

UNIVERSIDADE DE SOROCABA
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSOS TECNOLÓGICOS E
AMBIENTAIS

Cibeli Nieri

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO VERMELHO EM TRAÇOS DE
CONCRETO

Sorocaba/SP

2017

Cibeli Nieri

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO VERMELHO EM TRAÇOS DE
CONCRETO**

Dissertação apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard
Restivo

SOROCABA/SP

2017

Ficha Catalográfica

Cibeli Nieri

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO VERMELHO EM TRAÇOS DE
CONCRETO**

Dissertação aprovada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre no
Programa de Pós Graduação em Processos
Tecnológicos e Ambientais da Universidade
de Sorocaba.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo

Universidade de Sorocaba

Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva

Universidade de Sorocaba

Prof. Dr. Antônio Carlos da Silva

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

À minha família, pelo apoio, auxílio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à força maior, Deus, pela vida.

À Universidade de Sorocaba, pela oportunidade e incentivo à pesquisa.

Aos meus pais, pelo exemplo, por todo esforço, empenho na minha criação, educação e por sempre acreditarem em mim.

Aos meus irmãos pelo incentivo direto e indireto.

Ao meu querido cônjuge e amigo Tiago, pela paciência e pelo apoio nos momentos de estudo, além das longas conversas noites afora sobre o mundo da engenharia química.

A minha pequenina e amada filha, Júlia, pelas horas de ausência, pelos momentos sem minha atenção. Saiba que a minha maior motivação é você.

Ao meu professor e orientador, Dr. Thomaz Augusto Guisard Restivo, pelo auxílio, orientação e compartilhamento de seus conhecimentos, sempre incentivando e me colocando nos trilhos.

Ao professor e amigo, Dr. Haroldo Lhou Hasegawa, pelo exemplo de um grande pesquisador, por todo conhecimento transmitido e pelo projeto do moinho de bolas. Sua expertise foi fundamental para o desenvolvimento dos ensaios.

À empresa Qualitec Engenharia da Qualidade Ltda pela oportunidade de realização dos ensaios mecânicos fundamentais para a conclusão deste estudo e ao Professor Emerson Cremm Busnello pelas dicas fundamentais que contribuíram para melhoria desta pesquisa.

A empresa Holcim-Lafarge por ter cedido o cimento para desenvolvimento dos ensaios, em especial ao Engenheiro Adão Ribeiro Neto.

Aos meus colegas de trabalho e técnicos de laboratório, Lucas de Freitas Oliveira, pela ajuda na confecção dos corpos de prova e Gabriel Caitano Euzébio, pelas engenhocas criadas que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Processos Tecnológicos Ambientais e seus professores.

RESUMO

Introdução: Existem diversos estudos e aplicabilidades em busca do aproveitamento dos resíduos gerados na construção civil. Embora estes resíduos sólidos sejam de baixa periculosidade, causam impactos ao meio ambiente devido o seu elevado volume. Além dos resíduos gerados na execução da obra e em reformas, existem também os resíduos gerados na fabricação de elementos construtivos, é o caso da cerâmica vermelha. Estima-se que o volume de resíduos gerados na fabricação desses elementos seja entre 5% a 20% do volume de fabricação de olarias (fabricas artesanais) e indústrias. Dá-se ai a importância da valorização desse resíduo diretamente da indústria cerâmica, em outro elemento essencial para a construção civil fabricado a partir da extração do calcário, sendo este um recurso finito, o cimento. Sabe-se que existem diversos tipos de cimentos com adições, inclusive os que utilizam materiais pozolânicos, como por exemplo, o CP II-Z (Cimento Portland Composto com Pozolana) e o CP IV (Cimento Portland Pozolânico), sendo suas adições com base em materiais pozolânicos naturais e ou artificiais proveniente de subprodutos de outras indústrias químicas. **Objetivos:** Neste estudo foram desenvolvidos diversos traços em concreto com substituições parciais do cimento de alta resistência inicial (ARI) pelo material pozolânico, a fim de agregar valor ao resíduo cerâmico vermelho proveniente de quebras e rejeitos de indústrias cerâmicas, avaliando as variações das características físicas, químicas e as resistências mecânicas à compressão axial. **Métodos:** Classificou-se qualitativamente e quantitativamente o material pozolânico e o cimento através dos ensaios de difração de raios x, fluorescência de raios x, área superficial específica e curva granulométrica para a determinação do tamanho de partículas. Verificou-se a atividade pozolânica do material cerâmico através do método de Chapelle modificado, demonstrando o consumo de hidróxido de cálcio nas amostras. Realizou-se ensaio de resistência à compressão axial para os corpos de prova sem substituição do cimento pelo material pozolânico (0%) e com as respectivas substituições parciais de 10, 20, 30 e 40% nas idades de 7, 28 e 91 dias. **Resultados e Discussão:** As análises granulométricas demonstram que o tamanho da partícula do material pozolânico é menor que do cimento analisado, assim como, consequentemente, a área superficial específica. Através do ensaio de abatimento o tronco de cone observa-se o maior consumo de água quanto maior a substituição do

cimento pelo material cerâmico. A difração de raios-X identificou os compostos do cimento e o tipo de argila classificada por montmorilonítica “pobre” devido a grande quantidade de sílica inerte na amostra. O ensaio pelo Método de Chapelle identificou a baixa reatividade da amostra utilizada comparada ao material metacaulim e ao estudo realizado por Raverdy, 1980. O ensaio de Fluorescência de Raios X apresentaram os compostos CaO , SiO_2 , SO_3 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 , de acordo com os compostos do cimento tipo Ari. O material pozolânico foi classificado como pozolana artificial classe N, pois as composições encontradas no ensaio de fluorescência de Raios-X SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O e CaO , atendem os requisitos químicos de acordo com a NBR 12653 de 2014. Os ensaios de resistência foram correlacionados com suas composições e idades de rompimento. **Conclusão:** Foi possível utilizar a substituição parcial do cimento pelo material pozolânico, mesmo com baixa reatividade, com base nos ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de prova. A partir dos traços estudados, em comparação com o chamado traço base, é possível a utilização do traço com 10% de substituição mantendo o mínimo de 40 MPa aos 28 dias de idade.

Palavras-chave: Cimento Portland. Material pozolânico. Atividade Pozolânica. Resistência mecânica. Difração de raios-x.

ABSTRACT

Introduction: The literature shows several studies and applications toward the reutilization of the residues from building construction activities. In spite of low dangerous, such residues present some impact to the environment due to their large volume. The source of the residues are the civilian construction as well as during manufacturing. The last is the case for red ceramic, the so-called pozzolanic material. One estimate the total residue volume can reach from 5 up to 20% of production. Therefore, a suitable reutilization is investigated for instance as an additive to lime cement, which is a limited resource. Some commercial cements have been offered like Portland CP II-Z, where pozzolanic derived materials are added, both natural or artificial wastes from other industries. . **Objetives:** The study shows the development of some high initial resistance concrete formulations with partial replacement by pozzolanic material in order to add value to ceramic residues obtained from a local brick factory.. The materials were characterized by physical-chemistry and mechanical methods to evaluate the uniaxial compression strength. **Methods:** The pozzolans and starting cement were characterized through X-ray diffraction and fluorescence, specific surface area and particle size. The pozzolanic activity was estimated by a modified Chapelle method to measure the consumption of calcium hydrate. The uniaxial compression test were carried out at pozzolan replacements of 0, 10, 20, 30 and 40% aged at 7, 28 and 91 days. **Results and Discussion:** granulometric analyses showed the pozzolan mean particle size is smaller than the cement leading to higher surface areas of the former. The X-ray diffraction analyses identified the montmorillonitic clay with high silica content. The Chapelle test indicates low reactivity of such material as compared to metacaulim, which has been studied by Raverdy in 1980. X-ray fluorescence has detected the compounds CaO, SiO₂, SO₃, Fe₂O₃ e Al₂O₃ at the cement. The pozzolanic material was classified as type N with main composition containing SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O e CaO, which conform to the requirements accordingly the standard NBR 12653 (2014). The compression tests were related to the composition and age. **Conclusion:** A partial replacement of the original cement by the pozzolanic material is allowed, even at low reactivity of such material, supported by the uniaxial compression tests. The results show the pozzolan additives up to 10% at the actual formulation surpass the concrete specification of 40MPa minimum strength after 28 curing days.

keywords: Portlan cement. Pozzolan material. Pozolanic activity. Mechanical strength. X-ray Diffraction.

LISTA DE ABREVIações, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al₂O₃	Óxido de Alumínio
ANICER	Associação Nacional de Indústrias Cerâmicas
A/C	Relação água / cimento
Al₂Si₂O₇	Metacaulim
BET	(Brunauer, Emmett, and Teller) Adsorção de Nitrogênio
C₂S	Silicato dicálcico (belita)
C₃A	Aluminato tricálcico (alita)
C₃S	Silicato tricálcico (alita)
C₄AF	Ferroaluminato tetracálcico (ferrita)
CaCO₃	Carbonato de cálcio (calcário)
Ca(OH)₂	Hidróxido de cálcio (cal hidratada)
CaO	Óxido de Cálcio (cal)
CO₂	Dióxido de Carbono
CSH ou C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CH	Hidróxido de Cálcio
CP	Cimento Portland
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Fe₂O₃	Óxido de Ferro
FIHP	Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado

GJ/ano	Gigajoules por ano
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
K₂O	Óxido de potássio
LAREX	Laboratório de Reciclagem, Tratamento de Resíduos e Metalurgia Extrativa
LRAC	Laboratório de Recursos Analíticos e Calibração
MgO	Óxido de Magnésio
Mn₂O₃	Óxido de Manganês
MPa	Mega Pascal
Na₂O	Óxido de Sódio
NM	Norma Mercosul
RAA	Reação Álcalis Agregado
RCC	Resíduo da Construção Civil
SiO₂	Óxido de Silício (Sílica)
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto
TiO₂	Dióxido de Titânio

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissão Específica de CO ₂ por tonelada de Cimento.....	26
Figura 2 – Desenvolvimento da resistência dos compostos puros.....	29
Figura 3 – Estágios do processo de hidratação.....	34
Figura 4 – Evolução da resistência média à compressão dos diferentes tipos de Cimento Portland.....	40
Figura 5 – Embalagem com 40kg do cimento utilizado.....	53
Figura 6 – Pré-moagem manual dos tijolos.....	55
Figura 7 - Moinho de Bolas – UNISO.....	56
Figura 8 – Material Pozolânico sobre o cimento.....	58
Figura 9 – Mistura do material pozolânico com cimento.....	58
Figura 10 – Traço Base.....	59
Figura 11 – Traço com 10% de pozolana.....	59
Figura 12 – Traço com 20% de pozolana.....	60
Figura 13 – Traço com 30% de pozolana.....	60
Figura 14 – Traço com 40% de pozolana.....	60
Figura 15 - Corpos de prova, variação da cor do traço 1 ao 5.....	60
Figura 16 - ABNT NBR NM 67 – Slump Test – Ensaio.....	61
Figura 17 – Slump Test.....	62
Figura 18 – Máquina para ensaio de resistência à compressão – Qualitec.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva Granulométrica do Agregado Miúdo – Areia.....	70
Gráfico 2 – Curva Granulométrica do Agregado Graúdo – Brita 0.....	71
Gráfico 3 – Curva Granulométrica do Agregado Graúdo – Brita 1.....	71
Gráfico 4 – Espectro de difração do cimento.....	73
Gráfico 5 – Espectro de difração do Material Pozolânico.....	74
Gráfico 6 – Espectro de difração da areia.....	75
Gráfico 7 – Resistência à Compressão Axial.....	79
Gráfico 8 – Evolução da resistência à compressão do concreto.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais compostos do Cimento Portland.....	28
Quadro 2 – Características do concreto e influência no produto final.....	46
Quadro 3 - Classificação das consistências do concreto.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fabricação de Produtos cerâmicos.....	22
Tabela 2 – Tipos de Cimento Portland.....	24
Tabela 3 – Produção anual de cimento portland, segundo os tipos (em 1.000 toneladas).....	25
Tabela 4 - Valores médios típicos da composição de compostos de diferentes tipos de cimento.....	32
Tabela 5 – Calor de hidratação dos compostos puros.....	33
Tabela 6 - Teores dos componentes dos Cimentos Portland Brancos.....	42
Tabela 7 - Requisitos Químicos.....	48
Tabela 8 - Caracterização Físico-Química da água da rede pública de abastecimento.....	54
Tabela 9 – Composição dos traços das dosagens realizadas.....	58
Tabela 10 – Resultados obtidos nas análises por difração a Laser nas amostras.....	69
Tabela 11 – Granulometria do Agregado Miúdo – Areia.....	70
Tabela 12 – Granulometria do Agregado Graúdo – Brita 0.....	71
Tabela 13 – Granulometria do Agregado Graúdo – Brita 1.....	71
Tabela 14 – Slump Test.....	72
Tabela 15 – Compostos do Cimento - Difração de Raios X.....	74
Tabela 16 – Compostos do Material Pozolânico - Difração de Raios X.....	75
Tabela 17 – Compostos da Areia - Difração de Raios X.....	75

Tabela 18 – Fluorescência de Raios X - Óxidos.....	77
Tabela 19 – Comparativo ABNT NBR 12.653 x fluorescência	
material cerâmico - Requisitos Químicos.....	78
Tabela 20 – Resistência à Compressão Axial.....	79

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1	Cimento.....	28
2.1.1	Finura do cimento.....	30
2.2	Pasta de cimento.....	31
2.2.1	Expansibilidade.....	31
2.2.2	Tempo de Pega.....	31
2.2.3	Calor de hidratação.....	32
2.2.4	Hidratação do cimento.....	33
2.3	Tipos de cimento.....	37
2.4	Concreto.....	42
2.4.1	Propriedades do Concreto fresco e endurecido.....	43
2.4.2	Dosagem do concreto.....	46
2.5	Material Pozolânico.....	47
2.5.1	Reação Pozolânica.....	49
2.5.2	Atividade Pozolânica.....	50
2.5.3	Efeitos da Pozolana no Concreto.....	50
3	OBJETIVOS.....	52
3.1	Objetivo Geral.....	52
3.2	Objetivos Específicos.....	52
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
4.1	Materiais.....	53
4.1.1	Cimento.....	53
4.1.2	Agregado Miúdo.....	53
4.1.3	Agregado Graúdo.....	54
4.1.4	Água.....	54
4.1.5	Resíduo Cerâmico Vermelho.....	54

4.2 Métodos.....	55
4.2.1 Moagem do Resíduo Cerâmico Vermelho.....	55
4.2.2 Dosagem dos concretos.....	57
4.2.3 Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone.....	61
4.2.4 Resistência a Compressão.....	63
4.2.5 Análise granulométrica do Cimento e Pozolona.....	64
4.2.6 Área Superficial Específica.....	64
4.2.7 Análise Granulométrica de Agregados Miúdos e Graúdos.....	65
4.2.8 Atividade pozolânica.....	66
4.2.9 Difração de Raios X.....	67
4.2.10 Fluorescência de Raios X	68
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
5.1 Características Físicas.....	69
5.2 Características Químicas.....	73
5.3 Características Mecânicas.....	79
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	81
REFERÊNCIAS.....	83
ANEXO A – Relatório de ensaios do cimento.....	89
ANEXO B – Certificado de calibração da máquina de resistência à compressão (Qualitec Engenharia).....	90
ANEXO C - Distribuição de tamanho de partículas por difração a laser.....	91
ANEXO D – Determinação da atividade pozolânica (IPT).....	106
ANEXO E - Análise da área superficial de sólido por adsorção física de nitrogênio.....	107

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a questão ambiental é muito importante para a sociedade como um todo. O volume de resíduos gerados diariamente em todas as áreas é imensurável. A prática de destinação de resíduos por aterramento fica mais caro a cada dia devido a demanda.

A construção civil é responsável por uma boa parte dos resíduos sólidos gerados, causando grandes impactos ambientais, pois além de consumir recursos naturais e alterar o meio ambiente, o setor gera grande volume de resíduos. Embora os resíduos sólidos sejam de baixa periculosidade, causam grandes impactos devido ao seu elevado volume (Karpinsk et al., 2009).

De acordo com o relatório diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil (IPEA, 2012), em 2009 e 2010, foram coletados no Brasil, apenas por serviços públicos, 28.530 e 30.998 mil toneladas/ano de resíduos da construção civil, respectivamente, totalizando na região Sudeste 14.661 e 16.094 mil toneladas/ano. A estimativa média da fonte geradora de resíduos de construção civil (RCC) para os municípios brasileiros, de acordo com Tavares, (2007 apud SANTOS, 2009), compõem 20% relativos a residências novas, 21% quanto a edificações novas acima de 300m² e 59% são provenientes de reformas, ampliações e demolições. Os RCC podem representar 61% em massa dos resíduos sólidos urbanos (PINTO; GONZÁLES, 2005).

A resolução do CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA n° 307 de 2002 determina a segregação dos RCC, dividindo os resíduos em quatro classes diferentes, devendo encaminhá-los para reciclagem ou destinação final. Essa resolução também determina a proibição do envio destes à aterros sanitários. Em seu Artigo 2° propõe a seguinte definição para o RCC:

“Resíduos da construção civil são provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”.

O amianto foi incluído na classe de produtos perigosos, seguindo a seguinte divisão:

I – classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II- classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

III – classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

IV – classe D – são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2004).

As resoluções do CONAMA 307 e 348, determinaram que o gerador é o responsável pelo gerenciamento desses resíduos, responsabilizando os geradores pela segregação dos resíduos e o seu encaminhamento para reciclagem e disposição final adequada. Estabeleceu que as áreas destinadas para essas finalidade devem passar pelo processo de licenciamento ambiental e ser fiscalizadas pelos órgãos ambientais competentes. Segundo Carneiro (2005), na cidade de São Paulo, trinta por cento dos resíduos da construção civil são cerâmicos (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002, 2004).

Além dos resíduos gerados na construção civil, existem também os resíduos gerados na fabricação dos materiais para a construção civil, com foco nos materiais cerâmicos vermelhos (tijolos, blocos, tubos e telhas).

Assim, os resíduos cerâmicos provenientes da indústria cerâmica, bem como em olarias artesanais, geram um grande volume de resíduos em sua produção.

Segundo a ANICER (Associação Nacional de Indústrias Cerâmicas), em 2008, o número de cerâmicas e olarias no Brasil é aproximadamente 6.903 empresas.

Tabela 1 – Fabricação de Produtos cerâmicos

PRODUTOS	Nº. de empresas aproximado	Participação no setor (%)	Prod/mês (Nº. de Peças)	Consumo ton/mês(Matéria-prima:Argila)
Blocos/Tijolos	4346	63%	4.000.000.000	7.800.000
Telhas	2547	36%	1.300.000.000	2.500.000
Tubos	10	0,1%	325,5 km*	-

Nota: *Produção apontada pela Associação Latino-Americana de Fabricantes de Tubos Cerâmicos (Acertubos), considerando o número de 10 empresas, responsáveis pela fabricação de 3.906km/ano. Fonte: IBGE 2008 para Seção C, Divisão 23, Grupo 234, Classe 2342-7, Fabricação de Produtos Cerâmicos Não-Refratários para Uso Estrutural na Construção, excluídas as palavras pisos e azulejos da razão social).

Em virtude do grande número de indústrias e, conseqüentemente, a elevada produção de peças cerâmicas, o volume de resíduos gerados neste processo é grande. Chama-se de resíduo ou chamote, as peças inteiras de tijolos, telhas e tubos que não apresentam, após a etapa de queima nos fornos, as características técnicas necessárias para a comercialização, além dos fragmentos (cacos) oriundos de quebras após a queima (REDIVO, 2011).

As perdas posteriores ao processo de queima são provenientes basicamente de quebras das peças no carregamento e descarregamento dos fornos e caminhões transportadores e também da queima em excesso de algumas peças (BRASIL, 2009). Em geral, empresas com alto índice de perdas apresentam blocos sem dimensões padronizadas, com baixa resistência mecânica ao choque ou à compressão e sem uniformidade de coloração (INSTITUTO EUVALDO LODI, 1998). Assim, o índice de perdas na etapa de pós-queima, pode variar de 5% a 20%, conforme o tipo de indústria, ou seja, das mais modernas às rústicas. No Brasil, devido à diversidade das unidades de produção, estima-se que o valor das perdas,

em média, atinja cerca de 10%, o que equivale a aproximadamente 200 kg ou 0,2 toneladas de fragmentos por milheiro, considerando o peso médio de 2 mil kg por milheiro (BRASIL, 2009).

Diante do volume significativo do resíduo cerâmico gerado pelas indústrias de cerâmicas vermelhas, se faz necessário uma destinação adequada para esses resíduos. Normalmente eles são encaminhados para os aterros ou descartados inadequadamente no meio ambiente. Entretanto, esses rejeitos podem ser transformados em matéria prima de qualidade para a construção civil, tornando-se sustentável e, com isso, a indústria, a sociedade, o poder público e, sobretudo a natureza, acabam se beneficiando (DIAS, 2004).

O resíduo cerâmico vermelho trata-se de argila calcinada, também classificada como pozolana artificial de acordo com a ABNT NBR 12.653. A pozolana é um material silicoso que, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando assim compostos com propriedades aglomerantes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

A utilização de pozolanas nos concretos apresenta benefícios às suas propriedades, em relação à trabalhabilidade e fluidez no estado fresco, quanto ao comportamento mecânico e sua durabilidade no estado endurecido.

A extração do calcário para a fabricação de cimento também gera um grande problema ambiental. Inicia-se pela extração da rocha calcária nas pedreiras, em grandes extensões e espessuras, em geral a céu aberto, desmontadas com explosivos e transportadas por caminhões até a área de britagem, para a redução de suas dimensões a serem utilizadas no processo industrial. O processo de extração da rocha calcária, bem como toda a atividade mineradora, gera impactos negativos ao meio ambiente. Uma vez que consome os afloramentos naturais do calcário e sua vegetação característica, pode ser prejudicial ao ciclo local das águas, pois esses afloramentos recolhem as águas de chuva e direcionam aos corpos d'água subterrâneos, funcionando como uma caixa d'água natural.

Apesar do processo de fabricação do cimento ser a sétima atividade industrial que consome mais energia, liberando CO₂ para a atmosfera, o cimento é essencial para as construções.

Existem vários tipos de cimentos com diversas composições conferindo ao concreto maiores resistências, trabalhabilidade, durabilidade entre outras características, tabela 2. A disponibilidade desses cimentos varia de acordo com as características de cada região, de acordo com as demandas e estratégias de cada fabricante.

Tabela 2 – Tipos de Cimento Portland

CIMENTOS		Componentes (% em massa)			
SIGLA	NOME	Clínquer + sulfato de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
CPI	Cimento Portland Comum	100	-	-	-
	Cimento Portland Comum + adição	99 - 95	-	-	-
CPII	Cimento Portland Composto com escória	94-56	6-34	-	0-10
	Cimento Portland Composto com pozolana	94-76	-	6-14	0-10
	Cimento Portland Composto com filler	94-90	-	-	6-10
CPIII	Cimento Portland de Alto-Forno	65-25	35-70	-	0-5
CPIV	Cimento Portland Pozolânico	85-45	-	15-50	0-5
CPV	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	100-95	-	-	0-5

Fonte: AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção**. São Paulo: Pini, 2012.

De acordo com o relatório anual de 2013 do sindicato nacional da indústria de cimento, foram consumidas em território nacional 70,2 milhões de toneladas de cimento em 2013. Isso resultou em um consumo per capita de 353 kg/hab/ano (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2013).

Tabela 3 – Produção anual de cimento portland, segundo os tipos (em 1.000 toneladas).

ANO	TIPOS DE CIMENTO						SUBTOTAL	AJUSTES*	TOTAL
	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	Branco			
2008	346	33.080	8.879	5.714	3.577	86	51.682	288	51.970
2009	84	34.662	7.967	5.097	3.377	-	51.187	560	51.747
2010	88	38.474	8.345	6.686	4.211	-	57.804	1.313	59.117
2011	103	38.659	9.347	8.247	4.973	-	61.329	2.764	64.093
2012	98	39.743	10.000	9.612	5.580	-	65.033	3.776	68.809
2013	263	41.249	9.405	9.863	5.660	-	66.440	3.721	70.161

* *Dados estimados.*

Fonte: SNIC, 2013 - Relatório Anual do Sindicato Nacional da Indústria de Cimento, 2013. **Sindicato Nacional da Indústria de Cimento**, relatório anual, 2013. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em 02 fev. 2015.

A cada ano o consumo de cimento é maior e por consequência, há um aumento na emissão de CO₂ para a atmosfera e de gasto energético no processo de fabricação do cimento. A produção do cimento consiste na fabricação do clínquer com posteriores moagens e adições. O clínquer é obtido a partir da queima de várias matérias primas (SiO₂, CaO, Al₂O₃ e Fe₂O₃, entre outras), em um forno rotativo com temperaturas de até 1450°C, sendo a rocha calcária a principal matéria-prima natural utilizada. A calcita (CaCO₃) calcinada é responsável por 52% das emissões de CO₂ no processo de fabricação de clínquer. Segundo Worrell et al. (2001) a cada 1000 kg de clínquer fabricados gera-se em média aproximadamente 815 kg de CO₂.

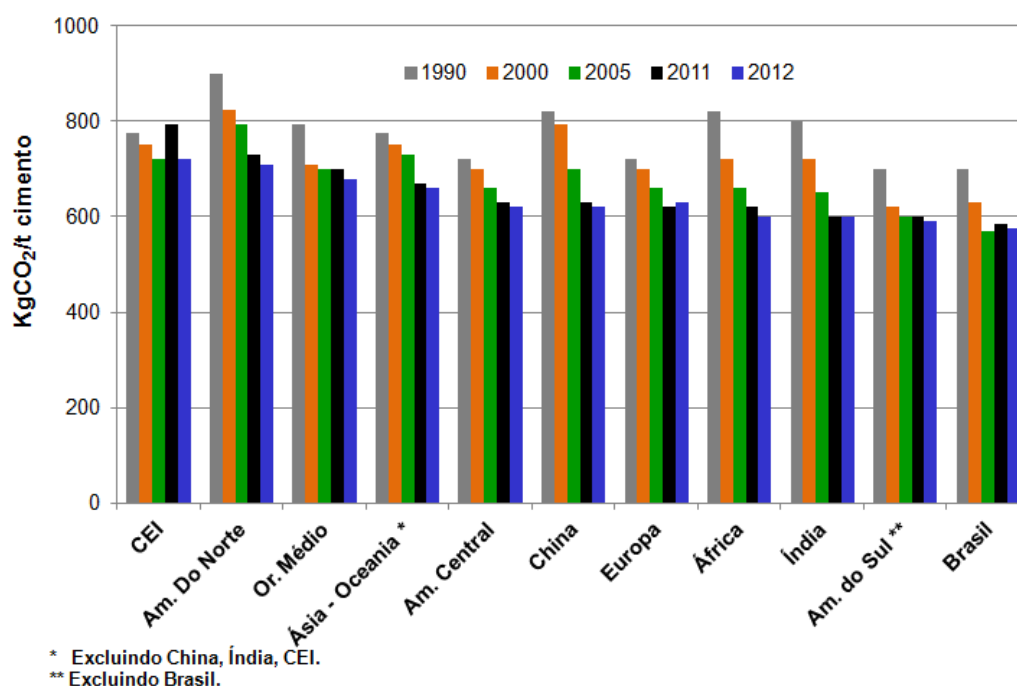
Vale ressaltar que o CO₂ agrava o efeito estufa, porém existem outros poluentes que podem ser liberados no processo de fabricação do clínquer como, o óxido de enxofre, óxido de nitrogênio, monóxido de carbono e compostos de chumbo, sendo todos eles poluentes. (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR

SUSTAINABLE DEVELOPMENT CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE, CO₂ and Climate Protection). Disponível em: < <https://www.wbcdcement.org/>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

É importante destacar que o setor produtivo da construção civil é um dos principais responsáveis pelo consumo de matérias-primas naturais, chegando a consumir entre 14% a 50 % do total extraído no planeta (JOHN, 2000), além de ser um dos setores que mais geram resíduos.

