óxidos são, geralmente, provenientes de calcita, dolomita e gibsita e, na maioria das vezes, não são encontrados nas argilas cauliníticas rafratárias (CABRAL, 2005).

- Óxido de Sódio e Óxido de Potássio (Na_2O e K_2O)

Os óxidos de sódio e de potássio são quase que totalmente provenientes de feldspatos, micas ou cátions trocáveis. Normalmente, o teor de óxido de potássio é bem mais elevado que o de óxido de sódio nas argilas, devido à maior resistência ao intemperismo por parte dos minerais micáceos (SANTOS, 1989).

De acordo com Grun (2007), os óxidos de sódio e potássio são substâncias fundentes e suas presenças nas argilas conferem à elas uma maior resistência mecânica, quando queimadas a temperaturas entre a 950 e 1000 ºC.

- Perda o fogo (PF)

Segundo Grun (2007), a perda ao fogo é a diminuição do peso da peça queimada até um valor constante, indicando uma perda de massa em função do aumento de temperatura. A perda ao fogo dá-se, de acordo com Santos (1989), principalmente pela umidade das massas, além da perda da hidroxila dos hidróxidos, como $Al(OH)_3$ e $Fe(OH)_3$, presentes nas misturas.

Ainda de acordo com Grun (2007), a perda ao fogo indica o teor de matéria orgânica presente nas argilas, assim como a quantidade de gás e vapor formados durante a queima, resultantes da decomposição dos carbonatos (CO_2 e CO).

- Material fundente

Segundo Riella et al. (2002), a matéria fundente na queima de uma argila vermelha corresponde aos óxidos alcalinos (Na_2O e K_2O) e alcalino-terrosos (CaO e MgO).

A presença de material fundente nas massas cerâmicas é importante para diminuir a temperatura de formação da fase líquida durante a queima das peças e, com isso, preencher as cavidades dos corpos cerâmicos, diminuindo-se assim a porosidade dos mesmos. A viscosidade da fase líquida se da em função da proporção entre material vítreo (SiO_2 e Al_2O_3) e óxidos modificadores (Na_2O e K_2O), como ilustra a equação 1.

$$k = \frac{(SiO_2 + Al_2O_3)}{(Na_2O + K_2O)} \qquad (1)$$

Quanto maior o valor de K, maior a viscosidade da fase líquida e, conseqüentemente, menor os valores de porosidade do produto cerâmico.

f) Análise térmica diferencial (ATD)

De acordo com Santos (1989a), o método de análise térmica diferencial consiste no aquecimento, em velocidade constante, de uma argila, juntamente com uma substância termicamente inerte (geralmente o óxido de alumínio-alfa), registrando as diferenças de temperatura entre o padrão inerte e a argila em estudo, em função da tempertatura, assim pode-se observar reações características, endotérmicas ou exotérmicas

Com a análise térmica diferencial, é possível identificar e observar as transformações que geram trocas energéticas endotérmicas ou exotérmicas, devido a fenômenos físicos ou químicos. Para cada troca ocorre um pico no gráfico, que de acordo com sua direção e temperatura de ocorrência, pode-se identificar a transformação ocorrida na amostra ou o mineral presente, como ilustrado na figura 9 (GRUN, 2007).

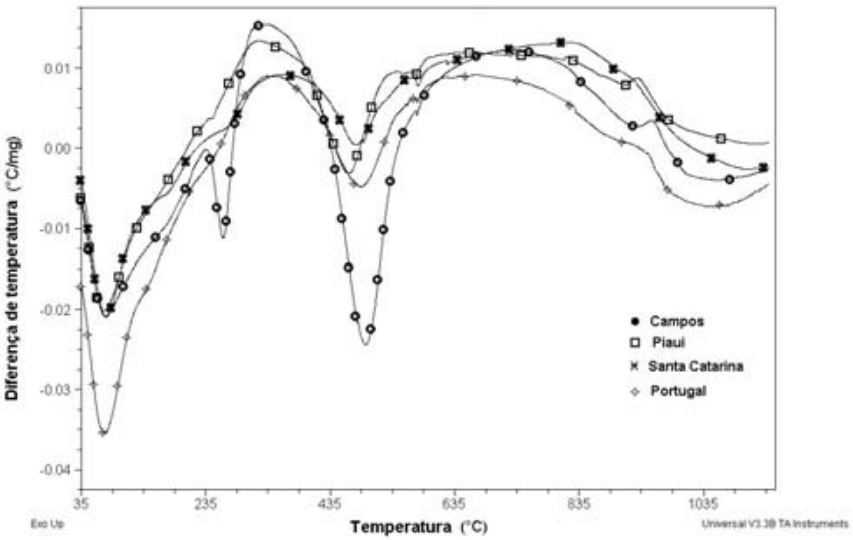


Figura 9 - Exemplo de análises térmicas diferenciais em amostras de solos argilosos. FONTE: VIEIRA et al. 2003b

Segundo Grun (2007), o método de análise térmica diferencial é muito utilizado no Brasil para o estudo de argilas, com a finalidade de identificação de argilominerais presentes nas amostras.

Segundo Oliveira e Maganha (2006), as reações provocadas nas várias etapas do ciclo de queima constituem, basicamente, as seguintes conversões físicas e químicas:

- Até 100°C: eliminação da água livre não eliminada totalmente na secagem;
- Até 200°C: elimina-se a água coloidal, que permanece intercalada entre as pequenas partículas de argila;

- De 350 a 650°C: combustão das substâncias orgânicas contidas na argila;
- De 450 a 650°C: decomposição da argila com liberação de vapor;
- 570°C: rápida transformação do quartzo;
- Acima de 700°C: reações químicas da sílica com a alumina, formando sílico-aluminatos complexos que dão ao corpo cerâmico suas características de dureza, estabilidade, resistência física e química;
- De 800 a 950°C: carbonatos se decompõem e liberam CO2;
- Acima de 1000°C: os sílico-aluminatos que estão em forma vítrea começam a amolecer, assimilando as partículas menores e menos fundentes, dando ao corpo maior dureza, compatibilidade e impermeabilidade.

De acordo com Santos (1989a), a análise térmica diferencial é de fundamental importância para estudos em cerâmica, já que com o aquecimento é possível se determinar as transformações que ocorrem nas argilas e nas massas cerâmicas durante a queima.

g) Análise termogravimétrica (TG)

A análise termogravimétrica consiste no aquecimento da amostra em uma velocidade constante, analisando-se a perda ou ganho de massa que a amostra sofre durante o acréscimo de temperatura. De acordo com Grun (2007), esse método complementa a análise térmica diferencial, pois ocorre uma distinção entre as reações em que ocorrem perda de massa e as reações em que não ocorrem.

Segundo Santos (1989a), a análise termogravimétrica não detecta transformações polimórficas (quartzo-alfa em quartzo-beta) pois, este tipo de transformação não envolve perda ou ganho de massa e sim uma perda ou ganho de energia. A figura 10 apresenta um exemplo de gráfico de análise termogravimétrica realizado em amostras de argila.

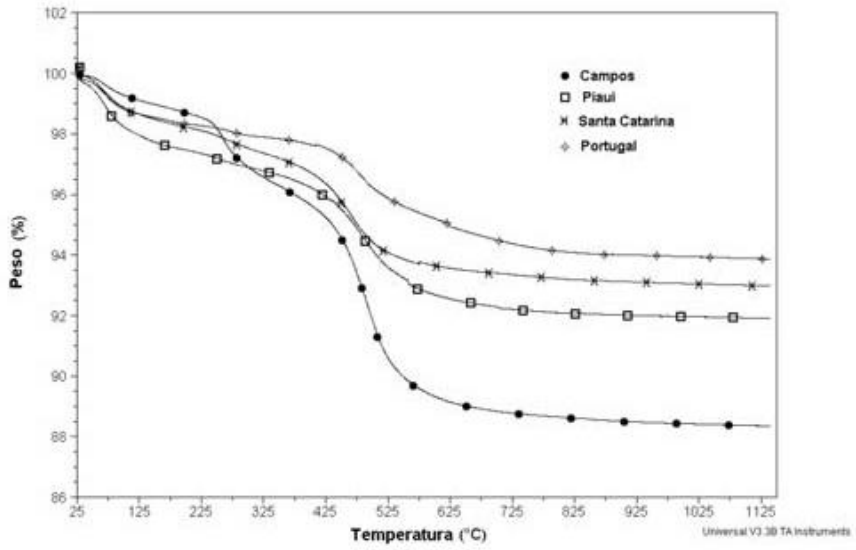


Figura 10 - Exemplos de curvas de análise termogravimétricas em amostras de argila. FONTE: VIEIRA et al. 2003b

2.3.2 ENSAIOS REALIZADOS NAS PEÇAS QUEIMADAS

a) Retração linear

A retração linear é a propriedade das argilas em diminuir de tamanho pela perda de água durante as etapas de secagem ou queima, sendo que a primeira é chamada retração linear após secagem e a segunda de retração linear após queima. Essa propriedade é muito importante, já que conhecendo a retração linear total de uma determinada peça cerâmica, pode-se produzir essa mesma peça com dimensões finais iguais às determinadas em projeto (CABRAL, 2005).

De acordo com Vieira et al. (2003a), a água adicionada nas argilas para conferir às mesmas propriedades de conformação pode ser dividida em dois tipos: água intersticial e água livre ou de plasticidade. O primeiro tipo refere-se à água necessária para preencher os poros das partículas e o segundo tipo localiza-se entre as partículas argilosas, facilitando o processo de conformação. A água de plasticidade é a responsável pela retração das peças, como ilustra a figura 11.

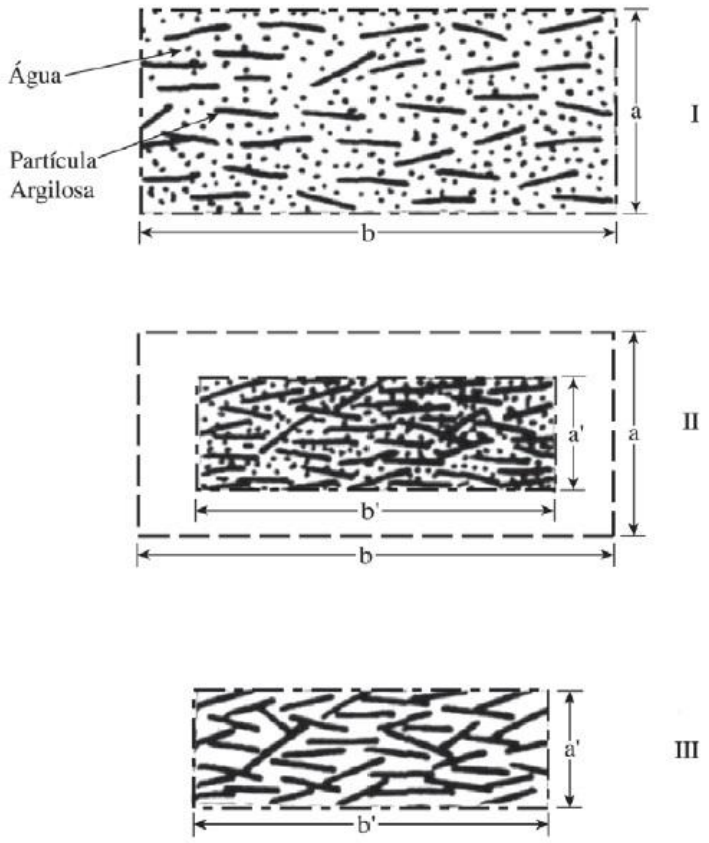


Figura 11 - Representação da secagem de uma peça de cerâmica. FONTE: VIEIRA et al. 2003a

Analisando-se a figura 11, percebemos que em I está representada a mistura entre a matéria argilosa e a água necessária para conferir características moldáveis à massa cerâmica (água de plasticidade). Em II, após a secagem da peça, esta retrai de tamanho pela perda de água de plasticidade, mas mantém em sua composição a água intersticial. Já em III, a peça cerâmica elimina também a água intersticial, sem se observar uma diminuição de tamanho.

De acordo com Vieira (2003b), com o aumento da retração linear, aumentam-se também as possibilidades de aparecimento de trincas durante a queima das peças.

Uma representação gráfica para a evolução da retração linear de secagem em função perda de água das massas é a *curva de Bigot*, que pode auxiliar no estabelecimento de um ciclo de secagem, diminuindo-se o tempo gasto nessa etapa e, conseqüentemente, o seu custo, conforme exemplo ilustrado na figura 12 (VIEIRA et al. 2003a).

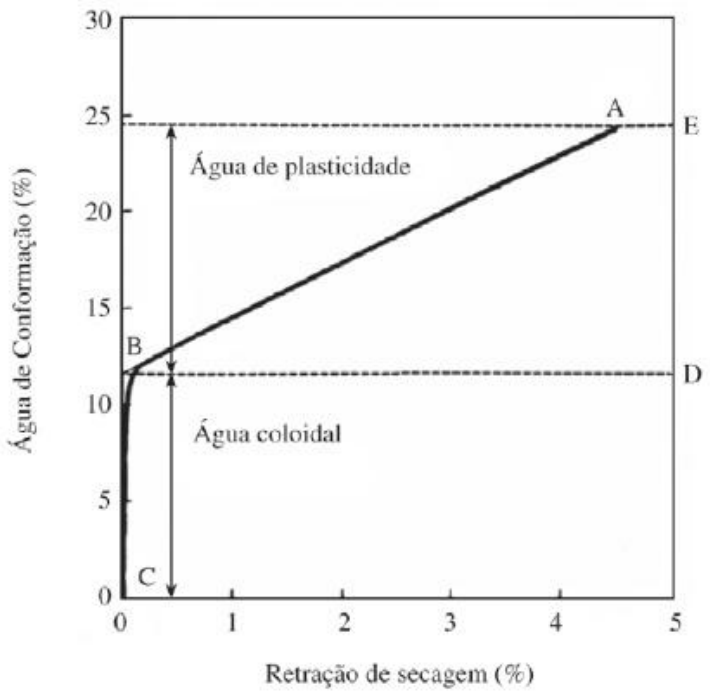


Figura 12 - Exemplo de uma curva de Bigot. FONTE: VIEIRA et al. 2003a

A curva de *Bigot* representa a variação da retração de secagem em função da quantidade de água de conformação das peças. Essa ferramenta é muito importante quando se pretende acelerar a secagem das peças. Conhecendo-se a *curva de Bigot,* pode-se estabelecer o momento em que é conveniente acelerar o processo de secagem das peças sem ocasionar o surgimento de trincas nas mesmas.

Ainda de acordo com Vieira et al. (2003a), quanto maior o teor de matérias primas com alto teor de argila na massa, maior a quantidade de água necessária para a conformação e, conseqüentemente, maior a retração linear das peças. Por isso, é importante o conhecimento da granulometria das massas, para que se possa adicionar areia nas massas, diminuindo-se assim a quantidade de água necessária para a conformação das peças e, conseqüentemente, diminuindo-se a retração linear dos produtos.

De acordo com Cabral (2005), a presença de sílica livre (SiO_2) nas massas argilosos causa uma redução da plasticidade das mesmas e, conseqüentemente, uma redução na retração linear das peças.

A retração linear ocorre devido à densificação do material, causada pela eliminação da água presente na mistura e pela diminuição dos poros. Além disso, a retração linear está diretamente ligada à perda ao fogo das massas. Quanto maior a perda ao fogo, ou seja,

quanto maior a perda de massa das peças em função do aumento da temperatura de queima, maior será a retração linear durante a queima (VIEIRA et al. 2003a)

É importante ressaltar que a retração linear está diretamente ligada à temperatura e ao tempo de queima das peças, sendo que, quanto maior a temperatura e o tempo de queima, maior será a retração linear dos produtos cerâmicos.

A retração linear de secagem e de queima, somadas, não deve exceder o valor de 12%. Acima deste valor, as peças correm grande risco de apresentarem trincas (CABRAL, 2005).

b) Expansão por umidade

A expansão por umidade (EPU) refere-se à expansão sofrida pelos materiais cerâmicos quando em contato com a água, na sua forma líquida ou de vapor. Esse fenômeno ocorre lentamente porém, merece atenção, já que materiais colocados lado a lado que sofrem esse tipo de expansão podem gerar tensões que poderão resultar em fissuras (CHIARI et al. 1996).

De acordo com Smith (1955) *apud* Chiari et al. (1996), a expansão por umidade das peças cerâmicas está diretamente ligada à tensão superficial das peças e à área superficial de um grama de material das peças.

Portanto, Chiari et al. (1996) conclui que a expansão por umidade dos produtos cerâmicos pode ser diminuída evitando-se a presença, no produto queimado, de fases cerâmicas com elevadas tensões superficiais e com baixo módulo de elasticidade.

c) Absorção de água

A água é um elemento fundamental para a produção de produtos de cerâmica vermelha, já que as matérias primas desses produtos necessitam de água para atingirem os critérios mínimos de plasticidade e tornarem-se moldáveis. Porém, após a queima das massas, a absorção de água dos produtos já queimados (prontos) pode não ser uma característica desejável, já que pode estar ligada a grande presença de poros nas peças, o que acarreta uma maior porosidade e conseqüentemente menores resistências. Além disso, os produtos prontos que absorvem muita água após a queima podem ter seu peso aumentado.

Para produtos de cerâmica vermelha, os valores máximos de absorção de água são de 25%, para tijolos maciços e blocos cerâmicos e 20%, para telhas. Para telhas romanas, o

limite máximo de absorção de água é um pouco inferior ao limite para os outros tipos de telhas, sendo inferior a 18% (VIEIRA et al. 2000, 2003a).

A absorção de água está diretamente ligada à presença de argilominerais, quantidade de água, presença de materiais fundentes e perda ao fogo das massas, sendo que quanto maior a perda ao fogo, maior a porosidade da peça e, conseqüentemente, maior número de vazios por unidade de espaço, fazendo com que o produto final absorva mais água.

Por outro lado, a absorção de água está inversamente ligada ao aumento da temperatura de queima, assim sendo, quanto maior a temperatura de queima das peças, menor sua absorção de água. Isso ocorre pois, quanto maior a temperatura de queima das peças, mais densas elas se tornam, com menos poros e, conseqüentemente, menos espaço há para a água penetrar no produto (VIEIRA et al. 2003a).

Portanto, a absorção de água e a retração linear são propriedades que dependem, inversamente, da temperatura e do tempo de queima peças, ou seja, quanto maior o tempo e a temperatura de queima da peça, maior será a retração linear da mesma e, por outro lado, menor será sua absorção de água.

.Esse comportamento fica evidente quando da análise do diagrama de gresificação das peças, que consiste de um gráfico com duas curvas, uma de absorção de água *versus* temperatura de queima e outra de retração linear *versus* temperatura de queima.

De acordo com Cabral et al. 2008, o ponto de gresificação, ou ponto de grés, corresponde à temperatura em que as duas curvas se encontram no gráfico, ocorrendo então, a união gradativa de dois grãos tornando-se um só.

d) Porosidade aparente

A porosidade aparente é uma característica muito importante quando trata-se de produtos cerâmicos, já que esta propriedade, que refere-se a quantidade de poros abertos existentes nas amostras, está diretamente ligada à outras propriedades dos produtos de cerâmica vermelha, como a absorção de água, a massa específica aparente e a resistência à compressão.

A porosidade aparente está inversamente ligada à temperatura de queima dos produtos, sendo que quanto maior a temperatura de queima das amostras, menor a porosidade aparente das mesmas. Ou seja, quanto maior a temperatura de queima, maior o

grau de vitrificação das peças e menor a porosidade aparente das mesmas (CABRAL, 2005).

e) Massa específica aparente

A massa específica aparente é a razão entre a massa total e o volume total de uma amostra, incluindo-se os vazios presentes na amostra. A massa específica aparente é um importante parâmetro para a confecção de agregados leves, já que quanto menor a massa específica aparente, menor a massa do agregado e, conseqüentemente, menores os pesos das estruturas produzidas com esses agregados.

A massa específica aparente é uma propriedade diretamente ligada à temperatura de queima das amostras, já que quanto maior a temperatura de queima, maior a densificação das amostras e, conseqüentemente, maior a maça específica das mesmas. Portanto, a massa específica aparente está ligada também à porosidade aparente, a absorção de água e a resistência à compressão das peças, já que quanto maior a massa específica dos produtos, menores os valores de porosidade aparente e absorção de água das peças. Da mesma forma, quanto maior a massa específica, maior a densificação dos produtos e, portanto, maiores os valores de resistência à compressão das peças.

3. CONCRETO ESTRUTURAL LEVE

3.1 INTRODUÇÃO

Quando comparado às cargas aplicadas, o peso das estruturas de concreto é elevado, principalmente em estruturas de grandes vãos, como as pontes e edifícios de múltiplos pavimentos. Nesses casos, melhorias consideráveis no desempenho das estruturas podem ser geradas com a redução do peso total das estruturas, assim como economia nas estruturas de fundações (ROSSIGNOLO, 2009a).

Uma alternativa para a redução de peso das estruturas é a utilização de concreto com agregados leves, ou concreto leve estrutural, atualmente um material de construção consagrado em todo o mundo, com aplicação em diversas áreas da construção civil, como em edificações pré-fabricadas, pontes e plataformas marítimas. A utilização desse material de massa específica reduzida pode promover benefícios diversos, como a redução de esforços na estrutura das edificações, gerando economia nas fundações, a economia com fôrmas e cimbramento, além da diminuição dos custos de montagem e transporte de estruturas pré-fabricadas (ZHANG e GJϕRV, 1991; HOLM e BREMNER, 1994; ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005; ROSSIGNOLO, 2009a).

Segundo ROSSIGNOLO (2003), os concretos leves podem ser obtidos através da substituição parcial ou total dos agregados convencionais por agregados leves e, normalmente, são classificados de acordo com o valor de sua massa específica seca. De acordo com a norma Brasileira ABNT NBR 6118:2007, o concreto leve deve apresentar massa específica seca abaixo de 2000 Kg/m³.

Segundo ACI 213-R03 (2003), o concreto leve estrutural deve apresentar, aos 28 dias de idade, uma resistência à compressão superior à 17 MPa, com uma massa específica aparente compreendida entre 1120 e 1920 Kg/m³.

Já a NM 35 (1995) relaciona a resistência à compressão dos concretos leves com valores máximos de massa específica aparente, como ilustra a tabela 3. Além disso, a NM 35 (1995) especifica também que os agregados utilizados para a confecção dos concretos leves devem apresentar massa unitária no estado solto abaixo de 1120 Kg/m³ (agregados miúdos) e 880 Kg/m³ (agregados graúdos).

Tabela 3 – Valores de resistência à compressão de acordo com a massa específica aparente dos concretos

Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Massa específica aparente (Kg/m³)
28	1840
21	1760
17	1680

As aplicações mais conhecidas historicamente da utilização de agregados leves em concreto foram as realizadas pelos romanos, durante a República Romana, o Império Romano e o Império Bizantino[5], com destaque para a cobertura do Panteão, em forma abobadada com 44 m de diâmetro, com a utilização de pedra-pomes como agregado para o concreto e o Coliseu de Roma (Figura 13), onde se utilizou concreto leve com aglomerante à base de cal e rochas vulcânicas, para a confecção da estrutura de fundação e de diversas paredes (ACI 213R-03, 2003).

Figura 13 – Coliseu de Roma. FONTE: Chandra; Berntsson, 2002.

Além disso, aplicação de concretos leves no Império Romano também pode ser observada no símbolo religioso máximo do Império Romano do Oriente, a Catedral de Santa Sofia (Figura 14), em Istambul, construída entre 532 e 537 d.C. (CHANDRA; BERNTSSON, 2002).

[5] "República Romana": período compreendido entre 509 a.C. e 27 a.C.; "Império Romano": período compreendido entre 27 a.C. e 476 d.C.; "Império Bizantino": período compreendido entre 476 d.C. e 1453 d.C.

Figura 14 – Catedral de Santa Sofia. FONTE: Chandra; Berntsson, 2002.

A utilização de concreto leve se reduziu após a queda do Império Romano, e só voltou a ser observada após o início do século XX, com a produção de agregados leves artificiais (ROSSIGNOLO, 2009a).

A produção de agregados leves artificiais deu-se através de estudos realizados por Stephen J. Hayde, engenheiro fabricante de tijolos cerâmicos na cidade de Kansas, nos estados Unidos. Ele observou que quando a etapa de aquecimento dos fornos ocorria mais rápido que o habitual, os tijolos se transformavam em elementos expandidos. O fabricante observou que se produzisse esses “tijolos” com dimensões menores, eles poderiam ser utilizados como agregados para concreto. Depois de quase dez anos de estudos, em 1918, Hayde patenteou o processo de obtenção de agregados leves pelo aquecimento em forno rotativo de pequenas partículas de xisto, de ardósia e de argila, denominados *Haydite* (ACI 213R-03, 2003).

As primeiras aplicações e concretos com agregados leves do tipo *Haydite* ocorreram ainda em 1918, durante a Primeira Guerra Mundial, para a produção de embarcações. Durante a Primeira Guerra Mundial foram construídas 14 embarcações e durante a Segunda Guerra Mundial, 488 (ROSSIGNOLO, 2009a).

A primeira aplicação do concreto leve para fins estruturais em edificações ocorreu em 1922, na construção do ginásio da Westport High School, na cidade de Kansas, dada a necessidade de se diminuir a massa específica da estrutura devido à baixa capacidade de suporte do solo (ESCSI, 1971).

Já a primeira aplicação do concreto leve estrutural em edifícios de múltiplos pavimentos ocorreu também na cidade de Kansas, em 1929, na expansão do edifício da Southwestern Bell Telephone Company, que foi construído com 14 pavimentos com estrutura de concreto convencional projetada para receber mais oito pavimentos. Com a utilização de concreto leve estrutural, foram construídos mais 14 pavimentos ao invés dos

oito pavimentos previstos no projeto (se fosse utilizado concreto convencional) (ROSSIGNOLO, 2009a).

No mesmo ano, na cidade de St. Louis (EUA), foi finalizada a primeira construção de um edifício de múltiplos pavimentos (28 andares) em estrutura integralmente executada com concreto com agregados leves, como ilustra a figura 15 (ROSSIGNOLO, 2009a).

Figura 15 – Hotel Chase-Park Plaza. Edifício com estrutura integralmente executada com concreto leve. FONTE: Rossignolo, 2009a.

Até a patente de Hayde expirar, em 1946, as aplicações de concreto leve nas construções limitaram-se aos Estados Unidos e Canadá. Com o final da Segunda Guerra Mundial e a necessidade de reconstrução de muitos Países, a tecnologia dos concretos leves foi disseminada pelo mundo, em locais com necessidade de estruturas com massa específica reduzida.

No Brasil, a primeira empresa a produzir agregados leves para concreto (agregado de argila expandida) foi a Cinasita[6], em 1968, na cidade de Jundiaí, com um volume mensal de produção de 7500 m³ de agregados, que eram utilizados na confecção de elementos pré-fabricados de seção variada (I, Y, U, T, TT) e, posteriormente, na produção de unidades habitacionais (ROSSIGNOLO, 2009a).

[6] Empresa do grupo Rabello, criada a partir da possibilidade de utilização de concreto leve nas peças pré-fabricadas produzidas pela empresa Cinasa (Empresa do grupo Rabello).

Com o passar dos anos, esse material foi sendo aprimorado, mas desde sua criação até os dias de hoje ele se mostra como a única alternativa nacional de agregado leve para concreto, que tem como principais aplicações sua utilização em elementos pré-fabricados de concreto e em estruturas de edifícios de múltiplos pavimentos (normalmente em lajes) (ROSSIGNOLO, 2009a).

