

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS
EM BLOCOS CERÂMICOS ESTRUTURAIS ATRAVÉS DO
MÉTODO DE ULTRASSOM NA REGIÃO
DE CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ**

NEILA GONDIM DE AZEREDO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JUNHO, 2015

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS
EM BLOCOS CERÂMICOS ESTRUTURAIS ATRAVÉS DO
MÉTODO DE ULTRASSOM NA REGIÃO
DE CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ**

NEILA GONDIM DE AZEREDO

“Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil”.

Orientador: Prof. D.Sc. Jonas Alexandre
Orientadora: Prof^a. D.Sc. Rita de Cássia S. S. Alvarenga

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JUNHO, 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

26/2015

Azeredo, Neila Gondim de

Avaliação das propriedades físicas e mecânicas em blocos cerâmicos estruturais através do método de ultrassom na região de Campos dos Goytacazes - RJ/ Neila Gondim de Azeredo. – Campos dos Goytacazes, 2015. xv, 154 f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2015.

Orientador: Jonas Alexandre.

Coorientador: Rita de Cássia S. S. Alvarenga.

Área de concentração: Estrutura.

Bibliografia: f. 129-139.

1. ALVENARIA ESTRUTURAL 2. BLOCO CERÂMICO ESTRUTURAL
3. TEMPERATURA DE QUEIMA DOS BLOCOS CERÂMICOS
ESTRUTURAS 4. TESTE DE ULTRASSOM 5. RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO SIMPLES I. Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de
Engenharia Civil II. Título

CDD 624.183

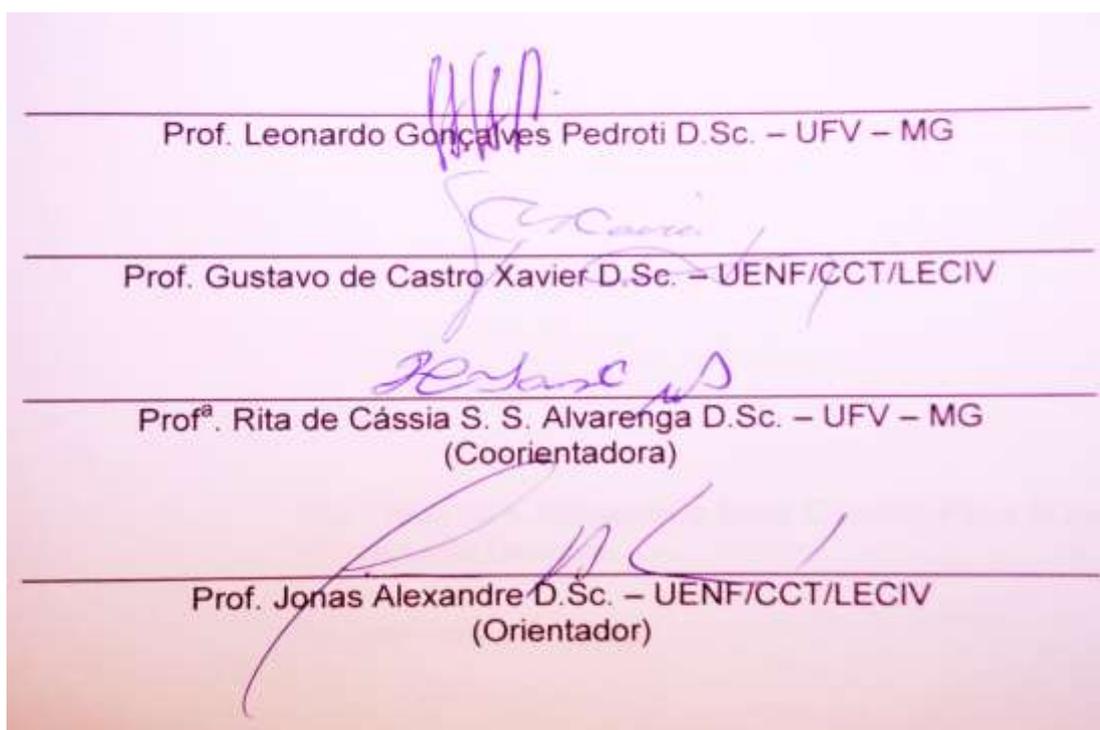
**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS
EM BLOCOS CERÂMICOS ESTRUTURAIS ATRAVÉS DO
MÉTODO DE ULTRASSOM NA REGIÃO
DE CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ**

NEILA GONDIM DE AZEREDO

“Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil”.