Além das emissões de gases do efeito estufa, durante a fabricação do cimento, existe também o gasto energético. Em números, o consumo global de energia para a produção de cimento situa-se entre 7 e 10 bilhões de GJ/ano, e as emissões de CO₂ correspondem a aproximadamente 6-7% da geração mundial (MALHOTRA, 1999; MEHTA, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Figura 01 – Emissão Específica de CO₂ por Tonelada de Cimento



Fonte: SNIC, 2013 - Relatório Anual do Sindicato nacional da Indústria de Cimento, 2013. **Sindicato Nacional da Indústria de Cimento**, relatório anual, 2013. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em 02 fev. 2015.

A substituição parcial do cimento por pozolana implica na economia de energia e na redução do custo de fabricação do cimento, aumentando assim o período de exploração das jazidas de calcário e argila e, conseqüentemente, o

período de produção da fábrica de cimento, sendo possível um aumento da capacidade de produção sem a necessidade de novos investimentos (SANTOS, 2006).

Em busca de um traço (ou formulação) de concreto sustentável, o presente estudo foi idealizado a título de empregar um resíduo gerado constantemente, proveniente de desperdícios de indústrias cerâmicas vermelhas e olarias artesanais, visando a redução do consumo de cimento. O reaproveitamento do resíduo cerâmico e a redução do consumo de cimento poderá contribuir com a redução de danos ambientais, preservação de áreas de descarte e redução de custos de produtos de materiais de construção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cimento

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico resultante da mistura homogênea de clínquer, gesso e adições normalizadas, finamente moídas. Aglomerante porque tem a propriedade de aglomerar os materiais, e hidráulico, porque reage (hidrata) na presença de água e depois de endurecido ganha características de rocha artificial.

Sua fabricação é feita via seca (99% das empresas), onde o calcário extraído é finamente moído em conjunto com a argila, em um moinho de bolas. Dessa homogeneização dá-se o nome de farinha ou cru. A farinha passa em um forno rotativo com temperatura inicial de 900°C, atingindo a temperatura de 1450°C, produzindo assim o clínquer. Para a finalização, o clínquer é resfriado atingindo temperatura inferior a 200°C. O clínquer resfriado, já na temperatura ambiente, é encaminhado ao moinho de cimento em conjunto com outras materias-primas que compõem cada tipo de cimento (gesso, calcário, pozolana e escória), e moído até atingir a sua granulometria ideal.

O cimento Portland é composto basicamente de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. O processamento dessas matérias-primas resulta na formação de compostos mais complexos, conforme quadro 1.

Quadro 1 – Principais compostos do Cimento Portland

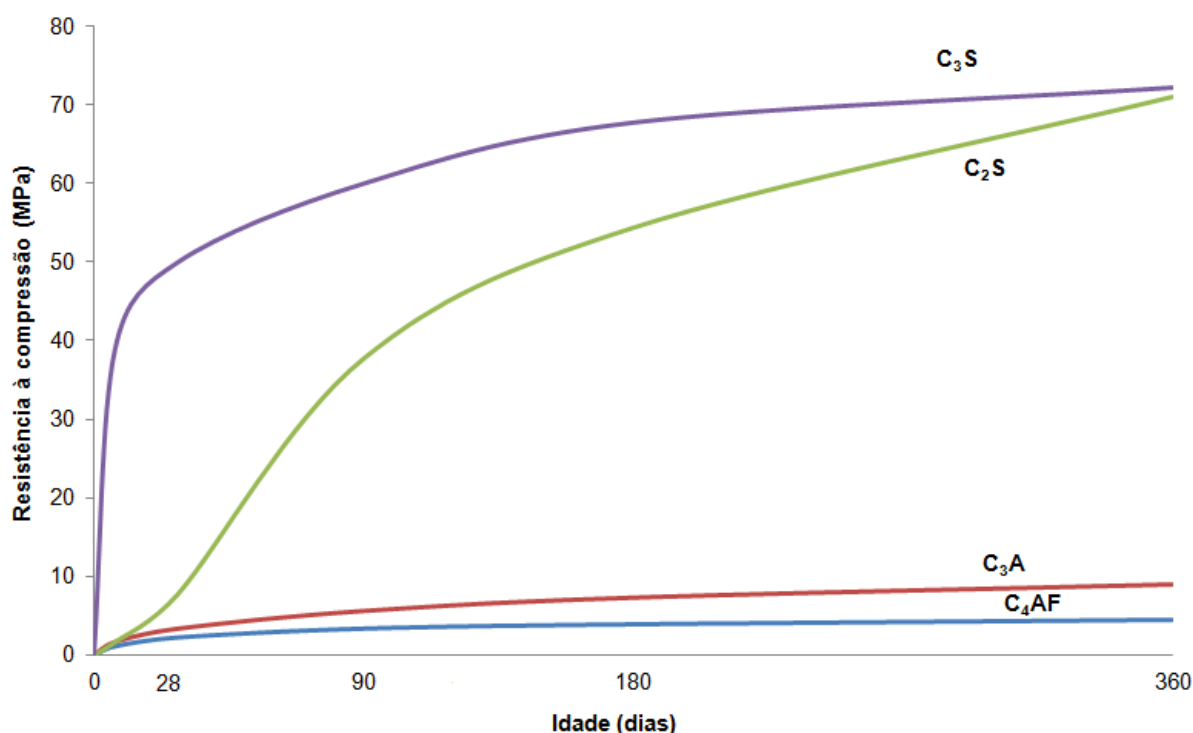
Compostos	Fórmula Química	Abrev	%	Propriedades
ALITA Silicato Tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	50 - 65	Endurecimento rápido. Alto calor de hidratação. Alta Resistência inicial.
BELITA Silicato Bicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	15-25	Endurecimento Lento. Baixo calor de hidratação. Baixa resistência inicial.
ALUMINATO Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6-10	Acelera a pega e alto calor de hidratação. Suscetível ao ataque de sulfatos. Aumenta a retração e reduz a resistência final.
Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	3-8	Endurecimento lento. Não contribui para a resistência. Resistente a sulfatos e possui coloração escura.

Fonte: AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção**. São Paulo: Pini, 2012.

Os silicatos C_3S e C_2S são responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada. (NEVILLE, 2013). O C_3A contribui muito pouco para a resistência do concreto, exceto nas primeiras idades. A sua presença no cimento é indesejável, pois, quando a pasta endurecida de cimento é atacada por sulfatos, a formação de sulfoaluminato (etringita) pode causar a desagregação do concreto. O seu efeito benéfico se resume pela combinação do óxido de cálcio com a sílica. (NEVILLE, 2013). O C_4AF está presente em pequenas quantidades no cimento. Ele reage com a gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) para formar sulfoferrito de cálcio e sua presença pode acelerar a hidratação dos silicatos (NEVILLE, 2013).

O C_3A e o C_3S são responsáveis pelas resistências iniciais de 1 a 3 dias, e o C_2S em idades posteriores, como ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Desenvolvimento da resistência dos compostos puros.



Fonte: NEVILLE, A.M.BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

Além dos compostos puros existem também os compostos secundários, como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O e Na_2O , que perfazem um pequeno percentual da massa de cimento. Desses compostos, o Na_2O e K_2O , óxidos de sódio e potássio, conhecidos como os álcalis, chamam atenção, pois podem reagir com alguns agregados,

criando a reação álcalis-agregado (RAA) causando a desintegração do concreto. A reação álcalis-agregado é um processo que ocorre em alguns constituintes mineralógicos do agregado que reagem com hidróxidos alcalinos, provenientes do cimento, água de amassamento, agregados e pozolanas, dissolvidos na solução dos poros do concreto. O resultado dessa reação é um gel higroscópico expansivo. A sua manifestação pode ocorrer de várias formas, expansões, movimentações nas estruturas, fissurações, entre outras.

2.1.1 Finura do cimento

A hidratação do cimento dá-se início na superfície das partículas, e é a área superficial total de cimento que define o material disponível para a hidratação. A velocidade de hidratação, portanto, depende da finura das partículas do cimento e, portanto, para um rápido ganho de resistência se faz necessária uma finura elevada. (NEVILLE, 2013). Quanto mais fino for o cimento mais rápido ele reagirá e por consequência maior será a sua resistência à compressão nos primeiros dias. As vantagens com relação a uma finura elevada estão na menor exsudação, maior impermeabilidade, maior trabalhabilidade e coesão dos concretos.

A exsudação é um fenômeno que ocorre quando a água de amassamento aflora até a superfície do concreto em estado fresco, levando partículas finas de cimento para a superfície, formando uma pasta e impedindo a ligação entre as partículas. Este fenômeno torna o concreto poroso e menos resistente. Para controlarmos a exsudação, devemos controlar a trabalhabilidade do concreto evitando água em excesso (AMBROZEWICZ, 2012).

A finura pode ser aumentada com uma moagem mais intensa, no entanto, o custo da moagem e o calor de hidratação determinam os limites de finura. Porém, quanto maior a finura, maior o calor de hidratação e a retração, podendo ocorrer fissurações (AMBROZEWICZ, 2012).

Os testes mais usuais para determinação da finura do cimento são os ensaios de peneiramento com a peneira ABNT 75 μm (0,075 mm), ABNT NBR 11.579 e área específica, ABNT NBR 16.372 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, 2015). Também é possível determinar a área superficial

específica através de outros métodos, como por exemplo, o método de BET ou Teoria da Adsorção multimolecular, tendo como objetivo descrever a adsorção física de moléculas de gás sobre uma superfície sólida.

2.2 Pasta de cimento

Trata-se da mistura cimento e água, quando o concreto encontra-se ainda em estado fresco.

2.2.1 Expansibilidade

É fundamental que o cimento não possua cal ou magnésia livre em teores elevados. Se o cimento apresentar estes compostos em excesso, ao contato com a água, produzirão Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2 . Essas reações provocam um aumento e volume na pasta, e em consequência, um concreto com fissuração excessiva. Os cimentos que apresentam esse tipo de expansão são denominados expansivos (AMBROZEWICZ, 2012).

2.2.2 Tempo de Pega

Pega é o termo utilizado quando a pasta de cimento inicia o processo de endurecimento, adquirindo certa consistência, perdendo assim a sua trabalhabilidade (AMBROZEWICZ, 2012).

Para controlar o tempo de pega, dando assim à pasta um maior tempo para a aplicação, mantendo sua consistência, é adicionado gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) na moagem do cimento (AMBROZEWICZ, 2012).

A tabela 4 apresenta a composição média dos diferentes tipos de compostos dos diversos tipos de cimentos existentes no mercado.

Tabela 4 – Valores médios típicos da composição de compostos de diferentes tipos de cimento.

Composição de compostos (%)								
Tipo de Cimento	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF	CaSO₄	CaO livre	MgO	Perda ao fogo
I	59	15	12	8	2,9	0,8	2,4	1,2
II	46	29	6	12	2,8	0,6	3,0	1,0
III	60	12	12	8	3,9	1,3	2,6	1,9
IV	30	46	5	13	2,9	0,3	2,7	1,0
V	43	36	4	12	2,7	0,4	1,6	1,0

Fonte: NEVILLE, A.M.BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

2.2.3 Calor de hidratação

Segundo Neville (2013), define-se como calor de hidratação a quantidade de calor liberada (em joules) por grama de cimento anidro até a hidratação completa a uma dada temperatura. A temperatura em que ocorre a hidratação afeta a velocidade de liberação de calor, o que é mais importante do que calor total de hidratação. O mesmo valor total de calor produzido em um período de tempo maior pode ser dissipado de forma gradual e, por consequência, com menor elevação da temperatura.

Em estruturas de concreto-massa, barragens, por exemplo, o calor de hidratação pode ser um problema devido à elevação de temperatura em razão da hidratação dos grãos de cimento, uma vez que a elevação da temperatura pode ser suficiente para causar trincas e/ou fissuras no concreto. Em algumas situações torna-se vantajoso, por exemplo, concretagens durante o inverno, quando a temperatura ambiente é baixa tornando a ação mais lenta e dissipando mais calor.

Para os cimentos Portland usuais, metade do calor total é liberado entre 1 e 2 dias, $\frac{3}{4}$ em 7 dias e aproximadamente 90% em 6 meses. O calor de hidratação depende da composição química do cimento e se aproxima da soma do calor de hidratação de cada composto puro hidratado separadamente.

Tabela 5 – Calor de hidratação dos compostos puros.

Composto	Calor de hidratação
	J/g
C₃S	502
C₂S	260
C₃A	867
C₄AF	419

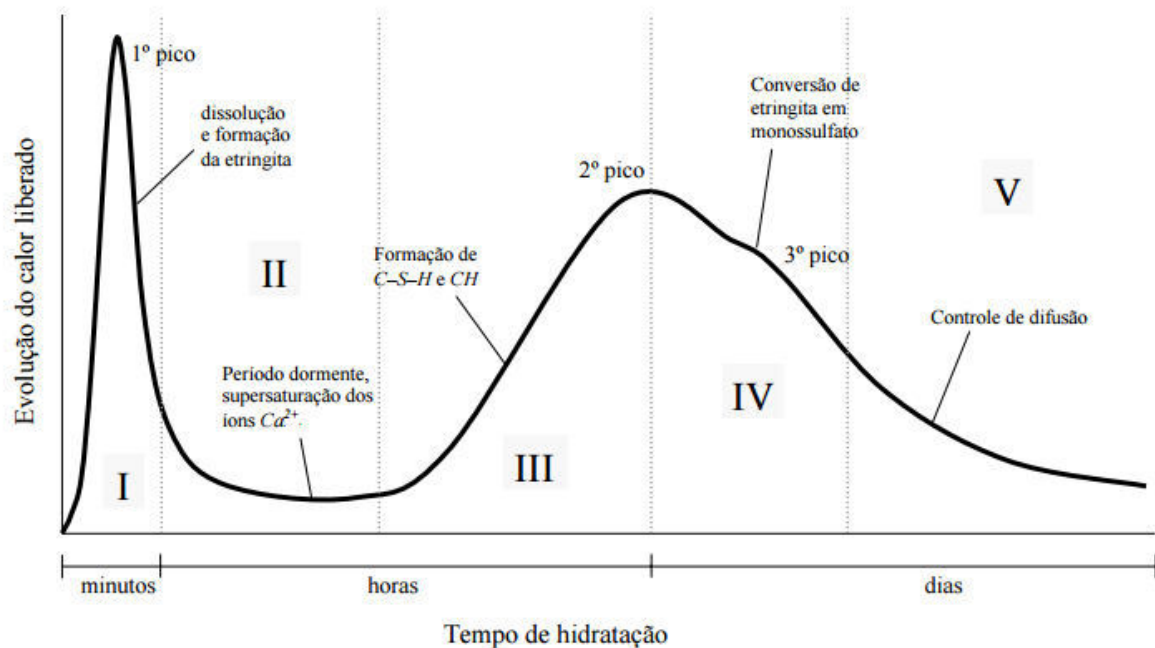
Fonte: NEVILLE, A.M.BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

2.2.4 Hidratação do cimento

Segundo Faria (2004, p. 18), a reação de hidratação do cimento é exotérmica e termoativada, ou seja, ao mesmo tempo em que os campos térmicos da massa de concreto são modificados pela evolução da reação, a cinética desta reação é alterada em função da temperatura da massa de concreto aquecida. A evolução dessa reação se relaciona diretamente à evolução das propriedades do material, como o módulo de elasticidade, resistência, fluência, retração, entre outros. Essa evolução denomina-se como o “envelhecimento” do concreto.

O processo exotérmico de hidratação do cimento, divididos em cinco estágios em relação ao tempo, estão descritos a seguir, como mostrado na Figura 3, segundo Faria (2004).

Figura 3 – Estágios do processo de hidratação.



Fonte: Faria, 2004.

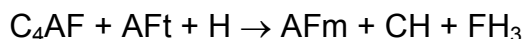
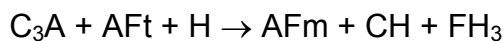
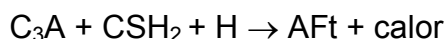
Nos primeiros instantes (15 a 20 minutos, estágio I), o cimento começa a ser dissolvido na água formando uma suspensão de íons, dentro os quais o Al^{3+} reage instantaneamente com o gesso e a água do sistema, liberando uma grande quantidade de calor, promovendo o primeiro pico exotérmico. Desta reação resulta uma camada constituída por pequenas agulhas chamadas etringita. Quando os íons de cálcio e de hidróxido alcançam concentrações críticas, a cristalização de Silicato de Cálcio hidratado (C-S-H) e de Hidróxido de Cálcio (CH) começa. Este advento é seguido pelo estágio II (2 a 4 horas), chamado período dormente ou de indução, onde o cimento ainda permanece plástico. A etringita continua sendo formada enquanto houver gesso na forma de íons SO_4^{2-} na solução, porém, de forma mais lenta, à medida que a camada que cobre os íons de Al^{3+} fica mais espessa, impedindo o seu contato com o SO_4^{2-} e a água. A dissolução dos minerais do cimento é concluída, aumentando a concentração de íons na solução. O CH precipita da solução e o C-S-H cristaliza na superfície do C_3S , formando uma camada. Nesse ponto, a reação é controlada por difusão, devido ao aumento de espessura dessa camada e do tempo que a água leva para penetrar na mesma. O C_2S hidrata a uma taxa mais lenta porque é um componente menos reativo. Por isso se nota uma baixa liberação de calor neste estágio. Com o desaparecimento do

SO_4^{2-} na solução vem a instabilidade da camada de etringita, causando sua desintegração e dando fim ao período dormente.

O estágio III (4 a 8 horas) é marcado pela concentração crítica de íons e a consequente retomada das vigorosas reações nas quais, principalmente os íons Ca^{2++} estão envolvidos na formação e precipitação do C-S-H e do CH. A taxa máxima de reação acontece nesta fase, promovendo uma forte liberação de calor que dá origem ao segundo pico exotérmico. A pega chega ao final e o endurecimento se inicia.

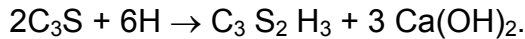
Após o segundo pico exotérmico, ocorre à conversão da etringita em monossulfato pela sua reação com os íons Al^{3+} não reagidos, consolidando o estágio IV (8 a 12 horas). Os íons Al^{3+} remanescentes reagem formando novos hidratos que, juntamente com os hidratos precipitados dos íons Ca^{2++} , formam uma proteção em torno do grão de cimento, impedindo o contato da água livre com a sua parte não hidratada. Inicia-se, assim, o último estágio, o estágio V (12 a 24 horas), também controlado por difusão. Neste estágio, a temperatura tem pouco efeito na hidratação.

De acordo com Faria (2004), a reação de hidratação do cimento é a soma de diversas reações, descritas a seguir:

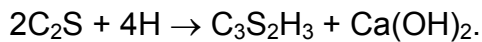


Onde AFt é a etringita e AFm o monossulfato.

Como os silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) são os principais compostos do cimento, sendo que o primeiro se hidrata muito mais rápido que o segundo, se faz importante o destaque das reações de sua hidratação (NEVILLE, 2013):

C₃S

[100g] [24g] [75g] [49g]

C₂S

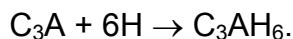
[100g] [21g] [99g] [22g]

Onde: C = CaO; S=SiO₂; A=Al₂O₃; F=Fe₂O₃ e H=H₂O.

O composto hidratado microcristalino C₃S₂H₃ é produto da hidratação do C₃S com a liberação de cal na forma cristalina de Ca(OH)₂. O C₂S se comporta de maneira semelhante, porém contém menos cal. Os silicatos de cálcio hidratados são descritos como C-S-H ou CSH.

De acordo com as [massas] nas equações anteriores, ambos os silicatos requerem aproximadamente a mesma quantidade de água para hidratação, mas o C₃S produz mais que o dobro de Ca(OH)₂ que o C₂S (NEVILLE, 2013).

Na maioria dos cimentos a quantidade de C₃A é pequena. Sua estrutura hidratada é uma forma cristalina cúbica circundada pelos silicatos de cálcio hidratados. A reação do C₃A puro com água é muito rápida e resulta na pega instantânea, prevenida pela adição de sulfato de cálcio ao clínquer. Mesmo assim, a velocidade de reação do C₃A é mais rápida que a dos silicatos de cálcio. A reação de hidratação do C₃A aproximada é:



[100g] [40g] [140g]

Onde: C = CaO; S=SiO₂; A=Al₂O₃; F=Fe₂O₃ e H=H₂O.

As [massas] indicam que a quantidade de água necessária é maior do que a requerida na hidratação dos silicatos.

2.3 Tipos de Cimentos

Os tipos de cimentos mais comuns utilizados no Brasil são obtidos a partir da moagem do clínquer (calcário e argila), com outras adições, gesso (sulfato de cálcio para controle de pega), escória de alto forno (subproduto da fabricação do aço), material pozolânico, cinzas de processo de queima industrial e filler calcário (obtido pela moagem do calcário bem concentrado). Os cimentos possuem propriedades e características específicas a serem utilizados em diversas aplicações (AMBROZEWICZ, 2012).

- **Cimento Portland Comum (CPI)**

O cimento Portland comum é utilizado para construções de concreto em geral, exceto quando da exposição a substâncias químicas agressivas presentes no solo (sulfatos) ou em águas subterrâneas. Não possui nenhum tipo de aditivo, exceto o gesso (cerca de 3%), que tem a função de retardar o início da pega do cimento possibilitando mais tempo para a aplicação. Existe também o CPI-S, cimento Portland comum com adições à mistura durante a moagem como material pozolânico, escória de alto forno, e ou materiais carbonáticos, da ordem de 1 a 6% em massa. O cimento Portland comum tem baixa disponibilidade no mercado, pois trata-se basicamente de clínquer puro, elevando seu custo, já que possui maior quantidade de calcário em sua fabricação (AMBROZEWICZ, 2012). Além do alto custo, tem menor resistência, segundo a ABNT NBR 5.732, as classes de resistências mais usuais são: 25, 32 e 40 MPa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991a).

- **Cimento Portland Composto com Escória de Alto-Forno (CPII-E)**

Este tipo de cimento é utilizado em estruturas de concreto que exigem um baixo calor de hidratação, evitando as fissuras, ou em estruturas que possam ser atacadas com sulfatos, como exemplo grandes volumes de concreto. O aumento da temperatura no interior de uma grande massa de concreto devido à liberação do

calor de hidratação do cimento, em conjunto com a baixa condutividade térmica do concreto, pode ocasionar fissurações graves. Esse tipo de cimento controla a hidratação do concreto controlando a liberação de calor evitando assim as fissurações (NEVILLE, 2013). Pode ser aplicado em todas as fases da obra. É composto de 94% a 56% de clínquer+gesso e 6% à 34% de escória de alto forno, podendo ou não ser adicionado até 10% em massa de material carbonático, segundo a ABNT NBR 11.578. Suas classes de resistências mais usuais são: 25, 32 e 40 MPa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

- **Cimento Portland Composto com Filler Calcário (CPII-F)**

Recomendado para argamassas de assentamento, de revestimento, argamassa armada, além de estrutura de concreto simples, armado, protendido e elementos pré-moldados e artefatos de concreto, pisos e pavimentos de concreto, solo-cimento, entre outros (AMBROZEWICZ, 2012). É composto de 94% a 90% de clínquer+gesso e 6 a 10% de material carbonático, de acordo com a ABNT NBR 11.578, cujas classes de resistência mais usuais são: 25, 32 e 40 MPa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

- **Cimento Portland Composto com Pozolana (CPII-Z)**

Ideal para utilização em obras subterrâneas, principalmente com presença de água, inclusive marítimas. Contém adição de material pozolânico de 6% a 14% em massa, o que contribui para a sua maior impermeabilidade, resultando em um concreto mais durável (AMBROZEWICZ, 2012). Composto de 94% a 76% de clínquer+gesso e até 10% em massa de material carbonático, segundo a ABNT NBR 11.578. Suas classes de resistência mais usuais são: 25, 32 e 40 MPa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

- **Cimento Portland de Alto-Forno (CP III)**

É menos poroso e mais durável, devido ao baixo calor de hidratação, possui alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos. Sua composição é de 65% a 25% de clínquer+gesso, de 35% a 70% de escória de alto-forno e pode possuir até 5% em massa de material carbonático, segundo a ABNT NBR 5.735. Recomenda-se sua utilização em obras de grande porte e agressividade, como barragens, fundações de máquinas, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, obras submersas, pavimentação de estradas, pistas de aeroportos, como também para aplicação geral em argamassas de assentamento e revestimento, estruturas de concreto simples, armado ou protendido. As classes de resistência mais usuais são: 25, 32 e 40 MPa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991c).

- **Cimento Portland Pozolânico (CP IV)**

De acordo com a ABNT NBR 5.736, o cimento Portland pozolânico constitui-se em 85% a 45% de Clínquer+gesso, 15% a 50% de material pozolânico e até 5% em massa de material carbonático. Deve-se ao alto teor de pozolana a alta impermeabilidade e conseqüentemente a maior durabilidade ao concreto em longo prazo. O concreto confeccionado com esse tipo de cimento apresenta resistência mecânica à compressão superior ao concreto de cimento Portland comum. Devido ao baixo calor de hidratação, recomenda-se sua utilização em grandes volumes e sob temperaturas elevadas. Indica-se especialmente em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos. Suas classes de resistências mais usuais são 25 e 32 MPa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999).