Merece destaque aqui a utilização de concretos leves com argila expandia na construção de Brasília, entre 1968 e 1972, nas obras executadas pela construtora Rabello S/A, e para a cobertura da Rodoviária Municipal de São Carlos, inaugurada em 1982 e executada com vigas – calhas de concreto leve com argila expandida, com 15 metros de vão. Mais recentemente, nas construções de edifícios de múltiplos pavimentos, a utilização de concretos leves com argila expandida vem sendo utilizada apenas na execução de lajes de edifícios e, na maioria das vezes, na execução de painéis de vedação (ROSSIGNOLO, 2009a).

A utilização deste material ainda é pouco expressiva no Brasil frente ao seu potencial de utilização, concentrando-se regionalmente ao estado de São Paulo e em estados vizinhos, dada a localização da única fábrica de agregado leve (argila expandida) em Várzea Paulista – SP (CINEXPAN). Desde o início da produção de argila expandida, em 1968, a aplicação de concretos leves estruturais na construção civil ocorre principalmente na fabricação de elementos pré-fabricados e na estrutura de edificações de múltiplos pavimentos moldadas *in loco*, em especial nas lajes (TEZUKA, 1973; SOBRAL, 1996; EVANGELISTA et al., 1996; ROSSIGNOLO, 2009)

Entretanto, a substituição dos agregados convencionais por agregados leves pode ocasionar alterações significativas nas propriedades dos concretos, como na massa específica, trabalhabilidade, resistência mecânica, durabilidade, módulo de deformação, absorção de água, estabilidade dimensional, retração linear, condutividade térmica e espessura da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, conforme será apresentado a seguir (ROSSIGNOLO, 2009a).

3.2 AGREGADOS LEVES PARA CONCRETO

Quanto à origem, existem dois tipos de agregados leves: os agregados leves naturais, provenientes da natureza, e os agregados leves artificiais ou sintéticos, confeccionados em fabricas através de processo de aquecimento da matéria prima.

Segundo Rossignolo (2009a), os agregados leves naturais (pedra-pomes e tufo vulcânico) são extraídos diretamente das jazidas e, por esse motivo, apresentam muita variação em suas propriedades, limitando seu uso em concretos estruturais. Já os agregados leves artificiais (argila expandida e escória sintetizada) são produzidos através de processos industriais e são classificados de acordo com suas matérias primas.

Segundo ACI 213R-03 (2003), os agregados leves artificiais são produzidos através de tratamentos térmicos aplicados às matérias primas com características expansivas, e podem ser divididos em três grupos:

- Materiais naturais, como a vermiculita, perlita, argila e ardósia;

- Produtos industrializados, como o vidro;

- Sub – produtos industrializados, como a escória sintetizada.

Já segundo EuroLightCon (2000b) podemos dividir em seis tipos os agregados leves para concreto, produzidos e utilizados em sua grande maioria na Europa, como ilustra a tabela 4.

Tabela 4 – Tipos de agregados leves utilizados nos diferentes países. FONTE: EuroLightCon, 2000b

Tipo de agregado leve	Pais de utilização
Pedra - pomes e escória	Islândia
Argila expandida	Brasil, Itália, Bélgica, Espanha, Alemanha, Áustria, Dinamarca, Finlândia, Noruega
Vidro expandido	Alemanha
Xisto e Ardósia expandida	Alemanha, França, Estados Unidos
Cinza Vulcânica	Holanda, Japão, Reino Unido, Polônia
Escória de alto forno	Alemanha

Segundo Gomes Neto (1998) apud in Rossignolo (2009a), os processos de sinterização e forno rotativo são os mais utilizados para a fabricação de agregados leves artificiais. No primeiro caso, a matéria prima é misturada com uma porção de combustível e, em seguida, é submetida à altas temperaturas para sua expansão.

Já o processo de produção em forno rotativo aproveita as características expansivas de algumas matérias primas à altas temperaturas (1000 ^{o}C a 1300 ^{o}C). Nessas temperaturas, uma parte da matéria prima se funde gerando uma massa viscosa e outra parte se decompõe quimicamente, gerando gases que são incorporados pela massa viscosa, expandindo-a em até sete vezes (ROSSIGNOLO, 2009a).

Os agregados produzidos pelo processo de sinterização apresentam poros abertos, com altos valores de absorção de água. Já os agregados produzidos pelo processo de forno rotativo apresentam uma camada externa de material vítreo, conferindo aos mesmos menor absorção de água.

Segundo Santos *et al.* (1986) apud in Rossignolo (2009a), o processo de fabricação da argila expandida em forno rotativo pode ser dividido em oito etapas, como ilustra a tabela 5.

Tabela 5 – Processo de fabricação de agregados leves de argila expandida

Etapa	Nomenclatura	Processo executado
1	Homogeneização	Homogeneização da matéria prima
2	Desintegração	Redução dos torrões em diâmetros máximos de 5 cm
3	Mistura e nova homogeneização	Mistura da matéria prima e correção de água para aumentara a expansão durante a queima
4	Laminação	Passagem do material por dois cilindros para eliminação dos torrões, deixando a mistura pronta para a extrusão
5	Pelotização	Extrusão da matéria prima, que passa por moldes cilíndricos e depois é cortada em seu tamanho final dos agregados
6	Secagem e queima	Primeiramente ocorre a secagem dos agregados extrudados, seguida da queima dos mesmos à altas temperaturas
7	Resfriamento	Resfriamento dos agregados após a queima
8	Classificação e estocagem	Classificação dos agregados de acordo com o tamanho final e estocagem dos mesmos

3.2.1 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS LEVES

a) Forma e textura superficial

Segundo Hoff (2002), a forma e a textura dos agregados leves dependem do processo de produção dos agregados e das matérias primas utilizadas na produção. Normalmente, os agregados leves têm forma arredondada, cúbica ou irregular e podem apresentar em sua camada externa texturas muito ou pouco porosas.

Agregados produzidos pelo processo de sinterização apresentam formas irregulares e muito porosas, o que aumenta a aderência entre a pasta de cimento e o agregado porém, agregados com altos valores de porosidade tende à absorver altos valores de água, podendo assim comprometer a resistência do concreto. Além disso, por apresentarem muitos poros, a penetração da pasta de cimento nos poros dos agregados aumenta muito (de 30 a 100 Kg/m³), aumentando assim o consumo de cimento e encarecendo o produto (ROSSIGNOLO, 2003).

Ainda de acordo com Rossignolo (2003), os agregados produzidos por forno rotativo apresentam normalmente forma arredondada e uma camada externa pouco porosa, diminuindo assim a absorção de água do agregado e, conseqüentemente, melhorando o tempo de manutenção da trabalhabilidade.

b) Resistência Mecânica e módulo de deformação

A resistência mecânica e o módulo de deformação dos concretos dependem de todos os materiais envolvidos no processo de produção dos mesmos, principalmente da pasta de cimento e dos agregados. Os agregados leves, por apresentarem maior porosidade que os agregados convencionais, tendem a apresentar valores de resistência à compressão inferiores aos apresentados pelos agregados convencionais.

Segundo Chandra e Berntsson (2002), a resistência mecânica dos agregados leves dependem das matérias primas e dos processos de produção dos mesmos, sendo que agregados confeccionados com as mesmas matérias primas podem apresentar diferentes resistências mecânicas dependendo de seu processo de produção.

Segundo Holm e Bremmer (1994), o tamanho e a distribuição dos poros são importantes para a resistência dos agregados, sendo que para uma mesma ordem de grandeza de porosidade, agregados com uma distribuição uniforme de pequenos poros apresentam maiores resistências que agregados com poucos poros de grandes diâmetros. Além disso, a redução da porosidade nas camadas externas dos agregados pode aumentar a resistência mecânica dos mesmos, como ocorre com a argila expandida.

Segundo FIP (1983) apud in Rossignolo (2009a), o módulo de deformação dos agregados leves pode ser estimado a partir de seus valores de massa específica aparente (φ), como ilustra a equação 2.

$$E_c = 0{,}008 \cdot \varphi^2 \qquad (2)$$

Segundo Holm e Bremmer (1994), os valores de módulo de deformação dos agregados leves para utilização em concreto estrutural variam entre 10 GPa e 18 GPa, sendo que quanto maior o valore do módulo de deformação dos agregados leves, maior o valor do módulo de deformação e da resistência à compressão dos concretos produzidos com os agregados leves.

c) Porosidade, absorção de água e massa específica

A absorção de água dos agregados e sua porosidade aparente interferem significativamente nas propriedades dos concretos no estado fresco e no processo de hidratação do cimento. Em alguns casos, quando o agregado apresenta valores muito elevados de absorção de água, faz-se necessária uma pré-saturação do agregado antes da moldagem, mantendo assim o tempo de trabalhabilidade do concreto (ROSSIGNOLO, 2003).

Para conferir a redução de massa, os agregados leves apresentam uma grande quantidade de poros. Devido a isso, os agregados leves absorvem de 5 % a 25 % de seu peso em água, nas 24 primeiras horas de imersão, sendo que agregados convencionais absorvem aproximadamente 2 % de seu peso em água, em igual período (HOFF, 2002).

Existem dois tipos importantes de poros: os que estão interconectados (afetam a permeabilidade do agregado) e os fechados (encontram-se isolados na estrutura interna do agregado e não tem conexão nenhuma com a área externa, não interferindo na permeabilidade do agregado) (CHJANDRA; BERNTSSON, 2002 e ACI 213R-03 (2003)).

Segundo Rossignolo (2009a), a alta absorção de água dos agregados pode afetar desfavoravelmente as propriedades dos concretos no estado endurecido, como o aumento da retração por secagem, o aumento da massa específica e a diminuição da resistência ao fogo. Apesar disso, a absorção de água pelos agregados melhora a zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento. A tabela 6 apresenta os valores de absorção de água, massa específica e outras características de agregados leves de argila expandida nacional.

Tabela 6 – Propriedades dos agregados leves de argila expandida nacional. FONTE: Rossignolo, 2009a

Nome comercial	Fabricação	Massa específica (Kg/dm³)	Massa unitária (Kg/dm³)	Dimensão (mm)	Absorção de água 24 h (%)
Cinexpan 0500	Forno rotativo	1,5	0,9	0 – 4,8	6
Cinexpan 1506		1,1	0,6	6,3 – 12,5	7
Cinexpan 2215		0,6	0,5	12,5 - 19	10

3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS LEVES[7]

Agregados leves apresentam propriedades diferenciadas dos agregados convencionais, como baixa massa específica, grande quantidade de poros e alta absorção de água, que podem interferir na produção e nas propriedades do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido. Por isso, na produção dos concretos leves fazem-se necessários alguns cuidados, para que o concreto atinja as características especificadas nos projetos.

1) Dosagem e mistura

De maneira geral, a dosagem de concretos leves é semelhante à de concretos convencionais, devendo-se apenas atentar para alguns fatores como a absorção de água dos agregados, a variação da massa específica do agregado leve em função de sua dimensão e a influencia das características dos agregados leves nos concretos (ROSSIGNOLO, 2009a).

Para concretos convencionais, a definição da relação água / cimento é feita levando-se em conta a quantidade de água necessária para a hidratação do cimento, ao passo que para concretos com agregados leves, essa definição deve ser feita levando-se em conta também a quantidade de água que os agregados leves absorvem, a fim de que essa absorção não utilize a água necessária para a hidratação do cimento. E, alguns casos, esse fenômeno pode ser evitado submetendo-se os agregados ao processo de pré-saturação antes da mistura (ROSSIGNOLO, 2003; 2009a).

Para assegurar níveis mínimos de trabalhabilidade, proteção e ancoragem da armadura, é recomendável a utilização de uma taxa de consumo de cimento maior que 300 kg/m³ (CHANDRA; BERNTSSON, 2002).

A mistura dos materiais para a confecção dos concretos leves é semelhante à dos concretos convencionais. Quando os agregados leves apresentarem absorção de água inferior à 10 % em massa após 24 horas de imersão, a mistura pode ser feita da mesma forma que para concretos convencionais porém, quando os agregados leves apresentam absorção de água superior à 10 % em massa após 24 horas de imersão, recomenda-se a pré-saturação dos mesmos para que a trabalhabilidade do concreto não seja alterada devido a utilização da água de hidratação do cimento para a absorção de água dos agregados.

[7] Maiores informações sobre a produção dos concretos leves podem ser obtidas em EuroLightCon (1998).

2) Transporte, lançamento e adensamento

Os agregados leves, por apresentarem baixa massa específica, tendem a segregar durante o processo de transporte dos concretos leves. Para o controle desse fenômeno, os concretos devem ser dosados com coesão e consistência adequados, controlando-se a relação água/cimento e a quantidade de agregados, assim como utilizando-se de aditivos minerais, como a sílica ativa (ROSSIGNOLO, 2003).

Quando da utilização de concreto bombeável, a granulometria dos agregados e principalmente sua umidade assume papel fundamental, já que com o aumento da pressão proveniente do processo de bombeamento, os agregados tendem a absorvem mais água, diminuindo-se assim a trabalhabilidade do concreto. Nesses casos, recomenda-se a utilização de agregados leves saturados, para que esses não atrapalhem o processo de bombeamento (EUROLIGHTCON, 2000a).

Para os concretos leves, normalmente pode-se utilizar técnicas usuais de vibração, como as utilizadas em concretos convencionais, porém, os concretos leves necessitam de maior energia de vibração. Portanto, no caso de vibradores de imersão, deve-se utilizar um raio de ação correspondente a metade do valor utilizado para concretos convencionais. Durante o processo de vibração dos concretos leves, os agregados leves tendem a segregar devido sua baixa massa específica e, por isso, recomenda-se a utilização de vibradores com baixa freqüência. O correto adensamento dos concretos é importante para se evitar a formação de vazios nos concretos (ROSSIGNOLO, 2009a).

3) Procedimento de cura

Durante o processo de cura do concreto, deve-se ter atenção especial para a temperatura do concreto. Devido à menor condutividade térmica do agregado leve, durante a hidratação do cimento, o calor liberado acaba resultando em uma elevação de temperatura maior do que nos concretos convencionais, isto gera um maior risco de fissuras térmicas. Recomenda-se um tempo maior para retirar as formas ou usar mantas isolantes quando o ambiente apresenta baixa temperatura. O processo de cura térmica deve ser feito de modo diferenciado, usando ou um intervalo de tempo maior de cura ou uma velocidade de elevação de temperatura menor. Vale lembrar também que a substituição parcial do cimento Portland por escória granulada de alto forno, pozolana ou cinzas volantes reduz esse aumento na temperatura durante a hidratação (CHANDRA; BERNTSSON, 2002; ROSSIGNOLO, 2009a).

Outro aspecto no comportamento de cura dos concretos leves é a ocorrência da cura interna (durante a hidratação do cimento nas idades iniciais, a água retida no agregado leve é transferida para a pasta de cimento, beneficiando este processo). Devido a este comportamento o concreto torna-se menos sensível às variações do processo de cura nas idades iniciais. A cura interna beneficia especialmente os concretos com baixa relação água/cimento (ACI 213R-03, 2003; ROSSIGNOLO, 2009a).

3.4 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS LEVES NO ESTADO ENDURECIDO

Normalmente, os agregados representam mais da metade do volume dos concretos. Dessa forma, a substituição de agregados comuns por agregados leves gera alterações consideráveis nas propriedades dos concretos, que dependem, além das propriedades da pasta de cimento, das propriedades dos novos agregados. As principais características abordadas neste trabalho afetadas pela substituição de agregados convencionais por agregados leves são a resistência à compressão, massa específica, resistência à tração, módulo de deformação, retração linear por secagem, absorção de água e porosidade aparente.

a) Resistência à compressão e massa específica

A resistência à compressão e a massa específica dos concretos leves são grandezas que estão diretamente ligadas ao tipo e à granulometria dos agregados utilizados. A relação entre essas duas grandezas corresponde ao fator de eficiência (FE) dos concretos, como ilustra a equação 3.

$$FE = \frac{fc}{\gamma} \quad \text{(MPa.dm}^3\text{ / Kg)} \qquad (3)$$

Onde,

fc = resistência à compressão do concreto (MPa)

γ = massa específica do concreto (Kg/dm³)

Concretos leves de alto desempenho apresentam fator de eficiência acima de 25 MPa.dm³ / Kg, segundo Spitzner (1994) e Armelin et al. (1994) apud in Rossignolo (2009a), obtido a partir da utilização de concreto com agregados convencionais, com resistência à

compressão de 60 MPa e massa específica de 2500 Kg/m³, classificado por Spitzner como de alta resistência.

Segundo Chandra e Berntsson (2002), a resistência à compressão e a massa específica dos concretos leves dependem do tipo de agregado leve, da quantidade de água utilizada, da relação água/cimento, do tipo de mistura dos componentes, do processo de lançamento e também de cura dos concretos.

Como os agregados leves apresentam resistência baixa quando comparados aos agregados convencionais (basalto), a pasta de cimento apresenta grande importância na resistência à compressão dos concretos. Além disso, com a utilização de agregados leves (que apresentam módulo de deformação similar ao da pasta de cimento), melhora-se muito a zona de transição agregado – matriz e, por isso, normalmente a ruptura dos concretos leves não ocorre devido à diferença entre as deformações da pasta e dos agregados, mas sim devido ao colapso da argamassa, geralmente, ao redor do agregado (ROSSIGNOLO, 2003).

Segundo EuroLightCon (2000c), a grande diferença entre a ruptura dos concretos confeccionados com agregados leves e os confeccionados com agregados convencionais de basalto é que nos primeiros, a ruptura atravessa o agregado, rompendo-o, enquanto nos segundos, por os agregados serem muito resistentes, eles não rompem, como ilustra a figura 16.

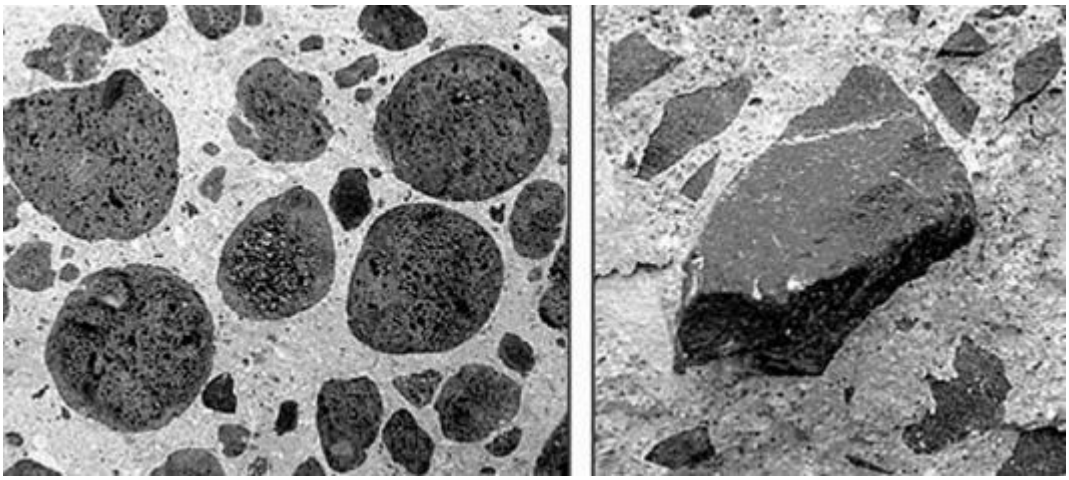


Figura 16 – forma de ruptura dos concretos com agregados leves (à esquerda) e com agregados convencionais (à direita). FONTE: ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005

Segundo Rossignolo (2009a), no caso de concretos com agregados leves, a relação entre a resistência à compressão dos agregados leves e da argamassa atinge um ponto ótimo, em que antes de ser atingido, a resistência do concreto leve é determinada

pela resistência da argamassa e, depois de se atingir esse ponto ótimo, a resistência do concreto é determinada pela resistência do agregado leve (normalmente menor que a resistência da argamassa). O conceito de resistência ótima pode contribuir para a otimização da dosagem dos concretos com agregados leves, que a partir de certo ponto, não têm sua resistência aumentada com o aumento do consumo de cimento na pasta.

Os concretos leves apresentam uma rápida evolução nos valores de resistência à compressão, podendo chegar a 80 % de seu valor final nos primeiros sete dias de idade. Em contrapartida, depois dos 28 dias de idade, a evolução da resistência à compressão dos concretos leves é lenta, quando comparada à apresentada pelos concretos convencionais (EUROLIGHTCON, 2000c).

Como os valores da massa específica e da resistência à compressão dos agregados leves são inversamente proporcionais à sua granulometria e dimensão, esses parâmetros têm bastante influência nos valores de resistência à compressão e massa específica dos concretos leves (ROSSIGNOLO, 2009a).

Após a moldagem do concreto leve, sua massa específica decai com o tempo devido à perda de água para o ambiente. A velocidade desta perda depende das condições do ambiente (temperatura, pressão e umidade), da relação entre área exposta e volume do concreto e das características do concreto (ACI 213R-03, 2003).

Estudos realizados por Evangelista *et. al* (1996) e Gomes Neto (1998), indicam a relação linear entre a resistência à compressão e a massa específica dos concretos, sendo que quanto maior o valor da massa específica, maior o valor da resistência à compressão dos concretos.

b) Resistência à tração

Segundo EuroLightCon (1998) apud in Rossignolo (2003), existem três grandes diferenças entre a resistência à tração dos concretos leves e dos convencionais:

1) O tipo de fratura, que no caso dos concretos leves ocorre no agregado e não na zona de transição agregado – matriz, como ocorre nos concretos convencionais;
2) O alto teor de umidade dos concretos leves, que pode causar redução na resistência à compressão;
3) A resistência à tração na flexão dos concretos leves é mais afetada que a resistência à tração na compressão diametral.

Por serem confeccionados com agregados com alto índice de vazios, a resistência à tração dos concretos leves é inferior à dos concretos convencionais, para o mesmo nível de resistência à compressão. Para o caso de concretos leves produzidos com argila expandida, os valores de resistência à tração por compressão diametral variam de 6% a 9% dos valores da resistência à compressão, ao passo que os valores de resistência à tração por flexão variam de 8% a 11% dos valores da resistência à compressão dos concretos (ROSSIGNOLO, 2009a).

A resistência à tração dos concretos leves pode ser relacionada com a resistência à compressão dos mesmos, como ilustra a tabela 7.

Tabela 7 – Relações entre a resistência à compressão e as resistências a tração por compressão diametral e por flexão dos concretos leves. FONTE: ROSSIGNOLO, 2009a.

Referência	Resistência à tração (MPa)		Observações
	Compressão diametral (f_{id})	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 Gjφrv (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)	$0,48.f_c^{0,5}$	$0,53.f_c^{0,5}$	

fc = Resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos (MPa)
fcu = Resistência à compressão em corpos de prova cúbicos (MPa)

c) Módulo de deformação

O módulo de deformação também depende do tipo e da quantidade de agregado utilizado na moldagem dos concretos. Como os agregados leves apresentam muitos vazios e valores de módulo de deformação relativamente baixos, os valores do módulo de deformação dos concretos leves normalmente são inferiores aos valores observados para concretos convencionais, sendo que para os concretos leves esses valores variam de 50% a 80% dos valores observados em concretos com massa específica convencional, para resistência a compressão variando de 20 MPa a 50 MPa (ROSSIGNOLO, 2009a).

Estudos realizados por Zhang e Gjφrv (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.

Assim como a resistência à tração, o módulo de deformação também pode ser estimado através dos valores de resistência à compressão e massa específica dos concretos leves, como ilustra a tabela 8.

Tabela 8 – Equações para o cálculo do módulo de deformação em concretos leves. FONTE: ROSSIGNOLO, 2009a

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

d) Retração linear de secagem

Os concretos leves apresentam, normalmente, para uma mesma resistência à compressão, valores de retração por secagem superiores aos obtidos para os concretos convencionais, já que os agregados leves oferecem pouca resistência à movimentação causada pela pasta de cimento e, além disso, concretos confeccionados com agregados leves normalmente necessitam de maior quantidade de água durante moldagem (ROSSIGNOLO, 2009a).

Segundo Hoff (1991), os concretos leves apresentam valores de retração por secagem da ordem de 500×10^{-6} e 1000×10^{-6}.

A NM35/95 estipula a retração linear máxima para o concreto leve em 0,10%, para concretos produzidos a partir de uma parte de cimento para seis partes de agregado, medidos em volume (proporção 1:6).

De acordo com Cabral et al. (2010), a granulometria, forma, textura e a dimensão máxima dos agregados são fatores que influenciam na retração linear de secagem dos concretos porém, a principal característica que influencia na retração linear de secagem dos concretos é o módulo de deformação dos mesmos, sendo que quanto maior esse valor, menor a retração linear dos concretos.

Ainda de acordo com Cabral et al. (2010), 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 in Rossignolo (2009a), a retração por secagem pode ser prevista para uma idade qualquer t, de acordo com a retração linear observada a uma certa idade, como ilustra a equação 4.

$$S_{ult} = ((35 + t)/t).S_t \qquad (4)$$

Onde,

S_{ult} = valor estimado para a retração linear de secagem ($x10^{-6}$)

t = tempo em dias

S_t = valor medido da retração linear de secagem ($x10^{-6}$)

e) Absorção de água e porosidade aparente

A absorção de água dos concretos está diretamente ligada à porosidade aparente dos mesmos e à porosidade aparente e absorção de água dos agregados utilizados para a sua confecção. Concretos confeccionados com agregados de baixa absorção tendem a absorver menos água que concretos confeccionados com agregados de alta absorção.

Segundo Holm e Brenmer (1994), os concretos leves tendem a apresentar, para uma mesma faixa de resistência à compressão, valores semelhante sou inferiores de absorção de água, quando comparados aos concretos convencionais. Isso explica-se pelos baixos valores da relação água / aglomerante dos concretos leves em relação aos concretos convencionais, para se obter uma mesma resistência à compressão.

f) 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 dos materiais.

É reconhecida a idéia de que a utilização de agregados porosos nos concretos aumenta a permeabilidade dos mesmos porém, estudos preliminares de Holm e Brenmer (1994), EuroLightCon (1998) Chandra e Berntsson (2002) em concretos com agregados leves, além de pesquisas nacionais em concretos com agregados de argila expandida demonstram que a utilização de agregados porosos não necessariamente reduz a durabilidade dos concretos (ROSSIGNOLO, 2009a).

Segundo Rossignolo (2009a), a durabilidade dos concretos está ligada à estrutura porosa dos concretos, ou seja, se os poros são ligados entre si ou não. Dessa forma, a durabilidade dos concretos está ligada à permeabilidade dos mesmos, e não apenas à porosidade.

Segundo Holm e Brenmer (1994) e ZHANG e GJϕRV (1991), a durabilidade dos concretos leves é igual ou inferior a durabilidade dos concretos convencionais, devido aos baixos valores de relação água cimento, diminuição das fissuras (devido a proximidade dos módulos de deformação dos materiais) e à melhor qualidade da zona de transição pasta agregado dos concretos leves, já que esta zona é a região de origem das primeiras micro-fissuras dos concretos.

A distribuição uniforme das tensões internas dos concretos com argila expandida reduz a formação de micro-fissuras, resultando em uma curva tensão-deformação linear até aproximadamente 80% do carregamento último, o que representa que a permeabilidade nesse tipo de concreto começa a aumentar com 80% do carregamento último, diferentemente dos concretos convencionais, que a permeabilidade tem início com 60% de seu carregamento último.

4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

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 para a utilização em concretos estruturais, que podem ser divididos em 7 etapas, conforme a tabela 9.