Aprovada em 29 de junho de 2015.

Comissão Examinadora:



DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Singefredo Maia Gondim Filho *in memoriam*
e Nice Leite Gondim.

Ao Demetrio e à Diana.

AGRADECIMENTOS

Ao Demetrio por ter me apoiado e ter literalmente carregado “pedra”, nesse caso, blocos cerâmicos estruturais, durante o decorrer desse trabalho.

À Diana por ter compreendido a minha não participação efetiva de mãe em vários momentos de sua vida nesses últimos anos.

Aos meus familiares.

Ao Orientador, Prof. Dr. Jonas Alexandre e à Coorientadora, Prof^a. Dra. Rita de Cássia S. S. de Alvarenga, aos professores Dr. Leonardo Conçalves Pedroti e Dr. Gustavo Xavier.

Ao Sr. Antônio Ribeiro, proprietário da indústria cerâmica que me permitiu o estudo; ao Sr. Fernando, gerente da indústria e demais funcionários.

Ao amigo Arismaldo, ao laboratorista Antônio Benedito e demais funcionários da LAB-TEC que muito me ajudaram na realização dos ensaios dos blocos cerâmicos estruturais.

Aos professores Dr. Cláudio Luiz Melo de Souza e Dr. Fábio Coelho (CCTA/UENF), ao Dr. Edward Frazão Teixeira, atualmente no Instituto Oswaldo Cruz (Fiocruz).

Ao Milton e Vanúzia (LECIV/CCT/UENF). À Dra. Rosane Toledo, ao Rômulo e à Elaine (LAMAV/UENF), Margareth, Idamara e Rafael Barros (Caminhos de Barro).

Ao Dr. Frederico Margem e família.

À minha incentivadora e amiga Dra. Simone Vasconcelos, aos colegas da Coordenação de Informática do Instituto Federal Fluminense *Campus* Campos-Centro. Aos colegas do IFF Cláudio Leal, Marcelo França, Regina Aquino, Marcos Pessanha, Helena de Fátima Medina e aos demais servidores, que de uma forma ou de outra estiveram junto comigo nessa jornada.

Aos colegas da UENF que me ajudaram em vários momentos, como Sérgio Rafael Cortes, José Renato, Caroline Pessôa, Afonso Rangel, Bianca, Gabriela e tantos outros que se torna difícil enumerar.