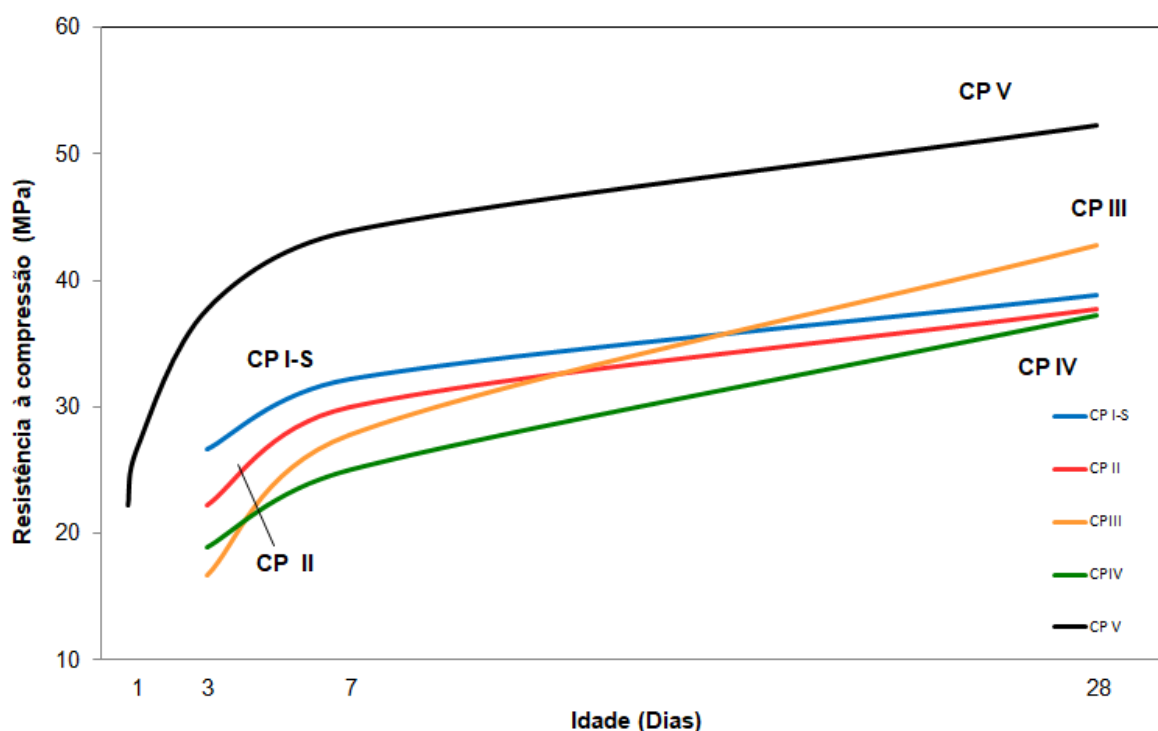
- **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI)**

Compõe-se de 100% a 95% de clínquer+gesso e até 5% em massa de material carbonático. Constitui-se em sua maior parte de silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas, com a moagem mais finas que outros tipos de cimento,

conferindo uma alta resistência inicial a concretos com esse tipo de cimento, podendo atingir até 34 MPa aos 7 dias de idade de acordo com a ABNT NBR 5.733. Utiliza-se em concretos de desforma rápida, como pré-moldados, por exemplo. Recomenda-se apenas para a fabricação de concretos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991b).

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), com base em resultados experimentais, ilustra a evolução da resistência média à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland conforme figura 4.

Figura 4 – Evolução da resistência média à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland



Fonte: ABCP, 2012.

- **Cimentos Portland Resistentes a Sulfatos (RS)**

É um aglomerante hidráulico que atende à condição de resistência dos sulfatos, obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem, são permitidas adições a esta mistura de escórias granuladas

de alto-forno ou materiais pozolânicos e/ou materiais carbonáticos (AMBROZEWICZ, 2012).

De acordo com a ABNT NBR 5.737, podem-se considerar resistentes aos sulfatos, os cimentos com as seguintes características:

- a) Os cimentos cujo teor de C_3A do clínquer seja igual ou inferior a 8% e cujo teor de adições carbonáticas seja igual ou inferior a 5% da massa do aglomerante total e/ou;
- b) Os cimentos Portland de alto-forno (CPIII) cujo teor de escória granulada de alto-forno esteja entre 60% e 70% e/ou;
- c) Os cimentos Portland pozolânicos com teores entre 25% e 40% e/ou;
- d) Os cimentos que tenham antecedentes com base em resultados de ensaios de longa duração ou referências de obras que comprovadamente indiquem resistência a sulfatos.

Recomenda-se a sua utilização para meios agressivos sulfatados, como redes de egotos, água do mar e em alguns tipos de solos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992).

- **Cimento Portland Branco (CPB)**

É um aglomerante hidráulico constituído por clínquer Portland Branco, sua maior parte de silicato de cálcio com propriedades hidráulicas e com teores limitados de óxidos corantes que garante a brancura exigida, com uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993).

Existem dois tipos de cimento Portland Branco, descritos na tabela 6, sendo um estrutural, indicado para concreto branco para fins arquitetônicos, e o não estrutural, indicado para rejunte de cerâmicas e em aplicações não estruturais. O cimento Portland Branco estrutural não é muito comum nos dias de hoje, devido ao seu alto custo (ABCP, 2012).

Tabela 6 – Teores dos componentes dos cimentos Portland brancos

Denominação	Classe	Componentes (% em massa)	
		Clínquer Branco + sulfatos de cálcio	Materiais carbonáticos
	25		
Cimento Portland branco estrutural	32	100 - 75	0 - 25
	40		
Cimento Portland não estrutural	-	74 - 50	26 - 50

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993.

- **Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC)**

São cimentos com taxas lentas de evolução de calor, dos tipos, CPI, CPII, CPIII, CPIV e CPV, segundo a ABNT NBR 13.116. Estes liberam até 260 J/g e até 300J/g aos 3 dias e 7 dias de hidratação, respectivamente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

Tem-se como propriedade retardar o desprendimento do calor em concretagens de grandes volumes, evitando-se assim fissuras de origem térmica, devido ao calor durante a hidratação do cimento (AMBROZEWICZ, 2012).

- **Cimento Portland para Poços Petrolíferos (ABNT NBR 9831, 2008)**

Trata-se de um cimento específico utilizado na cimentação de poços petrolíferos. Constitue-se de clínquer e gesso para retardar o tempo de pega e, em sua fabricação, são tomadas precauções especiais para garantir plasticidade em elevadas pressões e temperatura (AMBROZEWICZ, 2012).

2.4 Concreto

O concreto é material construtivo amplamente disseminado. Pode-se encontrá-lo em casas de alvenaria, em rodovias, em pontes, nos edifícios mais altos do mundo, em torres de resfriamento, em usinas hidrelétricas e nucleares, em obras

de saneamento e até em plataformas de extração petrolífera móveis. Estima-se que anualmente são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, o que representa, segundo a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP), aproximadamente, um consumo médio de 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água. No Brasil, o concreto que é produzido nas centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos por ano (PEDROSO, 2009).

O concreto é composto pela mistura de aglomerante (cimento), agregados (areia e brita) e água. A mistura de aglomerante, agregado e água em certa proporção é denominada traço. Vários tipos de traços podem ser criados de acordo com a necessidade de aplicação. Sua principal característica mecânica é a resistência a compressão expressa na unidade de pressão MPa. Essa resistência depende muito da composição do traço, principalmente o tipo de cimento utilizado e a sua relação água/cimento.

Os fatores que influenciam na qualidade do concreto são: a qualidade dos materiais, um proporcionamento adequado nas quantidades de cimento, agregados e água, manipulação adequada com relação ao transporte, lançamento e adensamento e finalmente a cura durante a hidratação inicial, ou seja, evitando a evaporação prematura da água, necessária para a hidratação do cimento.

O concreto pode ser fabricado *in loco* ou em centrais dosadoras de concreto.

2.4.1 Propriedades do Concreto fresco e endurecido

A consistência do concreto fresco é uma propriedade relacionada à fluidez da mistura, ou seja, a maior ou menor facilidade de se deformar. Essa propriedade está diretamente ligada à quantidade de água na mistura. Essa consistência é fundamental para garantir a trabalhabilidade do concreto no lançamento da fôrma, sem segregação.

A consistência é medida no ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test), de acordo com a ABNT NBR NM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998). Consiste em compactar o concreto em uma fôrma

cônica com 305 mm de altura, base de 203 mm e abertura superior de 102 mm, sob uma superfície plana e preenchido em três camadas de concreto. Cada camada recebe 25 golpes com uma haste metálica. Logo após o preenchimento retira-se o molde e mede-se o abatimento sofrido em centímetros. Esta medida é utilizada como valor comparativo da consistência. Quanto maior o abatimento mais fluído é o concreto (NEVILLE, 2013).

Para alterar a consistência do concreto, mantem-se o valor água/materiais secos, variando a relação agregado miúdo/agregado graúdo. O concreto será mais plástico se sua área específica for menor e menos plástico ao aumentarmos a sua área específica.

Consegue-se verificar experimentalmente que quanto maior a relação água/cimento, maior a relação areia/brita para obter-se maior plasticidade. Percebe-se também que para obter uma maior trabalhabilidade a granulometria dos materiais constituintes no concreto deve ser variavelmente contínua.

A separação dos componentes do concreto é chamada de segregação, que ocorre quando o concreto não possui características necessárias para seu adensamento. Trata-se de um concreto não homogêneo, com muitos vazios, reduzindo a sua resistência mecânica (AMBROZEWICZ, 2012).

O preparo e controle do concreto devem ser realizados de acordo com a ABNT NBR 12.655, que controla desde a sua mistura até o lançamento e qualidade no recebimento do concreto fresco para utilização em campo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015a).

As mais importantes propriedades dos concretos são:

- Massa específica (ABNT NBR 6.120): influi nos cálculos do peso próprio das estruturas. Para um concreto usual é de aproximadamente 2,3 t/m³ a 2,5 t/m³ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000).

- Resistência mecânica à compressão do concreto (NBR 5.739/2007): é a principal propriedade dos concretos, é influenciada por diversos fatores como a relação água/cimento, a idade de existência em dias (normalmente 28 dias) e a

forma dos corpos de prova, pois os cilíndricos apresentam resistência de aproximadamente 80% dos corpos de prova cúbicos (Ambrozewicz, 2012).

- Durabilidade: quanto menor o número de vazios no concreto, maior a durabilidade, pois diminui a permeabilidade, dificultando a penetração de substâncias agressivas (Ambrozewicz, 2012).

- Permeabilidade e absorção: De acordo com Ambrozewicz, 20% do peso do cimento em água reagem quimicamente com o cimento, o excesso evapora e deixa vazios no concreto, por onde a água pode percolar. Portanto há uma incorporação de ar durante a mistura. Para concretos que sofrem ataques de águas agressivas ou ação destruidora dos agentes atmosféricos, a impermeabilidade é muito importante.

- O fator água/cimento: é uma das etapas mais importantes no processo de dosagem do concreto. Segundo a Lei de ABRAMS: “Dentro do campo dos concretos plásticos, a resistência aos esforços mecânicos, bem como as demais propriedades mecânicas do concreto endurecido, varia na razão inversa da relação água/cimento”. Existem diversas curvas de Abrams para vários tipos de cimento, correlacionando o fator água/cimento com a resistência a compressão. Para a determinação dessas curvas, é necessário correlacionar a resistência à compressão axial no rompimento dos corpos de prova aos 28 dias com a relação água/cimento. Quanto menor a relação água/cimento, maior a resistência do concreto (Ambrozewicz, 2012).

- Cura do concreto: tem como finalidade impedir a evaporação da água utilizada no traço durante o início de hidratação do concreto, evitando fissuras, por exemplo.

- Retração: é a diminuição do volume do fim de sua cura até seu equilíbrio. É uma deformação independente de carregamento.

- Fluência do concreto: aumento de deformação, com o tempo, sob a ação de uma carga constante. É afetada pelos materiais, dosagem e condições de cura. A fluência é inversamente proporcional à resistência do concreto e diretamente proporcional às tensões aplicadas.

Quadro 2 – Características do concreto e influência no produto final

Tipo de Característica	Característica	Propriedades nas quais influi
Físicas	Condutibilidade Térmica	Resistência mecânica
	Dilatação térmica	Resistência mecânica
	Compacidade	Resistência mecânica
	Porosidade	Resistência mecânica
	Permeabilidade	Durabilidade
	Capilaridade	Durabilidade e exsudação
	Aderência dos grãos	Resistência mecânica e durabilidade
	Consistência	Trabalhabilidade
	Densidade	Resistência mecânica
	Granulometria	Resistência mecânica e trabalhabilidade
	Homogeneidade	Resistência mecânica, durabilidade e trabalhabilidade.
	Exsudação	Resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade.
	Segregação	Resistência mecânica, homogeneidade e durabilidade.
Químicas	Expansibilidade	Resistência mecânica
	Pega	Resistência mecânica e aplicabilidade
	Resistência química	Aplicabilidade
	Reação álcali-agregado	Resistência e durabilidade
Mecânicas	Resistência à compressão	Aplicabilidade
	Resistência à tração	Aplicabilidade
	Elasticidade	Deformação
	Fluência	Deformação
	Deformação lenta	Deformação
	Durabilidade	Aplicabilidade
	Resistência ao desgaste	Aplicabilidade
	Retração	Resistência Mecânica
	Refratariedade	Resistência ao fogo
	Trabalhabilidade	Aplicabilidade
	Dureza	Resistência mecânica
	Resistência ao fogo	Aplicabilidade

Fonte: AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção**. São Paulo: Pini, 2012.

2.4.2 Dosagem do concreto

A dosagem do concreto pode ser feita de forma empírica ou não experimental, baseado na experiência do engenheiro e de forma racional ou experimental, fazendo um proporcionamento dos materiais constituintes, com relação ao produto resultante.

Existem diversos métodos de dosagem de concreto como, por exemplo, Método ACI – American Concrete Institute, Método ABCP, bem como o método manual do construtor, sendo os dois últimos mais empregados.

O método ABCP consiste, com base nas características da dosagem do concreto, bem como dos materiais constituintes, fixar a relação água/cimento, determinar o consumo de água com base na dimensão máxima característica do agregado graúdo e da consistência desejada, determinar o consumo de cimento e o consumo dos agregados em volume, obtendo assim o traço desejado.

O método Manual toma como base as características dos materiais e do concreto desejado, o fator de resistência característica do concreto e o tipo de cimento. Obtém-se a relação água/cimento na curva do cimento, calcula-se o fator água/ mistura seca, o teor de agregado e a quantidade de argamassa, bem como o consumo de cimento por metro cúbico de concreto, resultando assim um traço em função de um saco de cimento de 50 kg, por exemplo.

2.5 Material Pozolânico

Material pozolânico é todo material natural ou artificial, silicoso ou sílico aluminoso, que sozinho não possui nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente moído, possui a capacidade de se combinar com o hidróxido de cálcio (cal) à temperatura ambiente em presença de água. Assim, torna-se um material ligante com propriedades cimentícias, o qual, depois de endurecido, se torna insolúvel em água. Em suma, o material pozolânico tem a capacidade de reagir com o Ca(OH)_2 em condições normais de pressão e temperatura e de formar novos compostos com propriedades aglomerantes.

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 12.653, os materiais pozolânicos são classificados em:

Pozolanas naturais: de origem vulcânica ou de origem sedimentar com atividade pozolânica.

Pozolanas artificiais: provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica.

Entre as pozolanas artificiais estão as argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais, como escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais e rejeito de carvão mineral.

Além da classificação quanto a origem, os materiais são divididos em três classes: N, C e E. A classe N são as pozolanas naturais e artificiais, como alguns materiais vulcânicos (ácidos), silicosos, argilas calcinadas e terras diatomáceas. A classe C, cinzas vulcânicas proveniente da queima de carvão mineral de termelétricas e a classe E, refere-se às pozolanas com requisitos diferentes das classes anteriores (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

De acordo com a ABNT NBR 12.653, a pozolana artificial classe N deve possuir as seguintes características:

Tabela 7 - Requisitos Químicos.

Propriedades	Classe N(%)
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70
SO_3	≤ 4
Teor de umidade	≤ 3

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014.

Ainda, segundo a ABNT NBR 12.653, as argilas calcinadas são materiais provenientes da calcinação, em geral, submetidas a temperaturas entre 500°C e 900°C, de modo a garantir a sua reatividade com o hidróxido de cálcio. A máxima atividade pozolânica da montmorilonita e da caulinita é obtida pela calcinação a temperaturas entre 550°C e 950°C. No caso das ilitas e dos argilominerais de camadas mistas e vermiculitas entre 900°C e 950°C (ZAMPIERI, 1993).

Segundo Zampieri (1993), as argilas com maiores teores de Al_2O_3 resultam em metacaulim com maior atividade pozolânica, pois indicam maiores teores de caulinita, que é o argilomineral potencialmente ativado pelo tratamento térmico. Quanto maior a quantidade de SiO_2 , maior a presença de materiais com pouca atividade pozolânica, como o quartzo, por exemplo.

De acordo com Santos (2006), o uso de pozolana ao cimento confere ao concreto e argamassas características como:

- menor calor de hidratação, pela troca de reações exotérmicas (hidratação do cimento), por reações atérmicas (pozolânicas);

- melhor resistência ao ataque ácido em função da estabilização do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do clínquer Portland e à formação de um C-S-H com menor relação CaO/SiO_2 de menor basicidade;

- maior durabilidade, contribuindo para a inibição da reação álcali-agregado e diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada, reduzindo o ataque do material por substâncias externas como cloretos e sulfatos.

Segundo Malhotra (1996), algumas vantagens da utilização de pozolanas em concretos com cimento Portland se destacam, como o aumento da trabalhabilidade do material, aumento da resistência à fissuração devido à redução da reação álcali-agregado, e maior impermeabilidade. Ao se tornar menos permeável, a sua durabilidade tende a aumentar.

2.5.1 Reação Pozolânica

De acordo com a ABNT NBR 12.653, um material é classificado como pozolânico, quando a quantidade de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ é no mínimo 70%, para as classes N e C, e de pelo menos 50% para os materiais da Classe E (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

A reação pozolânica ocorre devido à reação entre a cal (básica) e os óxidos (ácidos) da pozolana, que são os maiores responsáveis pela melhora das características técnicas no concreto. A principal reação pozolânica envolve a formação de silicato de cálcio hidratado (CSH), similar ao produzido pela hidratação dos silicatos de cálcios do cimento Portland, como o C3S (MEHTA, 1987).

As reações são descritas



Onde: C = CaO, S = SiO_2 , H = H_2O

Para que a reação pozolânica ocorra é necessário o hidróxido de cálcio, CH, que é gerado em conjunto com o silicato de cálcio hidratado, CSH, através das

reações de hidratação do silicato tricálcico (C_3S), e silicato dicálcico (C_2S), presentes no cimento Portland. Segundo Neville (2013), o CSH não tem composição fixa e é responsável pela resistência do cimento, enquanto o CH influencia na durabilidade da pasta, principalmente sujeita a meios ácidos.

2.5.2 Atividade Pozolânica

Segundo Zampieri (1993 apud AMBROISE; MURAT; PERA, 1986), não existe somente uma temperatura ótima de ativação dos argilominerais, mas também uma relação pozolana/cal mais adequada para o desenvolvimento das resistências mecânicas. Também constatarem experimentalmente que a relação água/sólido adotada nas pastas pozolana/cal é similar ao verificado com o cimento portland, de fundamental importância para a definição da resistência mecânica do produto. Na medida em que se adiciona água à mistura tem-se um decréscimo nos valores de resistência mecânica, uma vez que a água em excesso contribui exclusivamente para o incremento da porosidade final.

De acordo com esses autores, a reatividade dos materiais argilosos ativados termicamente decresce na seguinte ordem: caulinitas > esmectitas (montmorilonitas) > micas mal cristalizadas (ilítas) > micas bem cristalizadas. Para argilas in natura ou isentas de ativação, a reatividade diminui da seguinte forma: esmectitas (montmorilonitas) > ilítas > caulinitas.

2.5.3 Efeitos da Pozolana no Concreto

Quando da inclusão de materiais com granulometria fina em concretos, estes melhoram a trabalhabilidade, pois reduzem o tamanho e o volume de vazios. A pozolana, por apresentar partículas finas, ou seja, elevada área específica, tende a aumentar o consumo de água para uma dada consistência (METHA; MONTEIRO, 2008).

Além da redução da permeabilidade, o concreto com adição de pozolana aumenta a resistência das argamassas com relação à água com sulfatos. Portanto,

pode-se dizer que, em obras que possuem contato com o mar ou em vizinhanças próximas, é recomendado o uso de cimentos com adições pozolânicas.

A resistência mecânica à compressão axial foi estudada consistentemente por Malhotra (1996), avaliando o desenvolvimento das propriedades de concretos com adições pozolânicas na substituição do cimento por material pozolânico nas porcentagens de 10, 20 e 30%, aos 28 dias a 365 dias. No vigésimo oitavo dia, as amostras contendo o material pozolânico apresentaram um acréscimo substancial de resistência. Entretanto, após um ano, os resultados das amostras de 20 e 30% estiveram bem mais próximos do modelo de referência, e a amostra com 10% de material pozolânico teve um comportamento melhor que o modelo de referência.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Agregar valor ao resíduo cerâmico vermelho, proveniente de quebras e rejeitos de indústrias cerâmicas e olarias, em traços de concreto a serem utilizados em obras civis.

3.2 Objetivos Específicos

Estudar as características físicas, químicas e mecânicas do resíduo cerâmico vermelho.

Estudar o comportamento desse resíduo na substituição parcial ao cimento;

Avaliar a melhor proporção na substituição parcial do cimento pelo material cerâmico vermelho (material pozolânico), para o desenvolvimento de um traço de concreto atingindo a resistência à compressão mínima de 40 MPa apresentada no traço de referência.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Cimento

Utilizou-se o cimento de Alta Resistência Inicial, Ultra rápido - CPV ARI Fácil, da marca Holcim, disponível no mercado em sacos de 40kg. O saco de cimento foi acondicionado no laboratório de materiais de construção civil da Universidade de Sorocaba, em saco lacrado, mantendo as suas propriedades até a sua utilização.

Figura 5 – Embalagem com 40kg do cimento utilizado.



Fonte: Elaboração Própria.

Justifica-se a utilização deste tipo de cimento, por ser um cimento com 100% de clínquer, isento de adições. No anexo A encontram-se as características físicas e químicas fornecidas pelo fabricante do cimento.

4.1.2 Agregado Miúdo

Utilizou-se agregado miúdo disponível no mercado local. A massa específica do agregado miúdo é de $2,70 \text{ g/cm}^3$ (ensaio no frasco de Chapman).

4.1.3 Agregado Graúdo

Utilizou-se agregado graúdo tipo basalto, brita 0 e brita 1 no diâmetro máximo de 12,5 mm, disponível na região. As massas específicas são 2,73 e 2,77 g/ cm³, respectivamente.

4.1.4 Água

Utilizou-se da água fornecida pelo sistema de abastecimento de água e esgoto (SAAE) da cidade de Sorocaba para a confecção dos corpos de prova. Os parâmetros físicos-químicos estão mencionados na tabela 8.

Tabela 8 - Caracterização Físico-Química da água da rede pública de abastecimento.

PARÂMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	VALOR MÁXIMO PERMITIDO
pH	UpH	7,85	6,0 - 9,5
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	84,0	500,0
Ferro Total	mg Fe/L	0,02	0,30
Cloro livre	mg/L	0,6	5,0 (0,2 min.)
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	199,5	1.000
Temperatura da água	°C	27,1	-
Fluoreto	mg F/L	1,3	1,5
Cloreto	mg Cl /L	9,6	250,0
Alcalinidade de Hidróxidos	mg CaCO ₃ /L	0,0	0,0
Alcalinidade de Carbonatos	mg CaCO ₃ /L	0,0	125,0
Alcalinidade de Bicarbonatos	mg CaCO ₃ /L	102,0	250,0

Fonte: Adaptado de MENNA JUNIOR (2016).

4.1.5 Resíduo Cerâmico Vermelho

Adquiriu-se o denominado resíduo cerâmico vermelho - um lote de 100 tijolos cerâmicos furados - de uma olaria artesanal na cidade de Tatuí, interior de São Paulo, a fim de garantir a homogeneidade do resíduo para este estudo inicial. De acordo com a ABNT NBR 12.653, este resíduo é uma argila calcinada, classificada como pozolana artificial, classe N (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

4.2 Métodos

O resíduo cerâmico sofreu moagem de bolas a fim de atingir a mesma granulometria (finura) do cimento substituído, onde foi utilizado o material passante na peneira ABNT 0,075 mm ou Mesh #200.

A título comparativo realizou-se os ensaios BET (determinação da superfície específica m^2/g no cimento e no material pozzolânico, além da difração de raios x e fluorescência.

Para os agregados utilizados no concreto, realizamos a classificação destes identificando sua mineralogia, granulometria e massa específica, de forma a viabilizar a reprodução dos ensaios em futuros experimentos.

4.2.1 Moagem do Resíduo Cerâmico Vermelho

Primeiramente, realizou-se uma pré-moagem manual dos tijolos cerâmicos antes da moagem no moinho de bolas. Em seguida fez-se um peneiramento inicial com peneira de pedreiro para remover os pedaços maiores.

Figura 6 – Pré-moagem manual dos tijolos.



Fonte: Elaboração Própria.

Um moinho de bolas de laboratório foi projetado e construído para a moagem deste resíduo cerâmico. O moinho é dotado de um motor elétrico trifásico 0,33 Cv 4 Polos (1680 Rpm), inversor de frequência e um pote cerâmico de alumina.

Figura 7 - Moinho de Bolas - UNISO



Fonte: Elaboração Própria.

A velocidade crítica de rotação foi calculada em 378 rpm, de acordo com a equação (1), sendo o diâmetro interno do pote cerâmico de 0,0125 metros.

Equação: Velocidade Crítica de Rotação

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

onde:

V_c = velocidade crítica de rotação

D = diâmetro interno do pote cerâmico em metros.

Como a velocidade ideal dá-se a 75% da velocidade crítica, utilizou-se 283 rpm.

A moagem foi realizada por via seca, pois caso realizada por via úmida, sendo o material um aglomeramento, este é aglutinando e interrompe a continuidade da moagem.

Para moagem de 360 gramas de resíduo utilizou-se 1,60kg de esferas de alumina nos diâmetros de 16,91 mm e 18,48mm, sendo 800 gramas de cada diâmetro.

Ao término da moagem, peneirou-se o material na peneira ABNT 0,075 mm ou Mesh #200. Utilizou-se apenas o material passante por esta peneira para a confecção dos corpos de prova.

4.2.2 Dosagem dos concretos

Para o estudo da aplicabilidade do material pozolânico em traços de concreto, definiu-se um traço base a partir do método de dosagem empírica.

A confecção do traço de concreto empregou os seguintes materiais: Cimento CPV – Ari Fácil, areia média, Brita 0, Brita 1 e água, onde: ARI significa Alta Resistência Inicial;

Traço base → cimento: areia: brita 0: brita 1 : a/c, onde a/c é a relação água/cimento.

1: 1,52 : 0,75 : 1,12 : 0,46

A partir do traço base, definiram-se porcentagens de substituição do cimento pelo material pozolânico conforme a tabela 9.

Tabela 9 – Composição dos traços das dosagens realizadas.

Nº.	TRAÇOS	Cimento (kg)	Pozolana (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Água (litros)
1	BASE	6,50	-	9,90	4,85	7,25	3,0
2	10% POZOLANA	5,85	0,65	9,90	4,85	7,25	3,0
3	20% POZOLANA	5,20	1,30	9,90	4,85	7,25	3,0
4	30% POZOLANA	4,55	1,95	9,90	4,85	7,25	3,0
5	40% POZOLANA	3,90	2,60	9,90	4,85	7,25	3,0

Fonte: Elaboração Própria.

Produziram-se os traços no laboratório de materiais de construção da Universidade de Sorocaba. A confecção de cada traço foi conduzida com o auxílio de uma betoneira, marca CSN, com a capacidade para 320 litros (útil).

No caso das substituições parciais por material pozolânico, realizou-se uma mistura inicial, cimento e pozolana, antes da adição em betoneira.

Figura 8 – Material Pozolânico sobre o cimento.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 9 – Mistura do material pozolânico com cimento.