Tabela 9 - Resumo do programa experimental

Etapa	Descrição
1	Seleção das empresas e coleta das matérias primas
2	Ensaios realizados nas matérias primas coletadas
3	Confecção dos agregados e corpos de prova de argila calcinada
4	Ensaios realizados nos corpos de prova queimados
5	Produção dos agregados de argila calcinada
6	Produção dos corpos de prova de concreto
7	Ensaios realizados nos corpos de prova de concreto

4.1 SELEÇÃO DAS EMPRESAS E COLETA DAS MATÉRIAS PRIMAS

Para a realização do presente trabalho, foram selecionadas 5 empresas em diferentes regiões do estado de São Paulo, como ilustra a figura 17. São elas[8]:

- Cerâmica Josemar Ltda., na cidade de Ubarana;
- Morandin Produtos Cerâmicos, na cidade de Tambaú;
- Selecta Blocos (Grupo Estrutural), na cidade de Itu;
- Maristela Telhas Ltda. (Top Telha), na cidade de Leme;
- Cerâmica Vale do Mogi, na cidade de Porto Ferreira.

[8] Por motivos didáticos, os diferentes locais de extração de matéria prima para este trabalho serão chamados, neste texto, apenas pelo nome da cidade onde as empresas estão alocadas e foram coletadas as matérias primas

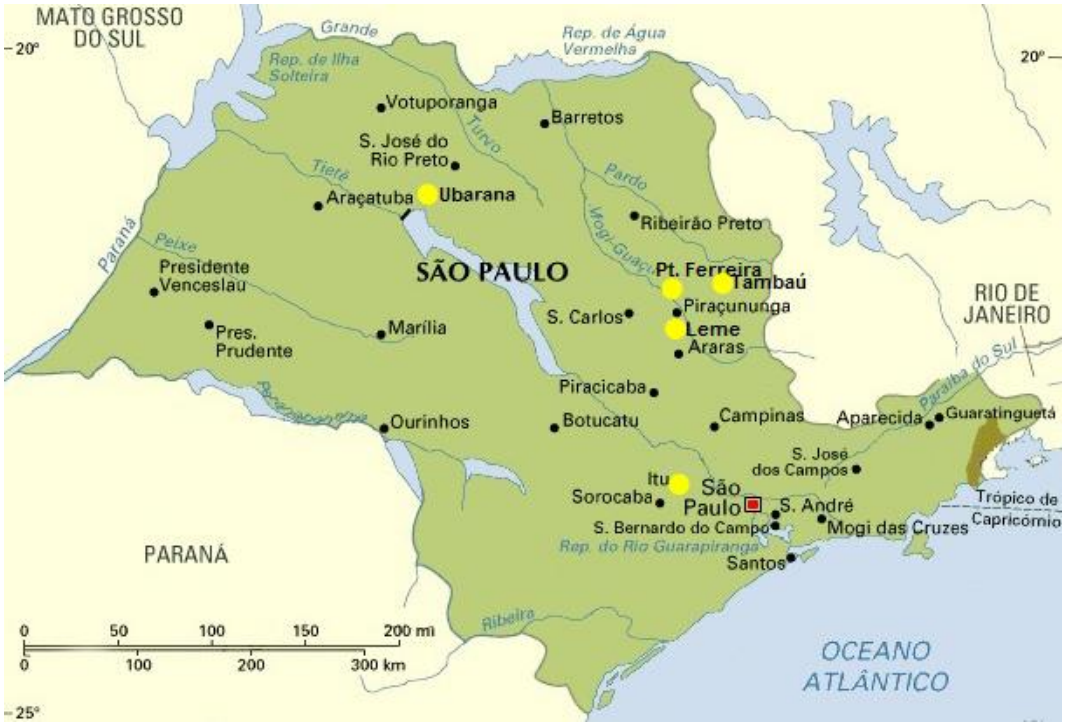


Figura 17 - Localização das empresas onde foram coletadas as matérias primas

Em todas as empresas visitadas foram coletadas amostras de matéria prima para a confecção dos agregados. Coletaram-se as misturas que as empresas utilizavam para a produção de seus produtos e também as diferentes matérias primas "*in natura"* que as empresas utilizavam em suas misturas, totalizando-se assim, 13 amostras coletadas.

4.2 ENSAIOS REALIZADOS NAS MATÉRIAS PRIMAS COLETADAS

As 13 amostras de solo coletadas foram submetidas a diversos ensaios físicos e químicos, como descrito na tabela 10.

Tabela 10 - Ensaios químicos e físicos realizados nas matérias primas

Ensaio	Descrição	Normatização
a	Determinação da umidade natural	
b	Limite de Liquidez	ABNT NBR 6459:1984
c	Limite de Plasticidade	ABNT NBR 7180:1984
d	Análise granulométrica	ABNT NBR 7181:1984
e	Massa específica dos sólidos	ABNT NBR 6508:1984
f	Difração de raios X (DRX)	
g	Espectrometria e fluorescência de raios X (FRX)	
h	Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD e TG)	

Os ensaios de granulometria, limites de consistência e massa específica dos sólidos foram realizados no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP. Para e realização dos ensaios, separou-se aproximadamente 2 Kg de cada uma das 13 amostras de solo coletadas. As amostras passaram por um processo de sacagem ao ar livre (alocadas em travessas colocadas em cima das estufas para acelerar o processo de secagem) por cinco dias, como ilustra a figura 18.

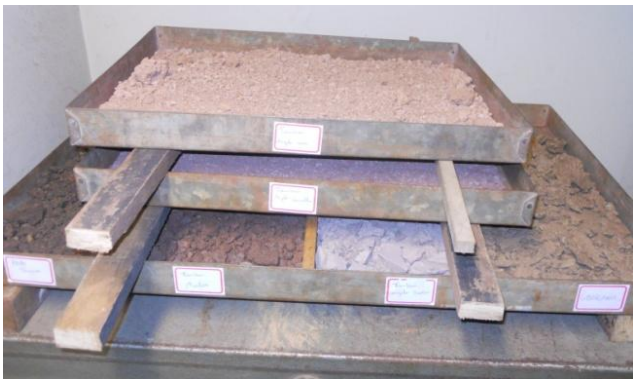


Figura 18 - Amostras de solo secando ao ar livre

Após a secagem, as amostras foram submetidas à primeira fase do processo de destorroação, que corresponde à passagem dos grãos pela peneira número 4.

a) Determinação da umidade natural

Para a determinação da umidade natural das amostras de solo, foram coletadas, para cada uma das amostras, três recipientes com aproximadamente 20 gramas de solo cada e colocadas na estufa, a uma temperatura de 100 ^{o}C, por 5 dias, para a determinação do teor de umidade das matérias primas "*in natura*", como ilustra a figura 19.

Figura 19 - Amostras levadas à estufa para determinação do teor de umidade

b) Limite de liquidez – ABNT NBR 6459:1984

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, primeiramente o solo foi destorroado e passado na peneira número 40, com o auxílio do pilão e do almofariz. O solo que passou pela peneira foi separado e dividido em duas amostras, uma seca colocada em um pequeno saco plástico e uma umedecida, colocada em um pote plástico. Todas as amostras ficaram descansando por no mínimo 72 horas.

Após os 3 dias de descanso, separou-se uma quantia de solo úmido para iniciar o ensaio. Esse solo foi espatulado, ou seja, misturado para ficar bem homogêneo, na placa de vidro ou na cumbuca. Depois de homogeneizado, colocou-se 2/3 do volume da concha do aparelho de Casagrande com solo e, com o auxílio do cinzel, fez-se uma ranhura na parte central do solo na concha. A concha foi colocada novamente no aparelho de Casagrande e, em seguida, com movimentos contínuos, girou-se a manivela com uma freqüência de 2 voltas por segundo. Quando uma parte do solo se encontra com a outra parte, o ensaio encerra-se, como ilustram as figuras 20 e 21.

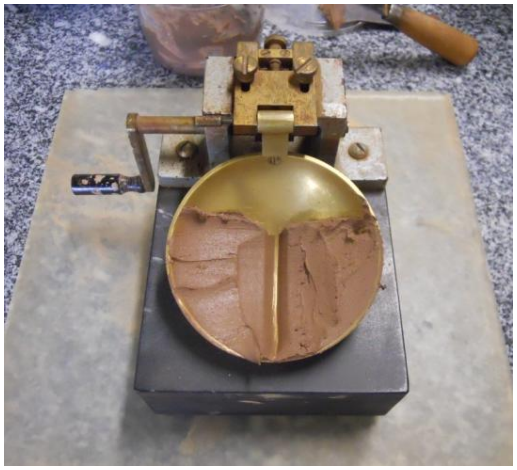


Figura 20 - Amostra de solo no aparelho de Casagrande com a ranhura feita pelo cinzel antes do início do ensaio

Figura 21 - Ensaio de limite de liquidez terminado

Quando do término do ensaio, um pouco da amostra do ensaio é recolhido e colocado em uma cápsula para a pesagem. Esse procedimento deve ser 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 se juntam antes de 15 golpes, o ensaio deve ser reiniciado.

As amostras pesadas são colocadas na estufa para secaram por no mínimo 24 horas e, após esse período, uma nova pesagem é feita. 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.

c) Limite de plasticidade – ABNT NBR 7180:1984

O limite de plasticidade de um solo refere-se ao ponto de umidade limite em que o solo perde suas características semi-sólidas e passa para o estado plástico.

Para o início do ensaio, primeiramente o solo passou pelo processo de destorroamento, passando pela peneira número 40, com o auxílio do pilão e do almofariz. O solo que passou pela peneira foi separado e dividido em duas amostras, uma seca colocada em um pequeno saco plástico e uma umidecida, colocada em um pote plástico. Todas as amostras ficaram descansando por no mínimo 72 horas.

Após as 72 horas de descanso, para início do ensaio, 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 que plana.

Com o auxílio de uma espátula, foram cortadas pequenas “tiras” de solo úmido com dimensões próximas de 3 mm. Em seguida, essas tiras foram roladas e transformadas em filetes de solo com a palma da mão, em cima da placa de vidro, em movimentos para frente e para trás, como ilustra a figura 22.

Figura 22 - Filete de solo úmido rolado para frente a para trás, em movimentos contínuos

Esses movimentos são repetidos até se obter um cilindro de aproximadamente 3 mm de diâmetro. Para a conferência do diâmetro do cilindro, utilizou-se um gabarito cilíndrico. Quando o cilindro atingiu o diâmetro desejado, com o auxílio de uma lupa, observou-se a formação ou não formação de pequenas rachaduras no molde. Quando da presença de pequenas rachaduras, o ensaio pode ser concluído cortando-se as extremidades das amostras e colocando-se a parte intermediaria em pequenos cilindros para pesagem antes e depois de serem levados à estufa, conforme a figura 23.

Figura 23 - Cilindro com 3 mm de espessura e com presença de pequenas rachaduras

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.

É importante salientar aqui que em alguns casos, por os solos serem muito argilosos, não ocorreram fissuras durante o ensaio. Quando isso ocorreu, aplicou-se uma força de flexão no centro da amostra com os 3 mm de diâmetro. Nesses casos, termina-se o ensaio quando do aparecimento de pequenas rachaduras na amostra com a aplicação desta pequena carga de flexão.

Após a pesagem das amostras úmidas e secas, determinou-se o teor de umidade dos solos e, com isso, o limite de plasticidade dos mesmos, que corresponde à média aritmética das umidades obtidas com o ensaio.

d) Análise granulométrica – ABNT NBR 7181:1984

O ensaio de análise granulométrica divide-se em duas etapas: a sedimentação e o peneiramento. A análise granulométrica tem como objetivo discriminar as principais faixas granulométricas das amostras analisadas.

Primeiramente, confeccionou-se hexametafosfato de sódio, que posteriormente foi adicionado às amostras de solo. O hexametafosfato de sódio é uma substância química composta por 45,7 g de sal para cada litro de água destilada. Depois de confeccionado o hexametafosfato de sódio, separou-se cerca de 50 g de cada uma das amostras e adicionou-se 125 ml de hexametafosfato de sódio em cada uma delas.

Após um período de cinco dias, as amostras foram colocadas em um agitador mecânico por 15 minutos cada, conforme a figura 24.

Figura 24 - Amostras sendo misturadas no agitador mecânico

Após passarem pelo processo de agitação, cada uma das amostras passaram pela peneira número 10. A matéria que passou pela peneira foi depositada na proveta de 1000 ml e, o que ficou retido na peneira foi colocado na estufa para secar. As provetas foram preenchidas com água destilada até o volume de 1000 ml.

Terminada a etapa de preparação do ensaio de sedimentação, as amostras foram colocadas em descanso por alguns dias antes do início da segunda etapa do ensaio, que teve início com a agitação do material que estava dentro das provetas, fazendo-se movimentos verticais (para cima e para baixo) com a hélice para misturar os materiais, durante aproximadamente dois minutos. Depois de bem misturados, iniciou-se a tomada dos valores da 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. Esse procedimento foi repetido para cada uma das amostras de solo. A figura 25 ilustra a execução sedimentação das amostras.

Figura 25 - Ensaio de sedimentação em andamento

Após o término do ensaio de sedimentação, iniciou-se a segunda etapa do ensaio de análise granulométrica conjunta, que consiste no peneiramento das amostras de solo que passaram pela sedimentação. Esse peneiramento é executado utilizando-se uma peneira de número 200 (aberturas de 0.074 mm). Para a execução do ensaio, primeiramente retirou-se da estufa as amostras de solo que haviam ficadas retidas na peneira número 10 (depois das amostras terem passado pelo agitador mecânico). Em seguida, com o auxílio da hélice, agitaram-se os materiais que estavam nas provetas e, com esse material, fez-se o peneiramento. O material que ficou retido na peneira número 200 foi adicionado com o 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 (número 4, 10, 16, 30, 50, 70, 100, 140, 200) e ficaram peneirando por um período de 10 minutos. Após o peneiramento, as amostras retidas em cada uma das peneiras e no fundo foram pesadas e, com esses valores pôde-se concluir o gráfico de granulometria e, conseqüentemente, a análise granulométrica das amostras.

e) Massa específica dos sólidos – ABNT NBR 6508:1984

Para o início do ensaio de determinação da massa específica dos sólidos das amostras, separou-se aproximadamente 50g de material, que foram colocadas em recipientes com água destilada. Esses recipientes ficaram descansando por um período de

no mínimo 24 horas antes do início do ensaio, como ilustrado na figura 26. Além disso, pequenas quantidades de cada uma das amostras foram separadas em cápsulas e pesadas antes e depois de serem levadas à estufa, para a determinação do teor de umidade de cada amostra.

Figura 26 - Amostras de solo com água destilada

Após o período de descanso das amostras, elas foram levadas à disperção, em dispersores eletrônicos, por 10 minutos cada (semelhante ao ensaio de sedimentação). Após a dispersão, as misturas foram levadas ao picnômetro, com aproximadamente 2/3 de seu volume com a mistura. Em seguida, os picnômetros com as misturas eram levados ao aparelho de vácuo, juntamente com um picnômetro apenas com água destilada. Faz-se isso pois, 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 a figura 27.

Figura 27 - Picnômetros com amostra de solo e com água destilada colocados no aparelho de vácuo

Antes de os picnômetros com as amostras e também com água destilada serem levados ao aparelho de vácuo, eles foram aquecidos, em uma panela com água, para facilitar a saída do ar das amostras e da água destilada.

Os picnômetros ficam no aparelho de vácuo até a completa saída do ar das amostras, o que leva, normalmente, 40 minutos, como ilustra a figura 28.

Figura 28 - Ar saindo das amostras colocadas no aparelho de vácuo

Após o término da saída do ar das amostras, os picmômetros com as amostras de solo e água foram completados com a água destilada sem ar.

Em seguida, as misturas nos picnômetros foram levadas ao freezer até atingirem uma temperatura próxima de 15 ^{o}C. Com essa temperatura, uma medida de peso e temperatura foi realizada. Em seguida, acrescentou-se um pouco mais de água e homogeneizou-se a mistura. Depois esquentou-se a mistura no picnômetro – esse acréscimo deve ser na ordem de aproximadamente 2,5 a 3 ^{o}C – e, tomou-se novas medidas de temperatura e peso. Esse procedimento foi repetido 4 vezes e, com isso, obteve-se 5 conjuntos de diferentes temperaturas e pesos das misturas.

Terminadas as tomadas de temperatura e peso, as misturas foram colocadas em pirex e levadas à estufa para secar. Depois de secas as amostras, elas foram pesadas para uma simples conferência de peso, comparando-se com o peso inicial do ensaio de cada uma. Isso é feito para saber se houve muita perda de material durante o ensaio.

f) 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 Cukα, com monocromador de grafite no feixe secundário, operando a 50 kV/50 mA. As amostras, que foram preparadas em forma de discos compactados, foram trituradas, pulverizadas, homogeneizadas por peneiramento e depositadas em lâmina de vidro com pequena cavidade circular. Todas as medidas foram feitas sob as mesmas condições experimentais, ângulo de varredura 5° ≤ 2θ ≤ 100° e passo 0,02°/2s em temperatura ambiente. A figura 29 ilustra o equipamento utilizado para a realização do ensaio.

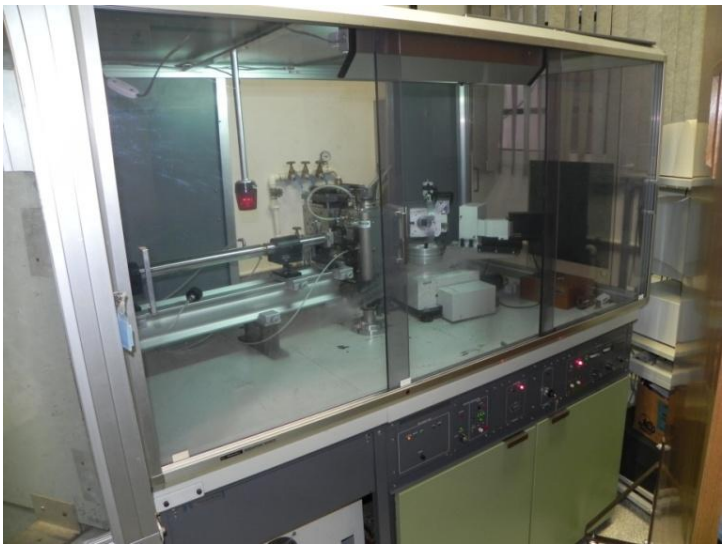


Figura 29 - Equipamento utilizado para a realização dos ensaios de DRX

As fazes cristalinas foram identificadas através do programa Match, utilizando o banco de dados PDF2 (2010), utilizando-se somente a seção de minerais, como ilustrado na figura 30.

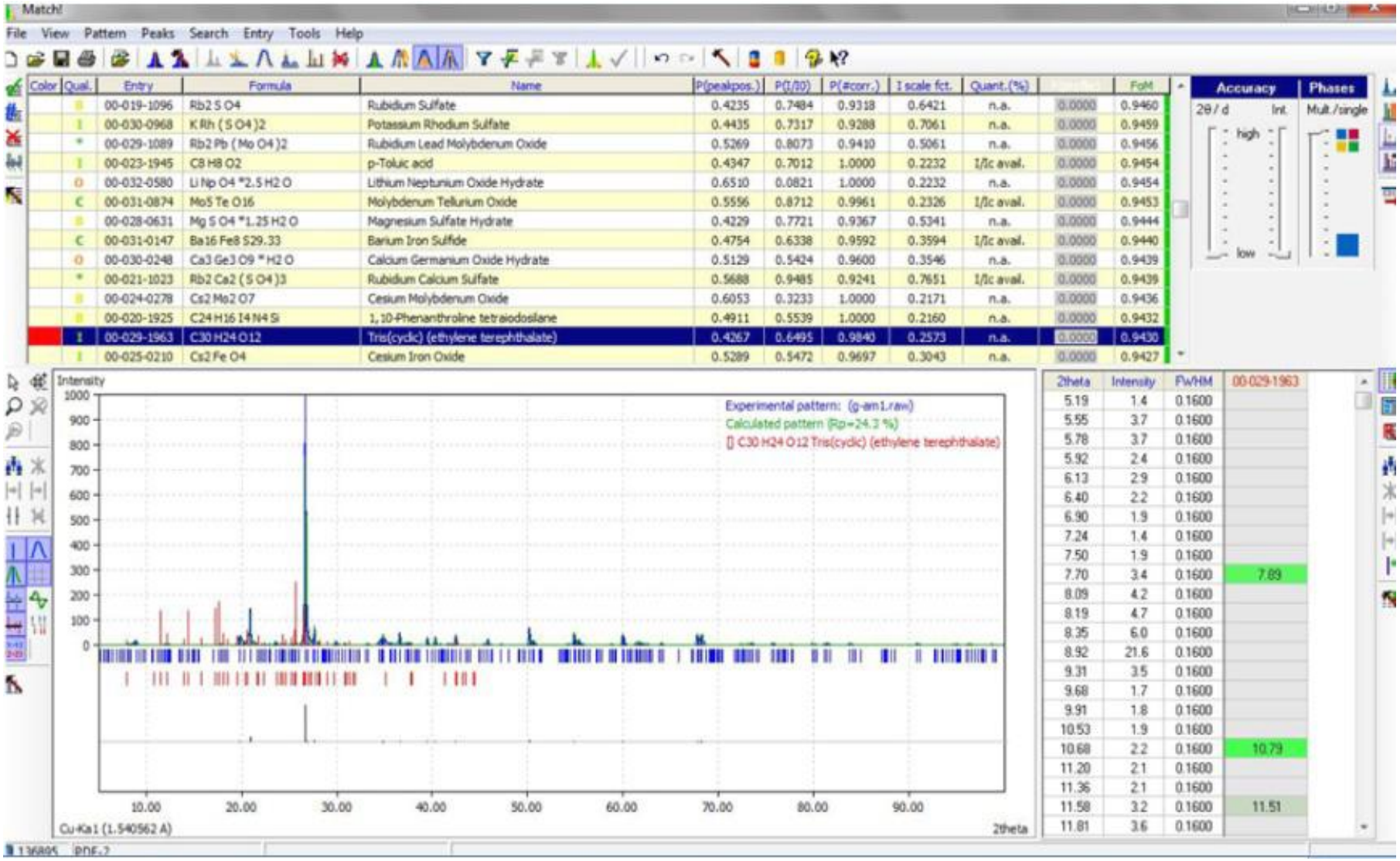


Figura 30 - Interface do programa MATCH!

O programa foi ajustado a ter uma baixa precisão por se tratar de uma amostra policristalina. A baixa precisão na diferença entre picos (2θ/d) e Intensidade é lustrada na figura 31.

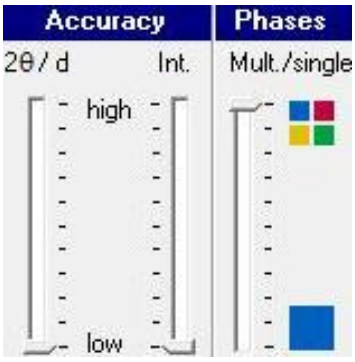


Figura 31 - Ajuste programável da precisão, distancia entre picos, intensidade e número de fases do programa MATCH

Em todas as amostras, o quartzo foi o mineral mais provável, com a maior probabilidade de ser encontrado e, por isso, adotou-se o erro desse mineral frente às amostras como padrão, para minimizar os erros do programa.

g) Espectrometria de 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, como ilustra a figura 32. Para a realização do ensaio, foi utilizado o método de pastilha de pó prensado (PPP), conforme no trabalho publicado na Revista Brasileira de Geociências, volume 29, número 3.

Figura 32 - Equipamento utilizado no ensaio de FRX

Foram analisados os 11 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.

Depois de terminados os ensaios físicos e químicos nas amostras de solos coletadas e a partir dos resultados obtidos nesses ensaios, foram escolhidas 5 amostras para a confecção dos agregados leves de argila calcinada, sendo elas as massas de produção utilizadas por todas as 5 empresas selecionadas para a fabricação de seus produtos. Ressalta-se aqui que, para a melhor apresentação dos resultados, cada uma das cinco amostras passa a ser chamada pelo nome da cidade das empresas.

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

Os ensaios de análise térmica diferencial e termogravimétrica foram realizados pela empresa BP engenharia indústria e comercio Ltda., localizada na cidade de Campinas – SP. As análises térmicas diferenciais foram executadas em alíquotas de 1g pulverizadas, empregando-se equipamento de sistema de analises térmicas da marca BP engenharia, modelo RB 3000, com taxa de aquecimento 12,4 °c/min. até a temperatura máxima de 1000°C exposta à atmosfera, como ilustra a figura 33.

Figura 33 – Equipamento utilizado para a realização do ensaio

Já as análises termogravimétricas foram realizadas utilizando-se alíquotas de 15g de amostra pulverizadas, empregando-se o mesmo aparelho utilizado para as análises térmicas diferenciais, com taxa de aquecimento 12,4°C/min. até a temperatura máxima de 1000°C exposta à atmosfera, como ilustra a figura 33.

4.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGILA CALCINADA

Os corpos de prova de argila calcinada foram produzidos no Laboratório de Construções Rurais e Ambiência da FZEA/USP, na cidade de Pirassununga, SP.

Os corpos de prova foram extrudados em formato de barras cilíndricas com 10 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro, utilizando-se as massas de produção de cada uma das 5 empresas estudadas.

Para a confecção das massas para a extrusão, as amostras de solo foram destorroadas e moídas, ficando em forma de pó, com diâmetro das partículas inferior a 0,2 mm. Para isso, elas foram submetidas a um cilindro moedor, seguido de um peneiramento e uma nova passagem pelo moedor. Por fim, as amostras foram peneiradas (peneira 80 Mesh) e ensacadas.

Após estarem todas as amostras prontas para serem preparadas e moldadas, elas foram submetidas ao ensaio de determinação da quantidade de água ($W_{médio}$) existente em cada uma delas. Para isso, foram coletadas e pesadas três amostras da cada tipo de solo, 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 de cada uma foi determinado (tabela 11).

Tabela 11 - Umidade das amostras de solo

Umidade	Ubarana	Itu	Porto Ferreira	Tambaú	Leme
$W_{médio}$ (%)	5,75	5,01	4,68	4,97	2,42

As amostras foram ensacadas e transportadas ao campus da USP na cidade de Pirassununga, onde foi executada a extrusão dos corpos de prova. Antes do início da preparação das massas, um sistema de identificação dos corpos de prova foi criado, conforme as tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12 - Legenda de identificação dos locais de extração das matérias primas das amostras

Local	Identificação
Ubarana	+
Porto Ferreira	+ +
Leme	+ + +
Itu	+ + + +
Tambaú	+ + + + +

Tabela 13 - Legenda de identificação da temperatura de queima das amostras

Temperatura de queima (°C)	Identificação
800	-
900	- -
1000	- - -

Tabela 14 - Legenda de identificação do número das amostras

Número da amostra	Identificação
1	I
2	I I
3	I I I
4	I I I I
5	I I I I I
6	I I I I I I

Portanto, cada um dos corpos de prova foi marcado com as identificações de local, número e temperatura de queima das amostras, conforme a figura 34.

Figura 34 – Corpos de prova extrudados e marcados de acordo com suas temperaturas de queima, números e locais de extração das matérias primas

Para a preparação das massas, em um primeiro momento, estipulou-se que a quantidade de água a ser adicionada a cada uma das amostras seria a mínima para a extrusão, ou seja, a correspondente ao limite de plasticidade de cada uma das amostras.

Como as amostras já estavam com um pouco de água, determinada pelo ensaio de determinação da umidade das amostras, 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 a equação 5.

$$V = \frac{P}{1 + \left(\frac{w}{100}\right)} * \left[\left(\frac{LP}{100}\right) - \left(\frac{w}{100}\right)\right] \qquad (5)$$

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.

Após a adição da água, 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 35.