Ao Dr. Giuseppe Cultrone do departamento de Mineralogia e Petrologia da Universidade de Granada, Espanha. Ao Dr. Odilon Pancaro Cavalheiro e ao Dr. Marco A. Pozzobon.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ALVENARIA ESTRUTURAL	1
1.2. OBJETIVO GERAL	6
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.4. JUSTIFICATIVA.....	7
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. MATERIAIS CERÂMICOS	10
2.1.1. Principais propriedades dos materiais cerâmicos.....	13
2.1.2. Materiais cerâmicos vermelhos	14
2.1.3. A indústria cerâmica.....	15
2.1.4. Conceito de argila	20
2.1.5. Processo de fabricação do bloco cerâmico estrutural	22
2.1.6. Produção de cerâmica vermelha em Campos dos Goytacazes-RJ.....	29
2.1.7. Massas cerâmicas.....	31
2.1.8. Massas cerâmicas da região de Campos dos Goytacazes-RJ.....	31
2.1.9. Características gerais de materiais cerâmicos	36
2.2. AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS.....	36
2.2.1. Caracterização da matéria-prima constitutiva do bloco cerâmico estrutural.....	
2.2.2. Ensaio dos blocos cerâmicos estruturais.....	39
3. PARTE EXPERIMENTAL	60
3.1. MATERIAIS: ARGILA E BLOCO CERÂMICO ESTRUTURAL	60
3.2. MÉTODOS.....	60
3.2.1. Caracterização da matéria-prima	61
3.2.2. Atributos dos blocos cerâmicos estruturais	68
3.2.3. Tratamento estatístico	85
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	96
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	96
4.1.1. Caracterização física	96
4.1.2. Caracterização química.....	98
4.1.3. Caracterização mineralógica por difração de raios-X	100
4.2. ATRIBUTOS DOS BLOCOS CERÂMICOS ESTRUTURAIS	101
4.2.1. Queima dos blocos em temperaturas de 800, 850, 900, 950 e 1000°C..	101
4.2.2. Atributos dimensionais	102
4.2.3. Desvio do esquadro e planeza das faces.....	103
4.2.4. Atributos físicos dos blocos cerâmicos estruturais: velocidade do pulso ultrassônico, absorção 24 horas, densidade, resistência à compressão simples. .	108
5. CONCLUSÕES	125
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
6.1. REFERÊNCIAS DE NORMAS TÉCNICAS	129
6.2. OBRAS CITADAS	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Adobes e moradia construída com esse sistema.	1
Figura 1-2: Pirâmides do Egito, Coliseu de Roma, Pirâmide de Kukulkán no México.	2
Figura 1-3 : Edifícios com quatro pavimentos em alvenaria estrutural.	4
Figura 1-4: Localização do município.	6
Figura 2-1: (a) Estocagem da matéria-prima; (b) Lançamento da matéria-prima no equipamento de moagem (desintegrador); (c) A matéria-prima em estado bruto dentro do equipamento de moagem (desintegrador).	23
Figura 2-2: (a) Coluna saindo da extrusora; (b) Formato do bloco (14x19x29 cm) depois do corte por fios.	24
Figura 2-3: (a) Blocos cerâmicos secos ao ar sobre vagonetes; (b) Estufa para a secagem dos blocos cerâmicos.	25
Figura 2-4: Saída do vagão do forno contínuo.	26
Figura 2-5: Blocos eliminados por defeitos.	26
Figura 2-6: Empilhadeira para transporte dos blocos cerâmicos.	28
Figura 2-7: Detalhe da estocagem dos blocos cerâmicos.	28
Figura 2-8: Exemplo de fluxograma de produção de blocos cerâmicos estruturais com dimensões de fabricação (14x19x29 cm).	29
Figura 2-9: Bacia Sedimentar.	32
Figura 2-10: Rio Paraíba do Sul e centro da cidade de Campos.	32
Figura 2-11: Foz do Rio Paraíba do Sul em São João da Barra, RJ.	33
Figura 2-12: Mapa da região com os municípios limítrofes e rios.	34
Figura 2-13: Locais para medições do comprimento (C) do bloco e Posições esquemáticas para as medições da espessura das paredes externas e septos.	42
Figura 2-14: Desvio em relação ao esquadro - Representação esquemática.	42
Figura 2-15: Planeza das faces – Representação esquemática – Bloco estrutural.	43
Figura 2-16: Massa de bloco seco estimada em balança eletrônica digital.	44
Figura 2-17: Blocos imersos em água.	45
Figura 2-18: Transdutores posicionados para ensaio direto.	49
Figura 2-19: Posicionamento dos transdutores para avaliação do tempo de trânsito.	51
Figura 2-20: (a) transmissão direta; (b) transmissão semidireta; (c) transmissão indireta ou de superfície.	51
Figura 2-21: Estojo com o equipamento de ultrassom.	53
Figura 2-22: (a) Pasta de acoplamento; (b) Bloco de calibração; (c) Unidade de leitura de dados.	53
Figura 3-1: Organograma dos ensaios.	61
Figura 3-2: Coleta da matéria-prima.	61
Figura 3-3: a) Almofoariz e mão de gral; b) Peneiramento; c) Amostra passada na peneira n ^o 40.	62
Figura 3-4: a) Recipiente identificado; b) Dispensor; c) Proveta graduada, densímetro, água destilada.	63
Figura 3-5: Aparelho de Casagrande.	63
Figura 3-6: Cilindro padrão de 3 mm para o ensaio do limite de plasticidade.	64
Figura 3-7: Picnômetro com amostra de solo.	65
Figura 3-8: Moinho de esferas, painel e argila mais esferas.	66
Figura 3-9: Equipamento (Shimadzu, EDX700, Japão).	66
Figura 3-10: Cadinho de 12,087 g.	66
Figura 3-11: Equipamento (Shimadzu, XRD700, Japão).	67
Figura 3-12: Temperaturas de queima dos blocos cerâmicos estruturais.	68
Figura 3-13: Forno (JRicardo, A900, Brasil) com o termopar na parte frontal.	68
Figura 3-14: Evolução da temperatura durante a queima dos blocos.	69