Fonte: Elaboração Própria.

A cada traço utilizou-se de parte do concreto fresco para a realização do slump test (teste de abatimento do tronco de cone).

Cada traço resultou em seis corpos-de-prova cilíndricos 10 x 20 cm. O processo de adensamento do concreto fresco nos moldes foi realizado manualmente, em duas camadas com quinze golpes por camadas, conforme ABNT NBR 5.738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Após 24 horas, os corpos de provas foram desmoldados e imersos em água saturada com cal, evitando assim a interação da água constituinte do traço com a água de imersão durante o tempo de cura, até atingirem as idades desejadas, 7, 28 e 91 dias, para a realização do teste de resistência à compressão. As Figuras 10 a 14 mostram os corpos de prova preparados, enquanto que a Figura 15 revela a diferença de tonalidades de cores com a progressiva adição do material pozolânico.

Figura 10 – Traço Base.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 11 – Traço com 10% de pozolana.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 12 – Traço com 20% de pozolana.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 13 – Traço com 30% de pozolana.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 14 – Traço com 40% de pozolana.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 15 – Corpos de prova, variação da cor do traço 1 ao 5.



Fonte: Elaboração Própria.

Nota-se uma diferença na coloração nos corpos de prova da figura 15 de acordo com a substituição do cimento pelo material pozolânico. O corpo de prova cinza não possui material pozolânico, a partir dele as substituições foram de 10, 20, 30 e 40% por material pozolânico observando-se uma coloração cada vez forte com tom marrom.

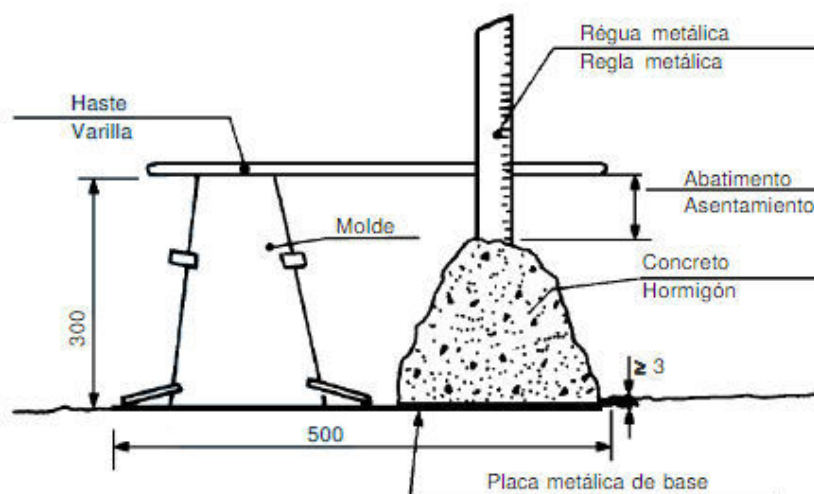
4.2.3 Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone

O ensaio de abatimento do tronco de cone (slump test) é utilizado para verificar a consistência do concreto no estado fresco. A consistência está relacionada ao seu estado de fluidez, ou seja, a maior ou menor facilidade de se deformar, de acordo com a quantidade de água na mistura. O ensaio consiste na compactação do concreto fresco em uma fôrma e, após a retirada da fôrma, este sofre um abatimento, onde a medida em centímetros fornece o valor comparativo da consistência. A norma ABNT NBR NM67 determina a execução deste ensaio, conforme se segue:

Após a preparação de cada traço de concreto desenvolvido neste trabalho, uma amostra é retirada para o preenchimento em 3 camadas de um molde de tronco de cone em metal, vazado em ambos os lados, sobre uma placa metálica. Preenche-se o molde em três camadas, cada uma com um terço da altura total do molde, sendo que cada camada deverá receber 25 golpes distribuídos de forma uniforme, com o auxílio de uma haste de compactação. Após o preenchimento total, alisa-se a superfície do molde com uma desempenadeira e retira-se a fôrma.

Imediatamente após a retirada da fôrma, esta é colocada ao lado do concreto desenformado e com o posicionamento da haste de maneira horizontal sobre o molde, quando é medida, com uma régua graduada, o abatimento do topo do concreto desenformado até a haste de compactação.

Figura 16 - ABNT NBR NM 67 – Slump Test - Ensaio



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998.

A noção da consistência é subjetiva. Segundo Ambrozewicz (2012), as consistências do concreto podem ser classificadas como:

Quadro 3 - Classificação das consistências do concreto

Consistência	Abatimento (cm)	Aplicação
Seca	0 a 2	Pré-fabricados, concreto massa, concreto protendido, vibração manual, adensamento manual, concreto autoadensável.
Firme	2 a 5	
Média	5 a 12	
Mole	12 a 18	
Fluída	18 a 25	

Fonte: AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção**. São Paulo: Pini, 2012.

Figura 17 – Slump Test



Fonte: Elaboração própria.

4.2.4 Resistência a Compressão

A resistência à compressão do concreto é uma das propriedades mais importantes do concreto. Esta propriedade permite avaliar a qualidade do concreto, pois está ligada a estrutura interna da pasta de cimento.

A escolha no número de corpos de prova para cada traço de concreto é feita com base na NBR ABNT 12.655, que estipula dois corpos de prova da mesma mistura para cada idade de rompimento, (7, 28 e 91 dias), moldados no mesmo ato onde se toma como resultado o exemplar de maior resistência à compressão dentro dos dois valores obtidos para cada idade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

Assim sendo, para cada idade (7, 28 e 91 dias), romperam-se dois corpos de prova, sendo o de maior valor, o resultado atingido.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no laboratório da empresa Qualitec Controle Tecnológico, na cidade de Votorantim – SP, em uma máquina da marca Forney, com capacidade máxima de carga de 100 tf. O certificado de calibração do equipamento encontra-se no anexo B.

Figura 18 – Máquina para ensaio de resistência à compressão – Qualitec.



Fonte: Elaboração Própria.

4.2.5 Análise granulométrica do Cimento e Pozolana

O tamanho de partícula de um material pode ser definido por difração a laser.

A difração a laser mede as distribuições de tamanho das partículas por medições angulares da intensidade da luz difundida à medida que um feixe do laser interage com as partículas da amostra dispersas. Trata-se de um método volumétrico aonde os cálculos para a determinação do tamanho de partículas são baseados em modelos matemáticos de Mie e de Fraunhofer.

Os ensaios para determinação da curva granulométrica do cimento e da pozolana foram realizados no Laboratório de Recursos Analíticos e Calibração (LRAC), da Faculdade de Engenharia Química (UNICAMP). Para a realização do ensaio utilizou-se o analisador de tamanho de partículas por Difração a Laser mastersizer, modelo MAZ3000 da marca Malvern.

As análises foram realizadas em modo seco utilizando o ar como meio dispersante, realizadas de dez leituras para cada amostra, sendo uma de cimento e outra de material pozolânico.

4.2.6 Área Superficial Específica

A área superficial específica de um material pode ser determinada através do método de Blaine ou do Método de BET.

Como o método de Blaine não apresenta bons resultados para área superficiais menores do que a apresentada por cimentos optou-se pelo método de BET para a análise do material pozolânico. A área superficial específica do cimento foi realizada pelo fabricante pelo método de Blaine.

O método de BET (Brunauer, Emmett e Teller) é uma técnica de adsorção gasosa, que se baseia na quantidade de um gás que é fisicamente adsorvido sobre a superfície de uma amostra, formando uma monocamada, sendo esta uma função direta da sua área superficial.

A análise da área superficial (BET) do material pozolânico por adsorção física de nitrogênio foi realizado no Laboratório de Recursos Analíticos e Calibração

(LRAC), da Faculdade de Engenharia Química (UNICAMP). Para a realização do ensaio utilizou-se o equipamento ASAP modelo 2000 marca Micromeritics.

O equipamento para a análise de área superficial utiliza gás nitrogênio, por ser inerte em relação à grande maioria dos sólidos e pela facilidade de obtenção do gás em estado puro. As medidas são realizadas em temperatura de nitrogênio líquido a fim de se obter valores detectáveis de adsorção.

A amostra foi pré-tratada em estufa a 100°C por 24 horas, e em sequencia levada ao equipamento e submetida a vácuo por 8 horas à 300°C. Após o resfriamento até a temperatura ambiente de aproximadamente 22 °C foi analisada.

A área superficial específica do cimento foi fornecida pelo fabricante e apresentada no anexo A.

4.2.7 Análise Granulométrica de Agregados Miúdos e Graúdos

A composição granulométrica tem grande influência nas propriedades do concreto. Para a obtenção de um concreto com boa resistência exige-se um adensamento máximo que só é possível com uma mistura trabalhável. Portanto, o concreto deve ter uma curva granulométrica variavelmente contínua para ser obter maior trabalhabilidade, compacidade e melhor resistência.

Foi realizado o ensaio para determinação da curva granulométrica de agregados miúdos e graúdos, bem como seu módulo de finura, segundo a norma ABNT NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

O ensaio foi realizado no laboratório de materiais de construção civil da Universidade de Sorocaba. O equipamento utilizado para a análise granulométrica foi um vibrador de peneiras eletromecânico da marca Solocap.

Para a realização da análise granulométrica em laboratório, utilizou-se o procedimento de quarteamento, método B, prescrito na norma ABNT NBR NM 27, para a coleta e homogeneização da amostra e a norma ABNT NBR NM 26 para a redução do tamanho da amostra em ensaio a ser realizado em laboratório (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001, 2009).

Agregados miúdos são os grãos que passam pela peneira ABNT com abertura de malha 4,75mm, de acordo com a ABNT NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). O procedimento para a análise granulométrica de agregado miúdo empregado no trabalho é descrito:

Duas amostras de 1kg de areia cada, foram secas em estufa (100°C a 110°C), e após atingirem a temperatura ambiente, determinou-se suas massas. As amostras foram colocadas na série normal de peneiras: 9,5 mm, 6,3mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm, respectivamente, promovendo a vibração mecânica por 15 minutos. A massa retida em cada peneira foi determinada, assim como o fundo do conjunto. A partir dos valores pesados, calculam-se as porcentagens, retida e acumulada, em cada peneira. A partir desses dados determinou-se a dimensão máxima característica do agregado em mm e seu módulo de finura.

Agregados graúdos são grãos que passam pela peneira de malha 75 mm e ficam retidos na peneira de malha 4,75 mm, através do ensaio prescrito na norma ABNT NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Os ensaios foram realizados para as britas 0 e 1 aplicadas na composição dos traços de concreto. Duas amostras de 5 kg de brita 0, foram secas em estufa (100°C a 110°C), e após atingirem a temperatura ambiente, determinou-se suas massas. As amostras foram colocadas na série de peneiras: 75 mm, 63 mm, 50 mm, 37,5 mm, 31,5 mm, 25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm, 4,75 mm, 2,36mm e submetidas à vibração mecânica por 15 minutos. As massas retidas foram determinadas em cada peneira, assim como no fundo do conjunto e calculadas as porcentagens, retida e acumulada. A partir desses dados determinou-se a dimensão máxima característica do agregado em mm e seu módulo de finura.

4.2.8 Atividade pozolânica

Determinou-se a atividade pozolânica do material cerâmico através do Método de Chapelle modificado – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado, de acordo com a NBR 15.895 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS, 2010a). O ensaio foi realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), no laboratório de Materiais e Construção.

O método consiste em colocar 2 gramas de CaO, 1 grama do material pozolânico e 250 ml de água isenta de CO₂ em um frasco e agitá-lo em banho maria por 16 horas. Calcula-se então a quantidade de CaO fixada pelo material pozolânico. O resultado é expresso em mg de Ca(OH)₂ fixado por g de material pozolânico, correspondendo ao valor da atividade pozolânica. A norma 15894-1 estabelece um padrão de atividade pozolânica de referencia para o metacaulim de um índice mínimo de 750 mg Ca(OH)₂/g.

A título de esclarecimento, o metacaulim é uma adição mineral proveniente da calcinação de argilas caulíníticas e caulins em temperaturas entre 600 e 900°C. Nesta faixa de temperatura, a argila perde os íons hidroxila de sua estrutura cristalina, causando a destruição do arranjo atômico, criando um componente amorfo e de grande instabilidade química, chamado de metacaulinita (Al₂Si₂O₇), responsável pela atividade pozolânica, formando predominantemente C-S-H e C₄AH_x (MOLIN, 2005).

O método de Chapelle foi baseado nas diretrizes gerais da publicação “Appréciation de l’activité pouzzolanique des constituants secondaires” (RAVERDY et al., 1980), que considera um material pozolânico, quando este apresentar um índice de consumo mínimo de 330 mg de CaO/g de amostra (436 mg de Ca(OH)₂/g de amostra).

4.2.9 Difração de Raios X

Realizou-se a difração de raios x nos materiais: cimento, pozolana e areia, no IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares). O equipamento utilizado é um difratômetro Bruker D8 Advance, equipado com tubo de Cu operando em 40KV e 30mA, monocromador de grafite e detector de cintilação. O raio do goniômetro é de 250mm.

Por meio de difração de raios x identifica-se as fases cristalinas dos componentes presentes em cada material analisado. A técnica consiste em

submeter uma amostra à radiação de um feixe monocromático de raios X e analisar o comportamento das ondas difratadas nos planos das estruturas cristalinas da amostra. Por meio da lei de Bragg, representado por $\lambda = 2d \sin(\theta)$, é possível avaliar os raios difratados pela amostra em ângulos que dependem basicamente da estrutura cristalina da mesma, que é um hábito repetitivo dos materiais. Assim tem-se:

λ = comprimento de onda do feixe monocromático incidente;

d = distância entre dois planos de átomos quaisquer de um cristal;

θ = ângulo de difração ou de incidência do feixe monocromático.

Na interpretação dos dados são comparados os valores das distâncias entre dois planos de átomos de um elemento, com os dados de referência do catálogo mundial de padrões de difração (ICDD-JCPDS), para identificação de seu composto químico.

4.2.10 Fluorescência de Raios X

A fluorescência de raios x por dispersão de energia é uma técnica multi-elementar não destrutiva utilizada para identificar elementos presentes em uma amostra e/ou a concentração de cada elemento (análise qualitativa e quantitativa).

O ensaio emprega uma fonte de radiação de elevada energia (radiação gama ou radiação X) incidente sobre a amostra provocando a excitação dos átomos presentes. Este átomo, em seu estado fundamental, absorve a energia, promovendo elétrons a níveis mais energéticos. Como na natureza tudo tende ao estado de estabilidade, o átomo excitado tende a retornar ao seu estado fundamental, ocorrendo uma emissão de energia. A energia envolvida na absorção é uma característica específica de cada elemento químico, assim é possível a sua identificação e quantificação (BECKHOFF, 2006).

Os ensaios quantitativos e qualitativos nas amostras do cimento e do material pozolânico foram realizados no laboratório LAREX da EPQI da USP: Varian / Cary Eclipse.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características Físicas

- Análise granulométrica do cimento Portland e do resíduo cerâmico**

Os ensaios demonstraram que o diâmetro médio das partículas de cimento com base em volume é de $11,2\mu\text{m}$ e revelaram uma curva com distribuição mono-modal, conforme relatório do laboratório LRAC (Anexo C).

De acordo com os ensaios realizados nas amostras de resíduo cerâmico (tijolo moído), o diâmetro médio com base volumétrica é de $7,89\mu\text{m}$ com curva com distribuição bi-modal (Anexo C).

Tabela 10 - Resultados obtidos nas análises por difração a Laser nas amostras.

AMOSTRAS	Dv (10) ± Desvio (μm)	Dv (4,3) ± Desvio (μm)	Dv (50) ± Desvio (μm)	Dv (90) ± Desvio (μm)
Cimento	$1,88 \pm 0,030$	$14,3 \pm 0,092$	$11,2 \pm 0,097$	$31,7 \pm 0,165$
Tijolo cerâmico Moído	$0,742 \pm 0,007$	$18,4 \pm 0,149$	$7,89 \pm 0,112$	$52,2 \pm 0,316$

Fonte: LRAC.

A distribuição granulométrica do resíduo cerâmico pode ser melhorada caso se utilize uma peneira de $45\mu\text{m}$, reduzindo assim o volume de finos e atingindo uma curva de distribuição mono-modal. Com a diminuição do volume de finos, a área superficial específica de molhagem dos grãos é reduzida, consequentemente melhoramos a trabalhabilidade do concreto.

- Área de Superfície específica cimento e resíduo cerâmico**

De acordo com o relatório do fabricante do cimento (anexo A), o valor médio da área de superfície específica do cimento é de $0,4791\text{ m}^2/\text{g}$.

A área de superfície específica do resíduo cerâmico (anexo E) é de $15,8255\text{ m}^2/\text{g}$.

Portanto, observa-se que o diâmetro médio do resíduo cerâmico é menor que o do cimento.

- **Análise granulométrica do Agregado Miúdo - Areia**

De acordo com a análise granulométrica realizada nas amostras do agregado miúdo, com base na tabela 11 obteve-se a curva granulométrica do gráfico 1.

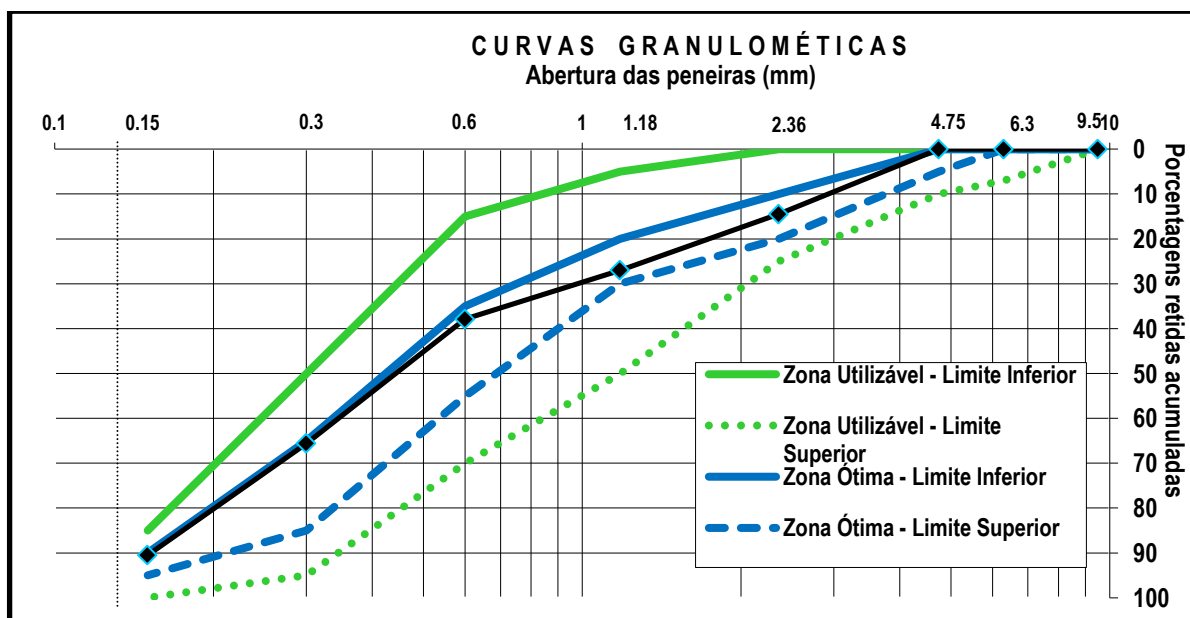
O agregado miúdo utilizado foi classificado como areia grossa, módulo de finura 2,36 e dimensão máxima característica de 2,4 mm. Sua curva encontra-se dentro da faixa denominada zona ótima de utilização.

Tabela 11 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – Areia

Peneiras (mm)	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	<0,15
(%) retida acumulada	0	14,5	27,0	37,9	65,6	90,5	100

Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 1 – Curva Granulométrica do Agregado Miúdo – Areia



Fonte: Elaboração própria.

• Análise Granulométrica – Agregados Graúdos

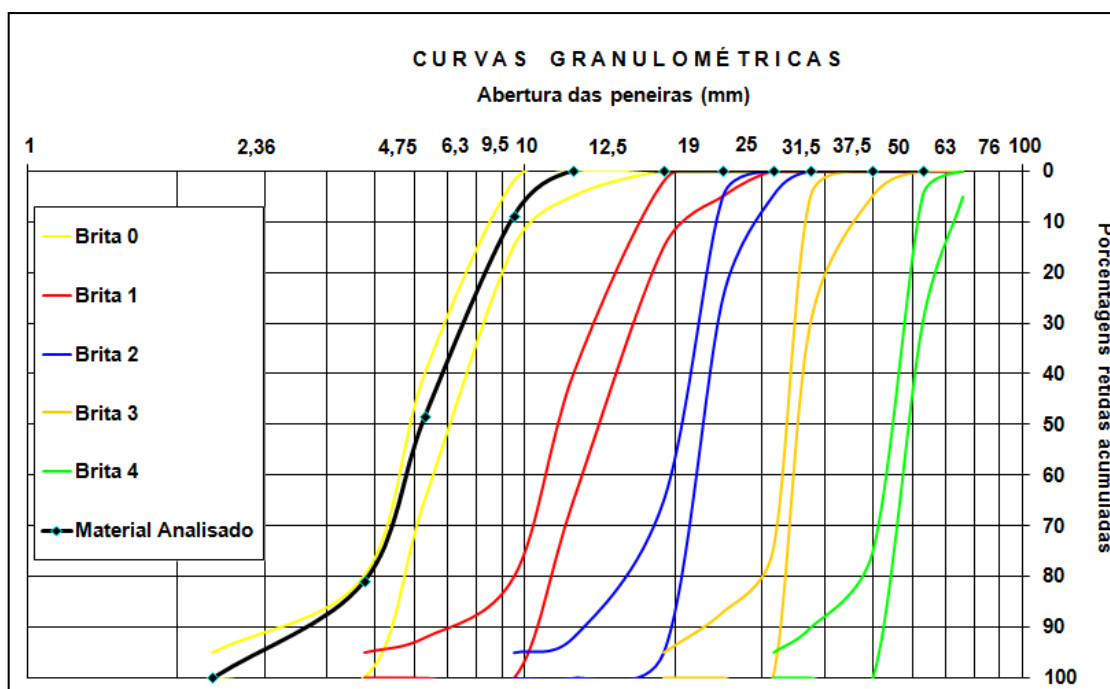
As análises granulométricas realizada nas amostras dos agregados graúdos apresentam-se nas tabelas 12 e 13, resultando nas curvas granulométricas dos gráficos 2 e 3, respectivamente.

Tabela 12 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – Brita 0

Peneiras (mm)	12,5	9,5	6,3	4,75	2,36
(%) retida acumulada	0	8,9	48,4	81	100

Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 2 – Curva Granulométrica do Agregado Graúdo – Brita 0



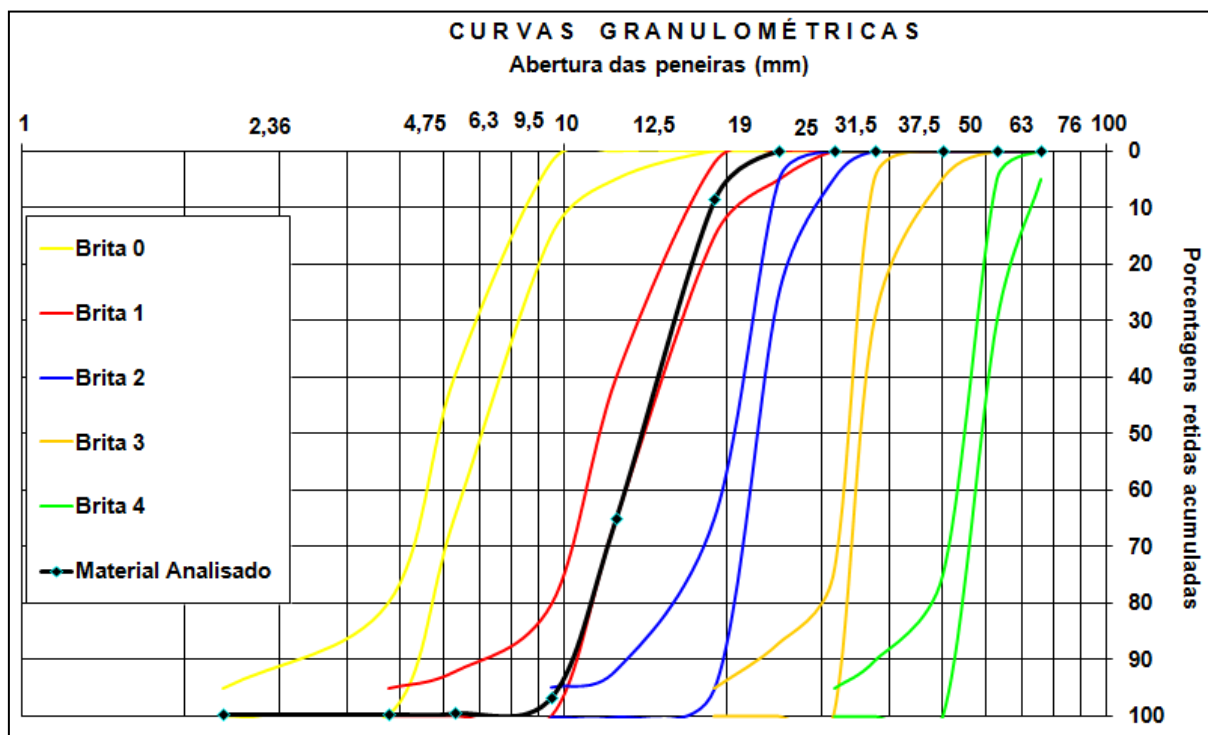
Fonte: Elaboração própria.

Tabela 13 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras – Brita 1

Peneiras (mm)	25	19	12,5	9,5	6,3	4,75	2,36	<2,36
(%) retida acumulada	0	8,6	64,9	96,5	99,4	99,6	99,6	100

Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 3 – Curva Granulométrica do Agregado Graúdo – Brita 1



Fonte: Elaboração própria.

Os agregados graúdos foram classificados em Brita 0 e Brita 1, respectivamente, resultando em módulo de finura, 5,90 e 7,03, e dimensão máxima característica de 12,5 mm para ambos os agregados.

• Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test)

Para cada traço de concreto foi realizado a medição do slump test, conforme tabela 14.

Tabela 14 – Slump Test.

TRAÇOS	Abatimento (cm)	Consistência
1 - Base 0% Pozolana	2,0	Firme
2 – 10% Pozolana	2,0	Firme
3 – 20% Pozolana	2,0	Firme
4 – 30% Pozolana	1,5	Seca
5 – 40% Pozolana	1,0	Seca

Fonte: Elaboração própria.