Porém, em alguns casos, as massas produzidas com adição de quantidade mínima de água para se atingir o limite de plasticidade de cada uma das amostras não apresentavam características adequadas para o equipamento de extrusão. Assim, decidiu-se adicionar mais água a cada uma das misturas, até que elas apresentassem características de moldagem.

Figura 35 - Preparação da massa para extrusão

A tabela 15 apresenta os valores do teor de umidade de cada uma das amostras para atingirem características de moldagem.

Tabela 15 – Valores do teor de umidade e dos limites de plasticidade das amostras para extrusão

	Ubarana	Porto Ferreira	Itu	Tambaú	Leme
LP	19,1	30,7	21,7	28,1	25,9
W_e (%)[1]	19,4	27,5	18,2	31,6	27,8

(1) umidade das amostras para a extrusão

Após serem preparadas, as massas foram extrudadas, em uma extrusora de pequeno porte 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 36.

Figura 36 - Massas extrudadas em formato cilíndrico

Conforme os corpos de prova eram extrudados, eles eram cortados em tamanho aproximado de 40 cm de comprimento e armazenados em bandejas, ficando assim preparados para serem cortados.

Após extrudados, os corpos de prova foram cortados, ficando cada um com 10 cm de comprimento e 15 mm de diâmetro, para a realização dos ensaios de absorção de água, porosidade aparente, retração linear, expansão por umidade, massa específica aparente e resistência à compressão. Foram cortados 21 corpos de prova para cada uma das amostras, sendo seis para cada temperatura de queima e três extras, conforme as figuras 37 e 38.

Figura 37 - Corte das barras **Figura 38 - Barras cortadas**

Após serem cortados, os corpos de prova 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 temperaturas de 800, 900 e 1000°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.

Depois de conformados, secos em estufa e queimados, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de retração linear, expansão por umidade, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente e resistência à compressão.

4.4 ENSAIOS REALIZADOS NOS CORPOS DE PROVA DE ARGILA CALCINADA

Para se determinar as características físicas das peças queimadas e posteriormente escolher qual a matéria prima seria utilizada para a confecção dos agregados para a utilização nos concretos estruturais estudados nesta pesquisa, os corpos de prova queimados foram submetidos a uma série de ensaios físicos, como mostra a tabela 16.

Tabela 16 - Ensaios realizados nos corpos de prova queimados

Ensaio	Descrição	Normatização
a	Retração linear	
b	Expansão por umidade e absorção de água	ABNT NBR 13818:1997
c	Porosidade aparente e massa específica aparente	
d	Resistência à compressão	

a) Retração linear

Para o ensaio de retração linear, os corpos de prova foram medidos em três pontos distintos de seus comprimentos, utilizando-se um paquímetro digital da marca *Mitutoyo, modelo CD-8'' CX-B, código 500-172-20B*, com precisão de 0,02 mm.

A primeira medição foi realizada após a secagem dos corpos de prova em estufa e antes da queima. Após a tomada das medidas, os corpos de prova foram levados à mufla para queima, em três diferentes temperaturas (800 ^{o}C, 900 ^{o}C e 1000 ^{o}C).

Depois de serem queimados, os corpos de prova foram novamente medidos, nos mesmos pontos utilizados para medição antes da queima e, a partir da equação 6, calculou-se a retração linear de cada um dos corpos de prova.

$$RL = \left(\frac{Lo - Lf}{Lo}\right) * 100 \qquad (6)$$

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) Expansão por umidade e absorção de água – Baseado na norma ABNT NBR 13818:1997

Para os ensaios de expansão por umidade e absorção de água, 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 Mitutoyo, modelo CD-8'' CX-B, código 500-172-20B, em três pontos distintos de seus comprimentos. Após isso, eles foram colocados imersos em água a temperatura de aproximadamente 100°C, durante 24 horas, conforme ilustram as figuras 39 e 40.

Figura 39 - Corpos de prova separados para imersão em água

Figura 40 - Corpos de prova imersos em água à temperatura de 100 °C

Após o período de imersão os corpos de prova foram secos, apenas superficialmente com toalha de papel, e novamente medidos e pesados, com os mesmos paquímetro e balança. A partir destes valores e com as equações 7 e 8, calculou-se a absorção de água e a expansão por umidade de cada uma das amostras.

$$AA = \left(\frac{Mu - Ms}{Ms}\right) * 100 \qquad (7)$$

Onde,

Mu = massa úmida dos corpos de prova, em gramas

Ms = massa seca dos corpos de prova, em gramas

$$EPU = \left(\frac{lf - lo}{lo}\right) * 100 \qquad (8)$$

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 colocados imersos em água, em temperatura ambiente, por aproximadamente 48 horas. Após o período de imersão, os corpos de prova foram pesados imersos em água,

como ilustra a figura 41. Com as equações 9 e 10, calculou-se as porosidades aparentes e massas específicas aparentes das amostras analisadas.

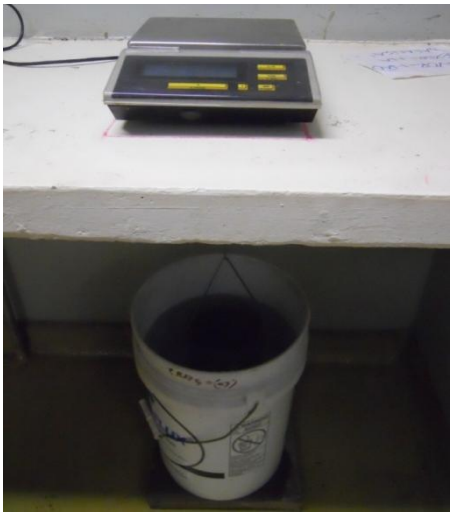


Figura 41 - Corpos de prova pesados imersos em água

$$PA = \left(\frac{Mu - Ms}{Mu - Mi}\right) * 100 \qquad (9)$$

$$MEA = \left(\frac{Ms}{Mu - Mi}\right) \qquad (10)$$

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

Para o ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova cilíndrico de 10 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro foram cortados em corpos de prova com comprimento igual a duas vezes o diâmetro, ficando assim com 3 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro.

Após estarem cortados, os corpos de prova ficaram imersos em água à temperatura ambiente por 24 horas, antes do início da compressão. Depois de imersos, os corpos de

prova foram submetidos à força de compressão aplicada através de um equipamento de ensaio de compressão fabricado pela empresa “Alfred J. Amsler & Co”, como ilustra a figura 42.

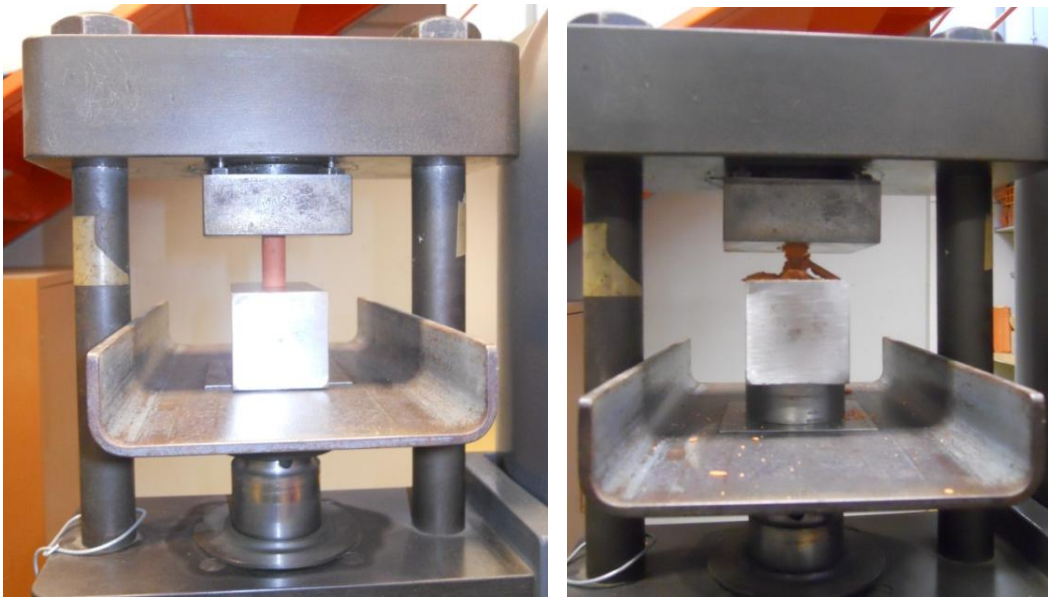


Figura 42 - Corpo de prova sendo rompido no ensaio de compressão

4.5 PRODUÇÃO DOS AGREGADOS 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. Da mesma forma que na produção dos copos de prova de argila calcinada, para a produção dos agregados leves as amostras de solo foram destorroadas e moídas, ficando com diâmetro de partículas inferior à 0,2 mm.

Após o destorroamento, as amostras foram submetidas ao ensaio de determinação da quantidade de água ($W_{médio}$) existente em cada uma delas. Para isso, foram coletadas e pesadas três amostras de cada tipo de solo e, em seguida, colocadas na estufa para secagem por 24 horas a 100 ^{o}C. Após estarem secas, as amostras foram pesadas novamente e o teor de umidade de cada uma foi determinado. Conhecendo-se a umidade natural das amostras, adicionou-se quantidades de água necessárias para cada uma das amostras atingirem seus respectivos limites de plasticidade (LP). A quantidade necessária para cada amostra atingir seu limite de plasticidade (LP) dá-se pela equação (5), apresentada no item 4.3 deste capítulo.

Após a adição de água, as amostras foram misturadas e, para as duas amostras, a adição de água foi insuficiente para adquirirem características moldáveis. Dessa forma, adicionou-se mais água a cada uma delas, até que apresentassem características moldáveis, como ilustra a figura 43.

Figura 43 – Mistura das massas cerâmicas

Após serem preparadas, as massas foram extrudadas, em uma extrusora de pequeno porte 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 15,0 mm, como ilustra a figura 44.

Figura 44 – Extrusão das massas cerâmicas

Depois de extrudados, os agregados foram cortados em seu tamanho final (aproximadamente 15 x 15 mm) e armazenados em bandejas para secagem, conforme ilustra a figura 45.

Figura 45 – Corpos de prova sendo cortados e armazenados para secagem

Após serem cortados, os corpos de prova 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 ^{o}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.

4.6 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Para a realização dessa pesquisa foram confeccionados corpos de prova de concreto com agregados produzidos com as massas cerâmicas de Itu, Porto Ferreira e com agregados argila expandida e basalto.

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 2624 Kg/m³ e massa unitária no estado solto de 1551 Kg/m³, além de cimento tipo CP II-Z-32, produzido pela empresa Votorantim Cimentos Brasil S/A, ensacada em Outubro de 2011, cujas características são apresentadas na tabela 17.

Tabela 17 – Características e propriedades do cimento CPII-Z-32

Características e propriedades		Unidade	
Finura	Resíduo #200 (NBR 11579)	%	1,30
	Blaine	cm²/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 18 ilustra as características físicas dos quatro tipos de agregados graúdos, com tamanho superior à 12,5 mm e inferior à 19 mm, utilizados para a produção dos corpos de prova de concreto. Ressalta-se aqui que, por os agregados produzidos com as massas cerâmicas de Itu e Porto Ferreira apresentarem elevados valores de absorção de água, esses agregados foram utilizados na condição saturada, permanecendo imersos em água à temperatura ambiente por 24 horas antes da moldagem. Para conferir as mesmas condições à todos os corpos de prova, os agregados de argila expandida e basalto também foram utilizados nas mesmas condições.

Tabela 18 – Características físicas dos agregados graúdos utilizados nos corpos de prova de concreto

Agregado	Massa unitária no estado solto (Kg/m³)	Massa específica saturada (Kg/m³)	Absorção de água (%)
Brita	1543	2930	0,88
Argila expandida	503	947	12,61
Itu	1066	2129	15,67
Porto	965	2039	21,64

Analisando-se a tabela 18, percebe-se que os agregados possuem características distintas, o que pode refletir diretamente nas características finas dos concretos produzidos com cada um dos agregados.

Conhecendo-se as características de cada um dos agregados, procurou-se manter em um mesmo patamar os consumos de cimento e areia para os quatro tipos de concreto, assim como uma relação água/cimento (0,5) e o volume dos agregados graúdos para todos os corpos de prova, como ilustra a tabela 19, de modo a analisar as alterações promovidas nos concretos para cada tipo de agregado.

Tabela 19 – Consumos teóricos de cimento, areia, agregado e água para a moldagem dos corpos de prova de concreto

CP	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Agregado (Kg)	Água (Kg)	Relação água / cimento
Brita	395,55	988,88	838,57	197,78	0,5
Argila expandida	395,58	988,96	284,82	197,79	0,5
Itu	394,10	985,26	543,86	197,05	0,5
Porto Ferreira	395,06	987,64	493,82	197,53	0,5

A mistura dos materiais foi realizada utilizando-se uma betoneira e, a moldagem das fôrmas deu-se com o auxílio de uma mesa vibratória. Para cada tipo de concreto foram moldados 17 corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, como ilustram as figuras 46 e 47.

Figura 46 – Mistura dos materiais na betoneira

Figura 47 – Moldagem dos corpos de prova

A tabela 20 ilustra os consumos reais de areia, cimento, agregado e água na moldagem dos corpos de prova de concreto, levando-se em consideração a incorporação de ar no processo de moldagem.

Tabela 20 - Consumos reais de cimento, areia, agregado e água para a moldagem dos corpos de prova de concreto

CP	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Agregado (Kg)	Água (Kg)	Relação água / cimento
Brita	387,53	968,84	821,58	193,77	0,5
Argila expandida	377,40	943,51	271,73	188,70	0,5
Itu	389,17	972,92	537,06	194,59	0,5
Porto Ferreira	383,94	959,84	479,92	191,97	0,5

Os corpos de prova moldados foram secados no ambiente do laboratório por um período de 24 horas. Após esse período, os corpos de prova foram desformados e foram submetidos ao processo de cura, em uma câmara úmida com umidade variando de 90% a 95% e temperatura variando de 20 ^{o}C a 23 ^{o}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 ^{o}C a 26 ^{o}C e umidade variando de 62% a 78%, aonde permaneceram até 91 dias de idade.

4.7 ENSAIOS REALIZADOS NOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Para a realização desta pesquisa, foram realizados ensaios nos corpos de prova no estado fresco e no estado endurecido, conforme ilustra a tabela 21.

Tabela 21 – Ensaios realizados nos corpos de prova de concreto

	Ensaio	Estado	Idade (dias)	Normatização
a	Slump	Fresco	Moldagem	NBRNM 67:1998
b	Massa específica fresca	Fresco	Moldagem	ABNT NBR 9833:2008
c	Teor de ar incorporado	Fresco	Moldagem	ABNT NBR 9833:2008
d	Resistência à compressão	Endurecido	7, 28 e 91	ABNT NBR 5739:2007
e	Resistência à tração	Endurecido	28	ABNT NBR 7222:2001
f	Módulo de deformação	Endurecido	28	ABNT NBR 8522:2008
g	Retração por secagem	Endurecido	7, 28, 60, 90, 150, 250	
h	Absorção de água	Endurecido	91	ABNT NBR 9778:2005
i	Índice de vazios	Endurecido	91	ABNT NBR 9778:2005
j	Massa específica	Endurecido	91	ABNT NBR 9778:2005

a) Slump

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 feita em três etapas, sendo que em cada uma das etapas usou-se uma haste metálica para adensar o concreto. Após 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 a figuras 48 a, b e c.

(a) **(b)**

(c)

Figura 48 – (a) Moldagem do corpo de prova no tronco de cone; (b) Retirada do tronco de cone; (c) Medida do abatimento do tronco de cone

b) Massa específica fresca - ABNT NBR 9833:2008

Para a determinação da massa específica do concreto no estado fresco determinou-se a massa de concreto necessária para preencher totalmente um recipiente cujo volume era igual a três litros. Depois de pesado, a divisão entre a massa do concreto pelo volume ocupado resultou na massa específica do concreto no estado fresco, conforme ilustra a figura 49.

Figura 49 – Pesagem do recipiente com concreto para determinação da massa específica fresca

c) Teor de ar incorporado - ABNT NBR 9833:2008

O teor de ar incorporado na moldagem do concreto representa a quantidade de ar que se incorpora ao corpo de prova de concreto durante a moldagem. A determinação do teor de ar incorporado foi feita a partir da equação 11.

$$Teor\ de\ ar = \left(\frac{Met - Mer}{Met}\right) * 100 \qquad (11)$$

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.

d) Resistência à compressão - ABNT NBR 5739:2007

Para o ensaio de resistência à compressão foram preparados 14 corpos de prova para cada um dos tipos de concreto confeccionados. O ensaio foi realizado em três idades diferentes, sendo que aos 7 dias de idade foram rompidos 4 corpos de prova de cada tipo de concreto e aos 28 e 91 dias foram rompidos 5 corpo de prova para cada tipo de concreto, respectivamente.

Após a moldagem, os corpos de prova curaram 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, como ilustra a figura 50. Após o capeamento, os corpos de prova foram transferidos para a câmara úmida, onde permaneceram até 91 dias de idade.

Figura 50 - Corpo de prova capeado

Nas datas referentes às idades de 7, 28 e 91 dias de idade, os corpos de prova foram retirados da estufa e submetidos ao ensaio de resistência à compressão, através de um equipamento de ensaio de compressão fabricado pela empresa “Alfred J. Amsler & Co”, como mostram as figuras 51 a, b e c.

(a)

(b)

(c)

Figura 51 – (a) Corpo de prova preparado para ensaio de compressão; (b) Corpo de prova sendo rompido; (c) Corpo de prova rompido

e) Resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2001)

O ensaio de resistência à tração nos corpos de prova de concreto foi realizado baseado na Norma Brasileira ABNT NBR 7222:2001. O ensaio foi realizado através da aplicação de uma força de compressão diametral nos corpos de prova cilíndricos.

Para o ensaio de resistência à tração foram selecionados três corpos de prova de cada um dos tipos de concreto, com idade de 28 dias, após cura em câmara úmida. A força de compressão diametral foi aplicada pela mesma prensa utilizada para a realização do ensaio de compressão nos corpos de prova, como ilustra a figura 52.

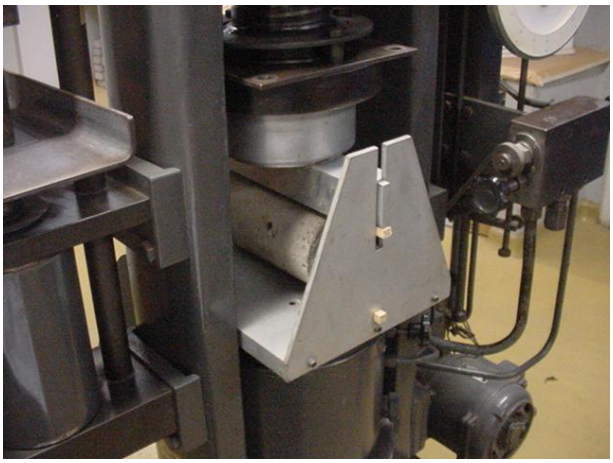


Figura 52 – Ensaio de resistência à compressão por compressão diametral

f) 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. 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 em estufa, foram ensaiados para a determinação do 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 a medida que a carga de compressão aumenta. A medida da deformação dos corpos de prova dá-se através da utilização de um aparelho modelo PRC, número 1052, da empresa Dinateste Indústria a Comércio Ltda., conforme ilustra a figura 53.

Figura 53 – Ensaio de módulo de deformação

Para cada um dos corpos de prova foram tomadas duas medidas de deformação, sendo a primeira uma medida inicial (sem aplicação de carga) e a segunda uma medida com a aplicação de uma carga correspondente à 40% da carga média resistida pelos corpos de prova quando submetidos à esforços de compressão.

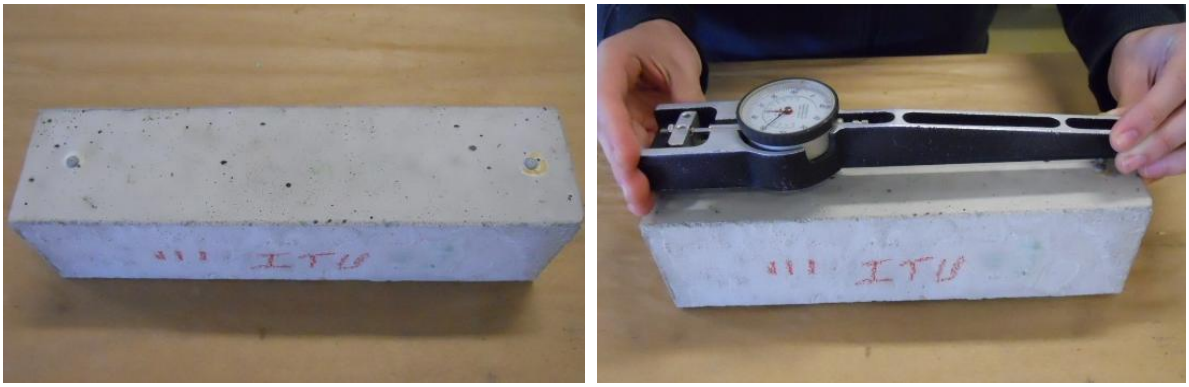
Após a tomada das medidas, os corpos de prova foram submetidos à carga de compressão suficiente para serem rompidos. Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão foram comparados aos obtidos pelos corpos de prova rompidos após o ensaio de módulo de deformação, sendo que todos os corpos de prova obtiveram valores de resistência à compressão compatíveis aos valores observados no ensaio de compressão.

g) Retração por secagem

Para o ensaio de retração por secagem dos corpos de prova de concreto foram confeccionados três corpos de prova retangulares para cada um dos tipos de concreto, com base quadrada de 75 mm e comprimento de 250 mm, conforme a figura 54.

Figura 54 – Corpos de prova moldados para o ensaio de retração linear de secagem

Após a moldagem e desforma dos corpos de prova, foram colados (com super bonder) dois “inserts” em cada um dos corpos de prova (figura 55 (a)) e foram tomadas as medidas iniciais (figura 55 (b)), a partir do centro de cada um dos “inserts”, através da utilização do aparelho modelo H 3231, produzido pela empresa Humboldt MFG. CO., como ilustra a figura 56. Com idades de 7, 28, 60, 90, 150 e 250 dias foram tomadas medidas a partir do centro de cada um dos “inserts”. 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 por secagem dos corpos de prova.



(a) **(b)**

Figura 55 – (a) Corpo de prova com os inserts; (b) Tomada de medida de retração

Figura 56 – aparelho utilizado para tomada de medidas de retração

h) Absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente (ABNT NBR 9778:2005)

Os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica 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 ^{o}C, para a eliminação da água contida em cada um dos corpos de prova, conforme ilustra a figura 57.

Figura 57 – corpos de prova na estufa

Após ficarem na estufa, os corpos de prova foram colocados imersos em água à temperatura ambiente, também por 72 horas (a cada 24 horas eram tomadas medidas de peso dos corpos de prova), como ilustra a figura 58. Após o período de imersão, foram tomadas medidas de peso dos corpos de prova quando imersos em água.

Figura 58 – corpo de prova imerso em água

A absorção de água, o índice de vazios e a massa específica dos corpos de prova foram obtidos através das equações 12, 13 e 14, respectivamente.

$$\left(\frac{Mu - Ms}{Ms}\right) * 100 \qquad (12)$$

$$\left(\frac{Mu - Ms}{Mu - Mi}\right) * 100 \qquad (13)$$

$$\left(\frac{Ms}{Mu - Mi}\right) \qquad (14)$$

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.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa sobre agregados leves de argila calcinada para concretos estruturais. A análise será dividida em 2 etapas, sendo elas: caracterização das matérias primas coletadas e a caracterização dos corpos de prova queimados. Como optou-se pela confecção de agregados apenas com as massas de produção das empresas, na apresentação dos resultados serão apresentados apenas resultados referentes à essas amostras.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS COLETADAS

As análises granulométricas, os ensaios de limites de consistência de massa específica dos sólidos foram realizados no laboratório de solos do Departamento de Geotecnia EESC – USP. As difrações de raios X foram realizadas no Laboratório de DRX do grupo de pesquisa de cristalografia de Instituto de Física de São Carlos - USP. As espectrometrias de fluorescências de raios X foram executadas no laboratório de fluorescências de raios X (FRX) do Instituto de Geociências de São Paulo – USP. As análises térmicas diferenciais e termogravimétricas foram realizadas na empresa BP Engenharia indústria e comércio Ltda., na sua matriz localizada na cidade de Campinas – SP.

5.1.1 LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Os valores dos limites de liquidez das amostras analisadas (tabela 22) variaram de 48,8% à 67,0%. Já os limites de plasticidade das matérias primas analisadas flutuaram de 19,1% à 30,7%, conferindo às amostras índices de plasticidade entre 18,1% e 38,9%, o que mostra que todas as amostras analisadas podem ser classificadas como altamente plásticas (índice de plasticidade superior à 15%) (PÉREZ et al. 2010).

De acordo com PÉREZ et al. (2010), Para a moldagem por extrusão de peças cerâmicas os valores adequados para o limite de plasticidade e para o índice de plasticidade são, respectivamente, de 15% a 25% e de 10% a 35%. As amostras de Ubarana e de Itu apresentaram valores de limites de plasticidade compreendidos entre 15% e 25% (19,1% e 21,7%, respectivamente). Com relação ao índice de plasticidade, as amostras de Porto Ferreira, Leme e Itu foram as únicas que apresentaram valores compreendidos entre 10% e

35% (18,1%, 32,1% e 27,3%, respectivamente). Portanto, a única amostra que apresentou limite de plasticidade e índice de plasticidade compreendidos entre os valores adequados para a moldagem por extrusão foi a de Itu (21,7% e 27,3%, respectivamente).

O limite de plasticidade representa a quantidade mínima de água a ser adicionada a uma amostra de solo para que o mesmo obtenha características moldáveis. Assim, as amostras de Ubarana e Itu, por apresentarem os menores limites de plasticidade dentre todas as amostras (19,1% e 21,7%) necessitam de menos água para serem conformadas, o que pode resultar em um menor tempo de secagem, menor porosidade aparente e conseqüentemente, menores problemas com defeitos causados pela retração linear.

Da mesma forma, a amostra de Porto Ferreira apresentou altos valores de limite de plasticidade comparado aos valores das outras amostras (30,7%), o que indica a necessidade de mais água para a conformação das peças, o que pode retardar o tempo de queima das peças, além de causar uma maior porosidade aparente e retração linear das peças queimadas, podendo aumentar a chance de defeitos nos produtos finais, como aparecimento de trincas.

Tabela 22 - Limites de consistência e massas específicas aparentes das matérias primas coletadas

Local	LL(1) (%)	LP(2) (%)	IP(3) (%)	ρ_s (4) (g/cm^3)
Tambaú	67,0	28,1	38,9	2,360
Porto Ferreira	48,8	30,7	18,1	2,640
Ubarana	57,5	19,1	38,4	2,695
Leme	58,0	25,9	32,1	2,675
Itu	49,0	21,7	27,3	2,585

(1) Limite de liquidez, (2) Limite de plasticidade, (3) Índice de plasticidade, (4) Massa específica dos sólidos.

5.1.2 MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

Os valores das massas específicas dos sólidos foram determinados segundo as recomendações da ABNT NBR 6508:1984. Os valores das massas específicas dos sólidos são apresentados na tabela 22, e variam de 2,360 a 2,695 g/cm^3.