Figura 3-15: Leitura da temperatura	70
Figura 3-16: Disposição dos blocos no forno.....	70
Figura 3-17: Representação esquemática do forno e temperaturas.....	71
Figura 3-18: Transporte dos blocos para queima no forno.....	72
Figura 3-19: Detalhes da fornalha: portas de alimentação e lenha de eucalipto.....	72
Figura 3-20: Temperaturas observadas em diferentes pontos do forno e na estufa.....	73
Figura 3-21: Equipamento portátil utilizado para leitura de temperaturas.....	73
Figura 3-22: Planta do bloco cerâmico para levantamento dos dados dimensionais.....	74
Figura 3-23: Corte visto de frente, planta e vista lateral do bloco (14x19x29 cm).....	75
Figura 3-24: Localização dos transdutores.....	76
Figura 3-25: Posicionamento das leituras V_1 , V_2 e V_3	76
Figura 3-26: PUNDIT LAB ⁺ , bloco e septos extraídos de blocos cerâmicos estruturais..	78
Figura 3-27: Desvio do esquadro.....	79
Figura 3-28: Planeza das faces.....	80
Figura 3-29: Avaliação da massa aparente do bloco.....	81
Figura 3-30: Preparação da pasta de cimento para capeamento dos blocos.....	82
Figura 3-31: Base de pasta de cimento para capeamento.....	82
Figura 3-32: Capeamento das amostras de blocos cerâmicos estruturais.....	82
Figura 3-33: Etapa de saturação de blocos cerâmicos estruturais.....	83
Figura 3-34: Prensa (Shimadzu, UH-F 500 kN, Japão).....	84
Figura 3-35: Prensa (Cotenco/Pavitest, I.3001.C, Brasil).....	84
Figura 3-36: Diagrama resumido do trabalho.....	85
Figura 4-1: Curva de distribuição granulométrica da matéria-prima.....	96
Figura 4-2: Difratograma de raios-X da massa argilosa.....	100
Figura 4-3: Vista superior do bloco cerâmico com indicação do lado com identificação do fabricante.....	103
Figura 4-4: Fragmentos de septos externos dos blocos.....	111
Figura 4-5: Influência da temperatura (800 a 1000°C) na velocidade de pulso ultrassônico (V_L).....	112
Figura 4-6: Influência da absorção AA(%) na velocidade de pulso ultrassônico (V_L)....	115
Figura 4-7: Influência da área bruta (AB) na velocidade de pulso ultrassônico (V_L).....	116
Figura 4-8: Influência da temperatura (800 a 1000°C) na absorção AA(%).	117
Figura 4-9: Influência da absorção AA(%) na resistência à compressão simples.....	117
Figura 4-10: Influência da temperatura na resistência à compressão simples.....	118
Figura 4-11: Influência da resistência à compressão na velocidade de pulso (V_L).....	121
Figura 4-12: Influência da temperatura na resistência à compressão simples.....	124