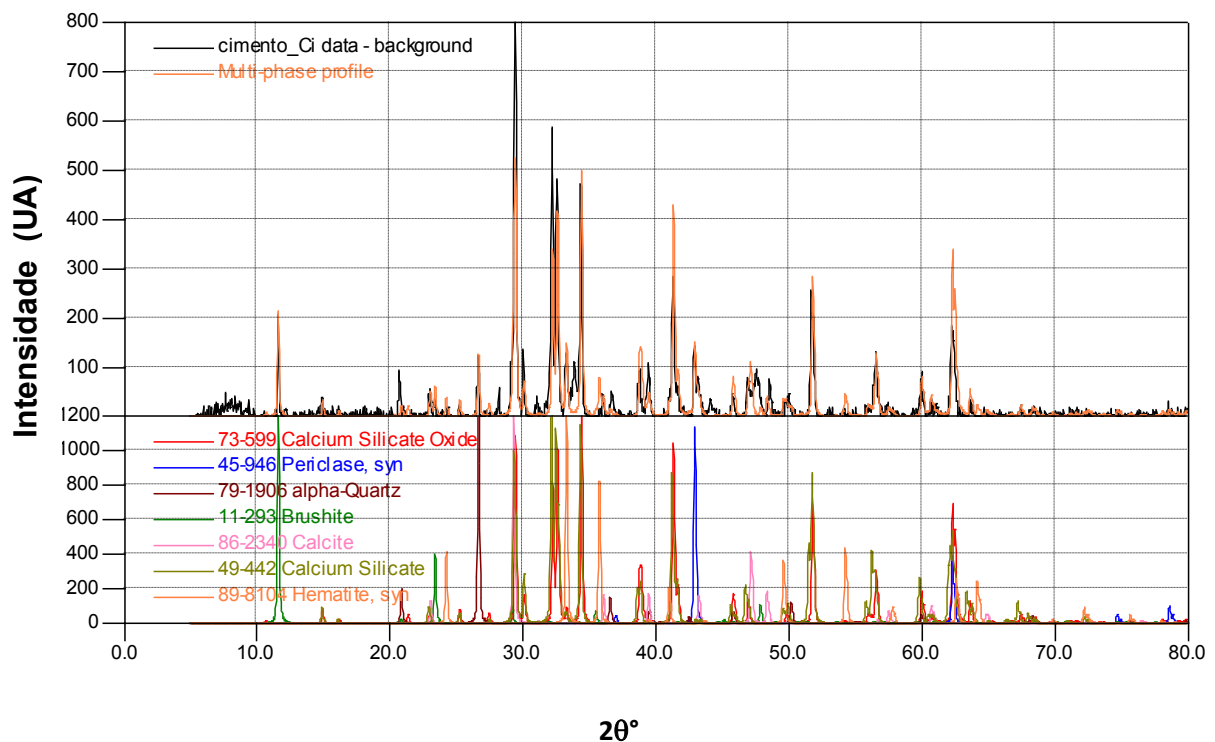
Devido ao grande volume de finos no material pozolânico, observa-se um aumento no consumo de água e consequente diminuição do abatimento para maiores quantidades de material pozolânico em substituição ao cimento. Isso ocorre devido ao aumento da área superficial do material pozolânico.

5.2 Características Químicas

• Difração de Raios X

Os espectros de difração de raios X para o cimento, o resíduo cerâmico e a areia estão apresentados nos gráficos 4, 5 e 6, respectivamente.

Gráfico 4 – Espectro de difração do cimento.



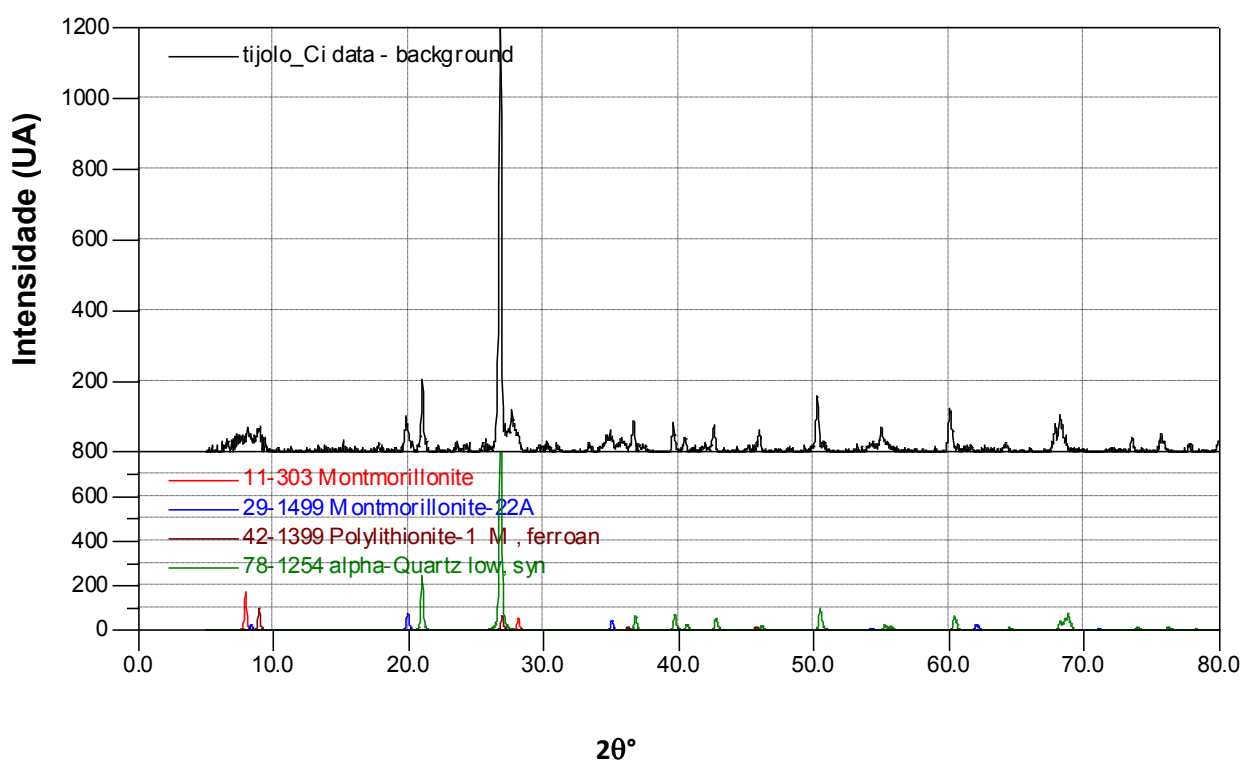
Fonte: IPEN.

Tabela 15 – Compostos do Cimento - Difração de Raios X

PDF N°	NOME	FÓRMULA
73-599	Calcium Silicate Oxide	$\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$
45-946	Periclase, syn	MgO
79-1906	Alpha-Quartz	SiO_2
11-293	Brushite	$\text{CaPO}_3(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
86-2340	Calcite	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$
49-442	Calcium Silicate	Ca_3SiO_5
89-8104	Hematite, syn	Fe_2O_3

Fonte: IPEN.

Gráfico 5 – Espectro de difração do material Pozolânico.



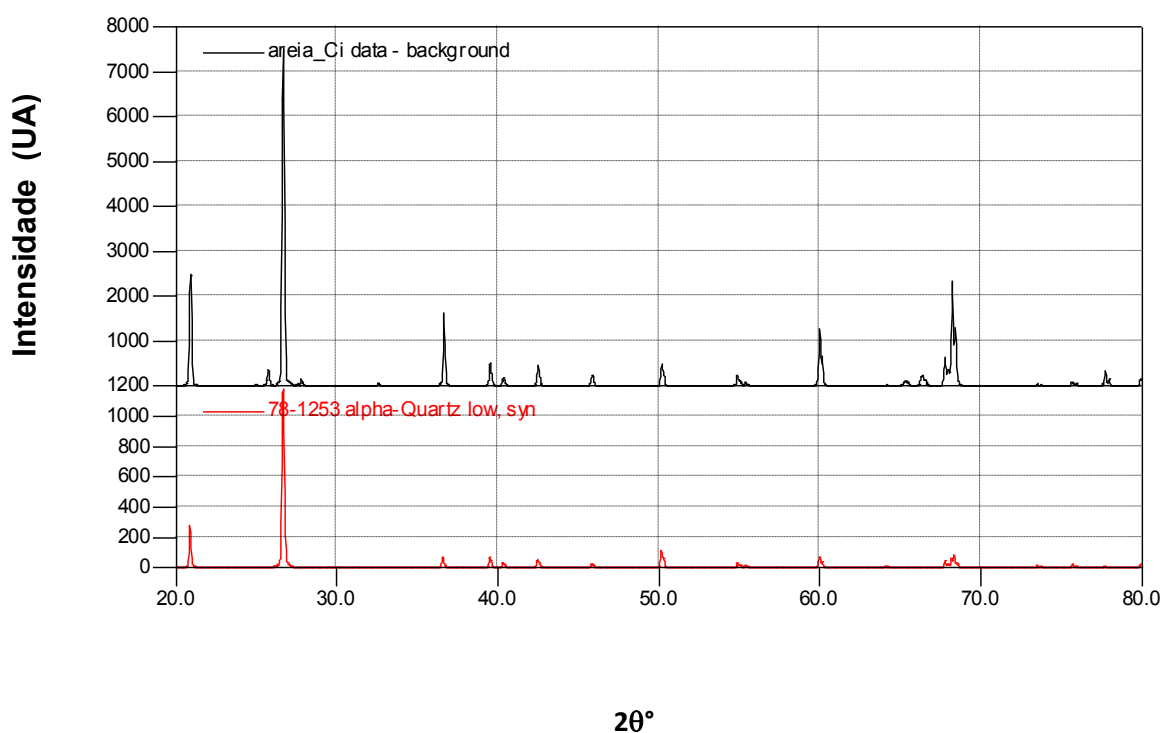
Fonte: IPEN.

Tabela 16 – Compostos do Material Pozolânico - Difração de Raios X

PDF N°	NOME	FÓRMULA
78-1254	A alpha-Quartz low, syn	Si O ₂
29-1499	B Montmorillonite-22A	Na _{0.3} (Al , Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (O H) ₂ .8 H ₂ O
11-303	Montmorillonite	(AlOH ₂) _{0.33} Al ₂ (Si _{3.67} Al _{0.33} O ₁₀)OH ₂
42-1399	C Polyolithionite-1 M , ferroan	K (Al Fe Li) (Si ₃ Al) O ₁₀ (O H) F

Fonte: IPEN.

Gráfico 6 – Espectro de difração da areia.



Fonte: IPEN.

Tabela 17 – Compostos da Areia - Difração de Raios X

PDF N°	NOME	FÓRMULA
78-1253	alpha-Quartz low, syn	Si O ₂

Fonte: IPEN.

Conclui-se que a maior composição do cimento trata-se de Silicato de Cálcio, conforme demonstrado no relatório do cimento (Anexo A), fornecido pelo fabricante.

O resíduo cerâmico utilizado é proveniente de argila montmorilonítica, com traços de mica e grande quantidade de areia quartzo alfa.

A areia utilizada é basicamente quartzo alfa.

- **Atividade Pozolânica**

Conforme ensaio Método de Chapelle modificado realizado no IPT, relatório apresentado no Anexo C, o consumo de Cal hidratada (Ca(OH)_2) encontrado na amostra à $(90\pm 5)^\circ\text{C}$, foi de 332 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ amostra.

A ABNT NBR 15.894-1 menciona que o índice de atividade pozolânica Chapelle para o material metacaulim destinado ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, deve ser maior ou igual a 750 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de material. Não há indicação de valor limite de atividade pozolânica na normalização nacional para outros materiais pozolânicos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010a).

No entanto, estudos realizados por Raverdy (1980), sobre absorção de cálcio por amostras de pozolanas, concluirão um valor mínimo indicativo de 436 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ amostra para um material ser considerado potencialmente pozolânico. O valor de Raverdy foi considerado como base para elaboração da NBR 15.895 de 2010.

Conclui-se então que o material pozolânico analisado possui baixa atividade pozolânica.

Por se tratar de um resíduo não foi possível concluir que sua baixa reatividade deve-se a sua queima em faixas fora da já estudada por Zampieri (1993) para argilas montmoriloníticas, de 550°C a 950°C .

- **Fluorescência de Raios X do Cimento e da Pozolana**

A tabela 18 demonstra as concentrações dos óxidos nas amostras de cimento e material pozolânico encontradas nas análises de fluorescências de Raios X.

As maiores composições encontradas no cimento foram CaO, SiO₂, SO₃, Fe₂O₃ e Al₂O₃, enquanto que no material pozolânico foram SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O e CaO, respectivamente.

Tabela 18 – Fluorescência de Raios X- Óxidos.

Nomenclatura	Óxidos	Concentração (%)	
		Cimento	Pozolana
Óxido de Cálcio (Cal)	CaO	74,5	2,01
Óxido de Silício (Sílica)	SiO₂	11,6	58,4
Óxido de Enxofre	SO₃	4,49	0,007
Óxido de Ferro	Fe₂O₃	4,12	13,8
Óxido de Alumínio (Alumina)	Al₂O₃	2,25	15,5
Óxido de Potássio	K ₂ O	1,13	5,78
Óxido de Fósforo	P ₂ O ₅	0,590	0,851
Óxido de Estrôncio	SrO	0,391	0,016
Óxido de Titânio	TiO ₂	0,303	1,13
Óxido de Magnésio	MgO	0,211	1,87
Óxido de Manganês	MnO	0,119	0,177
Óxido de Bário	BaO	0,026	0,047
Óxido de Zinco	ZnO	0,020	0,048
Óxido de Vanádio	V ₂ O ₅	0,019	0,030
Óxido de Cromo	Cr ₂ O ₃	0,014	0,024
Óxido de Zircônio	ZrO ₂	0,012	0,048
Óxido de Cobre	CuO	0,005	0,010
Óxido de Rubídio	Rb ₂ O	0,005	0,031
Óxido de Arsênio	As ₂ O ₃	0,003	-
Óxido de Chumbo	PbO	0,002	0,010
Óxido de Ítrio	Y ₂ O ₃	0,002	0,007
Óxido de Molibdênio	MoO ₃	0,001	-
Óxido de Níquel	NiO	-	0,012
Óxido de Gálio	Ga ₂ O ₃	-	0,005
Óxido de Nióbio	Nb ₂ O ₅	-	0,003
Cloro	Cl	0,199	0,212
	Total	100	100

Fonte: IPEN.

O resultado de sua fluorescência em raios x conclui que 74,5 % de sua composição é de óxido de Cálcio (CaO) e 11,6% de óxido de silício (SiO₂), sendo esses as maiores concentrações encontradas no cimento, onde podemos afirmar que o cimento utilizado é de alta resistência inicial (ARI), conforme ABNT NBR 5.733 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991b).

A fluorescência do resíduo cerâmico quantificou as concentrações de Sílica (SiO₂) e de Cal (CaO), respectivamente, 58,4 e 2,01. Em comparação com cimento observa-se um aumento na quantidade de Sílica (SiO₂) e um decréscimo na quantidade de óxido de cálcio (CaO).

O aumento da concentração de Sílica, sendo esta uma sílica de baixa reatividade prejudica na resistência mecânica à compressão do concreto quanto maior a sua substituição ao cimento em um traço de concreto. A diminuição de óxido de cálcio também influencia na redução da resistência mecânica do concreto.

A tabela 19 apresenta o comparativo da ABNT NBR 12.653 com a fluorescência realizada no resíduo cerâmico vermelho no material tipo classe N utilizado como substituição parcial ao cimento para desenvolvimento dos traços de concreto, comprovando que o material atende os requisitos químicos exigidos pela norma.

Tabela 19 - Comparativo ABNT NBR 12.653 x fluorescência material cerâmico - Requisitos Químicos.

Propriedades	Classe N(%)	Material Pozolânico analisado (%) *
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	87,7
SO ₃	≤ 4	0,007
Teor de umidade	≤ 3	0 **

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014.

* Dados Tabela 18.

** Ensaio realizado no laboratório de materiais de construção civil da UNISO, onde 100 gramas do material pozolânico submetido a 350°C, por duas horas manteve o mesmo peso.

5.3 Características Mecânicas

• Resistência Mecânica à Compressão

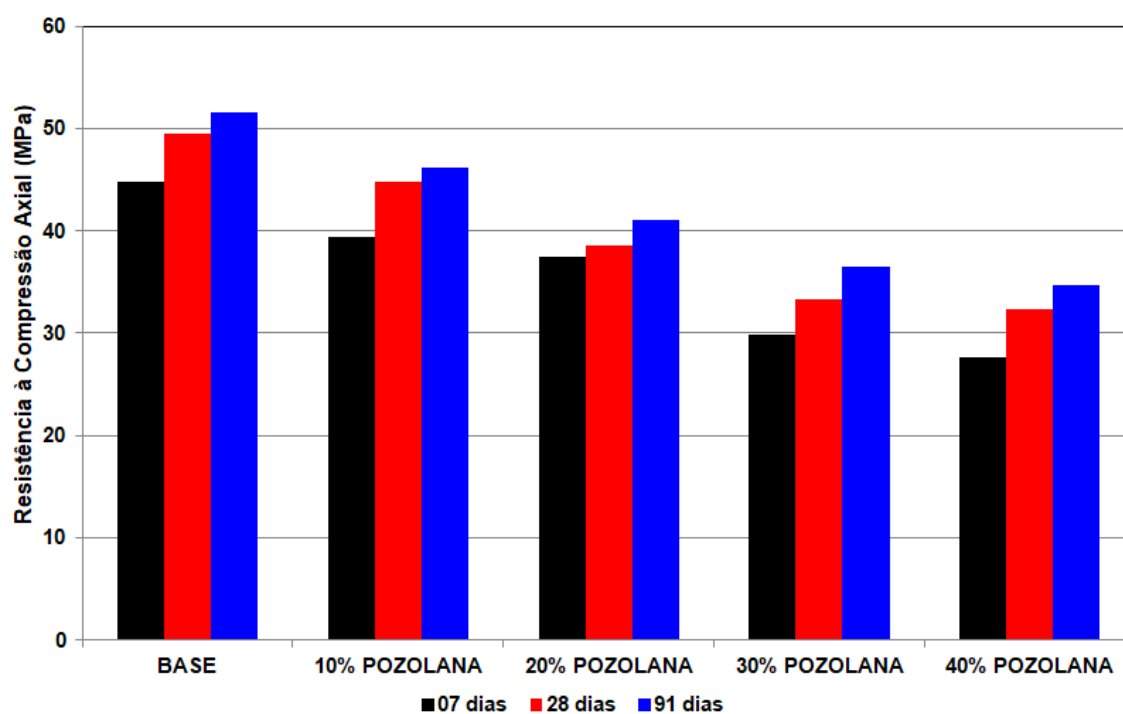
Com base nos materiais e métodos mencionados nos itens 4.1 e 4.2, obteve-se os valores de resistência à compressão axial dos corpos de prova para os tempos de cura (hidratação) de 07, 28 e 91 dias, para os traços: Base (sem substituição do cimento por pozolana), 10% de substituição do cimento por pozolana, 20%, 30% e 40%, apresentados na tabela 20. De acordo com a ABNT NBR 12.655, adotou-se o exemplar do corpo de prova de maior valor para o desenvolvimento dos gráficos 7 e 8 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

Tabela 20 – Resistência à Compressão Axial

CURA	BASE (MPa)		% SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR POZOLANA							
			10% (MPa)		20% (MPa)		30% (MPa)		40% (MPa)	
			CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
07 dias	44,80	43,95	39,40	38,78	37,51	35,40	29,83	29,79	27,71	27,54
28 dias	49,49	49,03	44,84	44,53	38,50	38,41	33,37	33,16	32,37	32,21
91 dias	51,64	50,68	46,13	46,00	41,07	40,89	36,44	36,30	34,68	34,47

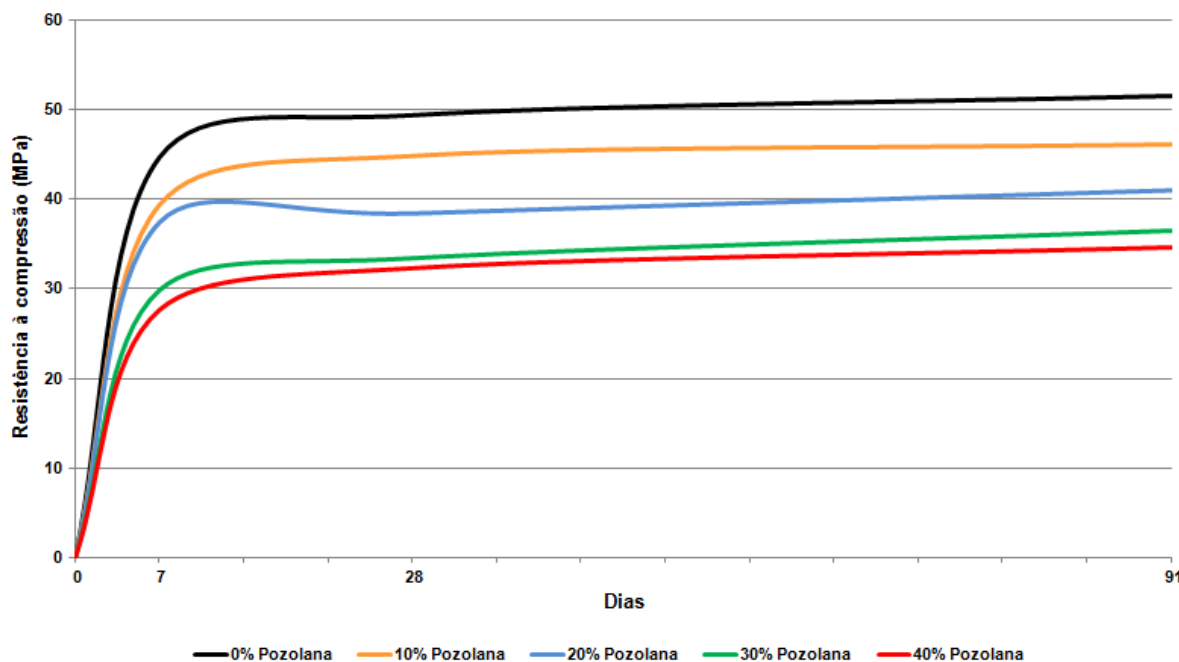
Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 7 – Resistência à Compressão Axial



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 8 – Evolução da resistência à compressão do concreto



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que houve uma queda de resistência à compressão quanto maior a substituição do cimento por pozolana.

Aos 28 dias com 10% de substituição houve uma queda de aproximadamente 9,4% na resistência mecânica a compressão do concreto, com 20% a queda foi de 22,2%. Nas substituições de 30% e 40% as quedas obtidas respectivamente resultaram em aproximadamente 32,5 % e 32,6%.

Conclui-se que para concretos confeccionados com a mesma composição, com substituição parcial do cimento com até 20% de material pozolânico, é possível atingirmos aos 91 dias a resistência final de 40 MPa. Para concretos com carregamentos após 28 dias, a substituição poderá ser até 10%.

De acordo com Gonçalves (2007), até 20% de substituição parcial do cimento pelo resíduo cerâmico não influencia significativamente as resistências mecânicas à compressão e a tração e promove concretos com maior capacidade de deformação.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados de resistência mecânica à compressão axial demonstra a diminuição da resistência quanto maior a substituição do cimento pelo material cerâmico, concluindo ser possível a substituição parcial do cimento em até 10% pelo material pozolânico estudado atingindo uma resistência mecânica à compressão axial maior que 40 MPa aos 28 dias.

Nota-se uma redução da porosidade com o aumento da substituição do cimento pelo material pozolânico devido a grande quantidade de finos, resultando assim em um concreto menos permeável, consequentemente com maior durabilidade do que o concreto convencional.

A argila utilizada e identificada na difração por raios x foi do tipo montmorilonítica, com traços de mica e quartzo, não sendo uma das melhores com relação à atividade pozolânica. A argila caulinítica possui maior atividade pozolânica do que a montmorilonítica.

A difração mostrou vários picos de sílica, confirmada na fluorescência de raios x com uma concentração de 58,4 % da amostra. Assim conclui-se com base no ensaio de Chapelle, como sendo uma sílica com baixa reatividade.

O ensaio de área superficial específica concluiu que o material pozolânico apresentou uma área superficial específica muito maior do que a do cimento, sendo sua partícula trinta e três vezes menor que a partícula do cimento, o que contribui para uma maior reatividade.

A partir das curvas granulométricas do cimento e do material pozolânico, observa-se uma oportunidade de melhoria para os próximos estudos. A utilização de uma peneira granulométrica de 45µm sob a peneira de 75 µm durante o processo de peneiramento, a fim de separar e excluir as partículas inferiores a 45µm, no processo de substituição parcial ao cimento.

A redução do volume de finos acarreta a redução da área superficial específica de molhagem melhorando a trabalhabilidade do concreto.

Como sugestão para futuros estudos este trabalho poderá ser utilizado como base para o desenvolvimento de novos traços utilizando resíduo de material

cerâmico vermelho com adições de aditivos objetivando em concretos com maiores resistências.

REFERÊNCIAS

AMBROISE, J.; MURAT, M.; PERA, J. Investigations on synthetic binders obtained by middle-temperature thermal dissociation of Clay minerals. **Silicates Industriels**, Bruxelles, v. 51, n. 7/8, p. 99-107, 1986.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção**. São Paulo: Pini, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. Bt-106. 7 ed. São Paulo, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 1991a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: Cimento Portland de Ato-Forno. Rio de Janeiro, 1991c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737**: Cimento Portland Resistentes a Sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto-procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9831**: Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (n° 200). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12989**: Cimento Portland Branco - Especificação. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13116**: Cimento Portland de baixo calor de hidratação - Especificação. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-1**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratórios. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da Consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.

BECKHOFF, B.; KANNGIEBER, B.; LANGHOOF, N.; WEDELL, R.; WOLFF, H. **Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis**. Berlin: Springer, 2006.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Análise-síntese da transformação mineral no país. (Relatório Técnico 79). In: **Análise-Síntese da transformação mineral no Brasil**. Brasília: SGM, 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P53_RT79_Analise_Sxntese_da_Transformaxo_Mineral_no_Paxs.pdf/90464f97-1fe0-4833-9363-e1fd41c147a4>. Acesso em: 16 de fevereiro 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (BRASIL). **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=30>>. Acesso em: 05 maio 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (BRASIL). **Resolução nº 348, de 16 de agosto de 2004**. Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=449>>. Acesso em: 05 maio 2015.

DIAS, J. F. **Avaliação de Resíduo da Fabricação de Telhas Cerâmicas Para Seu Emprego em Camadas de Pavimento de Baixo Custo**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004, 200 p.

FARIA, E. F. de. **Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através do modelo termo-químico e modelo de dados**. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro, 2004. 130 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

GONCALVES, Jardel Pereira. Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos. **Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 4, p. 639-644, Dec. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672007000400009&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 16 Nov. 2015.

INSTITUTO EUVALDO LODI. **Aperfeiçoamento do produto e do processo produtivo de cerâmica vermelha**. Salvador: IEL, 1998.

IPEA, **Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil**. Relatório de pesquisa, 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120911_relatorio_construcao_civil.pdf>. Acesso em 20 mar. 2015.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 113p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

KARPINSK, L. A. et al. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2009.

MALHOTRA, V. M. **Pozzolanic and Cementitious Materials - Advances in Concrete Technology**. vol.1. Ottawa: GORDON AND BREACH PUBLISHERS, 1996.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: PINI, 2008.

MENNA JUNIOR, D. **Avaliação físico-química de cimentos tipo Portland produzidos no Brasil, através da técnica de fluorescência de raios-X e resistência mecânica.** 2016. 131 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Sorocaba, 2016.

MOLIN, D. C. C. Dal. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: ISAIA, G. C., **Concreto: ensino, pesquisa e realização.** São Paulo: IBRACON, 2005. v.1. p. 345-378.