O menor valor de massa específica encontrado foi na amostra de Tambaú (2,360 g/cm^3) e o maior na amostra de Ubarana (2,695 g/cm^3), o que pode ser um indicativo de que peças cerâmicas produzidas com as amostras de Tambaú poderão apresentar as menores massas específicas dentre as amostras analisadas. Como a massa específica dos sólidos está diretamente ligada à massa específica aparente das peças queimadas, as peças

conformadas com as amostras de maior massa específica dos sólidos poderão apresentar uma maior densificação e, conseqüentemente, os maiores valores de resistência a compressão e menores valores de absorção de água e porosidade aparente.

5.1.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Analisando-se a tabela 23, que apresenta a análise granulométrica das matérias primas coletadas, percebe-se que os teores de areia grossa e pedregulho nas amostras são baixos, variando entre 1% a 4% e 0% a 1%, respectivamente, sendo que em todas as amostras os teores de argila e silte são predominantes, variando entre 48% a 61% e 19% a 37,5%, respectivamente.

Tabela 23 - Resultados da análise granulométrica nas matérias primas coletadas

Local	Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)	Pedregulho (%)
Tambaú	61	34	2	1	1	1
Porto Ferreira	48	28	17	6	1	0
Ubarana	53	19	24	3	1	0
Leme	48,5	37,5	10	3	1	0
Itu	50	31	6	9	4	0

Percebe-se também que todas as amostras analisadas possuem em suas formulações maiores teores de material argiloso do que de outros grãos, com exceção da amostra de Ubarana, que apresenta em sua composição 28% de areia (areia fina, areia média e areia grossa), o que certamente contribuiu para o baixo valor de limite de plasticidade dessa amostra (19,1%), já que a areia é um dos principais materiais desplastificantes existentes (PÉREZ et al. 2010).

As amostras de Porto Ferreira e Leme apresentaram teores semelhantes de argila em suas composições (48% e 48,5%, respectivamente), o que contribuiu para que as duas amostras fossem conformadas com quantidades de água muito semelhantes (27,5% e 27,8%), mesmo a amostra de Porto Ferreira apresentando um limite de plasticidade superior à amostra de Leme (30,7% e 25,9%, respectivamente). O fato de todas as amostras apresentarem predominância de grãos finos (argila e silte) comprova suas características altamente plásticas (PÉREZ et al. 2010)

5.1.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

A identificação das fases cristalinas presentes nas diferentes amostras das massas de produção das empresas estudadas foi realizada através do ensaio de difração de raios X. As figuras 59 a 63 representam os difratogramas obtidos utilizando amostras na forma de pó, compactadas manualmente no porta amostras de difração e em seguida analisadas pelo programa "*Match!*", utilizando-se a biblioteca PDF2 (2010) seção de minerais.

Analisando-se os difratogramas, percebe-se que todas as amostras apresentam como principais características a presença de argilominerais. Todas as amostras apresentaram picos acentuados na faixa de $2\theta = 27^{o}$, que demonstram a presença de quartzo livre em suas composições, um dos principais formadores da fase vítrea dos produtos cerâmicos.

Em nenhum dos casos verificou-se a presença de montmorilonita (argilomineral com características expansivas). Porém, todas as amostras apresentaram picos característicos de muscovita, argilomineral com características expansivas. Além disso, as amostras de Porto Ferreira e Itu apresentaram picos característicos de ilita, que pertence ao grupo dos minerais com a estrutura da montmorilonita.

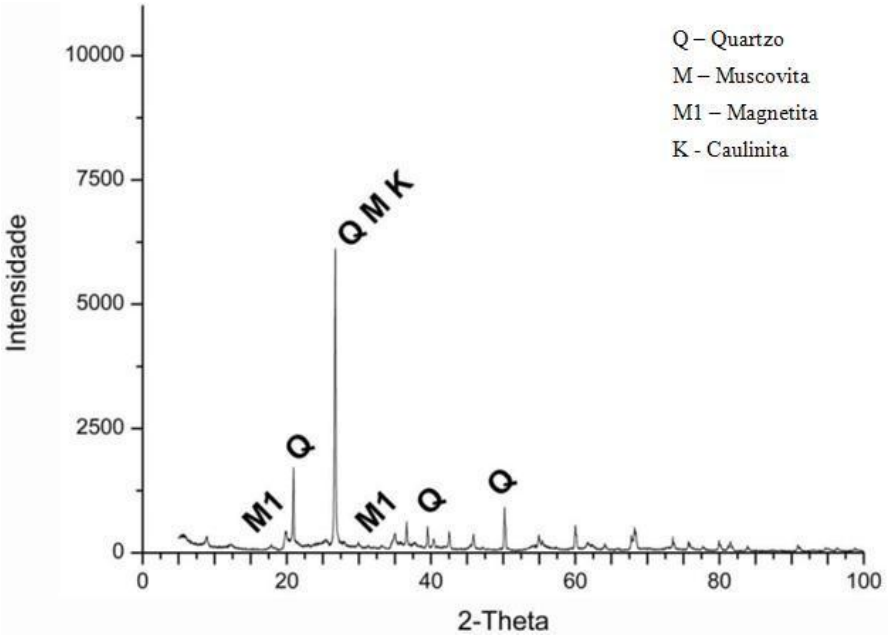


Figura 59 - Difratograma de raios-X da amostra de Tambaú

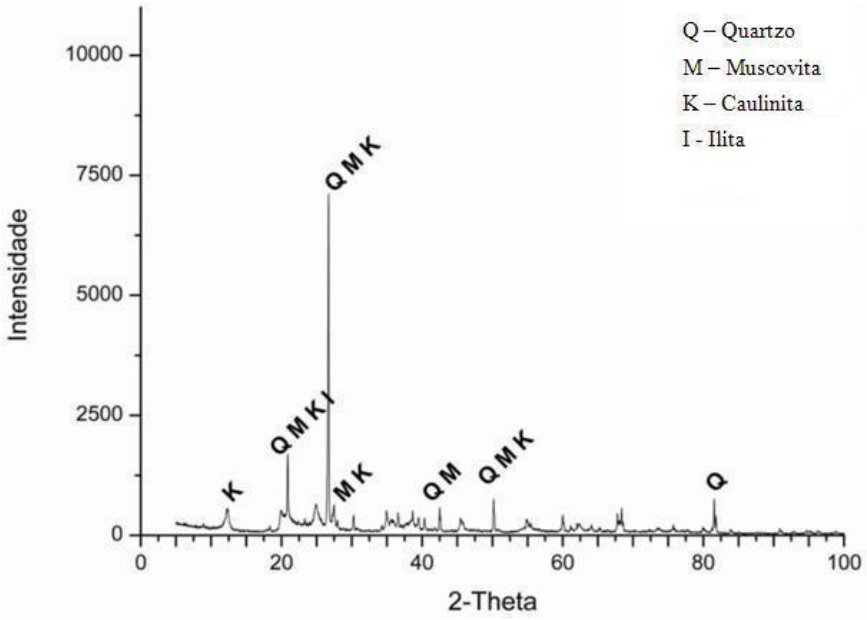


Figura 60 - Difratograma de raios-X da amostra de Porto Ferreira

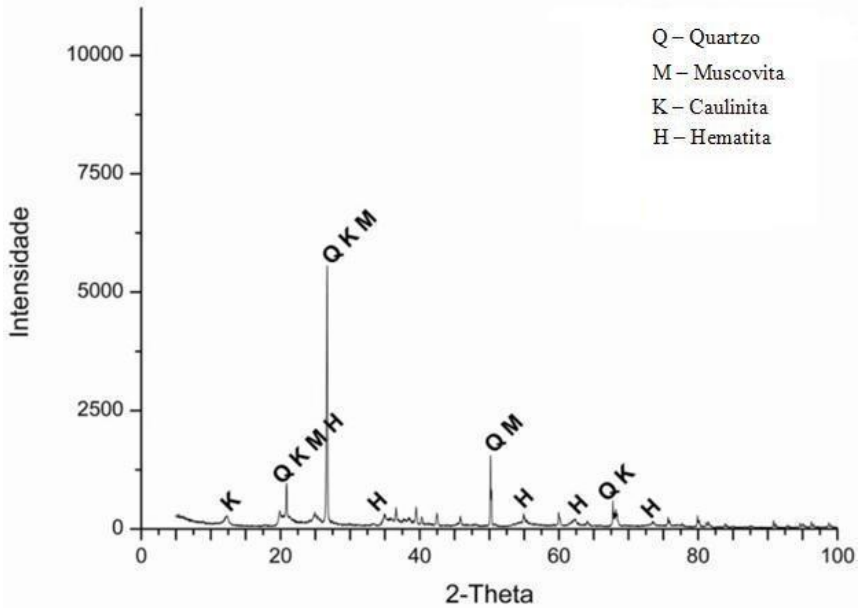


Figura 61 - Difratograma de raios-X da amostra de Ubarana

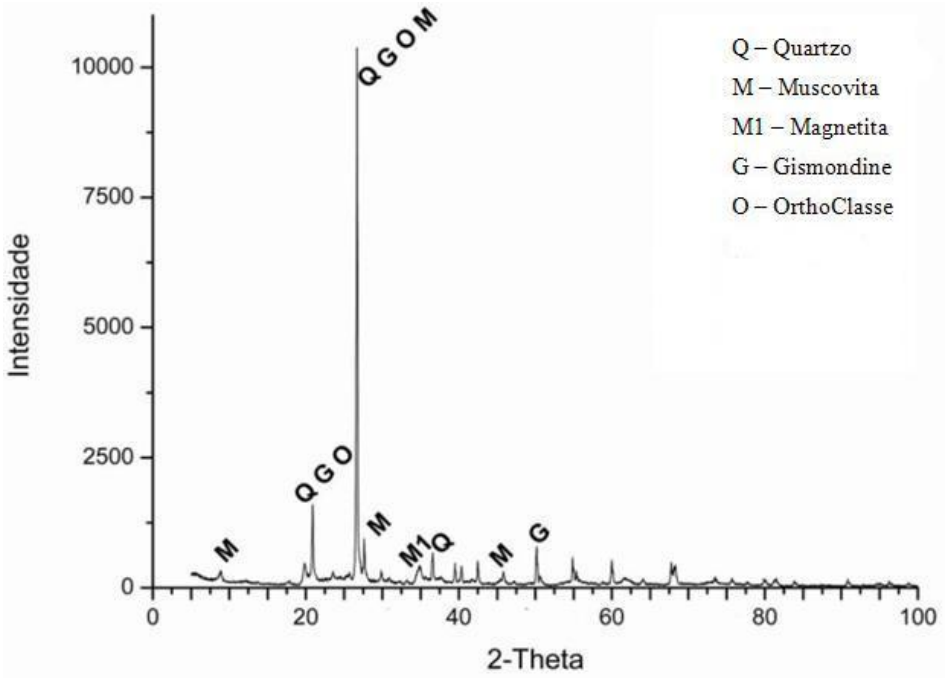


Figura 62 - Difratograma de raios-X da amostra de Leme

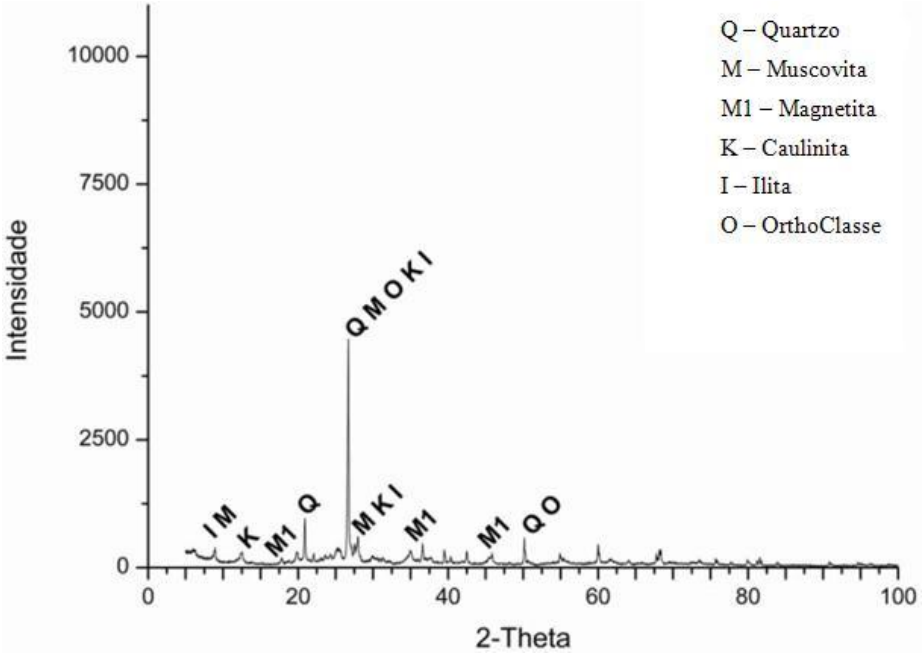


Figura 63 - Difratograma de raios-X da amostra de Itu

Ainda analisando as figuras 59 a 63, percebe-se que todas as massas de produção apresentam picos claros de hematita ou magnetita, o que está ligado à presença de ferro nas amostras, o que fica evidente na coloração avermelhada dos corpos de prova após a queima.

5.1.5 ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

A análise de espectrometria e fluorescência de raios X (FRX) é apresentada na tabela 24.

Tabela 24 - Composição química das amostras obtida através do ensaio de FRX (% de massa)

Amostra	SiO_2 (%)	TiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	P_2O_5 (%)	Perda ao fogo* (%)
Tambaú	66,77	0,904	15,64	6,32	0,057	1,36	0,32	0,12	2,40	0,119	6,04
Porto Ferreira	59,50	0,875	17,38	7,43	0,074	2,94	0,58	1,23	3,86	0,183	5,42
Ubarana	60,32	1,350	21,10	3,85	0,034	0,28	0,12	0,13	1,65	0,120	10,96
Leme	68,18	0,614	14,42	4,88	0,088	1,81	0,32	0,31	4,20	0,110	4,64
Itu	65,18	1,282	16,84	6,81	0,066	0,44	0,23	0,07	0,94	0,088	7,68

*Perda ao fogo realizada a temperatura de 1000 ^{o}C

Todas as amostras analisadas apresentaram altos teores de dióxido de silício (SiO_2), variando de 59,50% a 68,18%, sendo que as amostra de Porto Ferreira e Ubarana apresentam teores inferiores às amostras de Tambaú, Leme e Itu. O teor de dióxido de silício nas matérias primas influencia diretamente a resistência à compressão das peças queimadas.

De acordo com a tabela 24, a amostra de Porto Ferreira é a que apresenta em sua composição o menor teor de sílica (59,50%) e também o maior limite de plasticidade (30,7%) entre as massas de produção analisadas, o que indica que, segundo Cabral (2005), a presença de sílica nas matérias primas influencia nos valores dos seus limites de plasticidade, sendo que quanto menor o teor de sílica livre presente nas amostras, maior seu limite de plasticidade e, conseqüentemente, maior o valor da retração linear das peças queimadas.

A amostra de Ubarana apresentou uma quantidade de sílica muito semelhante à amostra de Porto Ferreira (60,32%) porém, seu limite de plasticidade foi o menor dentre todas as massas de produção, o que explica-se pela elevada quantidade de material arenoso em sua composição (28%), já que a areia é um dos principais materiais desplastificantes existentes (PRACIDELLI E MELCHIADES, 1997).

Analisando-se os dados da tabela 24, percebe-se também que a perda ao fogo das amostras analisadas variou de 4,64% da amostra de Leme a 10,96% da amostra de Ubarana. Isso pode ser relacionado ao teor de material orgânico das amostras, sendo que quanto maior esse teor, maior a perda ao fogo das mesmas e, conseqüentemente, maior a retração linear, a absorção de água e a porosidade aparente das peças queimadas, assim como menor a resistência a compressão das mesmas (GRUN, 2007).

Para uma melhor análise das diferenças químicas das matérias primas analisadas, um diagrama ternário foi construído, como ilustra a figura 64.

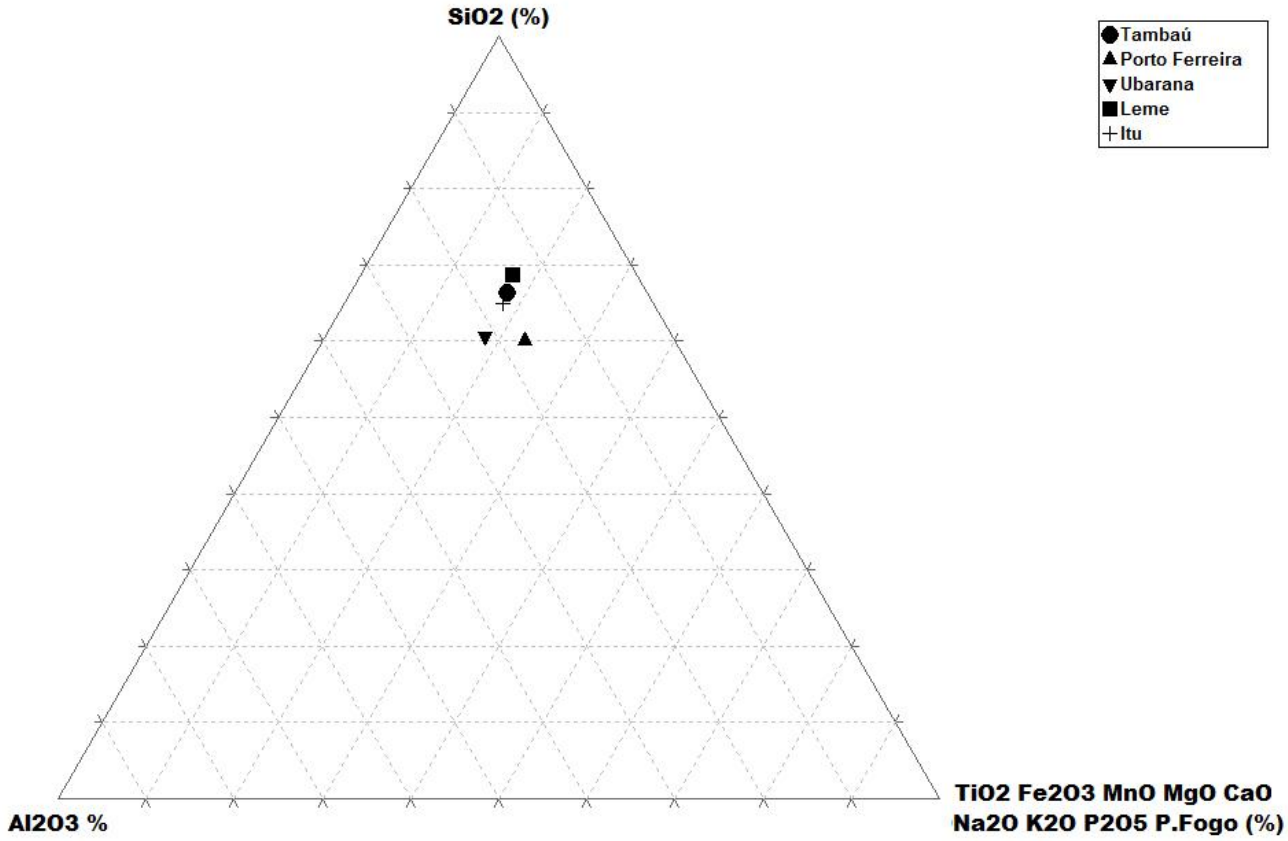


Figura 64 - Ternário da composição química das massas cerâmicas

Analisando-se a figura 56, percebe-se que as amostras de Tambaú, Leme e Itu apresentam quantidades semelhantes de SiO_2 e Al_2O_3 e, a amostra de Porto Ferreira é a que apresenta menores quantidades de SiO_2 e Al_2O_3 e maiores quantidades de outros óxidos, conferindo-se assim às peças queimadas com essa matéria prima os menores valores de resistência à compressão, devido à menor presença de material vítreo (SiO_2 + Al_2O_3) em suas composições.

Normalmente, os corpos de prova queimados com matérias primas com alto índice de SiO_2 e AlO_2 (formadores da fase vítrea) apresentam valores de resistência à compressão

superior aos corpos de prova com baixo teor destas substancias. Da mesma forma, o teor de matéria fundente (da matéria prima) e sua viscosidade estão diretamente ligados à resistência à compressão dos corpos de prova queimados, pois quanto maior a quantidade de material fundente com alta viscosidade, menores os valores de porosidade aparente dos corpos de prova queimados.

5.1.6 ANÁLISES TÉRMICAS (ATD e TG)

Os resultados obtidos nos ensaios de análise térmica diferencial e termogravimétrica das amostras analisadas são apresentados nas figuras 65 a 74 e na tabela 25. Analisando-se as figuras 65 a 74, que ilustram as análises térmicas das amostras analisadas, percebe-se que todas as amostras apresentam picos (exotérmicos), depressões (endotérmicos) e perdas relativas de massa similares nas mesmas faixas de temperatura, mostrando novamente que as 5 amostras escolhidas não apresentam diferenças tão consideráveis em suas constituições.