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1: Demonstrativo da estimativa das reservas aproveitáveis de argila.....	19
Tabela 2.2: Componentes químicos da massa argilosa Xavier (2006).....	35
Tabela 2.3: Exigências segundo a ABNT NBR 15.270:2005.....	46
Tabela 2.4: Exemplos de velocidade de ondas longitudinais e cisalhantes em alguns tipos de materiais.....	50
Tabela 3.1: Classificação do solo quanto ao IP.....	64
Tabela 3.2: Dimensões mínimas do objeto de teste (BS 1881: parte 203).....	77
Tabela 3.3: Média, desvio padrão e coeficiente de variação das medições das velocidades nas três direções ortogonais em bloco cerâmico estrutural.(V1, V2 e V3) e nos septos isolados.....	78
Tabela 4.1: Características Granulométricas.....	97
Tabela 4.2: - Limites de Atterberg.....	97
Tabela 4.3: Composição química da massa argilosa natural (% em peso).....	98
Tabela 4.4: Perda ao Fogo em porcentagem (%).....	99
Tabela 4.5: Temperatura de queima (°C) e número de blocos (n) testados.....	101
Tabela 4.6: Médias (L, H, C) e médias dos septos internos e externos em milímetros.....	102
Tabela 4.7: Médias desvio de esquadro e planeza das faces.....	104
Tabela 4.8: Análise da variância para efeito da temperatura de queima sobre AL, AB, DELL, DELI, PLL, PLI para a análise dimensional de blocos cerâmicos estruturais...	106
Tabela 4.9: Atributos de qualidade física dos blocos cerâmicos AL (cm ²), AB (cm ²), DELL (mm), DELI (mm), PLL (mm), PLI (mm) para a análise dimensional de blocos estruturais cerâmicos.....	107
Tabela 4.10: Matriz de Correlações de Pearson (R).....	109
Tabela 4.11: Análise da variância da Velocidade (1000 m ^s) de ultrassom em diferentes sentidos (V ₁ , V ₂ e V ₃) anisotropia total (ΔM) para a análise da resistência de blocos estruturais cerâmicos.....	109
Tabela 4.12: Velocidade (1000 m ^s) de ultrassom em diferentes sentidos (V1, V2 e V3) e anisotropia total (ΔM) para a análise da resistência de blocos estruturais cerâmicos, Campos de Goytacazes, 2015.....	110
Tabela 4.13: Análise da variância para efeito da temperatura na RES, ABS e DEN.....	113
Tabela 4.14: Atributos de qualidade de blocos cerâmicos estruturais a partir das variáveis resistência à compressão (MPa), absorção AA(%) e densidade (g cm ⁻³).....	114
Tabela 4.15: Médias gerais das amostras de blocos cerâmicos estruturais: RES, V ₁ , V ₂ e V ₃ , (±Desvio Padrão).....	119
Tabela 4.16: Matriz de Correlações (RES, V ₁ , V ₂ e V ₃).....	119
Tabela 4.17: Análise da variância da resistência à compressão (MPa) e das velocidades de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais, V ₁ , V ₂ e V ₃ (1000 m ^s).....	120
Tabela 4.18: Temperatura de queima, RES (MPa), velocidades pulso ultrassônico, resultados obtidos por meio da equação (4.1) e o erro (%).	121
Tabela 4.19: Resistência à compressão média, resistência característica f _{bk} segundo a ABNT NBR 15270:2005, resistência característica segundo análise de Weibull Máxima Verossimilhança (Limite Inferior) e Método Gráfico de Probabilidades.	123
Quadro 2.1: Principais setores cerâmicos, matérias-primas e processos de fabricação.	12
Quadro 2.2: Classificação granulométrica brasileira ABNT NBR 6502:1995.....	20
Quadro 2.3: Reações químicas causadas pelo aumento da temperatura.....	27
Quadro 2.4: Lista dos dez elementos mais abundantes na crosta terrestre em porcentagem ponderal.....	38
Quadro 2.5: Faixas de composições químicas de algumas argilas e suas localizações.....	38
Quadro 2.6: Alguns tipos de argila e tradução em inglês.....	39
Quadro 2.7: Características do equipamento de ultrassom.....	54
Quadro 3.1: Distribuição dos dados experimentais (y _{ij}).....	87