NEVILLE, A.M.BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto.** Porto Alegre: Bookman, 2013.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do concreto enquanto material construtivo. **Concreto & Construções**, São Paulo, ano 37, n. 53, p. 14-19, jan./fev./mar. 2009.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. **Manejo e gestão de resíduos da construção civil.** Brasília: CEF, 2005. (Manual de orientação: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios, v.1).

RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLERE, A. M.; DRON, R. **Appréciation de L'activité Pouzzolanique Des Constituants Secundaries.** 7^e. CONGREÈS INTERNATIONAL DE LA CHIMIE DES CEMENTS, Paris, 1980. Proceedings Vol. III, IV-36/41.

REDIVO, Israel Maccari. **Utilização de resíduo de cerâmica vermelha em misturas com solo para construção de camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SANTOS, A. L. **Diagnóstico ambiental da gestão e destinação dos resíduos de construção e demolição (RCC): análise das construtoras associadas ao Sinduscon/RN e empresas coletoras atuantes no município de Parnamirim – RN.** 2009. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

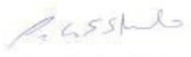
SANTOS, S. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto**

desempenho. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 267 p.

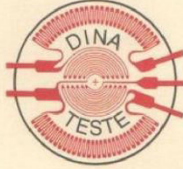
WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE, CO2 and Climate Protection. Disponível em: <
<https://www.wbcdcement.org/>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

ZAMPIERI, V. A. **Cimento Portland Aditivado com Pozolanas de Argilas Calcinadas: Fabricação, Hidratação e Desempenho Mecânico.** 233 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências – USP, São Paulo, 1993.

ANEXO A – RELATÓRIO DE ENSAIOS DO CIMENTO

		RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO TIPO / CLASSE : CP V ARI FÁCIL FÁBRICA PEDRO LEOPOLDO				
ENSAIOS	PERÍODO	03.04.2016 27.04.2016	01.05.2016 25.05.2016	29.05.2016 15.06.2016	26.06.2016 20.07.2016	LIMITES NBR5733
ENSAIOS FÍSICOS						
# 400 (%) IT Holcim	Média Desv. Pad. Nº Amostras	2,5 0,39 8	2,2 0,19 8	1,8 0,18 8	1,9 0,35 8	
# 325 (%) NBR 9202	Média Desv. Pad. Nº Amostras					
Blaine (cm²/g) NBR NM 76	Média Desv. Pad. Nº Amostras	4791 71 8	4751 47 8	4701 86 8	4694 93 8	≥ 3000
Início Pega (min) NBR NM 65	Média Desv. Pad. Nº Amostras	124 14 8	135 12 8	126 12 8	128 9 8	≥ 60
Fim Pega (min) NBR NM 65	Média Desv. Pad. Nº Amostras	179 11 8	190 10 8	181 11 8	181 9 8	≤ 600
Exp. Quente (mm) NBR 11582	Média Desv. Pad. Nº Amostras					≤ 5
R 1 dia (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	28,7 1,47 8	28,4 0,78 8	29,4 1,24 8	29,0 0,84 8	≥ 14,0
R 3 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	40,9 1,09 8	41,2 0,49 8	41,4 0,76 8	42,4 0,72 8	≥ 24,0
R 7 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	45,8 1,40 8	46,4 0,85 8	46,8 0,71 8	47,4 0,59 8	≥ 34,0
R 28 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	54,7 1,22 8	54,9 0,63 8	55,2 0,95 8	55,5 0,51 4	
ANÁLISE QUÍMICA (%)						
PF 1000°C	NBR NM 18	3,69	3,39	3,67	3,53	≤ 4,5
SiO₂	NBR 14656	19,20	19,42	19,27	19,24	
R.I.	NBR NM 15	0,93	0,92	0,94	0,86	≤ 1,0
Al₂O₃	NBR 14656	4,96	4,87	5,10	4,99	
Fe₂O₃	NBR 14656	2,93	2,93	3,01	3,01	
CaO	NBR 14656	63,64	63,69	63,82	64,47	
MgO	NBR 14656	0,73	0,86	0,86	0,75	
SO₃	NBR 14656	3,02	3,02	2,99	2,92	≤ 4,5
CO₂	NBR NM 20	2,52	2,49	2,56	2,65	≤ 3,0
K₂O	NBR 14656	0,81	0,80	0,80	0,74	
PF 500°C	IT Holcim	0,84	0,78	0,74	0,65	
C₃A (Teórico)	Equação Bogue	7,93	7,74	7,67	7,46	
OBSERVAÇÕES: 1. IT = Instrução de Trabalho 2. Resíduo na peneira #200: ≤ 6,0% (NBR 11579)						
		 Eng. Carlos Melo Supervisor A. Técnicos SP				
APLO_CP_V_ARI_PLUS_VENDAS.xls		6 setembro, 2016				

ANEXO B – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (QUALITEC ENGENHARIA)



DINATESTE INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.
ASSISTÊNCIA TÉCNICA EM MÁQUINAS DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO, TRAÇÃO
E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE FORÇA DE USO GERAL (DINAMÔMETROS)



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DNTT/ 432c/16.

1/1.

A
Qualitec Tecnologia de Materiais Ltda.
Rua Cândido dos Santos, 49
18110-405 - Votorantim - SP.

Máquina de Ensaio de Compressão,
Marca Forney, modelo n/c, tipo eletro-hidráulica,
Nº. n/c, n.º pat. n/c, ano n/c,
Cap. Máx.: 100 tf,
Faixa(s) nominal(is) de 100 tf,
Identif.: PR-004.

- Indicador digital, marca Dinateste,
Mod. PRC-RPAS, n.º 3522, n.º pat. n/c,
Identif.: n/c.

RESULTADOS

Faixa nominal de 100 tf, resolução 0,01 tf - Sens = 2,208 mV/V								
Indicação na Máquina	Valores Médios Indicados pelo Padrão		Erros Relativos de Repetitividade		Resolução Relativa	Classificação	Incerteza Expandida	k
(tf)	(kN)	(tf)	q (%)	b (%)	a (%)	-	U (%)	V _{eff}
0,00	0,00	0,000	-	-	-	-	-	-
2,00	19,76	2,015	-0,72	0,25	0,50	1	0,40	80
3,00	29,48	3,006	-0,21	0,20	0,33	1	0,29	70
4,00	39,33	4,010	-0,26	0,18	0,25	1	0,24	50
6,00	58,61	5,976	0,40	0,23	0,17	1	0,24	9
8,00	78,13	7,967	0,41	0,23	0,13	1	0,22	7
10,00	97,66	9,959	0,42	0,05	0,10	1	0,12	500
15,00	146,63	14,953	0,32	0,06	0,07	1	0,10	150
20,00	195,33	19,918	0,41	0,09	0,05	1	0,11	25
40,00	390,0	39,77	0,59	0,18	0,03	1	0,18	7
60,00	586,5	59,81	0,32	0,11	0,02	0,5	0,12	16
80,00	782,6	79,81	0,24	0,08	0,01	0,5	0,10	30
100,00	979,9	99,92	0,08	0,09	0,01	0,5	0,10	25
f0 (%)	0,00							
resolução, r (tf)	0,01							

Temperatura ambiente durante a calibração: 22,6 °C. (Incerteza das indicações: ± 1,7 °C)

Informações gerais:

Ambiente com ar condicionado.

Equipamento instalado no LABORATÓRIO - SOROCABA.

Calibração efetuada em uma só posição do pistão, por impossibilidade de montagem dos equipamentos em outra posição.

Data da última calibração: 28/08/2015.

Calibração efetuada conforme IT-003, baseada na norma ABNT NBR NM-ISO 7500-1:2004.

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com v_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Fator de Conversão: 1 tf = 9,80665 kN

Obs.: A calibração foi efetuada com a realização de ajuste no equipamento.

Data desta calibração: 11/05/2016.

Padrão(ões) utilizado(s):

CC Identif.: CO 21, n.º M70551, cap. máx. 1 MN, Cert. RBC (IPT - CAL 0003) n.º 144.482-101, de 22/04/15 - calib. válida até 22/06/17.

CC Identif.: CO 22, n.º 1908, cap. máx. 200 kN, Cert. RBC (IPT - CAL 0003) n.º 144.485-101, de 27/04/15 - calib. válida até 27/06/17.

São Paulo, 16 de maio de 2016.

Dinateste Indústria e Comércio Ltda.
Flávio dos Santos Braga
Flávio dos Santos Braga
Signatário Autorizado

CC = Célula de Carga

- O ajuste não faz parte do escopo da acreditação deste laboratório.

- Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades - SI.

- A reprodução do presente documento somente poderá ser efetuada desde que integralmente, sem quaisquer alterações.

AVENIDA CORIFEU DE AZEVEDO MARQUES, 1.468 - CEP 05582-001 - BUTANTÃ - SÃO PAULO - SP - BRASIL

TEL.: (11) 3723-2710 / 3726-4899 - E-mail: dinateste@dinateste.com.br - Site: www.dinateste.com.br

ANEXO C – RELATÓRIO DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS POR DIFRAÇÃO A LASER



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
 Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
 CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
 E-mail: lrac@feq.unicamp.br



RS_17_220_MS

RELATÓRIO DE ANÁLISE

DADOS DO CLIENTE

Solicitante: Cibeli Nieri

Orientador: Thomaz Guisardi Restivo

Data: 25/05/2017

DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS POR DIFRAÇÃO A LASER (MASTERSIZER)

1 OBJETIVO

Verificação da distribuição do tamanho de partículas em amostras fornecidas pelo cliente.

2 DADOS EXPERIMENTAIS

Descrição da(s) amostra(s) (fornecida pela empresa):

1. Cimento;
2. Tijolo cerâmico moído.

Número de amostra(s): 2

Preparação da(s) amostra(s):

As amostras foram analisadas no modo seco utilizando o ar como meio dispersante.

Parâmetros de análise:

Pressão: 2,0 Bar

Vibração: 50%

T_{laboratório}: (22 ± 2)°C

3 AMOSTRAGEM

As amostras foram entregues no LRAC pelo cliente em condição ambiente. O método de amostragem, local de coleta e preservação da integridade das amostras, até a entrega no laboratório, são de total e completa responsabilidade do cliente.

4 EQUIPAMENTOS EMPREGADOS

Analisador de Tamanho de Partículas por Difração a Laser Mastersizer, modelo MAZ3000 da marca Malvern.

Módulo de análise: AERO S.

Faixa de Análise: 0,01 a 3500 micrômetros.

Princípio da técnica analítica: Este equipamento realiza análises da distribuição do tamanho de partículas através do princípio de difração de laser.

É um método volumétrico e os cálculos para determinação do tamanho de partículas são baseados nos modelos matemáticos de Mie e de Fraunhofer. O modelo de Mie considera que as partículas são esféricas e que não são opacas, desta forma leva em conta a difração e difusão da luz na partícula e no meio.

5 RESULTADOS

As análises foram realizadas no modo Via Seca sendo realizadas dez leituras para cada amostra. A Tabela 1 apresenta os resultados e desvios padrão, em micrometros, obtidos nas análises realizadas. Os dados brutos são apresentados na forma de figuras e tabelas encontradas no ANEXO I.

A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
 Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
 CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
 E-mail: lrac@feq.unicamp.br



Tabela 1: Resultados obtidos nas análises por difração a laser para as amostras em questão.

<i>Amostras</i>	<i>Dv (10) ± Desvio (μm)</i>	<i>D [4,3] ± Desvio (μm)</i>	<i>Dv (50) ± Desvio (μm)</i>	<i>Dv (90) ± Desvio (μm)</i>
<i>Cimento</i>	1,88 ± 0,030	14,3 ± 0,092	11,2 ± 0,097	31,7 ± 0,165
<i>Tijolo cerâmico moído</i>	0,742 ± 0,007	18,4 ± 0,149	7,89 ± 0,112	52,2 ± 0,316

Nas Figuras 1 e 2 são apresentadas imagens ilustrativas obtidas das amostras em Microscópio Óptico Leica DMLM.

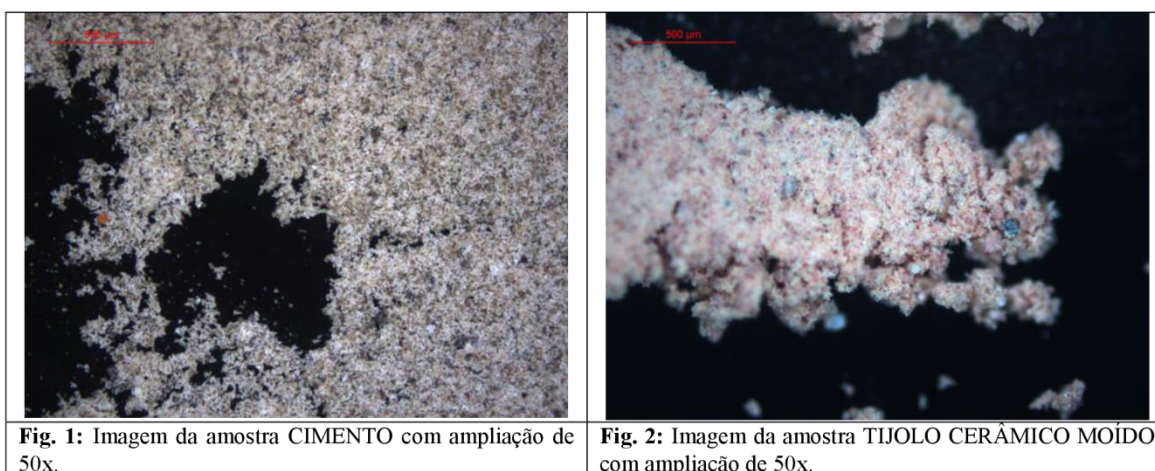


Fig. 1: Imagem da amostra CIMENTO com ampliação de 50x.

Fig. 2: Imagem da amostra TIJOLO CERÂMICO MOÍDO com ampliação de 50x.

Lucélia Luisa da Silva
ANALISTA

MSc. Adilson R. Brandão
SUPERVISÃO

MSc. Kelly R. Palma
DIREÇÃO

A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS



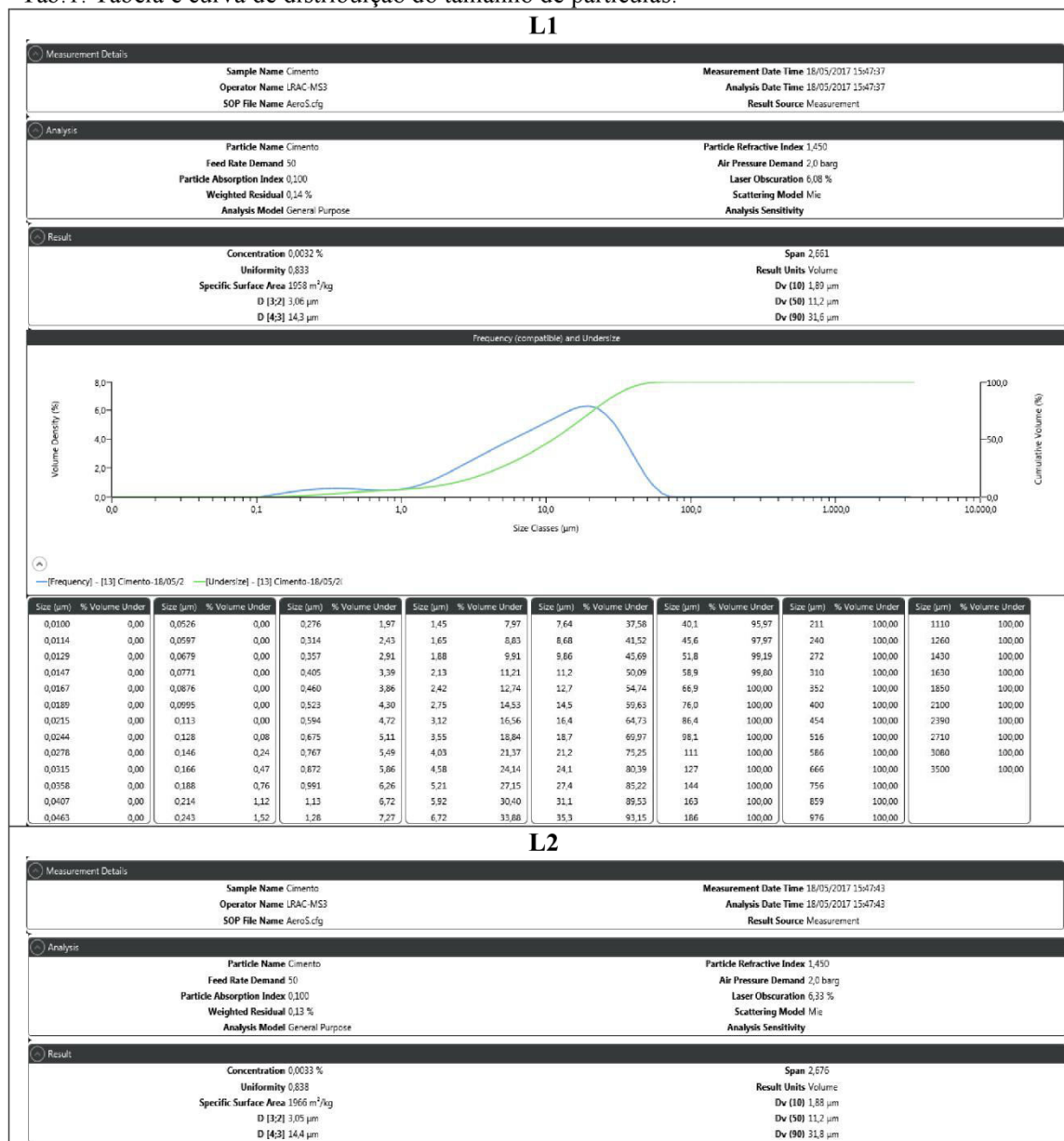
Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
 Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
 CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
 E-mail: lrac@feq.unicamp.br



ANEXO I

Amostra: Cimento.

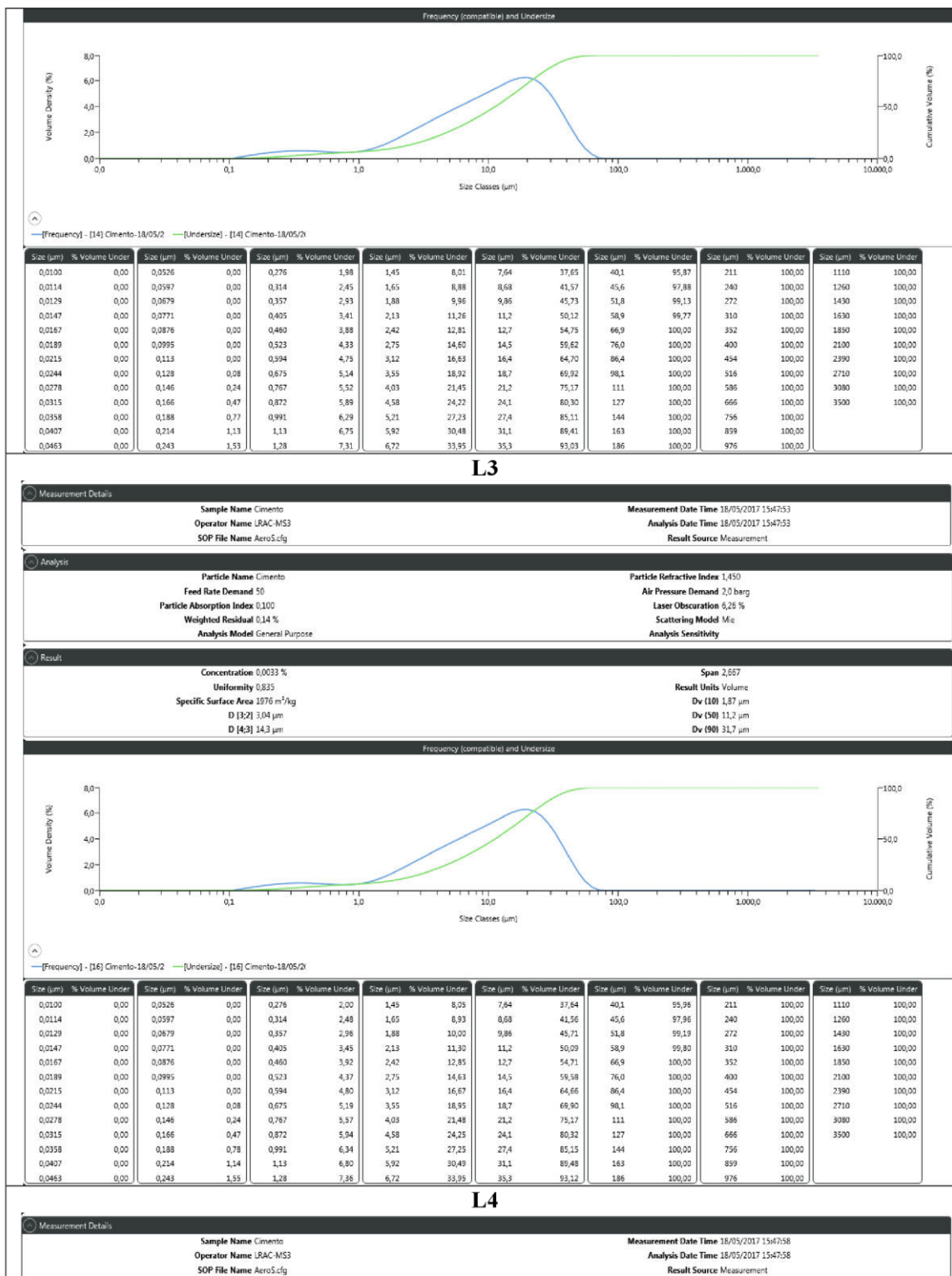
Tab.1: Tabela e curva de distribuição do tamanho de partículas.



A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
 Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
 CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
 E-mail: lrac@feq.unicamp.br

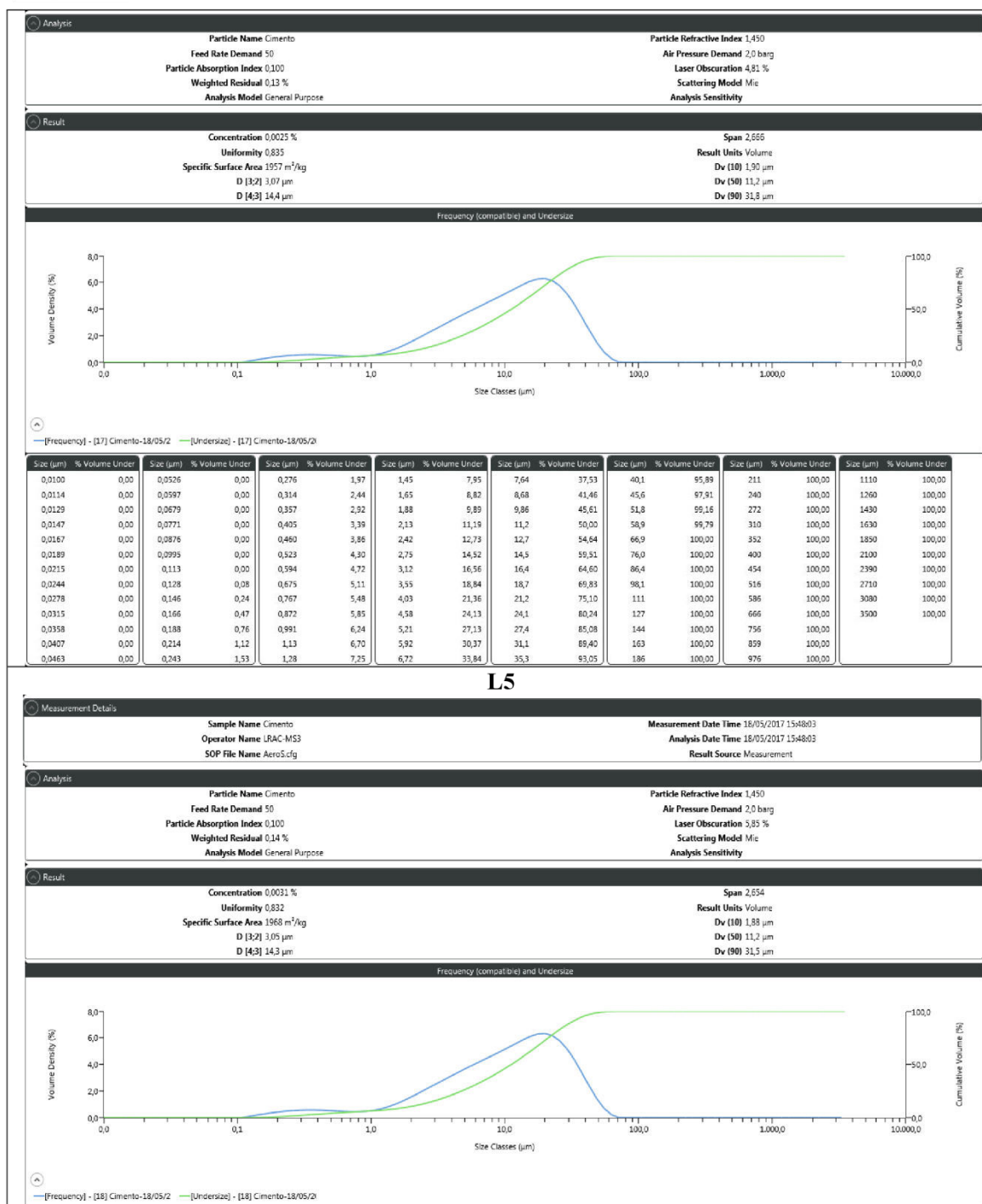


A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
 Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
 CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
 E-mail: lrac@feq.unicamp.br



A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS

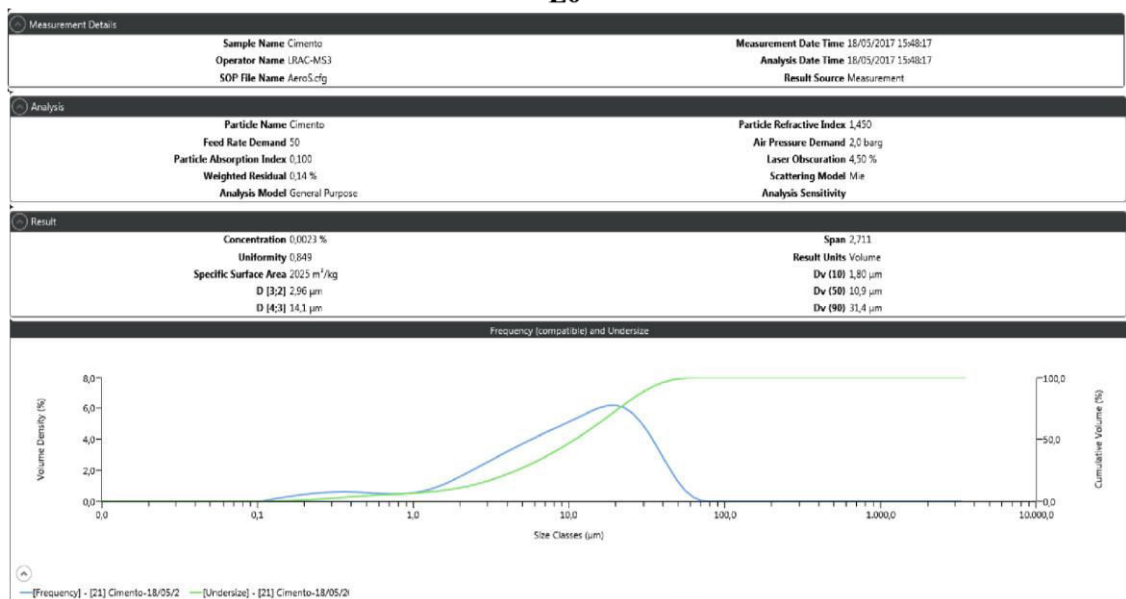


Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
 Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
 CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
 E-mail: lrac@feq.unicamp.br