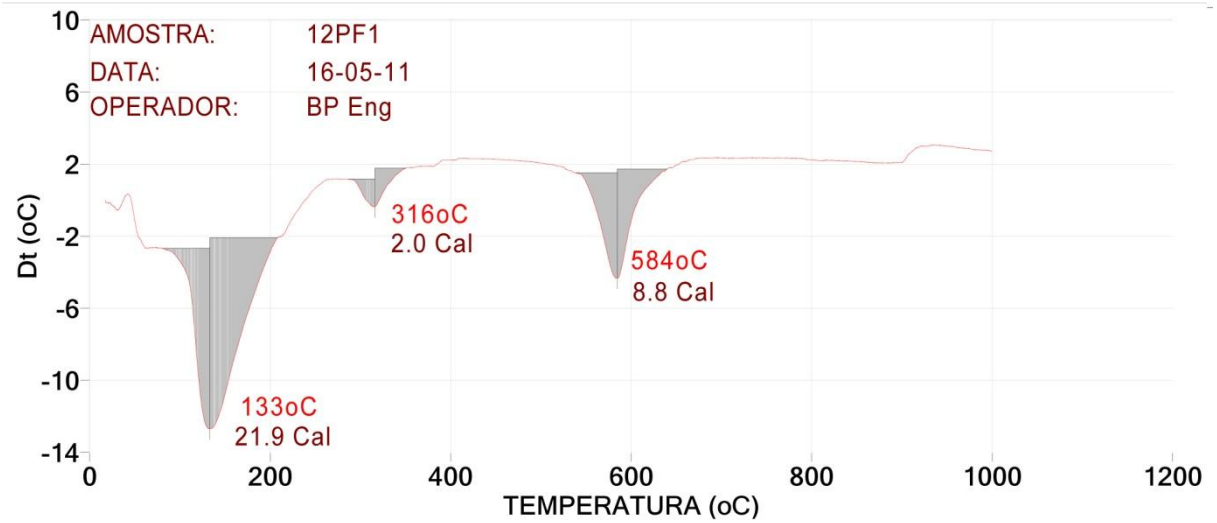


Figura 65 – Análise térmica diferencial da amostra de Tambaú

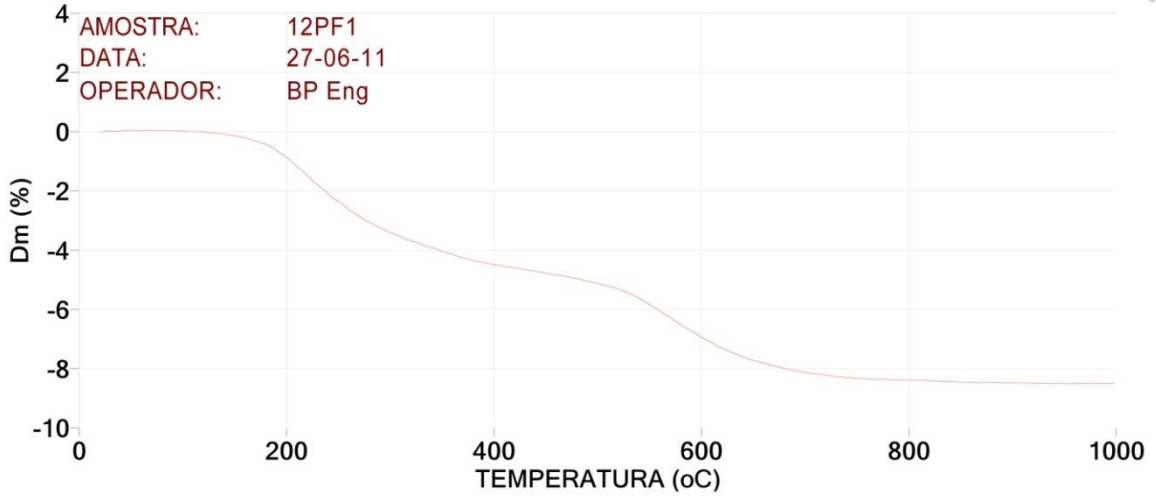


Figura 66 – Análise termogravimétrica da amostra de Tambaú

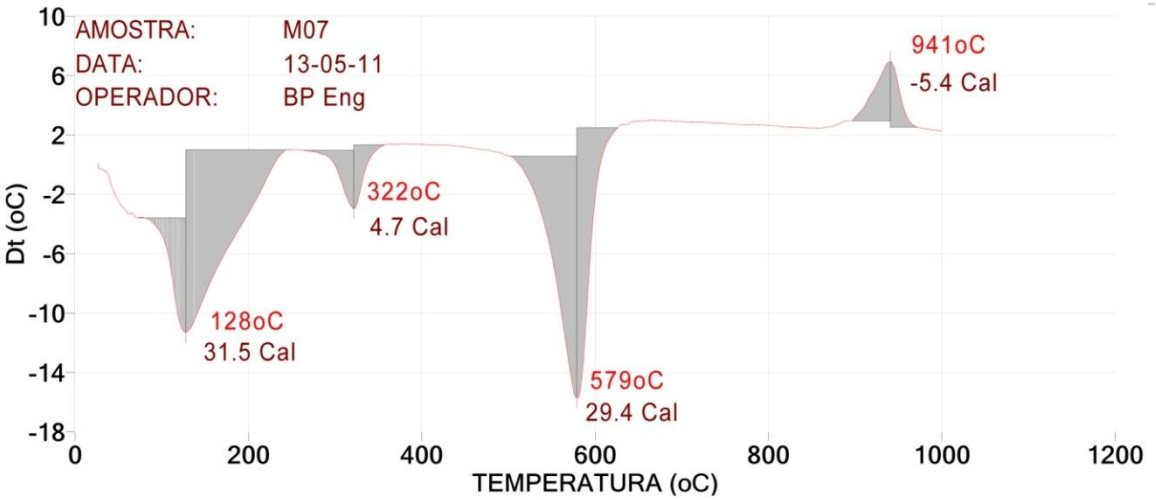


Figura 67 – Análise térmica diferencial da amostra de Porto Ferreira

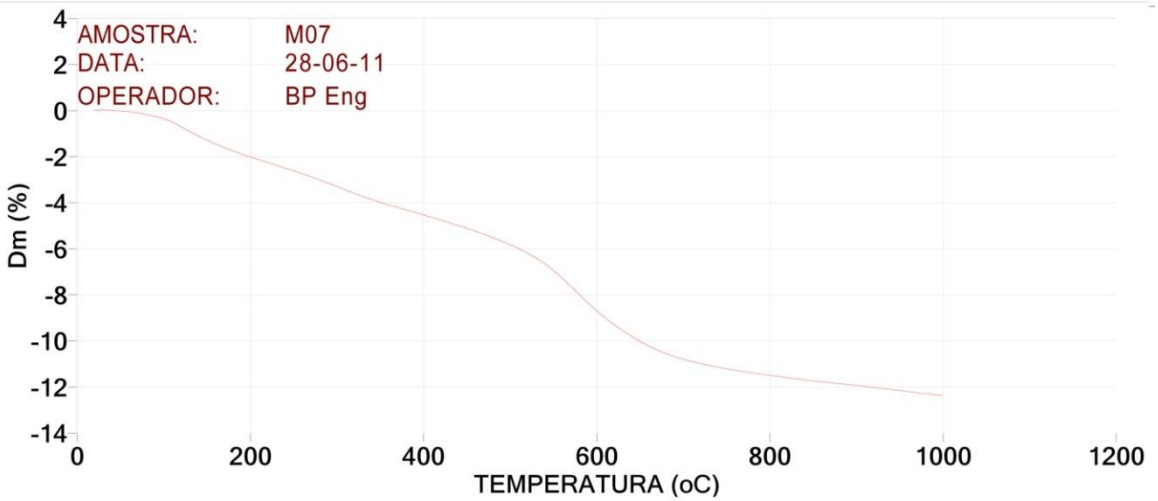


Figura 68 – Análise termogravimétrica da amostra de Porto Ferreira

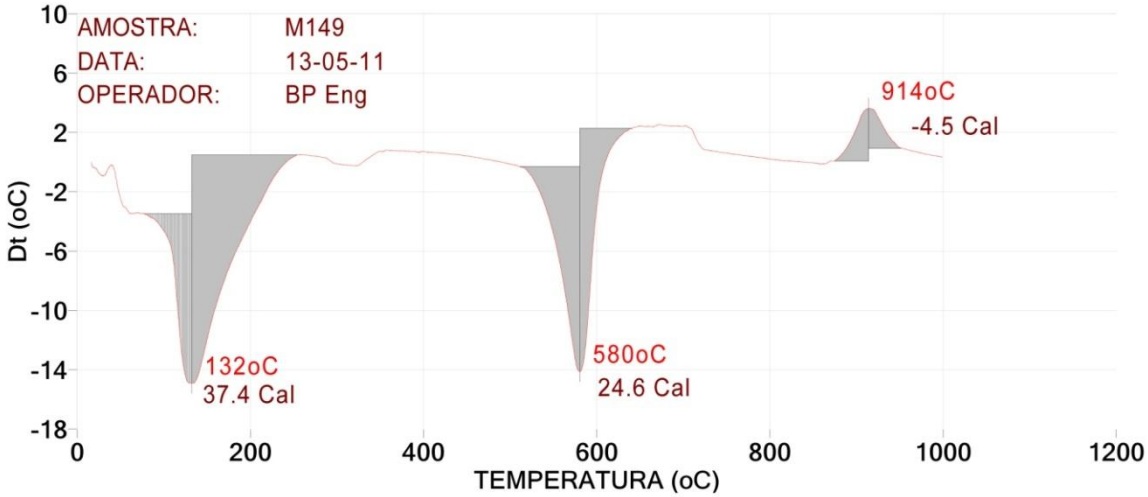


Figura 69 – Análise térmica diferencial da amostra de Ubarana

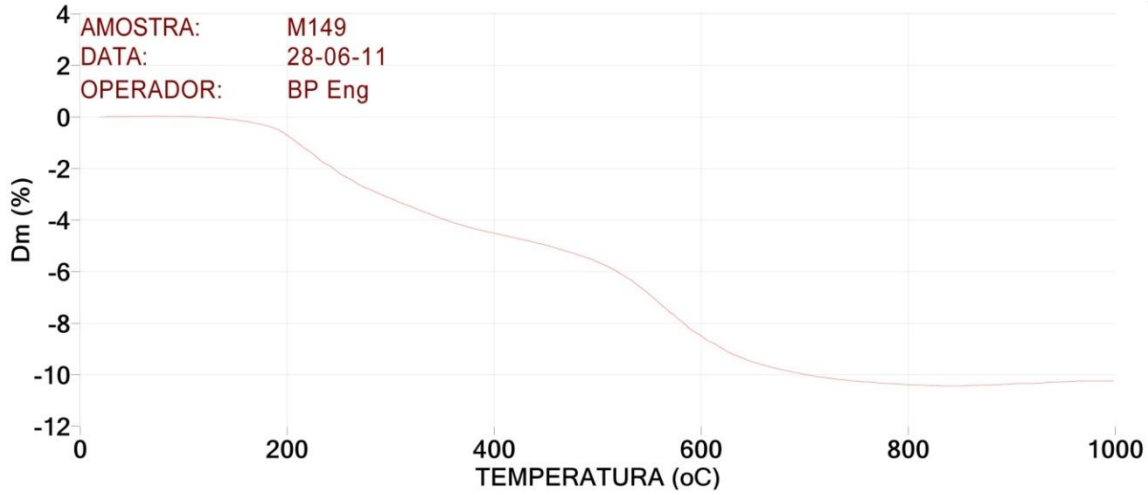


Figura 70 – Análise termogravimétrica da amostra de Ubarana

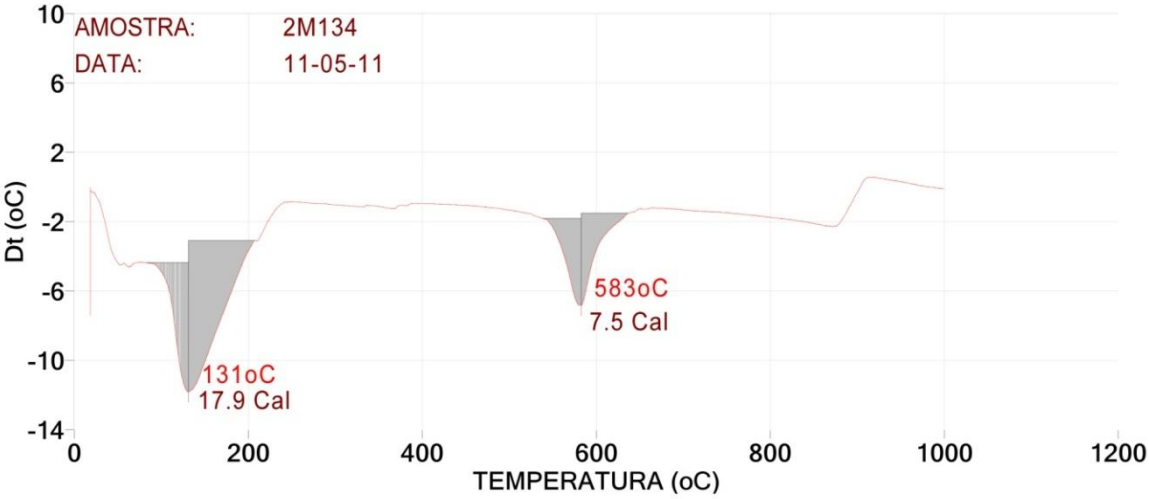


Figura 71 – Análise térmica diferencial da amostra de Leme

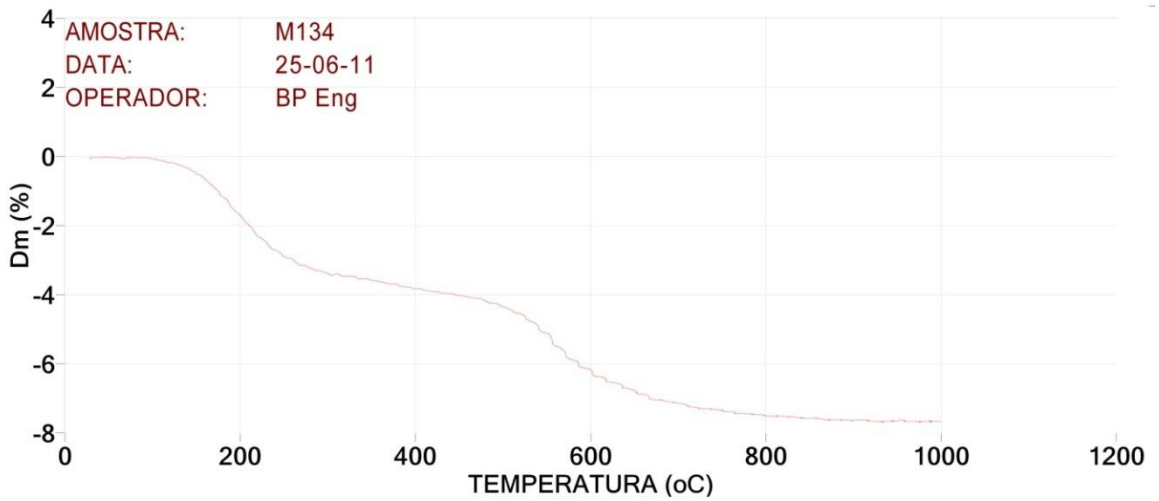


Figura 72 – Análise termogravimétrica da amostra de Leme

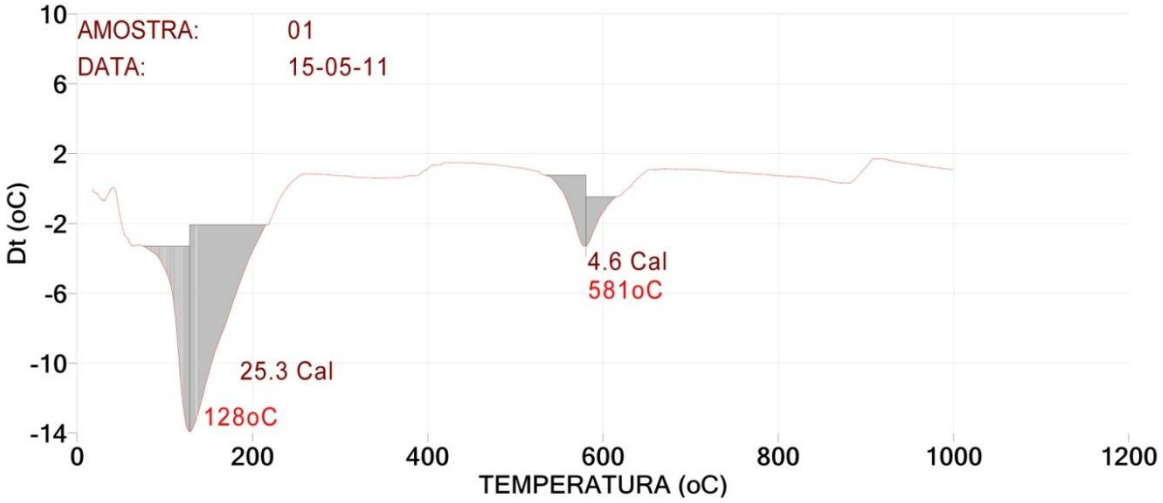


Figura 73 – Análise térmica diferencial da amostra de Itu

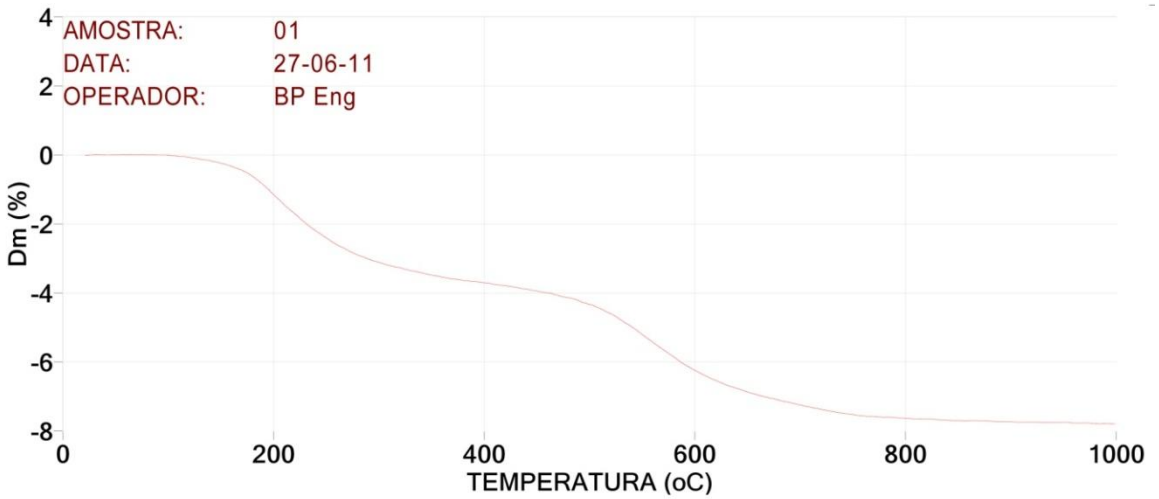


Figura 74 – Análise termogravimétrica da amostra de Itu

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

- Entre 0°C e 200°C: as perdas de massa podem estar relacionadas à perda de umidade superficial, fato este que pode ser comprovado pelo ensaio de umidade natural das amostras, que mostra uma perda de massa das mesmas relativa à perda de água. 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: existe uma perda de massa que geralmente pode estar relacionado à perda da matéria orgânica presente nas amostras (depressão endotérmica).

- Entre 400°C e 600°C: a perda de massa das amostras pode estar relacionada à decomposição dos argilominerais presentes nas amostras, com a conseqüente 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).

- Entre 900°C e 1000°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.

De acordo com Polito, W.S., os ácidos humicos são ácidos orgânicos de cadeiras ligeiramente compridas capazes de complexar metais pesados e materiais argilosos, deslocando o ponto de fusão característico da matéria orgânica (200°C e 400°C) para próximo de 900ºC. Isso leva a maiores valores de óxidos no solo, aumentando o ponto de fusão das massas cerâmicas. Com isso, as massas necessitam de temperaturas mais elevadas para atingirem o ponto de grés, o que pode gerar maiores custos na produção.

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

Tabela 25 - Resultados obtidos através das análises térmicas

Amostras	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 (%)
Tambaú	0,9	21,9	3,5	2,0	2,6	8,8	0,02	0,0	8,51
Porto ferreira	2,0	31,5	2,4	4,7	4,2	29,4	0,44	-5,4**	12,37
Ubarana	0,7	37,4	3,7	0,0	3,9	24,6	-0,11**	-4,5**	10,44
Leme	1,8	17,9	2,1	0,0	2,2	7,5	0,02	0,0	7,69
Itu	1,2	25,3	2,6	0,0	2,4	4,6	0,06	0,0	7,79

* variação energética **ganho de massa

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGILA CALCINADA

Os ensaios de retração linear, expansão por umidade, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente e resistência à compressão nos corpos de prova confeccionados com as massas de produção das empresas analisadas foram realizados no Laboratório de Construção Civil (LCC) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos – USP. Foram ensaiados corpos de prova confeccionados e queimados com as misturas de matérias primas utilizadas pelas empresas para a fabricação de seus produtos cerâmicos.

Esses ensaios foram realizados com o objetivo de se determinar as principais características dos agregados e corpos de prova queimados, para que, com essas características, fossem escolhidas as matérias primas que seriam queimadas para a produção dos agregados leves de argila calcinada para a produção de concretos estruturais.

5.2.1 RETRAÇÃO LINEAR

Analisando os valores de retração linear dos corpos de prova (tabela 26), percebe-se que, em todos os casos, a retração linear está diretamente ligada ao aumento da temperatura de queima, sendo que quanto maior a temperatura de queima, maior a retração linear.

Percebe-se também que, exceto na amostra de Porto Ferreira, todas as amostras apresentam, quando queimadas à temperatura de 1000 ^{o}C, retração linear muito superior à observada quando queimadas à 800 ^{o}C.

Ainda analisando a tabela 26, observa-se também que a amostra que apresentou maior retração linear foi a de Leme, quando queimada a 1000 ^{o}C. Isso pode ser explicado pela temperatura de queima da amostra e pela quantidade de argila e silte em sua composição granulométrica (86%), já que, quanto maior a presença de grãos finos na massa, maior a quantidade de água necessária para a extrusão e, conseqüentemente, maior a retração linear da peça queimada (VIEIRA et al. 2003a).

Tabela 26 - Retração linear dos corpos de prova queimados

Local	Temperatura de queima (^{o} C)	Retração linear (%)	Desvio padrão
Tambaú	800	0,58	1,47
	900	0,96	0,11
	1000	3,71	0,21
Porto Ferreira	800	0,61	0,10
	900	1,15	0,10
	1000	1,46	0,03
Ubarana	800	0,28	0,06
	900	0,76	0,08
	1000	1,53	0,08
Leme	800	-0,20	0,17
	900	1,46	0,16
	1000	5,70	0,33
Itu	800	0,06	0,15
	900	0,83	0,09
	1000	4,22	0,21

Da mesma forma, as amostras de Porto Ferreira e Ubarana apresentam os menores valores de retração linear, já que, em suas composições granulométricas, elas apresentam os menores teores de argila e silte em suas matérias primas, dentre as amostras estudadas.

De acordo com Cabral, 2005, quanto maior a presença de sílica livre (SiO_2) nas matéria primas das massas de produção das peças, menor a retração linear dos produtos queimados. Porém, esse fato não foi observado, já que analisando-se os dados das tabelas 24 e 26, nas quais as peças de Leme, que têm em sua constituição a maior taxa de SiO_2

(68,18%), apresentaram as maiores retrações lineares (5,70%) quando queimadas a 1000 ^{o}C e as amostras de Porto Ferreira, que têm em sua constituição as menores quantidades de SiO_2 (59,50%) apresentam as menores retrações lineares (1,46%) quando queimadas à mesma temperatura, o que pode ser explicado pela presença de grãos finos mas matérias primas, já que a amostra de Leme apresentou grandes quantidades de argila e silte em sua composição (86%) e a amostra de Porto Ferreira apresentou baixa quantidade de material fino em sua composição (76%). Portanto, a retração linear das peças queimadas não está ligada apenas à presença de SiO_2 nas matérias primas, mas sim à presença de argila e silte e na quantidade de água adicionada às massas para a conformação dos corpos de prova.

A amostra de Leme, quando queimada à 800 ^{o}C, apresentou um valor negativo para a retração linear. Esse valor refere-se, portanto, a uma expansão, que pode ser explicada pela transformação de quartzo α em quartzo β, que ocorre a uma temperatura de 573 ^{o}C. Nessa temperatura ocorre uma expansão da peça durante a queima, que se mantém crescente até temperaturas próximas de 900 ^{o}C. Como a expansão em peças com alto teor de quartzo é mais acentuada que nas peças com baixo teor de quartzo, observou-se uma expansão nos corpos de provam de leme, que foram conformados com a massa cerâmica que apresentou a maior quantidade de SiO_2 em sua composição.

Outro fator que influencia a retração linear das peças é a perda ao fogo, que de acordo com Vieira et al. 2003a, quanto maior a perda ao fogo das matérias primas das massas de produção, maior a retração linear das peças queimadas. Porém, esse dado não foi observado nas amostras ensaiadas, já que a amostra de Ubarana apresentou a maior perda ao fogo a 1000 ^{o}C (10,92%) e uma das menores retrações lineares na mesma temperatura de 1000 ^{o}C (1,53%). Da mesma forma, a amostra de Leme apresentou a maior retração linear quando queimada a 1000 ^{o}C (5,70%) e sua matéria prima apresentou a menor perda ao fogo nessa mesma temperatura (4,64%). Já a amostra de Porto Ferreira apresentou perda ao fogo igual a 5,42% e uma retração linear de 1,46%, a temperatura de 1000 ^{o}C. Portanto, nas amostras analisadas, observou-se que a perda ao fogo das matérias primas não influenciou significativamente os valores das retrações lineares dos corpos de prova queimados.

5.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA E POROSIDADE APARENTE

Observando-se a tabela 27, percebe-se que as absorções de água dos corpos de prova analisados variaram de 9,60 % a 24,39%, ficando assim, abaixo de 25%, valor

máximo de absorção de água para tijolos maciços e blocos cerâmicos de cerâmica vermelha (VIEIRA et al. 2000, 2003a).

Ainda de acordo com a tabela 27, todas as amostras tiveram absorção de água inversamente relacionadas à temperatura de queima, ou seja, em todos os casos, as absorções de água diminuíram com o aumento da temperatura de queima. Isso se dá pois, com o aumento da temperatura de queima, as peças tornam-se mais densas, com menos poros e, conseqüentemente, absorvem menos água (VIEIRA et al. 2000, 2003a).

Observa-se também que, para as três temperaturas de queima, os corpos de prova de Itu foram os que apresentaram menor absorção de água dentre todos os corpos de prova ensaiados. Esse fato pode ser um indício de que a queima foi bem feita e que os corpos de prova tiveram uma boa densificação durante a queima, o que é demonstrado pelos valores de massa específica aparente dos corpos de prova, que são os maiores dentre os estudados (1,743, 1,791 e 1,973 g/cm^3, para as três temperaturas de queima, respectivamente).

Tabela 27 - Porosidade aparente e absorção de água dos corpos de prova queimados

Local	Temperatura de queima (°C)	Porosidade aparente (%)	Desvio padrão	Absorção de água (%)	Desvio padrão
Tambaú	800	35,69	0,1649	21,86	0,1349
	900	34,16	0,6718	20,23	0,6130
	1000	28,26	0,4351	15,36	0,5651
Porto Ferreira	800	37,55	0,1490	24,39	0,2057
	900	37,59	0,3076	24,18	0,3580
	1000	37,06	0,1221	23,43	0,2255
Ubarana	800	30,09	0,1642	16,80	0,0952
	900	29,16	0,2021	16,34	0,1437
	1000	27,97	0,4685	15,43	0,2775
Leme	800	35,36	0,2541	21,99	0,1472
	900	31,75	0,3371	18,73	0,2578
	1000	19,50	0,4866	10,00	0,2672
Itu	800	31,21	0,1820	17,91	0,1184
	900	29,64	0,4490	16,55	0,2452
	1000	18,93	0,6167	9,60	0,4222

Da mesma forma, a amostra de Porto ferreira apresentou a maior absorção de água e a menor massa específica aparente (24,39% e 1,540 g/cm^3, respectivamente) dentre todas

as amostras analisadas, quando queimada a 800 ^{o}C, já que a essa temperatura a densificação dos corpos de prova é menor doq eu a temperaturas superiores.

De acordo com Rossignolo (2009a), os valores de absorção de água de agregados leves de argila expandida são 6%, 7% e 10%, para agregados com dimensões de 0 a 4,8 mm, de 6,3 a 12,5 mm e de 12,5 a 19 mm, respectivamente. Comparando-se esses valores com os valores apresentados na tabela 16, percebe-se que todas as amostras, com exceção das amostras de Leme e Itu (quando queimadas a 1000 ^{o}C) apresentam absorção de água superior aos agregados de argila expandida, o que pode representar um maior cuidado na hora da produção do concreto, que poderá ser produzido com uma porcentagem maior de água do que normalmente, para que mesmo com a absorção de água do agregado, o concreto ainda tenha suas características moldáveis.

Ressalta-se aqui o diagrama de gresificação dos corpos de prova, que relaciona a retração linear e a absorção de água das peças queimadas, sendo que, para todas as amostras estudadas, quanto maior a temperatura de queima das peças, maior a retração linear e menor a absorção de água das mesmas. Os diagramas de gresificação dos corpos de prova queimados são ilustrados nas figuras 75 a 79.

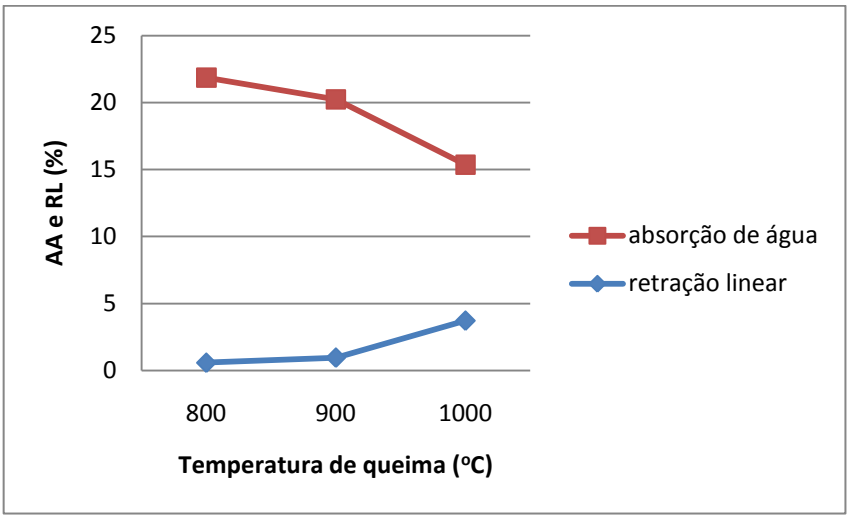


Figura 75 - Diagrama de gresificação dos corpos de provas de Tambaú

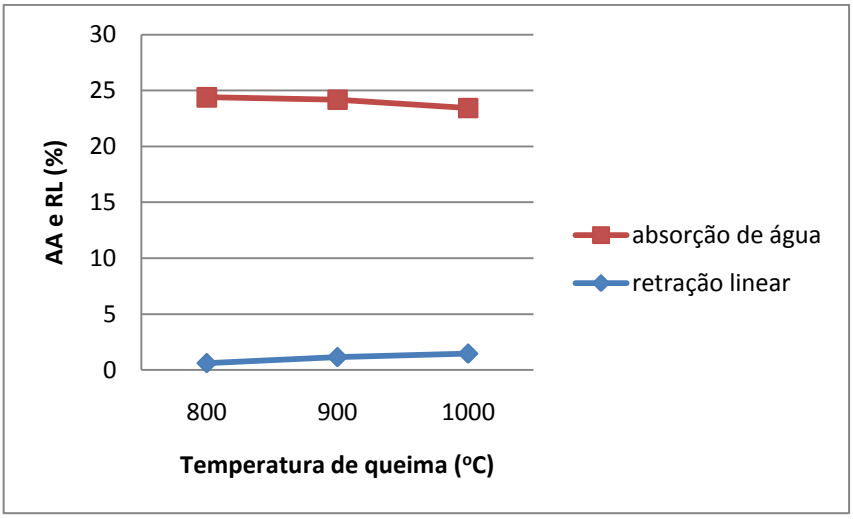


Figura 76 - Diagrama de gresificação dos corpos de provas de Porto Ferreira

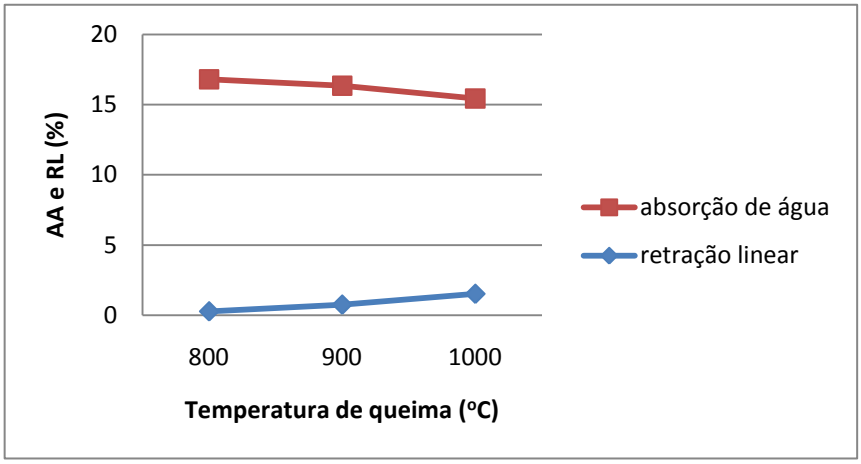


Figura 77 - Diagrama de gresificação dos corpos de provas de Ubarana

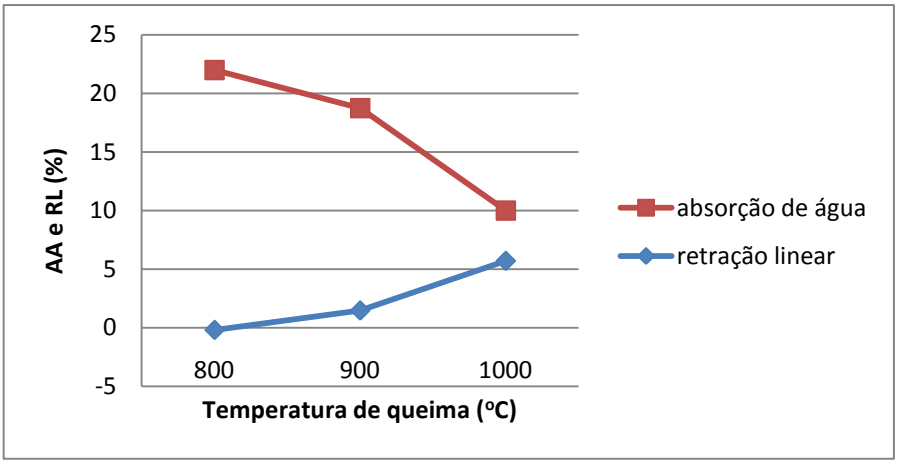


Figura 78 - Diagrama de gresificação dos corpos de provas de Leme

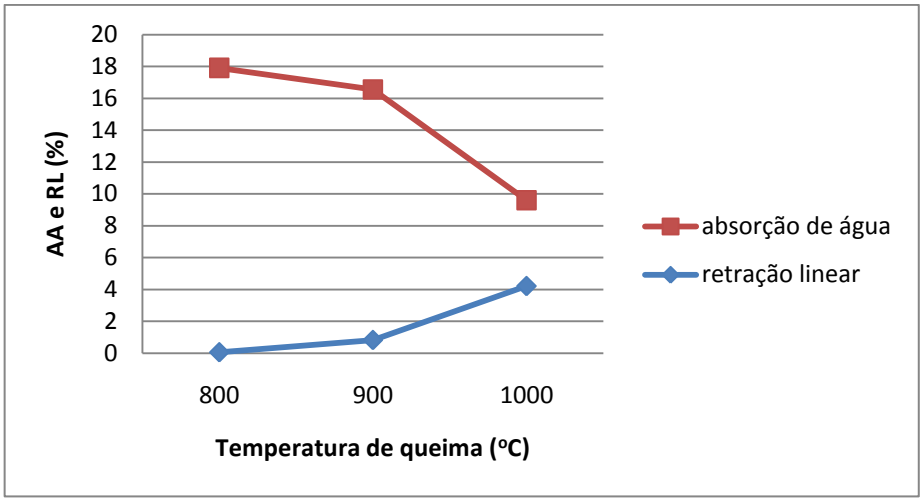


Figura 79 - Diagrama de gresificação dos corpos de provas de Itu

Analisando-se os diagramas de gresificação dos corpos de prova queimados, percebe-se que as amostras de Porto Ferreira e Ubarana apresentam curvas pouco acentuadas, quando comparadas às apresentadas pelas amostras de Tambaú, Leme e Itu. Percebe-se que as amostras não apresentam variações significativas nos parâmetros de retração linear e absorção de água para temperaturas de até 900°C. De 900°C a 1000°C, as amostras de Tambaú, Leme e Itu apresentam variações mais significativas, que, de acordo com Vieira et al. (2000), podem estar relacionadas ao início de formação da fase líquida. Percebe-se também que em nenhum dos casos as curvas se cruzaram, o que indica que até a temperatura de 1000°C o ponto de grés não foi atingido.