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

γ	Massa específica da água
ρ	Densidade do material
ν	Coeficiente de Poisson
a.C.	Antes de Cristo
AA (%)	Índice de absorção d'água
AB	Área bruta do bloco cerâmico estrutural
ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Absorção 24h (%)
ACS	<i>American Ceramic Society</i>
AL	Área líquida do bloco cerâmico estrutural
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
APL	Arranjo Produtivo Local
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	<i>British Standards Intituition</i>
C	Comprimento do bloco cerâmico estrutural
C.V.	Coeficiente de Variação em porcentagem (%)
CEF	Caixa Econômica Federal
D	Desvio do esquadro
d.C.	Depois de Cristo
DELI	Desvio do Esquadro Lado Informativo
DELL	Desvio do Esquadro Lado Liso
DEN	Densidade do bloco cerâmico estrutural
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRM-RJ	Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro
DRX	Difração de raios-X
DTTM	Departamento de Tecnologia e Transformação Mineral
E_d	Módulo de elasticidade dinâmico
EDX	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X
END	Ensaio não destrutivo
ETENE	Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste
f	Frequência
F	Planeza das faces
f_{bk}	Resistência Característica à Compressão Simples (NBR 15270:2005)
FGTS	Fundo de Garantia do Tempo de Serviço
FUNDECAM	Fundo de Desenvolvimento de Campos
FV	Fonte de Variação
GL	Grau de liberdade
H	Altura do bloco cerâmico estrutural

Hz	Hertz - “ciclos por segundos”
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
IP	Índice de plasticidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISSS	<i>International Society of Soil Science</i>
JCPDS	<i>Joint Comitee of Powder Diffraction Standards</i>
kN	Quilonewton
kV	Quilovolt
kVA	Quilovolt-ampere
kW	Quilowatt
L	Largura do bloco cerâmico estrutural
LC	Limite de contração
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
m_a	Massa aparente do bloco cerâmico estrutural
m_{ar}	Massa seca ao ar do bloco cerâmico estrutural
M_f	Massa de solo depois da queima
MGP	Resist. Característica Método Gráfico de Probabilidades de Weibull
M_i	Massa de solo antes da queima
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MME	Ministério das Minas e Energia
MPa	Megapascal
m_s	Massa seca do bloco cerâmico estrutural
m_u	Massa saturada do bloco cerâmico estrutural
MV	Resistência Característica pela Máxima Verossimilhança de Weibull
n	Número de blocos testados em cada temperatura
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NBR	Normas Brasileiras
NM	<i>Comité Mercosur de Normalización</i>
°C	Temperatura em graus Celsius
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PBQP-H	Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat
PF	Perda ao fogo
PIB	Produto Interno Bruto <i>per capita</i>
PLI	Planeza das Faces Lado Informativo
PLL	Planeza das Faces Lado Liso
PSQ	Programa Setorial de Qualidade
PUNDIT	<i>Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester</i>
PUNDIT LAB ⁺	(PROCEQ, PUNDIT LAB ⁺ , SUÍÇA) (Fabricante, modelo, procedência)

QM	Quadrado Médio
R	Correlação de Pearson
R^2	Coefficiente de determinação (confiabilidade)
RES	Resistência à Compressão Simples em MPa
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i>
RPM	Rotações por minuto
SAEG	Sistema de Análises Estatísticas
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
Sindicer/RJ	Sindicato da Indústria de Cerâmica e Construção de Campos, RJ
T	Período
t	<i>Tempo decorrido</i>
USDA	<i>US Department of Agriculture</i>
V_1	Velocidade da onda ultrassônica longitudinal na direção da largura
V_2	Velocidade da onda ultrassônica longitudinal na direção da altura
V_3	Velocidade da onda ultrassônica longitudinal na direção do comprimento
V_c	Velocidade da onda de compressão
V_L	Velocidade de propagação da onda no ensaio direto (longitudinal)
Vol	Volume do bloco cerâmico estrutural
ΔM	Anisotropia total
μ	Média populacional da variável
\bar{y}	Média amostral
τ_i	Efeito do tratamento
e_{ij}	Erro de resíduo
N	Número total de parcelas
G L	Grau de liberdade
S Q	Soma dos quadrados
Q M	Quadrado médio
Δ_{DMS}	Diferença mínima significativa
β	Módulo de Weibull
θ	Parâmetro de escala de Weibull
δ	Parâmetro de localização de Weibull
Γ	Função Gama
$g \text{ cm}^{-3}$	Gramas por centímetro cúbico