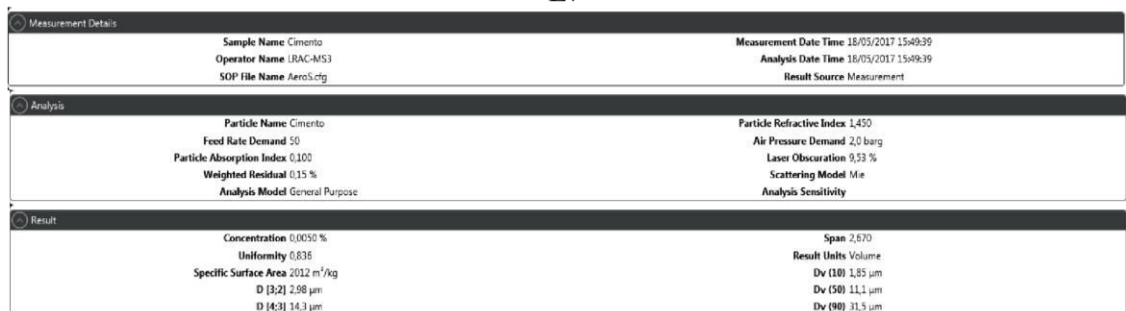
Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under
0.0100	0.00	0.0526	0.00	0.276	1.58	1.45	8.02	7.64	37.65	40.1	96.08	211	100.00	1110	100.00				
0.0114	0.00	0.0597	0.00	0.314	2.45	1.65	8.89	8.68	41.57	45.6	98.06	240	100.00	1260	100.00				
0.0129	0.00	0.0679	0.00	0.357	2.94	1.88	9.97	9.86	45.71	51.8	99.26	272	100.00	1430	100.00				
0.0147	0.00	0.0771	0.00	0.405	3.42	2.13	11.28	11.2	50.10	58.9	99.83	310	100.00	1630	100.00				
0.0167	0.00	0.0876	0.00	0.460	3.89	2.42	12.83	12.7	54.73	66.9	100.00	352	100.00	1850	100.00				
0.0189	0.00	0.0995	0.00	0.523	4.34	2.75	14.62	14.5	59.61	76.0	100.00	400	100.00	2100	100.00				
0.0215	0.00	0.113	0.00	0.594	4.76	3.12	16.66	16.4	64.71	86.4	100.00	454	100.00	2390	100.00				
0.0244	0.00	0.128	0.08	0.675	5.15	3.55	18.94	18.7	69.96	98.1	100.00	516	100.00	2710	100.00				
0.0278	0.00	0.146	0.24	0.767	5.52	4.03	21.47	21.2	75.25	111	100.00	586	100.00	3080	100.00				
0.0315	0.00	0.166	0.47	0.872	5.90	4.58	24.24	24.1	80.42	127	100.00	666	100.00	3500	100.00				
0.0358	0.00	0.188	0.77	0.991	6.30	5.21	27.25	27.4	85.28	144	100.00	756	100.00						
0.0407	0.00	0.214	1.13	1.13	6.76	5.92	30.49	31.1	89.62	163	100.00	859	100.00						
0.0463	0.00	0.243	1.54	1.28	7.32	6.72	33.96	35.3	93.26	186	100.00	976	100.00						

L6



Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under
0.0100	0.00	0.0526	0.00	0.276	2.08	1.45	8.85	7.64	38.42	40.1	96.08	211	100.00	1110	100.00				
0.0114	0.00	0.0597	0.00	0.314	2.55	1.65	9.24	8.68	42.34	45.6	98.01	240	100.00	1260	100.00				
0.0129	0.00	0.0679	0.00	0.357	3.03	1.88	10.34	9.86	46.30	51.8	99.21	272	100.00	1430	100.00				
0.0147	0.00	0.0771	0.00	0.405	3.56	2.13	11.67	11.2	50.87	58.9	99.80	310	100.00	1630	100.00				
0.0167	0.00	0.0876	0.00	0.460	4.05	2.42	13.25	12.7	55.47	66.9	100.00	352	100.00	1850	100.00				
0.0189	0.00	0.0995	0.00	0.523	4.52	2.75	15.07	14.5	60.29	76.0	100.00	400	100.00	2100	100.00				
0.0215	0.00	0.113	0.00	0.594	4.96	3.12	17.14	16.4	65.31	86.4	100.00	454	100.00	2390	100.00				
0.0244	0.00	0.128	0.08	0.675	5.37	3.55	19.46	18.7	70.47	98.1	100.00	516	100.00	2710	100.00				
0.0278	0.00	0.146	0.25	0.767	5.76	4.03	22.03	21.2	75.66	111	100.00	586	100.00	3080	100.00				
0.0315	0.00	0.166	0.49	0.872	6.16	4.58	24.84	24.1	80.73	127	100.00	666	100.00	3500	100.00				
0.0358	0.00	0.188	0.80	0.991	6.57	5.21	27.89	27.4	85.48	144	100.00	756	100.00						
0.0407	0.00	0.214	1.17	1.13	7.05	5.92	31.17	31.1	89.72	163	100.00	859	100.00						
0.0463	0.00	0.243	1.60	1.28	7.63	6.72	34.68	35.3	93.29	186	100.00	976	100.00						

L7

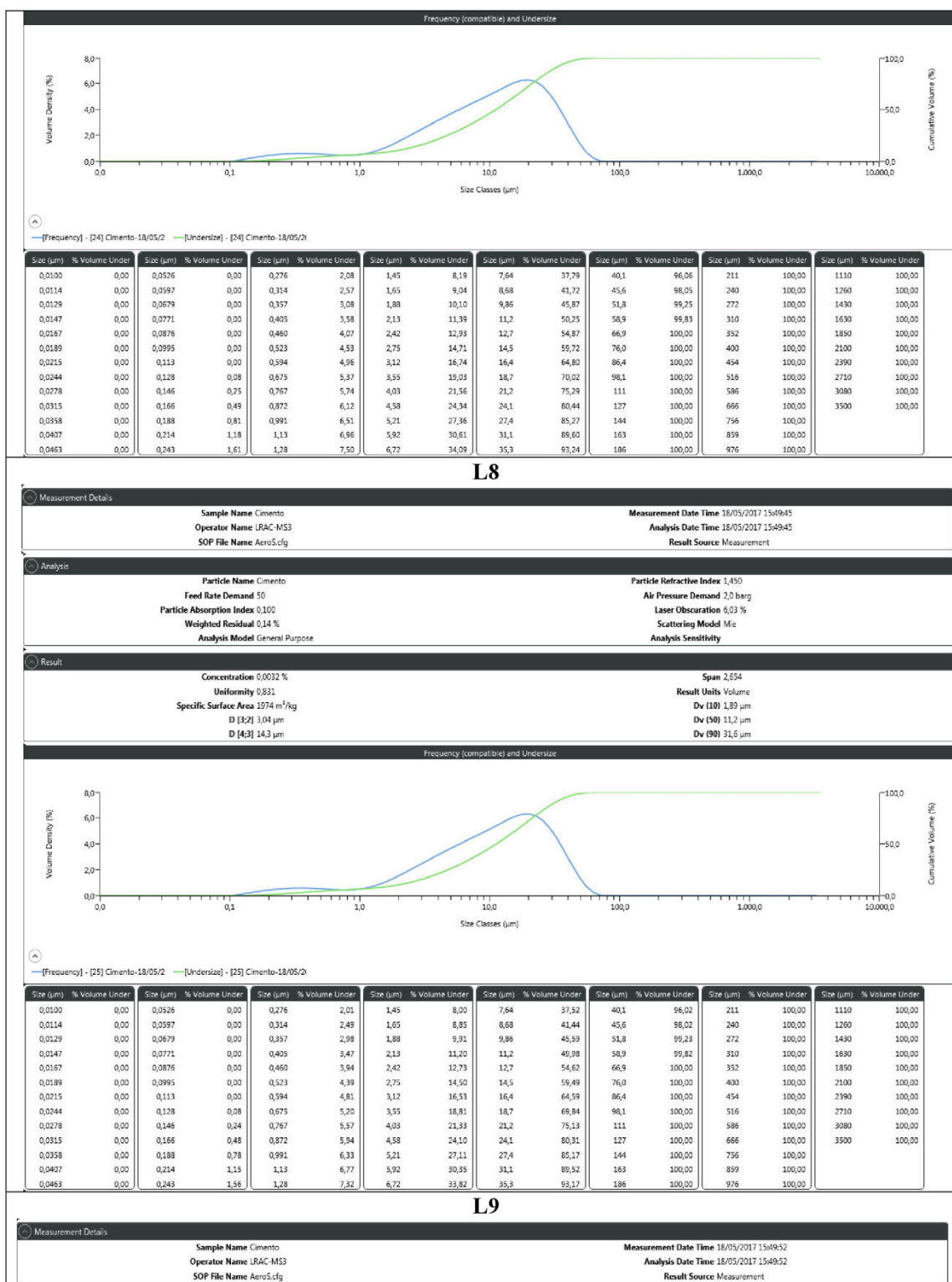


A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
 Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
 CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
 E-mail: lrac@feq.unicamp.br

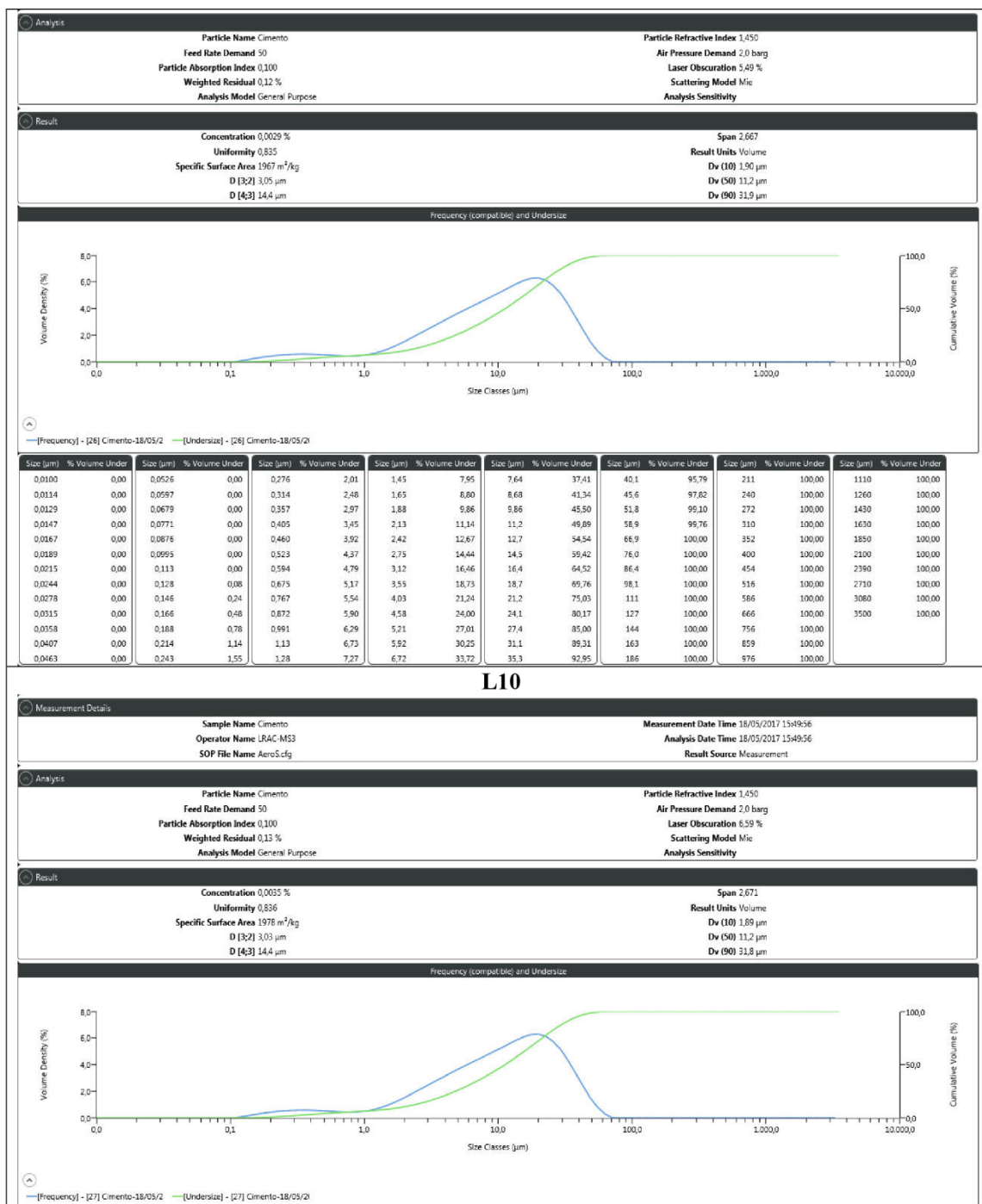


A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
 Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
 CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
 E-mail: lrac@feq.unicamp.br



A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS



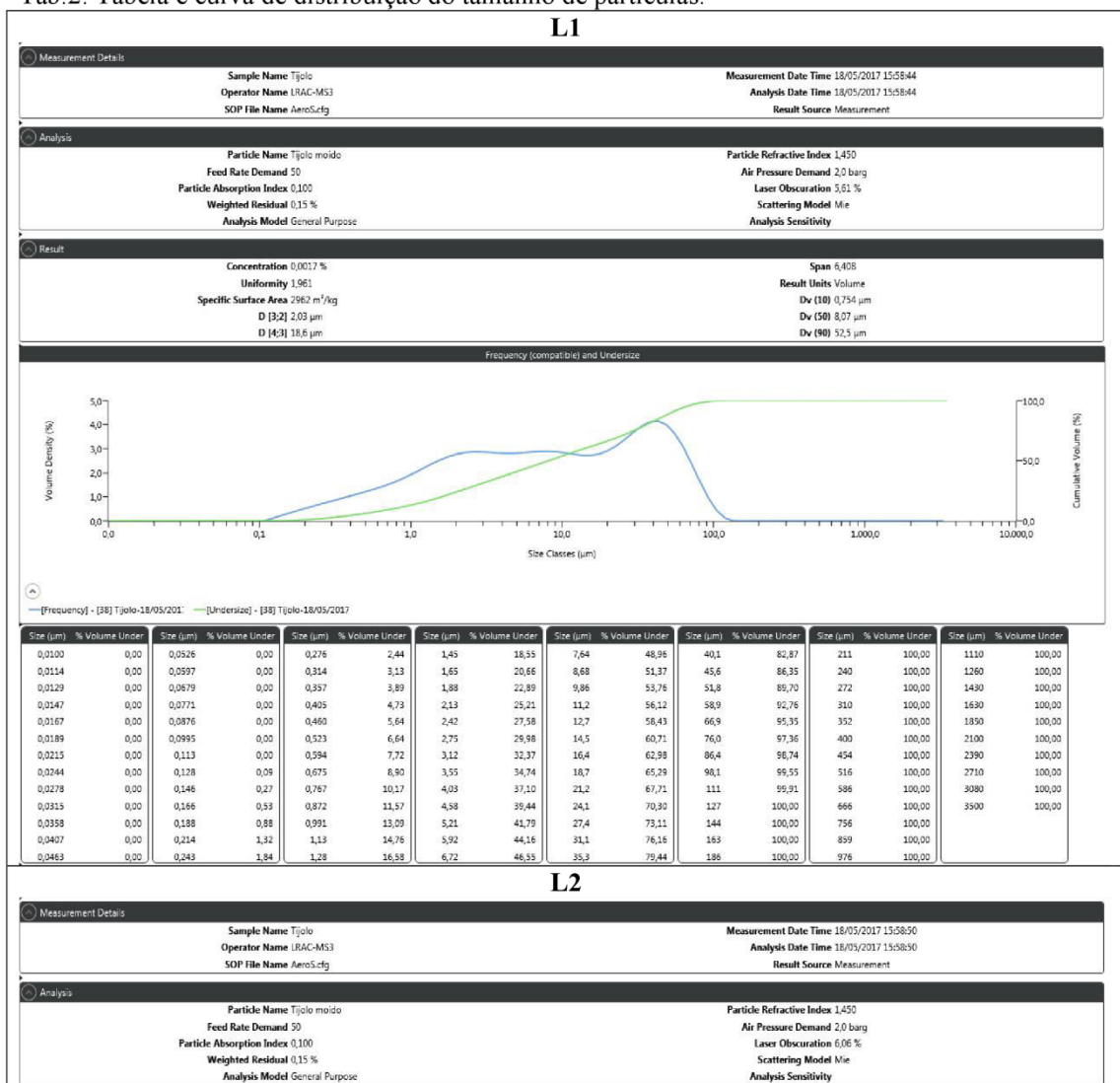
Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
 Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
 CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
 E-mail: lrac@feq.unicamp.br



Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under
0,0100	0,00	0,0526	0,00	0,276	2,03	1,45	8,00	7,64	37,50	40,1	95,82	211	100,00	1110	100,00
0,0134	0,00	0,0597	0,00	0,314	2,51	1,65	8,85	8,68	41,42	45,6	97,84	240	100,00	1260	100,00
0,0129	0,00	0,0679	0,00	0,357	3,00	1,88	9,91	9,86	45,57	51,8	99,11	272	100,00	1430	100,00
0,0147	0,00	0,0771	0,00	0,405	3,49	2,13	11,19	11,2	49,96	58,9	99,76	310	100,00	1630	100,00
0,0167	0,00	0,0876	0,00	0,460	3,96	2,42	12,71	12,7	54,60	66,9	100,00	352	100,00	1850	100,00
0,0189	0,00	0,0995	0,00	0,523	4,41	2,75	14,48	14,5	59,47	76,0	100,00	400	100,00	2100	100,00
0,0215	0,00	0,113	0,00	0,594	4,83	3,12	16,51	16,4	64,55	86,4	100,00	454	100,00	2390	100,00
0,0244	0,00	0,128	0,00	0,675	5,22	3,55	18,78	18,7	69,78	98,1	100,00	516	100,00	2710	100,00
0,0278	0,00	0,146	0,24	0,767	5,59	4,03	21,30	21,2	75,05	111	100,00	586	100,00	3080	100,00
0,0315	0,00	0,166	0,48	0,872	5,96	4,58	24,07	24,1	80,19	127	100,00	666	100,00	3500	100,00
0,0358	0,00	0,188	0,79	0,991	6,34	5,21	27,08	27,4	85,01	144	100,00	756	100,00		
0,0407	0,00	0,214	1,15	1,13	6,79	5,92	30,32	31,1	89,33	163	100,00	859	100,00		
0,0463	0,00	0,243	1,57	1,28	7,32	6,72	33,80	35,3	92,97	186	100,00	976	100,00		

Amostra: Tijolo cerâmico moído.

Tab.2: Tabela e curva de distribuição do tamanho de partículas.

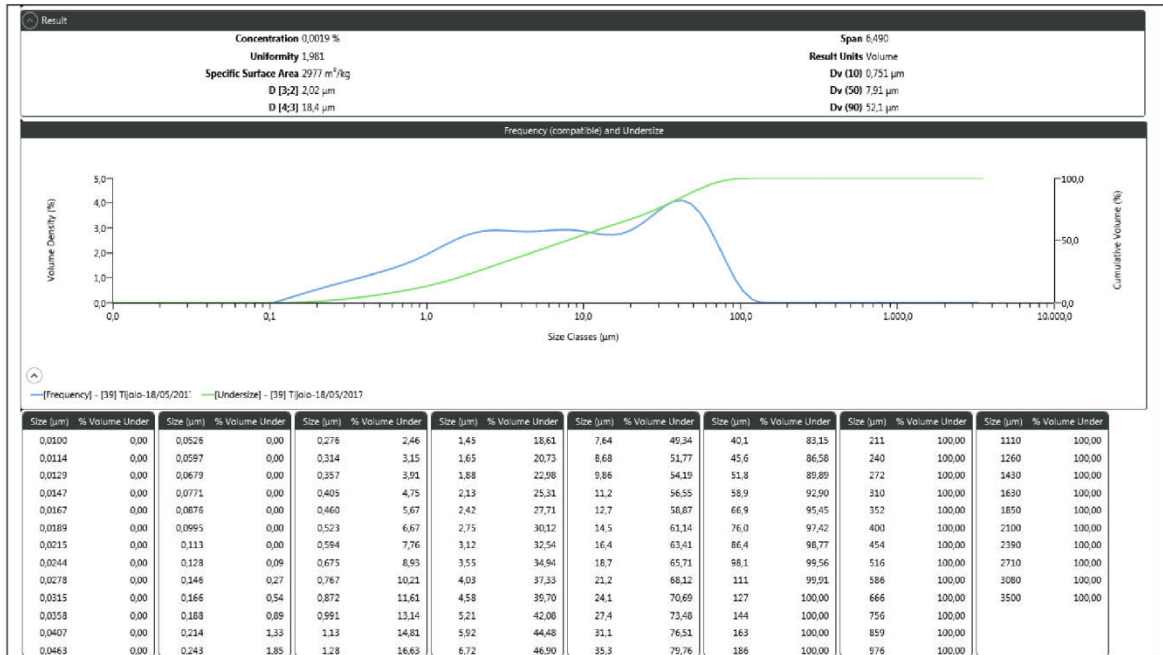


A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

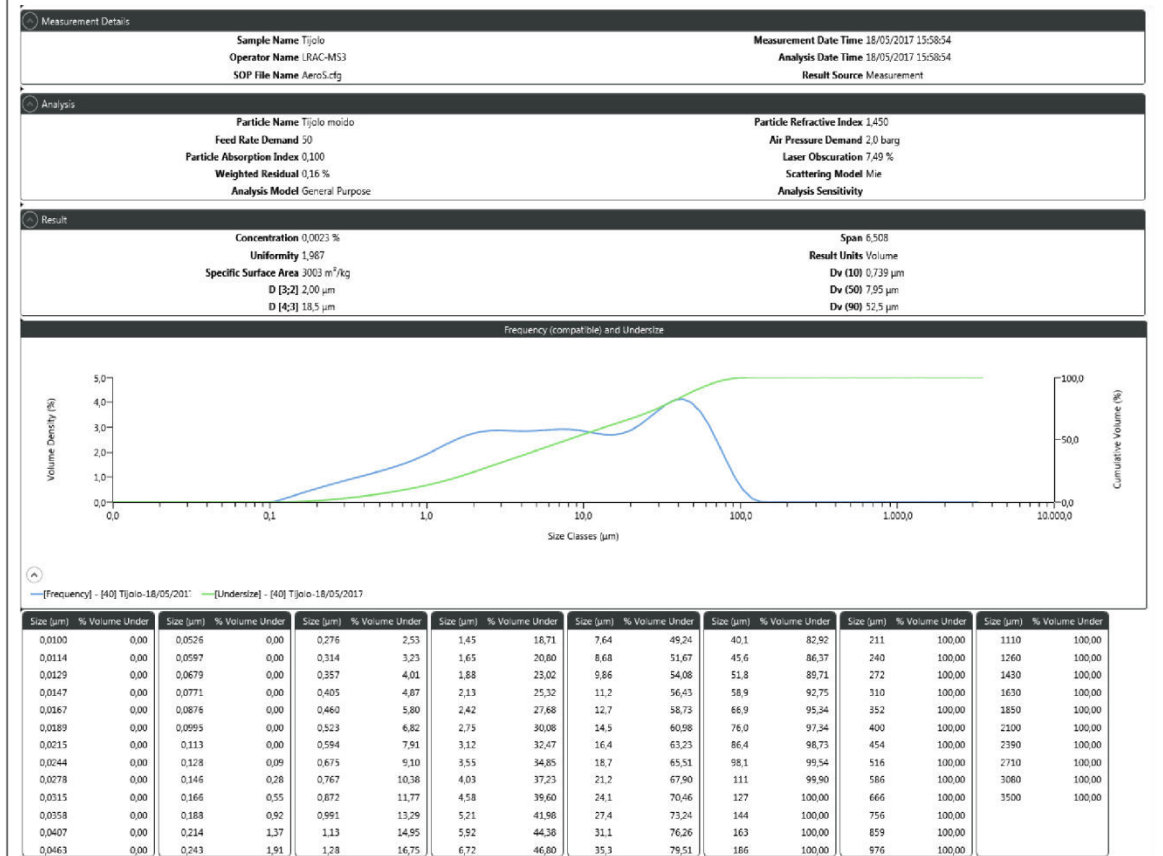
R_17_220_MS



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
E-mail: lrac@feq.unicamp.br



L3



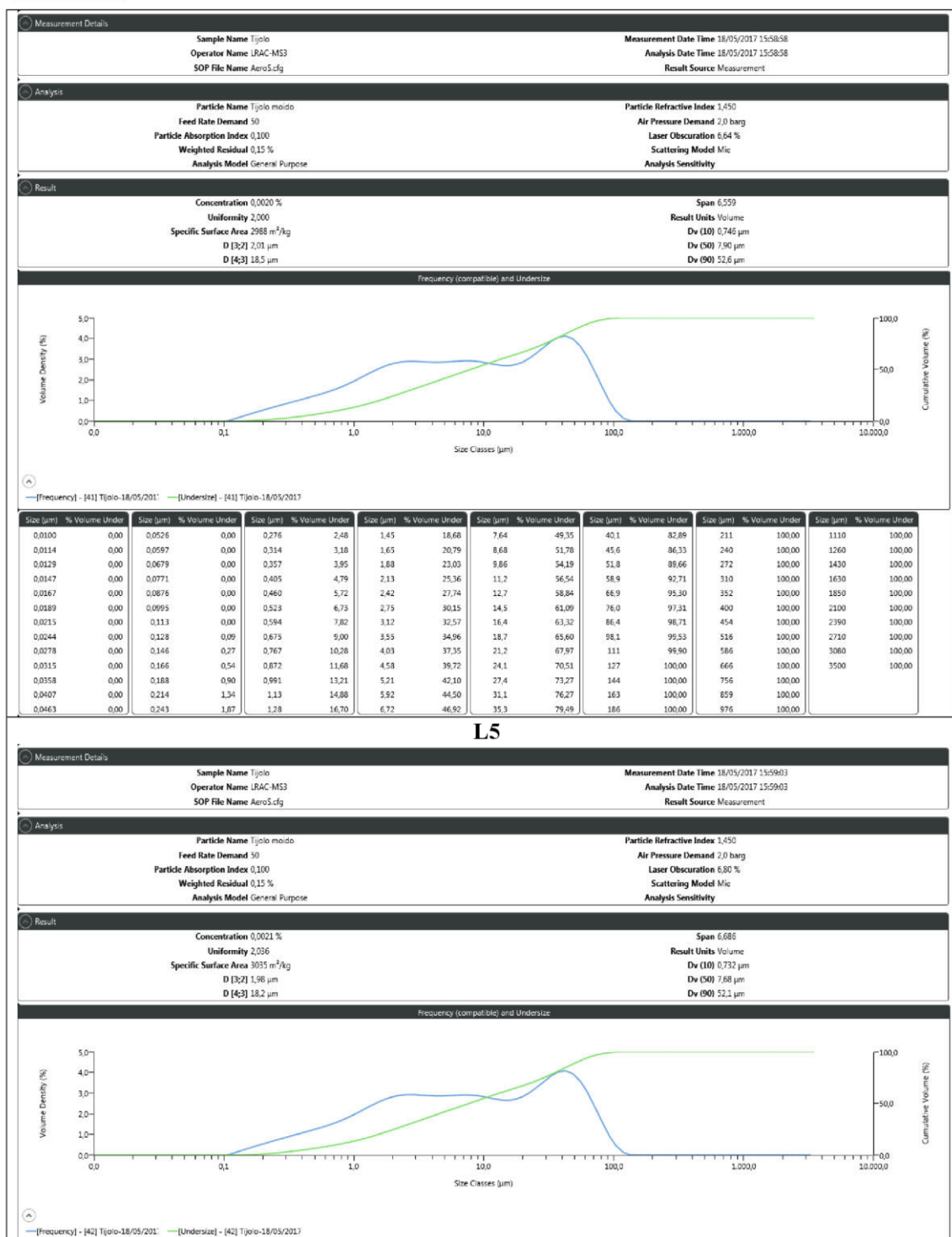
L4

A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
 Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
 CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
 E-mail: lrac@feq.unicamp.br