Ainda de acordo com Vieira, et al. 2003a, a absorção de água está diretamente ligada à porosidade aparente das peças, sendo que quanto maior a porosidade aparente dos produtos queimados, maior a absorção de água dos mesmos. Isso é evidenciado analisando-se as figuras 80, 81 e 82.

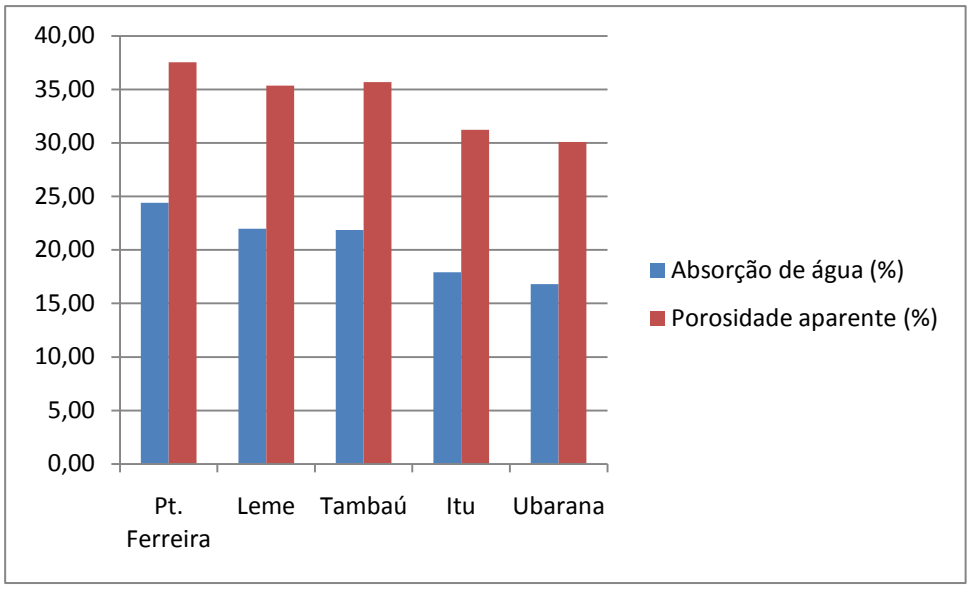


Figura 80 - Absorção de água e porosidade aparente dos corpos de prova queimados à 800 °C.

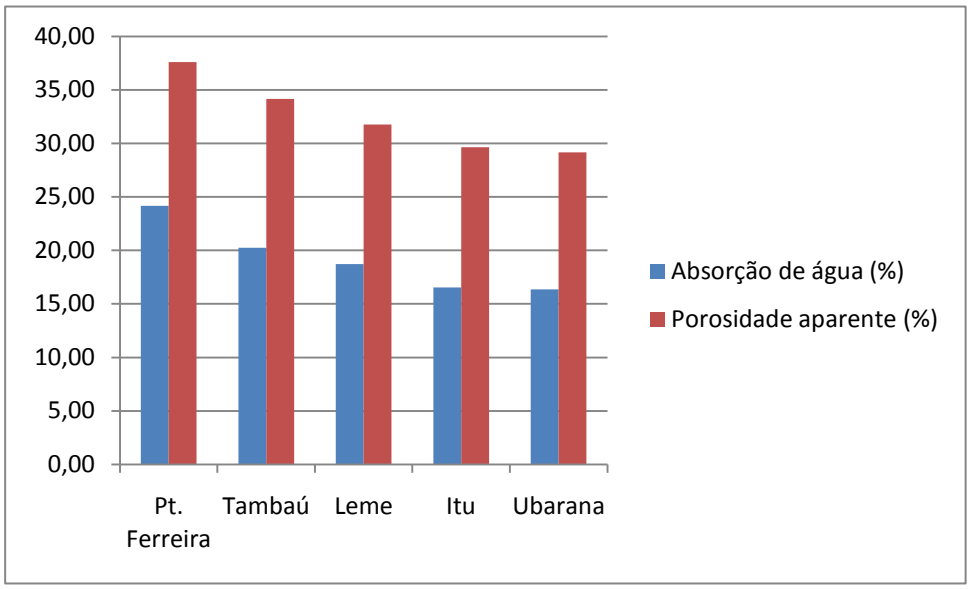


Figura 81 - Absorção de água e porosidade aparente dos corpos de prova queimados à 900 °C.

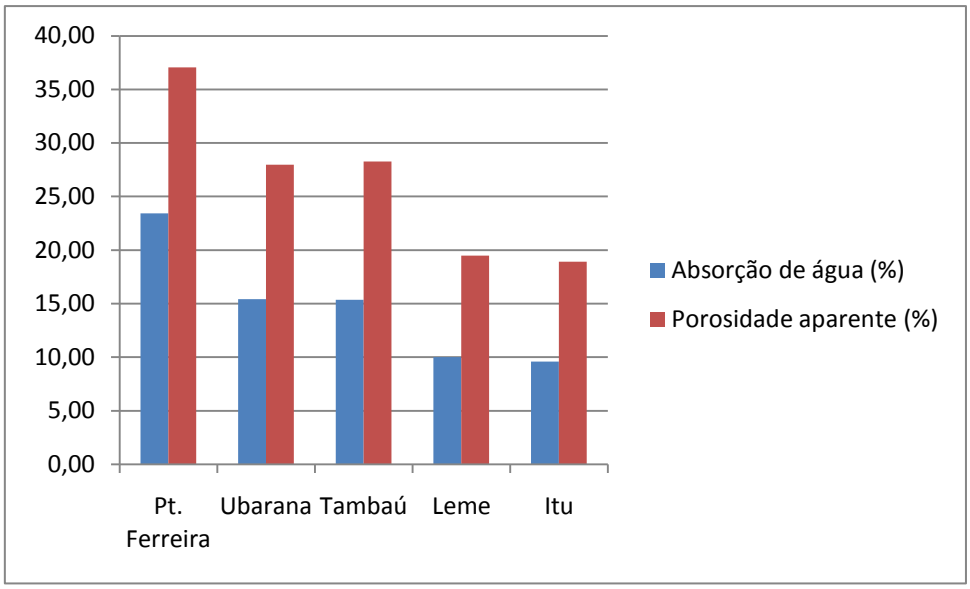


Figura 82 - Absorção de água e porosidade aparente dos corpos de prova queimados à 1000 °C.

Os valores das porosidades aparentes dos corpos de prova queimados são mostrados na tabela 27. Percebe-se que os valores das porosidades aparentes diminuem com o aumento da temperatura de queima das amostras. Isso pode ser atribuído à densificação dos corpos de prova com o aumento da temperatura de queima, com a conseqüente diminuição dos poros nas amostras.

Percebe-se também que as amostras de Leme e Itu foram as que apresentaram os menores valores de porosidade aparente quando queimadas a 1000°C, 19,50% e 18,93%, respectivamente, o que confirma o dado apresentado na tabela 27, mostrando que as duas amostras foram também as que apresentaram menor absorção de água quando queimadas à mesma temperatura, 10,0% e 9,6%, respectivamente.

Da mesma forma, a amostra que apresentou as maiores absorções de água foi a de Porto Ferreira (23,43%), dado esse que pode ser confirmado analisando-se a tabela 27, que mostra que mesma amostra apresenta também os maiores valores de porosidade aparente (37,06%) e, conseqüentemente, mais espaços livres para a água penetrar.

De acordo com Riella et al. (2002), a porosidade aparente das peças está inversamente ligada à viscosidade da matéria fundente das massas de produção, sendo que quanto mais viscosa a matéria fundente da massa, menores os valores de porosidade aparente da peça queimada, já que a matéria fundente tende a ocupar os espaços vazios entre os cristais de quartzo, durante a inversão do quartzo. Esse fato é ilustrado na tabela 28.

Tabela 28 - Porosidade aparente e absorção de água das peças queimadas em função da viscosidade da matéria fundente

Local	K (Viscosidade da matéria fundente)	Material vítreo (SiO_2 + Al_2O_3)	Quantidade de matéria fundente* (%)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
Itu	81,21	82,02	1,68	18,93	9,60
Ubarana	45,72	81,38	2,18	27,97	15,43
Tambaú	32,70	82,41	4,20	28,26	15,36
Leme	18,31	82,60	6,64	19,50	10,00
Porto Ferreira	15,10	76,88	8,61	37,06	23,43

* a matéria fundente corresponde aos óxidos alcalinos (Na_2O e K_2O) e alcalino-terrosos (CaO e MgO)

Ainda Analisando-se a tabela 28, percebe-se que, exceto na amostra de Leme, quanto maior a viscosidade da matéria fundente, menor o valor de porosidade dos produtos queimados, evidenciando o fato que quanto maior a viscosidade da matéria fundente, menos espaços vazios existirão entre os cristais de quartzo vitrificados.

É importante ressaltar que a quantidade de matéria fundente influencia também no preenchimento das cavidades do corpo cerâmico, diminuindo assim a porosidade das peças queimadas porém, a viscosidade da matéria fundente exerce mais influência na porosidade das peças queimadas que a quantidade de matéria fundente nas massas, ao passo que, analisando-se a tabela 28, percebe-se que a amostra de Itu apresenta o menor valor de quantidade de matéria fundente (1,68%), mas o maior valor de viscosidade dessa matéria fundente (81,21), conferindo assim o menor valor de porosidade aparente (18,93%) e absorção de água (9,60%) dentre todas as amostras analisadas.

Esse fato fica evidenciado na amostra de Leme, que apresenta uma viscosidade da matéria fundente baixa (18,31), mas uma grande quantidade de matéria fundente (6,64%) e de material vítreo (Quartzo e alumínio) (82,60%), conferindo assim valores baixos de porosidade aparente (19,50%) e absorção de água (10,00%), o que não ocorre na amostra de Porto Ferreira que, também apresenta baixo valor de viscosidade da matéria fundente (15,10) e grande quantidade dessa matéria (8,61%) porém, por apresentar pouco material vítreo (76,88%), as peças dessa amostra apresentam alta porosidade aparente (37,06%) e absorção de água (23,43%).

Segundo Vieira et al. (2004) a adição de matéria fundente ilitica é uma alternativa utilizada para melhorar as propriedades de queima dos produtos cerâmicos, reduzindo a porosidade aparente e a absorbância de água dos mesmos.

5.2.3 EXPANSÃO POR UMIDADE

Os dados de expansão por umidade são apresentados na tabela 29. As amostras de Porto Ferreira (900 ^{o}C) e Ubarana (800 ^{o}C) apresentaram expansão por umidade superior a 0,06%, valor máximo indicado pelo processo de certificação para placas cerâmicas do centro cerâmico do Brasil (CCB). O valor da expansão por umidade apresentada pela amostra de Ubarana (0,1273%) pode ser justificado pelo tempo de queima ou pela temperatura de queima, já que, com tempo de queima ou temperatura de queima maiores, o rearranjo das partículas poderia ter sido melhor e, conseqüentemente, a expansão por umidade seria menor. Já no caso de Porto Ferreira, o valor da expansão por umidade (0,1134%) pode ser explicado pelo desvio padrão das medidas.

Percebe-se também que, em alguns casos, a expansão por umidade dos corpos de prova foi negativa, o que pode ser explicado por pequenas variações nas tomadas de medidas e também pelo erro (desvio padrão) de cada uma das medidas.

Tabela 29 - Expansão por umidade e massa específica aparente dos corpos de prova ensaiados

Local	Temperatura de queima (^{o} C)	Expansão por umidade (%)	Desvio padrão	Massa específica aparente (g/cm^3)	Desvio padrão
Tambaú	800	0,0066	0,0861	1,632	0,0045
	900	-0,0248	0,1022	1,689	0,0221
	1000	0,0217	0,2040	1,842	0,0617
Porto Ferreira	800	-0,0364	0,0677	1,540	0,0103
	900	0,1134	0,0881	1,555	0,0118
	1000	-0,0071	0,0630	1,582	0,0146
Ubarana	800	0,1273	0,0567	1,791	0,0034
	900	-0,0293	0,0879	1,785	0,0037
	1000	0,0689	0,0938	1,813	0,0111
Leme	800	-0,0758	0,1350	1,608	0,0081
	900	0,0214	0,0652	1,695	0,0093
	1000	0,0111	0,1579	1,949	0,0127
Itu	800	-0,2480	0,7247	1,743	0,0105
	900	-0,8615	0,8459	1,791	0,0064
	1000	-0,3664	1,8762	1,973	0,0671

5.2.4 MASSA ESPECÍFICA APARENTE

Os dados das massas específicas aparentes dos corpos de prova ensaiados são apresentados na tabela 29. Percebe-se que, para todas as amostras analisadas, a massa específica aparente aumenta com o aumento da temperatura, já que com o aumento da temperatura de queima dos corpos de prova, ocorre maior densificação das peças queimadas e, conseqüentemente, uma menor porosidade aparente e maior massa específica aparente das mesmas.

Observa-se também que a amostra que apresentou maior massa específica aparente foi a de Itu, cujo valor foi igual a 1,973 g/cm^3, quando queimada a 1000 ^{o}C. Da mesma forma, essa mesma amostra apresentou as menores absorções de água e porosidade aparente, sendo eles, respectivamente, 9,60 % e 18,93 %, o que indica uma boa queima, resultante em uma boa densificação da matéria durante a queima.

De acordo com Rossignolo (2009a), agregados leves de argila expandida apresentam massa específica variando de 1,51 g/cm³ (para agregados com diâmetro de até 4,8 mm) a 0,64 g/cm³ (para agregados com diâmetro entre 12,5 mm e 19 mm). Comparando-se os valores obtidos e apresentados na tabela 18 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 g/cm³, percebe-se que as amostras de argila calcinada analisadas apresentaram valores de massa específica intermediários entre agregados leves de argila expandida e agregados de basalto.

5.2.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os valores das resistências à compressão dos corpos de prova ensaiados são apresentados na tabela 30.

Percebe-se que, exceto para a amostra de Ubarana, a resistência à compressão aumenta com o aumento da temperatura de queima das peças pois, com o aumento da temperatura, aumentam-se a densificação das peças e a massa específica das mesmas.

Tabela 30 - Resistência à compressão dos corpos de prova

Local	Temperatura de queima (°C)	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão
Tambaú	800	17,9	2,81
	900	43,5	10,91
	1000	51,6	19,77
Porto Ferreira	800	14,1	3,42
	900	18,0	4,11
	1000	22,0	3,75
Ubarana	800	43,6	2,32
	900	55,8	11,40
	1000	35,9	5,82
Leme	800	18,9	3,70
	900	38,6	3,41
	1000	59,4	12,88
Itu	800	26,2	6,30
	900	39,5	5,43
	1000	56,2	11,97

A amostra de Ubarana apresenta um valor de resistência à compressão da amostra queimada à 1000 °C inferior às amostras queimadas à 800 °C e 900 °C. Isso pode ter ocorrido por falhas durante a queima das peças ou então, pela presença de micro fissuras nos corpos de prova, causando assim uma diminuição da resistência à compressão dos mesmos.

Os corpos de prova que apresentaram os menores valores de resistência à compressão foram os de Porto Ferreira. Os mesmos corpos de prova apresentam os menores valores de massa específica aparente, e os maiores valores de absorção de água e porosidade aparente, o que mostra que foram os que tiveram em sua formação a maior presença de poros e, conseqüentemente, as menores resistências.

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 contra partida, quanto menores os valores de massa específica dos agregados, menores os valores de resistência à compressão dos mesmos e maiores suas absorções de água e porosidades aparentes.

Portanto, concretos confeccionados com agregados leves de argila com alta massa específica poderão 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 ligada à maiores valores de massa específica dos concretos.

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.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

A avaliação das propriedades do concreto foi realizada 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 com idades de 7, 28 e 91 dias. As propriedades analisadas no estado fresco foram a massa específica fresca e o teor de ar incorporado e no estado endurecido foram a resistência à compressão, massa específica aparente, resistência à tração por compressão diametral, módulo de deformação, absorção de água e índice de vazios.

5.3.1 MASSA ESPECÍFICA FRESCA E TEOR DE AR INCORPORADO (ABNT NBR 9833:2008)

Conforme citado no item 4.6 deste trabalho, procurou-se manter o consumo de cimento, areia e o volume de agregados em um mesmo patamar para os quatro tipos de concreto, moldados com uma relação água / cimento igual a 0,5. Desta forma, procurou-se manter fixas as condições de moldagem dos concretos, variando-se apenas o tipo de agregado, conforme ilustra a tabela 31.

Tabela 31 – Consumo de materiais (real), massa específica fresca, slump e teor de ar incorporado nos corpos de prova de concreto

CP	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Agregado (Kg)	Relação água / cimento	Massa específica fresca (Kg/m³)	slump (mm)	Teor de ar incorporado (%)
Brita	387,53	968,84	821,58	0,5	2386	40	2,03
Argila expandida	377,40	943,51	271,73	0,5	1766	50	4,59
Itu	389,17	972,92	537,06	0,5	2151	45	2,66
Porto Ferreira	383,94	959,84	479,92	0,5	2124	50	2,82

Analisando-se a tabela 31, percebe-se que os valores de massa específica no estado fresco dos concretos variaram entre 2386 Kg/m³ (corpos de prova produzido com brita) e 1766 Kg/m³ (corpos de prova produzidos com agregados de argila expandida). Os concretos produzidos com os agregados de Itu e Porto Ferreira apresentaram valores de massa específica no estado fresco iguais a 2151 Kg/m³ e 2124 Kg/m³, respectivamente, atingindo uma redução de 10,9% e 12,3% respectivamente, quando comparado ao concreto produzido com brita, atingindo um patamar intermediário entre os valores obtidos para os concretos produzidos com brita e os produzidos com argila expandida.

Ainda analisando-se a tabela 31, percebe-se que os concretos produzidos com os agregados de Itu e Porto Ferreira apresentaram um teor de ar incorporado muito próximo, 2,66% e 2,82%, respectivamente, ficando em um patamar intermediário entre os corpos de prova produzidos com brita (2,03%) e os produzidos com argila expandida (4,59%).

5.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MASSA ESPECÍFICA APARENTE (ABNT NBR 5739:2007 e ABNT NBR 9778:2005)

Para os ensaios de resistência à compressão e de massa específica aparente foram utilizados corpos de prova de concreto cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200mm de altura. O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 5739:2007, em três idades diferentes, 7, 28 e 91 dias. Para cada idade foram utilizados 5 corpos de prova, exceto para a idade de 7 dias, que se utilizaram 4 corpos de prova. O ensaio de massa específica aparente foi realizado de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 9778:2005, utilizando-se três corpos de prova para cada tipo de concreto, com 91 dias de idade. Os valores obtidos para a resistência à compressão dos corpos de prova são apresentados na tabela 32.

Tabela 32 – Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto

Corpo de prova / Idade	Resistência à compressão					
	7 dias (MPa)	Desvio padrão (MPa)	28 dias (MPa)	Desvio padrão (MPa)	91 dias (MPa)	Desvio padrão (MPa)
Brita	25,55	1,15	34,07	1,38	42,77	1,03
Argila expandida	20,32	0,58	23,68	0,59	28,08	0,71
Itu	18,95	0,68	23,94	0,96	29,70	0,72
Porto Ferreira	16,22	0,86	19,79	1,35	25,82	1,24

Analisando-se a tabela 32, observa-se que com idade de 91 dias, a resistência à compressão dos corpos de prova variou de 25,82 MPa para os corpos de prova produzidos com agregados de Porto Ferreira e 42,77 MPa para os corpos de prova confeccionados com brita, conforme ilustra a figura 83.

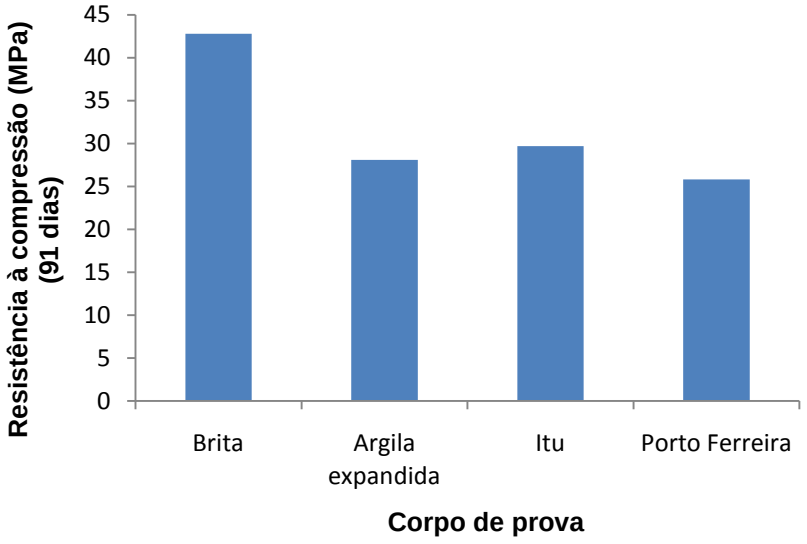


Figura 83 – Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto com 91 dias de idade

A diferença observada nos valores da resistência à compressão dos corpos de prova com os agregados de Itu e de Porto Ferreira aos 91 dias (Tabela 32), de 13%, não foi tão expressiva quanto à variação observada entre os valores da resistência à compressão desses agregados, de 52% (item 5.2.5). Pode-se atribuir esse fato à especificidade dos traços analisados nesta pesquisa, que resultaram em concretos com consumo de cimento da ordem de 380 kg/m^3. Em traços com valores menores de consumo de cimento possivelmente observaríamos variações maiores dos valores de resistência à compressão entre esses dois tipos de concreto, uma vez que em concretos mais pobres o agregado passa a influenciar mais no valor dessa propriedade.

Analisando os resultados aos 28 dias de idade apresentados na Tabela 32, observa-se que os concretos com os agregados de Itu e com argila expandida enquadram-se na classe de resistência CL20 (Norma Brasileiro ABNT NBR 8953:1992). Já o concreto com os agregados de Porto Ferreira se enquadra na classe de resistência CL15, mas no limiar da CL20.

Conforme ilustra a figura 84, para todas as idades analisadas, os maiores e os menores valores de resistência à compressão foram observados, respectivamente, para os corpos de prova produzidos com brita e com agregados de Porto Ferreira.

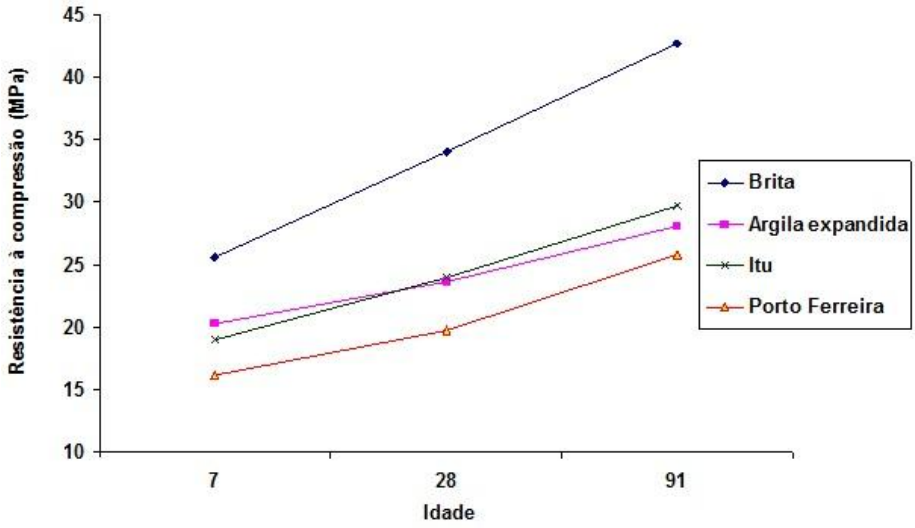


Figura 84 – Evolução da resistência à compressão com o aumento da idade

Ainda de acordo com os dados apresentados na figura 84, percebe-se que os valores de resistências à compressão dos corpos de prova aumentam com a idade e que, em todas as idades, os corpos de prova produzidos com agregados de argila expandida e Itu apresentaram valores muito próximos de resistência à compressão, sendo eles inferiores aos valores apresentados pelos corpos de prova produzidos com brita e superiores aos valores apresentados pelos corpos de prova produzidos com agregados de Porto Ferreira.