RESUMO

A utilização do sistema construtivo em alvenaria estrutural, praticado no Brasil nos últimos anos, experimentou um grande avanço com as políticas habitacionais do governo federal. Diante desse fato, em 2003 foi elaborado um documento, que estabeleceu critérios e exigências para a construção de edifícios residenciais — de três a cinco pavimentos — constituídos de paredes resistentes em alvenaria estrutural. Em 2005, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) lançou a NBR 15.270 tratando de componentes cerâmicos, suas terminologias e métodos de ensaio, incluindo destrutivo e não destrutivo. Dessa forma, no que diz respeito à avaliação da condição do bloco cerâmico estrutural, o teste de ultrassom é uma ferramenta simples e econômica, que se contrapõe ao método de ensaio destrutivo proposto pela norma brasileira. O ponto principal deste trabalho é o de avaliar a viabilidade de um método com a utilização de pulso ultrassônico, no intuito de descrever as propriedades mecânicas e físicas do bloco cerâmico estrutural, bem como para verificar sua condição de homogeneidade. A resistência à compressão simples é a propriedade mecânica primordial do presente trabalho, seguida das propriedades físicas, dimensionais, absorção 24 horas, densidade e anisotropia total. Nesse sentido, medidas de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais do bloco (largura, altura, comprimento) foram realizadas com equipamento portátil, munido com um par de transdutores de 54 kHz, em blocos queimados nas temperaturas de 800, 850, 900, 950 e 1000°C, cujas medidas de fabricação são: largura (14 cm), altura (19 cm) e comprimento (29 cm). Também foram analisadas as características físicas, químicas e mineralógicas da matéria-prima empregada na indústria ceramista. Além dos fatores que influenciam a variação da velocidade da propagação da onda longitudinal, pelo método de transmissão direta, são apresentadas e discutidas as correlações estatísticas entre a velocidade e as propriedades física e mecânica. A principal conclusão deste trabalho é a confirmação de que, por meio do teste não destrutivo de ultrassom, é possível ser feita uma avaliação preliminar da resistência à compressão simples dos blocos cerâmicos estruturais de forma ágil, e ainda a verificação da homogeneidade, traduzida pela anisotropia total. Isso é de grande interesse, devido ser o ensaio destrutivo mais dispendioso e demandar mais tempo para sua realização.

ABSTRACT

The brick masonry, including structural applications practiced in Brazil, experienced a major breakthrough due to the housing projects for the low-income residents carried on by the Federal Government public policies. A document was drawn up on year 2003 with the objective of establishing the criteria and requirements for constructing three to five storeys residential buildings composed mainly by structural masonry system, in housing projects to be financed by the Federal Government. The Brazilian Association for Technical Norms came about with the NBR 15.270 on year 2005, which concerns the masonry's clay brick and its terminology, requirement and the use of destructive and nondestructive methods to evaluate it. With respect to the evaluation of the structural clay brick element condition, the ultrasonic pulse velocity is a simple and economical tool, which is the opposite of the method proposed by the Brazilian Standard. Thus, the central issue of the present research concerns the evaluation of the suitability of the ultrasonic pulse velocity method for describing the mechanical and physical properties of the structural clay brick element and for the assessment of its homogeneity. The mechanical property encompasses the simple compressive strength, and the physical properties include the dimensional measurements, 24 hours water absorption, density and the total anisotropy. For this purpose, measurements in three perpendicular directions (width, height, length) of the longitudinal ultrasonic pulse velocity were done by using an ultrasound generator with 54 kHz transducers. The clay brick samples — dimensions (14 x 19 x 29 cm) —, air dried in the brickmaking industry were fired under controlled temperatures of 800 to 1000°C. The characterization of the clayey raw material (used to prepare the samples by extrusion at the industry), was carried out in terms of physical, chemical and mineralogical characterization. A discussion of the factors that induce variations on the ultrasonic velocity is also provided. Additionally, statistical correlations between ultrasonic pulse velocity and mechanical and physical properties are presented and discussed. The major output of this work is the confirmation that ultrasonic pulse velocity can be effectively used as a simple and economical nondestructive method for a preliminary prediction of mechanical and physical properties, as well as a tool for the assessment of the structural clay brick element homogeneity, by the total anisotropy. This is of much interest due to the usual difficulties, cost and amount of time required by the destructive methods.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado um Breve Histórico do sistema construtivo em Alvenaria Estrutural, a sua conceituação, bem como a justificativa, os objetivos e a estrutura da tese.