A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
E-mail: lrac@feq.unicamp.br



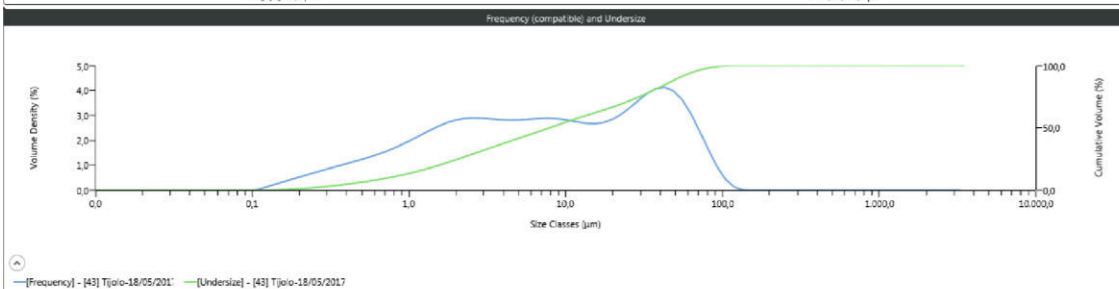
Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under
0.0100	0.00	0.0526	0.00	0.276	2.54	1.45	18.99	7.64	49.90	40.1	83.18	211	100.00	1110	100.00
0.0114	0.00	0.0597	0.00	0.314	3.24	1.65	21.14	8.68	52.32	45.6	86.59	240	100.00	1260	100.00
0.0129	0.00	0.0679	0.00	0.357	4.03	1.88	23.41	9.86	54.71	51.8	89.89	272	100.00	1430	100.00
0.0147	0.00	0.0771	0.00	0.405	4.89	2.13	25.77	11.2	57.04	58.9	92.89	310	100.00	1630	100.00
0.0167	0.00	0.0876	0.00	0.460	5.84	2.42	28.19	12.7	59.32	66.9	95.44	352	100.00	1850	100.00
0.0189	0.00	0.0995	0.00	0.523	6.86	2.75	30.63	14.5	61.55	76.0	97.41	400	100.00	2100	100.00
0.0215	0.00	0.113	0.00	0.594	7.97	3.12	33.06	16.4	63.76	86.4	98.77	454	100.00	2390	100.00
0.0244	0.00	0.128	0.09	0.675	9.17	3.55	35.48	18.7	66.00	98.1	99.56	516	100.00	2710	100.00
0.0278	0.00	0.146	0.28	0.767	10.47	4.03	37.88	21.2	68.36	111	99.91	586	100.00	3080	100.00
0.0315	0.00	0.166	0.55	0.872	11.89	4.58	40.27	24.1	70.88	127	100.00	666	100.00	3500	100.00
0.0358	0.00	0.188	0.92	0.991	13.44	5.21	42.65	27.4	73.62	144	100.00	756	100.00		
0.0407	0.00	0.214	1.37	1.13	15.14	5.92	45.05	31.1	76.60	163	100.00	859	100.00		
0.0463	0.00	0.243	1.91	1.28	16.99	6.72	47.47	35.3	79.81	186	100.00	976	100.00		

L6

Measurement Details	Sample Name: Tjolo	Measurement Date Time: 18/05/2017 15:59:07
	Operator Name: LRAC-MS3	Analysis Date Time: 18/05/2017 15:59:07
	SOP File Name: AeroS.cfg	Result Source: Measurement

Analysis	Particle Name: Tjolo moído	Particle Refractive Index: 1.450
	Feed Rate Demand: 50	Air Pressure Demand: 2.0 barg
	Particle Absorption Index: 0.100	Laser Obscuration: 5.27 %
	Weighted Residual: 0.15 %	Scattering Model: Mie
	Analysis Model: General Purpose	Analysis Sensitivity:

Result	Concentration: 0.0016 %	Span: 6.582
	Uniformity: 2.010	Result Units: Volume
	Specific Surface Area: 3012 m ² /kg	Dv (10): 0.730 µm
	D [3:2]: 1.99 µm	Dv (50): 7.83 µm
	D [4:3]: 18.4 µm	Dv (90): 52.3 µm



Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under
0.0100	0.00	0.0526	0.00	0.276	2.49	1.45	18.95	7.64	49.53	40.1	82.99	211	100.00	1110	100.00
0.0114	0.00	0.0597	0.00	0.314	3.19	1.65	21.10	8.68	51.93	45.6	86.45	240	100.00	1260	100.00
0.0129	0.00	0.0679	0.00	0.357	3.96	1.88	23.37	9.86	54.31	51.8	89.79	272	100.00	1430	100.00
0.0147	0.00	0.0771	0.00	0.405	4.82	2.13	25.72	11.2	56.65	58.9	92.83	310	100.00	1630	100.00
0.0167	0.00	0.0876	0.00	0.460	5.76	2.42	28.12	12.7	58.93	66.9	95.41	352	100.00	1850	100.00
0.0189	0.00	0.0995	0.00	0.523	6.78	2.75	30.54	14.5	61.16	76.0	97.41	400	100.00	2100	100.00
0.0215	0.00	0.113	0.00	0.594	7.88	3.12	32.95	16.4	63.39	86.4	98.77	454	100.00	2390	100.00
0.0244	0.00	0.128	0.09	0.675	9.08	3.55	35.33	18.7	65.65	98.1	99.56	516	100.00	2710	100.00
0.0278	0.00	0.146	0.27	0.767	10.39	4.03	37.69	21.2	68.02	111	99.91	586	100.00	3080	100.00
0.0315	0.00	0.166	0.54	0.872	11.82	4.58	40.03	24.1	70.55	127	100.00	666	100.00	3500	100.00
0.0358	0.00	0.188	0.90	0.991	13.38	5.21	42.38	27.4	73.32	144	100.00	756	100.00		
0.0407	0.00	0.214	1.35	1.13	15.08	5.92	44.74	31.1	76.33	163	100.00	859	100.00		
0.0463	0.00	0.243	1.88	1.28	16.94	6.72	47.12	35.3	79.58	186	100.00	976	100.00		

L7

Measurement Details	Sample Name: Tjolo	Measurement Date Time: 18/05/2017 15:59:12
	Operator Name: LRAC-MS3	Analysis Date Time: 18/05/2017 15:59:12
	SOP File Name: AeroS.cfg	Result Source: Measurement

Analysis	Particle Name: Tjolo moído	Particle Refractive Index: 1.450
	Feed Rate Demand: 50	Air Pressure Demand: 2.0 barg
	Particle Absorption Index: 0.100	Laser Obscuration: 4.91 %
	Weighted Residual: 0.14 %	Scattering Model: Mie
	Analysis Model: General Purpose	Analysis Sensitivity:

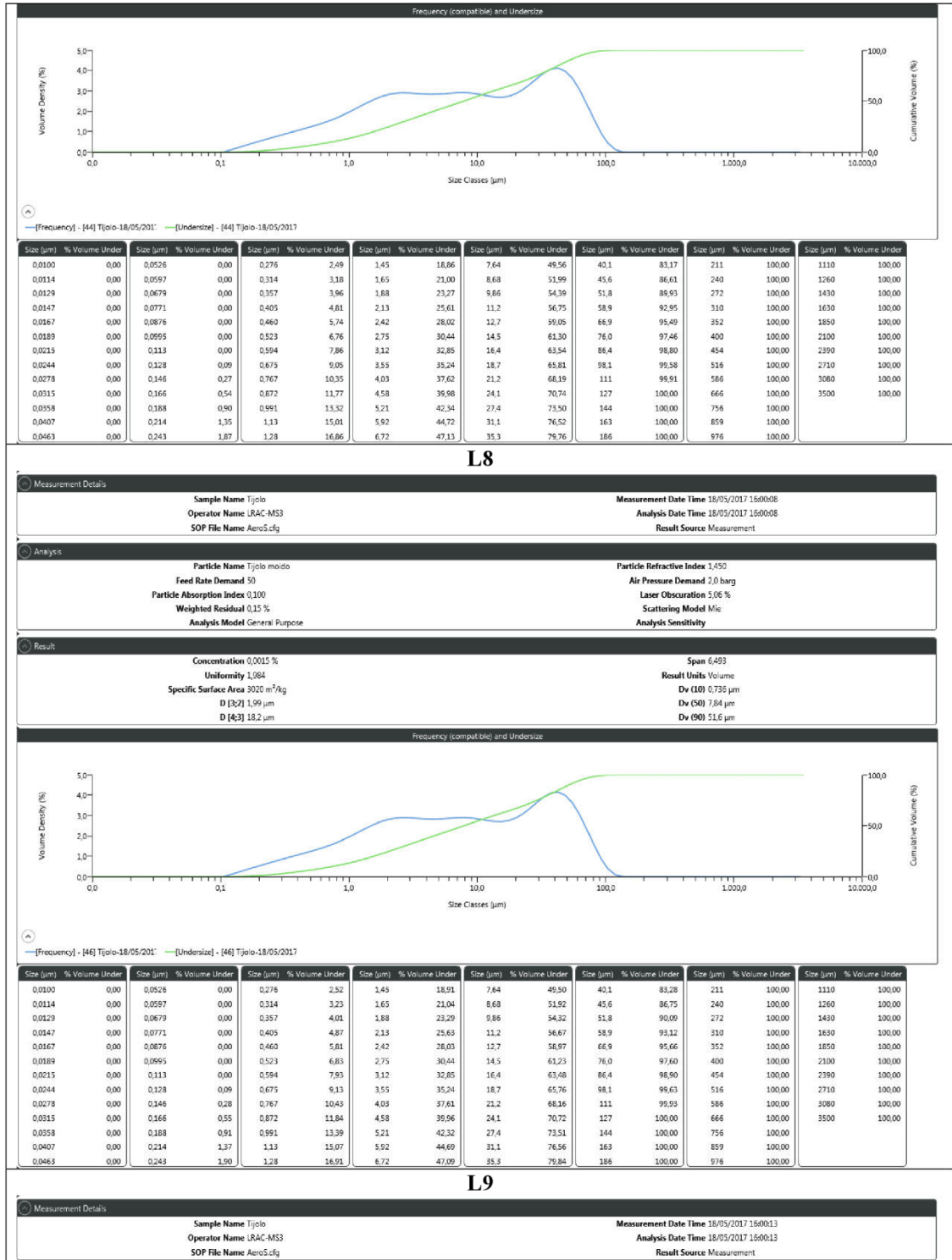
Result	Concentration: 0.0015 %	Span: 6.555
	Uniformity: 2.001	Result Units: Volume
	Specific Surface Area: 3006 m ² /kg	Dv (10): 0.741 µm
	D [3:2]: 2.00 µm	Dv (50): 7.82 µm
	D [4:3]: 18.3 µm	Dv (90): 52.0 µm

A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
 Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
 CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
 E-mail: lrac@feq.unicamp.br

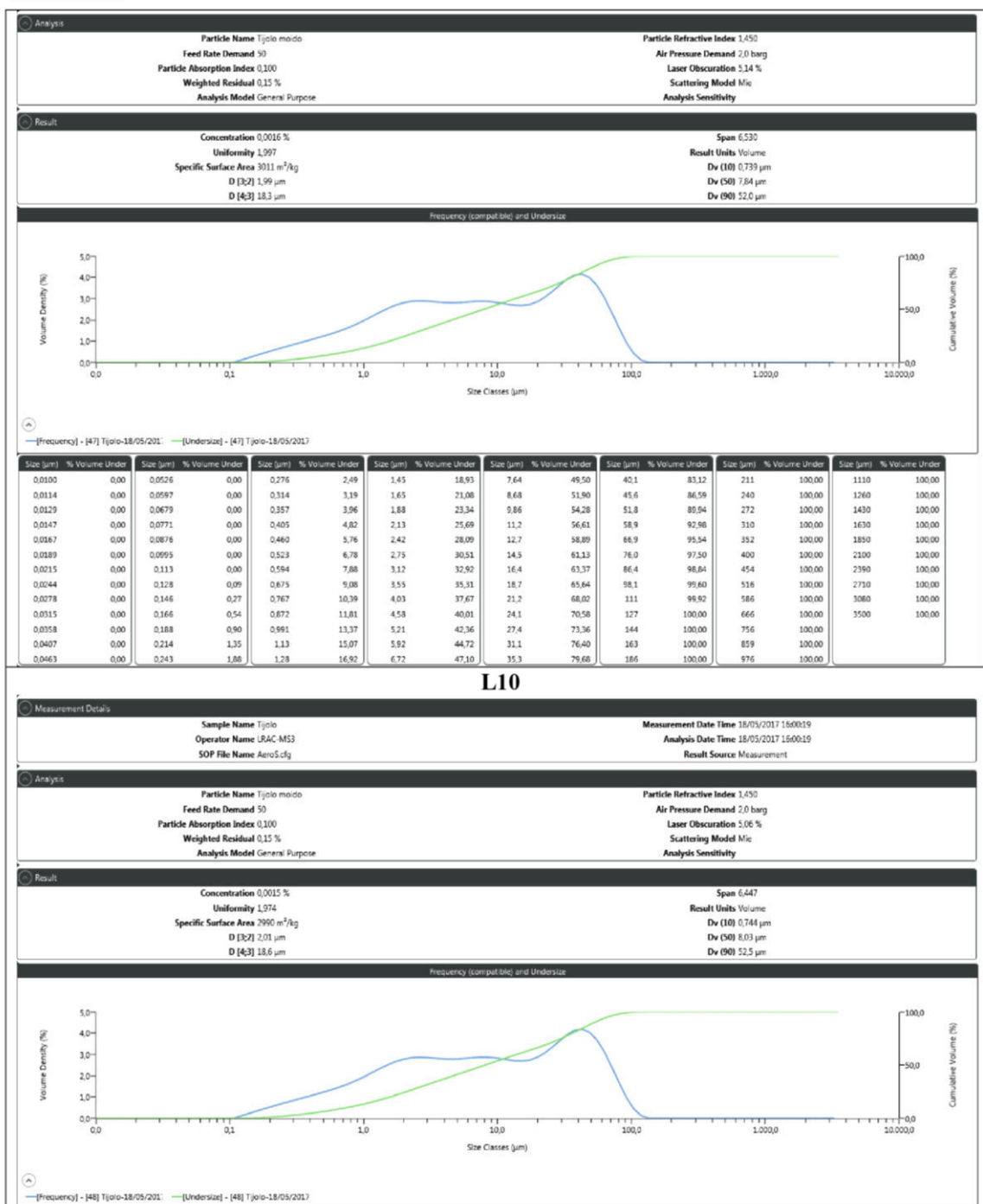


A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
 Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
 CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
 E-mail: lrac@feq.unicamp.br



A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC

Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP

CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975

E-mail: lrac@feq.unicamp.br



Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under	Size (µm)	% Volume Under
0.0100	0.00	0.0526	0.00	0.276	2.48	1.45	18.76	7.64	46.05	40.1	82.77	211	100.00	1110	100.00
0.0134	0.00	0.0597	0.00	0.314	3.18	1.63	20.89	8.88	51.44	45.6	86.28	240	100.00	1260	100.00
0.0129	0.00	0.0679	0.00	0.357	3.95	1.88	23.13	9.86	53.82	51.8	85.67	272	100.00	1430	100.00
0.0147	0.00	0.0771	0.00	0.405	4.80	2.13	25.45	11.2	56.37	58.9	92.75	310	100.00	1630	100.00
0.0167	0.00	0.0876	0.00	0.460	5.73	2.42	27.83	12.7	58.46	66.9	95.37	352	100.00	1850	100.00
0.0189	0.00	0.0895	0.00	0.523	6.74	2.75	30.22	14.5	60.71	76.0	97.39	400	100.00	2100	100.00
0.0215	0.00	0.113	0.00	0.594	7.83	3.12	32.60	16.4	62.96	86.4	98.77	454	100.00	2390	100.00
0.0244	0.00	0.128	0.09	0.675	9.02	3.53	34.96	18.7	65.24	98.1	99.57	516	100.00	2710	100.00
0.0278	0.00	0.146	0.27	0.767	10.32	4.03	37.30	21.2	67.63	111	99.92	586	100.00	3080	100.00
0.0315	0.00	0.166	0.54	0.872	11.72	4.58	39.62	24.1	70.19	127	100.00	666	100.00	3500	100.00
0.0358	0.00	0.188	0.90	0.991	13.26	5.21	41.95	27.4	72.98	144	100.00	756	100.00		
0.0407	0.00	0.214	1.34	1.13	14.95	5.92	44.29	31.1	76.02	163	100.00	859	100.00		
0.0463	0.00	0.243	1.87	1.28	16.78	6.72	46.66	35.3	79.31	186	100.00	976	100.00		

Legenda:

Dv(10) – 10% da amostra está abaixo do referido tamanho de partícula.

Dv(50) – 50% da amostra está abaixo do referido tamanho de partícula.

Dv(90) – 90% da amostra está abaixo do referido tamanho de partícula.

D[4;3] – diâmetro médio relacionado ao volume.

D[3;2] – diâmetro médio relacionado à área superficial.

Não considerar o Specific Surface Area.

A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_MS

ANEXO D – RELATÓRIO DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA (IPT)



INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

Laboratório de Materiais de Construção Civil / CT-Obras / IPT

1/1

RELATÓRIO DE ENSAIO N° 1 088 443-203

CLIENTE: CIBELI NIERI
CPF 271.654.548-02
Av. General Osório, 1430 - Apto 146A - Trujillo
CEP 18060-502 - Sorocaba - SP

NATUREZA DO TRABALHO: Determinação de atividade pozolânica

REFERÊNCIA: Orçamento FIPT N° 1914/17 de 10.02.2017 e aprovação de 17.02.2017.

1 MATERIAL

Um (01) material recebido no IPT em 21.02.2017, identificado e registrado no laboratório conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1: Dados de identificação do material.

Dados do Cliente	Dados do IPT	
	LMCC N.º	Massa (g)
"Amostra de material pozolânico"	102-17	100,0

2 MÉTODO UTILIZADO

Atividade pozolânica: NBR 15.895:2010 "Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado" (CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-041).

Nota 1: O ensaio foi realizado na amostra conforme recebida.

3 RESULTADO

Atividade pozolânica à (90±5)°C: 332 mg Ca(OH)₂/g amostra.

Nota 2: O resultado do ensaio é expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material "pozolânico". Conforme a norma ABNT NBR 15894-1:2010 (Tabela 1) para o material "metacaulim destinado ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta" o índice de atividade pozolânica Chapelle deverá ser maior ou igual a 750mg Ca(OH)₂/g de material. Outrossim, não há indicação de valor limite de atividade pozolânica na normalização nacional para outros materiais pozolânicos.

EQUIPE TÉCNICA

Técnico Químico Daniel Polato Malvestuto – FIPT - Fundação de Apoio ao IPT.
Engenheiro Químico Sérgio Soares de Lima – IPT

São Paulo, 24 de fevereiro de 2017.

CENTRO DE TECNOLOGIA DE OBRAS DE
INFRAESTRUTURA
Laboratório de Materiais de Construção Civil

Eng.º Químico Sérgio Soares de Lima
Supervisor de Ensaios
CRQ N.º 09302257 - RE. N.º 9059

CENTRO DE TECNOLOGIA DE OBRAS DE
INFRAESTRUTURA
Laboratório de Materiais de Construção Civil

Quím. Dr. Valdecir Angelo Quarcioni
Chefe do Laboratório
CRQ N.º 04212773 - RE N.º 6741

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã
São Paulo | SP | 05508-901
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

www.ipt.br

ANEXO E - ANÁLISE DA ÁREA SUPERFICIAL DE SÓLIDO POR ADSORÇÃO FÍSICA DE NITROGÊNIO



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
E-mail: lrac@feq.unicamp.br



RS_17_220_ASAP

RELATÓRIO DE ANÁLISE

DADOS DO CLIENTE

Solicitante: Cibeli Nieri

Orientador: Thomaz Guisardi Restivo

Data: 25/05/2017

ANÁLISE DA ÁREA SUPERFICIAL DE SÓLIDO POR ADSORÇÃO FÍSICA DE NITROGÊNIO

1 OBJETIVO

Verificação da área superficial (BET) de sólidos por adsorção física de nitrogênio.

2 AMOSTRA

Descrição da(s) amostra(s) (fornecida pelo cliente): Tijolo cerâmico moído.

Número de amostra(s): 1

3 AMOSTRAGEM

A amostra foi entregue no LRAC pelo cliente em condições ambientes. O método de amostragem, local de coleta e preservação da integridade da amostra, até a entrega no laboratório, são de total e completa responsabilidade do cliente.

4 PROCEDIMENTO OPERACIONAL

A amostra foi pré-tratada em estufa a 100°C por 24 h, em seguida levada ao equipamento e submetida a vácuo por 8 horas à 300 °C. Após o resfriamento até temperatura ambiente foi analisada.

Condições ambientais: T_{laboratório}: (22 ± 2) °C

5 EQUIPAMENTOS EMPREGADOS

Equipamento: ASAP modelo 2000 marca Micromeritics.

• **Princípio da técnica analítica:** A amostra contida em um tubo (porta amostra), é evacuada e resfriada a temperatura do N₂ líquido, então é exposta ao gás de análise (N₂) a uma série de pressões precisamente controladas. A cada incremento de pressão a quantidade de moléculas de gás que são adsorvidas fisicamente aumenta e este parâmetro é relacionado com volume de gás adsorvido e com a área superficial da amostra através de equações matemáticas efetuadas automaticamente pelo software do equipamento.

6 RESULTADOS

A curva BET obtida é apresentada na Figura 1. Os resultados obtidos estão sumarizados na Tabela 1.

A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_ASAP
Página 1 de 2



Lab. Recursos Analíticos e de Calibração - LRAC
Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
CEP 13083-852 Campinas/SP tel: (19) 3521-3975
E-mail: lrac@feq.unicamp.br

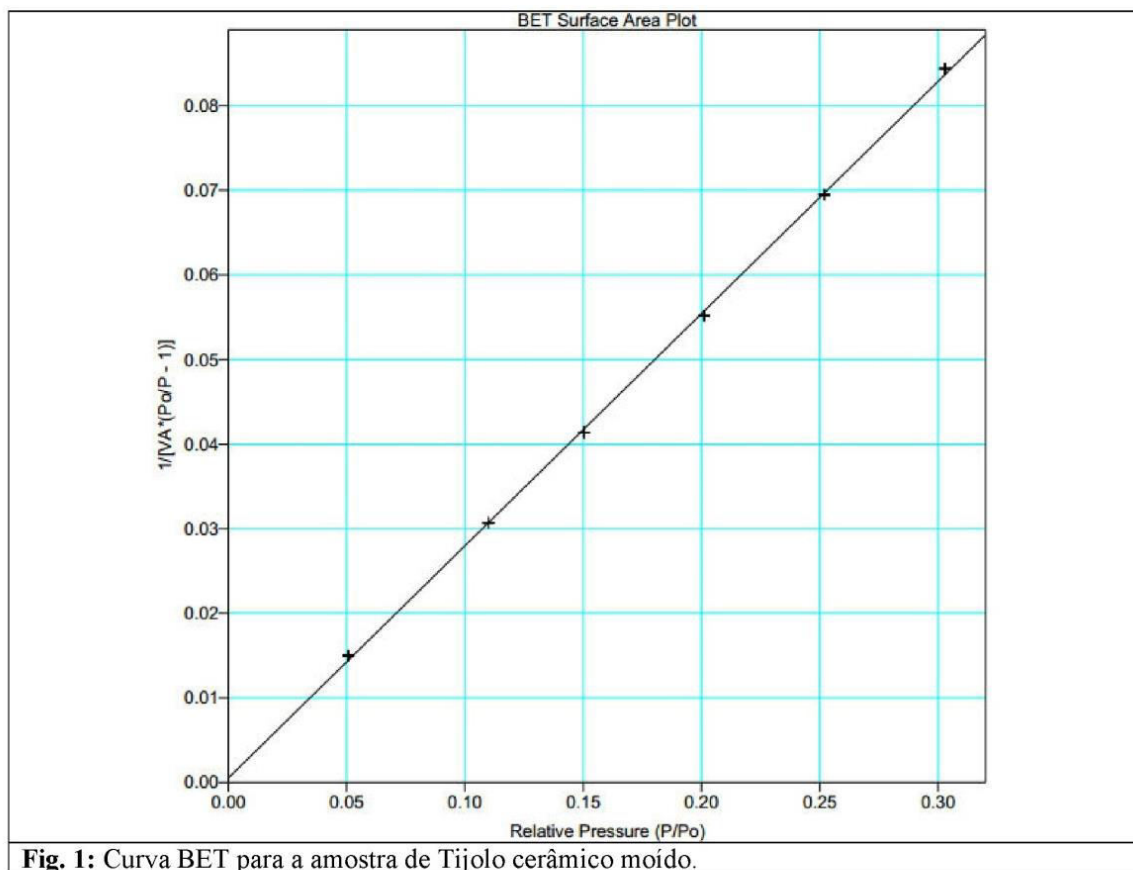


Fig. 1: Curva BET para a amostra de Tijolo cerâmico moído.

Tabela 1: Valores de área superficial da amostra analisada.

Tijolo cerâmico moído	Área (BET) em m ² /g	Diâmetro médio de poros (Å)
	15,8255	131,2000

Lucélia Luisa da Silva
ANALISTA

MSc. Adilson R. Brandão
SUPERVISÃO

MSc. Kelly R. Palma
DIREÇÃO

A reprodução deste relatório deve ser realizada na íntegra e somente é válido para a porção de amostra ensaiada. O laboratório não é responsável em nenhum caso de interpretação ou uso indevido que possa fazer deste documento.

R_17_220_ASAP
Página 2 de 2