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 33.

Tabela 33 – Massa específica aparente e fator de eficiência dos corpos de prova de concreto (91 dias)

Corpo de Prova	Massa específica aparente seca (Kg/m³)	Desvio padrão (Kg/m³)	Fator de eficiência (MPa.dm³/Kg)
Brita	2235	12,98	19,14
Argila expandida	1608	12,70	17,46
Itu	1948	1,30	15,25
Porto Ferreira	1896	7,05	13,62

Analisando a tabela 33, percebe-se que os concretos confeccionados com os agregados de Porto Ferreira e Itu apresentaram massa específica aparente em um patamar intermediário quando comparados aos concretos confeccionados com argila expandida e com brita, sendo que a redução de massa para os corpos de prova com agregados de itu foi de 12,84 % e para os corpos de prova com agregados de Porto Ferreira foi de 15,17%, quando comparados aos corpos de prova confeccionados com brita.

O fator de eficiência (FE) dos concretos variou de 13,62 MPa.dm³/Kg para os corpos de prova produzidos com os agregados de Porto Ferreira a 19,14 MPa.dm³/Kg para os corpos de prova produzidos com brita, como ilustra a figura 85.

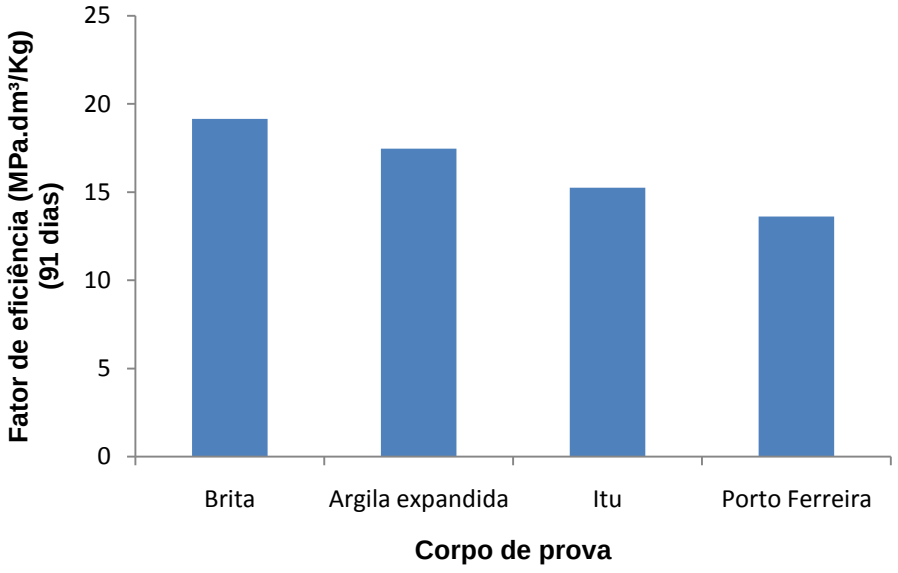


Figura 85 – Fator de eficiência (Fe) dos corpos de prova de concreto aos 91 dias de idade

5.3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (ABNT NBR 7222:2011)

Os valores da resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova são apresentados na tabela 34. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado com corpos de prova com idade de 28 dias, baseado na Norma Brasileira ABNT NBR 7222:2011. Para cada um dos tipos de concreto foram confeccionados 3 corpos de prova para a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Tabela 34 - Valores de resistência à tração dos corpos de prova de concreto

Corpo de prova	Resistência à Tração (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Resistência à tração / Resistência à compressão (28 dias) (%)
Brita	2,92	0,11	8,57
Argila expandida	1,80	0,55	7,60
Itu	2,29	0,61	9,57
Porto Ferreira	1,78	0,37	8,99

Analisando-se a tabela 34, percebe-se que os corpos de prova confeccionados com brita apresentaram as maiores resistências à tração dentre os corpos de prova analisados, sendo que os corpos de prova confeccionados com argila expandida e agregados de Porto Ferreira apresentaram resistência à tração muito próximas, 1,80 MPa e 1,78 MPa, respectivamente.

Ainda analisando-se a tabela 34, percebe-se que a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão dos concretos são muito semelhantes, variando de 7,60% para os corpos de prova confeccionados com agregados de argila expandida a 9,57% para os concretos confeccionados com agregados leves de Itu, o que é um indício de que os agregados confeccionados com matérias primas de Porto Ferreira e Itu não alteram os valores da relação “resistência à tração/resistência à compressa” dos concretos, normalmente em torno de 10%.

Estudos realizados pelo American Concrete Institute relacionam os valores da resistência à tração dos corpos de prova cilíndricos de concreto com seus valores de resistência à compressão, através da equação 15 (ACI 318 (2008).

$$R_t = 0{,}48.f_c^{0,5} \qquad (15)$$

Onde,

F_c = Resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto

Comparando-se os valores obtidos nos ensaios realizados de acordo com a NBR ABNT 7222:2011 e os resultados teóricos, baseados no ACI 318 (2008), percebe-se que os valores obtidos nos resultados teóricos são próximos aos obtidos nos ensaios realizados de acordo com a Norma Brasileira, o que nos leva a crer que a proposição feita por ACI 318 (2008) pode ser utilizada para a estimativa dos valores de resistência à tração de concretos com agregados convencionais e agregados leves, a conforme ilustra a tabela 35.

Tabela 35 – Relação entre os valores experimentais e teóricos de resistência à tração dos corpos de prova

CP	Resistência à tração (MPa)	
	ABNT NBR 7222:2011	Compressão diametral (ACI 318 (2008))
Brita	2,92	2,80
Argila expandida	1,80	2,34
Itu	2,29	2,35
Porto Ferreira	1,78	2,14

5.3.4 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO (ABNT NBR 8522:2008)

A tabela 36 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 30% do valor do carregamento.

Tabela 36 – Módulo de deformação dos corpos de prova de concreto

CP	Módulo de deformação (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
Brita	36,63	0,75
Argila expandida	20,44	2,64
Itu	19,48	0,51
Porto Ferreira	17,41	1,58

Observando-se a tabela 36, percebe-se que os valores dos módulos de deformação dos concretos com agregados leves foram inferiores aos valores do módulo de deformação dos concretos produzidos com brita, já que os agregados leves apresentam valores de resistência à compressão e módulo de deformação inferiores aos agregados convencionais (ROSSIGNOLO, 2009a).

A tabela 37 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, proposto por ROSSIGNOLO e AGNESINI (2005), relacionando o módulo de deformação dos concretos leves com suas resistências à compressão e suas massas específicas, conforme ilustra a equação 16.

$$E_c = 0{,}049 \cdot \gamma^{1,5} \cdot F_c^{\,0,5} \text{ (MPa)} \qquad (16)$$

Tabela 37 – Relação entre os valores experimentais e teóricos dos módulos de deformação dos corpos de prova de concreto

CP	Módulo de deformação (GPa)	
	ABNT NBR 8522:2008	ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005
Brita	36,63	30,22
Argila expandida	20,44	15,38
Itu	19,48	20,61
Porto Ferreira	17,41	18,00

Analisando-se a tabela 37, percebe-se que os valores teóricos observados para os corpos de prova confeccionados com agregados leves de argila expandida e brita foram inferiores aos valores experimentais, sendo que os valores experimentais e os teóricos para o módulo de deformação dos concretos confeccionados com agregados leves de Itu e Porto Ferreira foram muito semelhantes, indicando que a equação 16 pode ser utilizada para estimativa dessa propriedade.

5.3.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS (ABNT NBR 9778: 2005)

Os ensaios de absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova de concreto foram realizados com três corpos de prova de cada um dos tipos de concreto, com idade de 91 dias, de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 9778:2005. Os resultados das absorções de água e índice de vazios dos corpos de prova são apresentados na tabela 38.

Tabela 38 – Absorção de água e índice de vazios dos corpos de prova de concreto

CP	Absorção de água – 24 horas (%)	Absorção de água 48 horas (%)	Absorção de água 72 horas (%)	Índice de vazios (%)
Brita	4,71	5,87	6,28	14,04
Argila expandida	6,6	8,84	9,23	14,85
Itu	10,53	10,88	11,02	21,46
Porto Ferreira	11,31	11,97	12,12	22,97

Analisando-se a tabela 38 e a figura 86, percebe-se que os corpos de prova absorvem a maior quantidade de água nas primeiras 24 horas de imersão, principalmente os corpos de prova confeccionados com agregados leves de Itu e Porto Ferreira, já que estes apresentam elevados valores de absorção de água quando comparados a argila expandida e a brita.

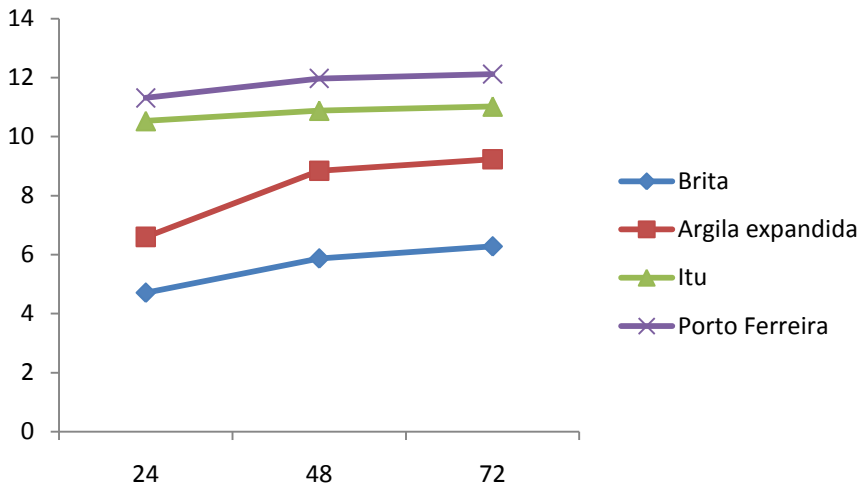


Figura 86 – Absorção de água dos corpos de prova de concreto

Ainda analisando-se a tabela 38 e a figura 86, percebe-se que os corpos de prova com agregados leves (Itu, Porto Ferreira e argila expandida) apresentaram valores de absorção de água superiores aos obtidos para os corpos de prova moldados com brita. No caso específico dos concretos com argila expandida deve-se considerar o valor de ar incorporado durante a moldagem (4,59%), significativamente maior do que os valores observados para os demais concretos, podendo ter potencializado a absorção de água desses corpos de prova.

Já os resultados obtidos para os corpos de prova moldados com agregados de Itu e Porto Ferreira, que apresentaram os maiores valores de absorções de água dentre todos os corpos de prova analisados, indicam que esses agregados potencializaram a absorção de

água dos concretos, influenciando, assim, a durabilidade desse material. Esse fato indica a necessidade de aprimoramento desses agregados com a finalidade de reduzir a absorção de água para valores abaixo de 10%, como observado para os agregados de argila expandida.

5.3.6 RETRAÇÃO LINEAR DE SECAGEM

Para a avaliação da retração por secagem dos concretos foram confeccionados três corpos de prova retangulares, com base quadrada de 7,5 cm e 25 cm de comprimento, para cada um dos tipos 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, 28, 60, 90, 150 e 250 dias. A tabela 39 e a figura 87 ilustram as retrações lineares de secagem dos corpos de prova de concreto até a idade de 250 dias.

Tabela 39 – Retração linear de secagem dos corpos de prova de concreto

Retração linear (x 10^{-6})						
Corpo de prova	**7 dias**	**28 dias**	**60 dias**	**90 dias**	**150 dias**	**250 dias**
Brita	-23,3	60,0	320,0	365,3	482,7	492,0
Argila expandida	16,0	104,0	384,0	472,0	588,0	676,0
Itu	-34,0	40,0	412,0	494,7	604,0	676,0
Porto Ferreira	-26,7	13,3	405,3	477,3	544,0	626,7

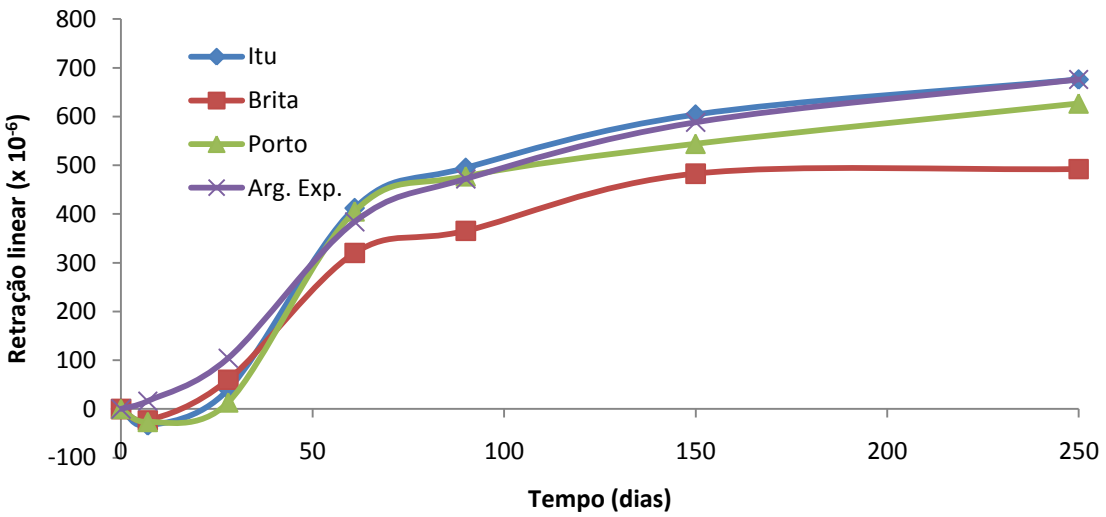


Figura 87 – Evolução da retração linear de secagem dos corpos de prova de concreto

De acordo com a tabela 39 e a figura 87, percebe-se que a retração por secagem dos corpos de prova de concreto inicia-se com uma pequena expansão ao invés de retração (observada nos corpos de prova com agregados de Itu, Porto Ferreira e brita) devido exposição dos corpos de prova em câmara úmida e, a partir da idade de 28 dias, todos os corpos de prova apresentaram retração linear de secagem.

Analisando-se a tabela 39 e a figura 87, percebe-se que, a partir da idade de 61 dias, a retração linear do concreto com brita foi menor do que a retração linear observada para os corpos de prova confeccionados com agregados leves de argila expandida, Itu e Porto Ferreira, já que o módulo de deformação dos corpos de prova confeccionados com brita (36,63 GPa) é superior aos módulos de deformação dos corpos de prova confeccionados com argila expandida (20,44 GPa), agregados leves de Itu (19,48 GPa) e Porto Ferreira (17,41 GPa).

Outro fator que pode ter influenciado na retração linear dos corpos de prova analisados é a porosidade dos agregados leves, uma vez que quanto maior a porosidade dos agregados, maiores os valores de absorções de água e, conseqüentemente, maiores os valores de retração de secagem dos concretos. Esse fato fica evidenciado quando analisamos as tabelas 38 e 39, em que os corpos de prova confeccionados com brita apresentaram os menores valores de absorção de água após 72 horas de imersão (6,28%) e apresentaram também os menores valores de retração linear de secagem (492,0 $x10^{-6}$) após 250 dias. Já os corpos de prova confeccionados com agregados leves de Itu apresentaram elevados valores de absorções de água após 72 horas de imersão (11,02%) e apresentaram também a maior retração linear de secagem dentre todos os corpos de prova analisados (676,0 x 10^{-6} após 250 dias).

Observa-se também que a partir dos 250 dias de idade, a retração linear de secagem dos corpos de prova tende a estabilizar, devido à eliminação da água contida no material.

Uma previsão dos valores finais da retração linear de secagem dos corpos de prova pode ser feita utilizando-se a equação 4, descrita no item 3.4 deste trabalho (ACI 209R-92 (1997)), em que S_t representa o valor da retração de secagem (x 10^{-6}) aos *t* dias e S_{utt} representa o valor final da retração linear de secagem (x 10^{-6}). A tabela 40 ilustra as possíveis retrações finais de secagem dos corpos de prova de concreto.

$$S_{ult} = ((35 + t) / t).S_t$$

Tabela 40 – Estimativa da retração linear de secagem final dos corpos de prova de concreto

Corpo de prova	Retração linear final ($x10^{-6}$) (mm/m) (ACI 209-R92)	Retração linear experimental aos 250 dias
Brita	520,0	492,0
Argila expandida	624,0	676,0
Itu	669,5	676,0
Porto Ferreira	658,7	626,7

Analisando-se a tabela 40, que ilustra a estimativa da retração linear final de secagem dos corpos de prova, observa-se que, para todos os casos, as retrações lineares estão abaixo dos limites estabelecidos por Hoff (1991), os quais estipulam que a retração linear de secagem dos concretos leves estruturais apresenta variação entre $500x10^{-6}$ e $1000x10^{-6}$ aos 400 dias de idade.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos neste trabalho, há indicações de que a produção de concretos com agregados leves de argila calcinada pode ser viável, com destaque para os seguintes aspectos:

- No estado fresco, os corpos de prova produzidos com agregados leves de argila calcinada de Itu e Porto Ferreira apresentaram valores de massa específica (2151 Kg/m³ e 2124 Kg/m³, respectivamente) em um patamar intermediário entre os corpos de prova produzidos com agregados de basalto (2386 Kg/m³) e argila expandida (1766 Kg/m³);

- No estado endurecido, os valores de massa específica aparente dos corpos de prova de Itu (1948 Kg/m³) e Porto Ferreira (1896 Kg/m³) também apresentaram-se em um patamar intermediário entre as massas específicas dos corpos de prova de basalto (2235 Kg/m³) e argila expandida (1608 Kg/m³), tendo se observado uma redução em massa de 12,84% e 15,17% para os corpos de prova de Itu e Porto Ferreira, respectivamente, quando comparados aos corpos de prova de basalto;

- Os valores da resistência à compressão e do módulo de deformação dos corpos de prova moldados com agregados de argila calcinada foram similares aos observados para os corpos de prova com argila expandida, porém, com aumento do valor da massa específica aparente da ordem de 15%;

- Os corpos de prova confeccionados com agregados leves de Itu e Porto Ferreira apresentaram elevados valores de absorção de água (11,02% e 12,12%, respectivamente), quando comparados aos corpos de prova confeccionados com agregados leves de argila expandida (6,6%) e de basalto (4,71%). A alta absorção de água dos corpos de prova com agregados leves de argila calcinada (Itu e Porto Ferreira) está diretamente ligada à alta absorção de água apresentada por esses agregados.

- Os valores de retração linear de secagem dos corpos de prova variaram de 492,0 ($x10^{-6}$) para os corpos de prova confeccionados com basalto a 676,0 ($x10^{-6}$) para os corpos de prova confeccionados com agregados leves de Itu e argila expandida. Os corpos de prova confeccionados com agregados leves de Porto Ferreira apresentaram retração linear de 544,0 ($x10^{-6}$), valores estes compreendidos entre os propostos por Hoff (1991) para concretos leves ($500x10^{-6}$ a $1000x10^{-6}$).

Portanto, agregados leves de argila calcinada mostram-se como uma alternativa viável para utilização em concretos estruturais leves, já que concretos confeccionados com esses agregados apresentaram desempenho em um patamar intermediário ao observado para os concretos com brita e com argila expandida, além da possibilidade de disseminação desta tecnologia por todo o território nacional, já que existe uma grande quantidade de empresas produtoras de cerâmica vermelha espalhadas por todo o território nacional.

- **Continuação da pesquisa**

Seguem abaixo algumas sugestões de continuidade desta pesquisa:

- Análise do efeito dos agregados de argila calcinada em concretos com diferentes dosagens;

- Estudos voltados para a redução dos valores de absorção de água dos agregados para níveis abaixo de 10%;

- Análises das possibilidades de reduções do valor da massa específica aparente e do aumento do valor da resistência mecânica dos agregados;

- Avaliação da durabilidade dos concretos com agregados leves de argila calcinada;

- Estudo da influência dos agregados leves de argila calcinada na microestrutura da zona de transição matriz-agregado.

7. REFERÊNCIAS

_____ (ABNT). NBR 5739 – *Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos de Concreto*. Rio de Janeiro, 2007.

_____ (ABNT). NBR 6118. *Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2007.

_____ (ABNT). NBR 6459. *Solo – Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro, 1984.

_____ (ABNT). NBR 6502. *Rochas e Solos*. Rio de Janeiro, 1995.

_____ (ABNT). NBR 6508. *Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica*. Rio de Janeiro, 1984.

_____ (ABNT). NBR 7180. *Solo – Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro, 1984.

_____ (ABNT). NBR 7181. *Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984.

_____ (ABNT). NBR 7222. *Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2011.

_____ (ABNT). NBR 8953 – *Concreto Para Fins Estruturais – Classificação Por Grupos de Resistência*. Rio de Janeiro, 1992.

_____ (ABNT). NBR 9778 – *Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa específica*. Rio de Janeiro, 2005.

_____ (ABNT). NBR 9833 – *Concreto Fresco – Determinação da Massa Específica e do Teor de Ar pelo Método Gravimétrico*. Rio de Janeiro, 2008.

_____ (ABNT). NBR 13818. *Placas Cerâmicas Para Revestimento – Especificação e Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, 1997.

_____ (ABNT). NBRNM 53 – *Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2009.

_____ NBRNM 35 – *Agregados leves para concreto estrutural – Especificações*. Rio de Janeiro, 1995.

_____ NBRNM 53 – *Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2009.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI *Guide for structural lightweight aggregate concrete. ACI – 213R-03. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 27p., 2003.*

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI *Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures. ACI – 209R-92. ACI Manual os Concrete Practice, Part 1, Materials and General Properties of Concrete, 1997.*

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. *Code requirements for reinforced concrete. ACI – 318-08. 347p., 2008.*

BATISTA, F.G.S.; LOPES, L.A.S.; VIEIRA, A. Produção e caracterização de argila calcinada para uso em pavimentação rodoviária. In: **XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**. Anais..., Florianópolis-SC, pp. 270-281, 2004.

BUSTAMANTE, M. G.; BRESSIANI, J. C.; A Indústria Cerâmica Brasileira. **Cerâmica Industrial,** v. 5, n. 3, p. 31-36, Maio / Junho, 2000.

CABRAL, G. L. L. **Metodologia de Produção e emprego de Agregados de Argila Calcinada Para Pavimentação.** 2005. 358 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

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.

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.

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

_____ DNER-ES 227. Agregados sintéticos graúdos de argila calcinada – emprego em obras rodoviárias, 1989.

_____ DNER-EM 230. Agregados sintéticos graúdos de argila calcinada – especificação de material, 1994.

_____ DNER-ME 225. Agregado sintético de argila calcinada – determinação de perda de massa após fervura, 1994.

ESCSI – EXPANDED SHALE, CLAY AND SLATE INSTITUTE. *Lightweight concrete: history, applications and economics.* USA, ESCSI Publications, 43p., 1971.

EUROLIGHTCON – Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete. *Pumping of lightweight aggregate concrete based on expanded clay in Europe.* Project BE96-3942/R11, Noruega, 67p. 2000a.

EUROLIGHTCON – Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete. *Light Weight Aggregate.* Project BE96-3942/R15, Noruega, 25p. 2000b.

EUROLIGHTCON – Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete. *Mechanical Properties of Lightweight Aggregate Concrete.* Project BE96-3942/R23, Noruega, 48p. 2000c.

EVANGELISTA, A.C.J.; SHEHATA, L.C.D.; ALMEIDA, I.R. Características mecânicas de concretos leves de alta resistência com argila expandida, produzidos no Brasil. In: **International Congress On High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures**. Anais…, Florianópolis SC, Brasil, pp. 170-189, 1996

FROTA, C.A.; SILVA, C.L.; NUNES, F.R.G. Estudo da exploração de argila para fins de calcinação, visando a construção de pavimento na província petrolífera de Urucu-AM-Brasil. In: V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias. Anais..., Recife-PE, pp. 1-12, 2006.

GOMES NETO, D. P. *Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura – Estudo de caso.* Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 156p. 1998.

GRUN, E. **Caracterização de argilas provenientes de Canelinha/SC e estudo de formulações de massas cerâmicas.** 2007.60 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade do estado de Santa Catarina, Joinville, 2007.

GUIA NET – GUIA INTERNET BRAZIL. **Mapa do Estado de São Paulo.** Disponível em <http://www.guianet.com.br/sp/mapasp.htm>. Acesso em: 30 de Maio de 2011.

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.; AHMAD, S.H., eds. **High performance concrete: properties and applications**. New York, McGraw-Hill. Cap. 10, pp. 341-374, 1994

ITAÚ CULTURAL – ENCICLOPÉDIA ITAÚ CULTURAL E ARTES VISUAIS. **Cerâmica.** Disponível em <http://www.itaucultural.org.br>. Acesso em: 25 de Maio de 2011.

MONTEDO, O.R.K. et al. Utilização de pó de aciaria em massa cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 8, pp. 14-17, 2003

MORI, P. E.; REEVES, S.; CORREIA, C. T.; HAUKKA, M. Development of a Fused Glass Disc XRF Facility and Comparison With The Pressed Powder Pellet Technique ai Instituto de geociências, São Paulo University. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 3, p. 441-446, Setembro, 1999.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JÚNIOR, M.; As Matérias – Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 28-39, Março / Abril, 2001.

OLIVEIRA, M. C.; MARGANHA, M. F. B. Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica branca e de revestimento. São Paulo: CETESB, 84 p. 2006.

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.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da Composição Granulométrica de Massas para Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial,** v. 2, n. 1/2 , p. 31-35, 1997.

RIELLA, H. G.; FRANJNDLICH, E. U. de C.; DURAZZO, M. Caracterização e Utilização de Fundentes em Massas Cerâmicas. **Cerâmica Industrial,** v. 7, n. 3, p. 33-36, 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. **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., 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.; AGNESINI, M. V. C. Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete. **Cement & concrete composites**, v. 26, pp. 375-380, 2004.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Concreto leve estrutural. In: ISAIA; G. C. (Ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo, IBRACON, v.02, p. 1333-62, 2005.

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.

SANTOS, M.G.R. **Estudo do comportamento do agregados sintético de argila calcinada para uso em revestimentos asfálticos para Manaus**. Dissertação (mestrado), Universidade de Brasília-UnB, Brasília-DF, 102p., 2007

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

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

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia das Argilas. 2 ed. Ver. Atual. Volume 3. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda. 1989c. 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.

SOARES, A.L.C.P; BATISTA, F.G.S.; CABRAL, G.L.L. **Estudo da Viabilidade Técnica do Agregado de Argila Calcinada para a Pavimentação da Amazônia**. Projeto de Fim de Curso, Instituto Militar de Engenharia-IME, Rio de Janeiro, 1998.

VIEIRA, A. **Agregados de Argila Calcinada: Produção e Utilização em Pavimentação Rodoviária na Região Amazônica.** Seminário, COPPE/UFRJ, 2000.

VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, J. N. F.; PINATTI, D. G. Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ. **Cerâmica,** v. 46, n. 297, p. 14-17, 2000.

VIEIRA, C. M. F.; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S. N. Avaliação da Secagem de Cerâmica Vermelha Através da Curva de Bigot. **Cerâmica Industrial,** v. 8, n. 2, p. 42-46, 2003a.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, T. M.; MONTEIRO, S. N. Massas Cerâmicas Para Telhas: Características e Comportamento de Queima. **Cerâmica,** v. 49, n. 312, p. 245-250, 2003b.

VIEIRA, C. M. F.; SALES, H. F.; MONTEIRO, S. N. Efeito da Adição de Argila Fundente Ilítica em CerÂmica Vermelha de Argilas Cauliníticas. **Cerâmica,** v. 50, p. 239-246, 2004.

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