1.1. ALVENARIA ESTRUTURAL

As edificações passaram por diversos sistemas de construção ao longo da história da humanidade, partindo das edificações de pedras ou tijolos cerâmicos autossustentáveis — dentre eles o adobe (Figura 1-1), que foi utilizado em diversas partes do mundo, especialmente nas regiões quentes e secas — assentados com barro e betume, até as argamassas de cal e, posteriormente, a utilização de aço e concreto armado, com o advento da industrialização no século XIX (FRANCO, 1987, 1992).



Figura 1-1: Adobes e moradia construída com esse sistema.

Fonte: Foto Angola (2009)

A alvenaria é um sistema construtivo que se encontra entre as formas mais utilizadas na elaboração de moradia, casa, palácios, enfim, tanto obras monumentais, quanto simples abrigo. Como exemplos, Ramalho e Corrêa (2003)

citam o farol de Alexandria (280 a. C.), o complexo de Gizé no Egito, onde se encontra a grande pirâmide do faraó Quéops (de pedra, 4500 a.C.), o Coliseu de Roma (82 d.C.). Além desses, pode-se citar as várias estruturas que compõem o sítio arqueológico de Chichén-Itzá (de pedra, anos 435 e 455), na província de Yucatan-México, onde a pirâmide de Kukulcán, o Templo de Chac Mool, a Praça das Mil Colunas, e o Campo de Jogos dos Prisioneiros são exemplos arquitetônicos da Civilização Maia, Figura 1-2.

Todas essas obras admiráveis, diante dos desafios da época em que foram erguidas, são nos dias atuais patrimônios históricos da humanidade. Sem contar o farol de Alexandria, as últimas obras citadas permanecem edificadas até os dias de hoje, e são obras em alvenaria motivo de roteiro turístico mundo afora (RAMALHO e CORRÊA, 2003).



Figura 1-2: Pirâmides do Egito, Coliseu de Roma, Pirâmide de Kukulcán no México.

Nesse contexto, os materiais constitutivos da alvenaria variaram ao longo das épocas. Como exemplo, o “tijolo”, que engloba um grande número de produtos obtidos da mistura de argilas, preparadas, moldadas, extrudadas, secas e queimadas em fornos, ou mesmo prensadas a seco (RADIVOJEVIĆ e KURTOVIĆ-FOLIĆ, 2006).

Organizar uma produção de tijolos nos tempos antigos não era uma tarefa muito difícil, mas o segredo da qualidade e da produção em grande quantidade já era dependente de um bom controle da organização e de toda a linha de processo. Essa era a única maneira de prover uma boa qualidade do produto final, apesar de não haver um controle sistematizado através de ensaios laboratoriais nos tempos antigos. Mesmo assim, a alvenaria construída com esse tipo de material mostrou ser uma das construções mais duráveis do mundo (RADIVOJEVIĆ e KURTOVIĆ-FOLIĆ, 2006).

Tais edificações eram erguidas a partir de experiências passadas de geração em geração, baseadas em padrões construtivos de cada época. Sabe-se que a capacidade de resistência da alvenaria e dos seus materiais constitutivos era baseada puramente no empirismo. Com o passar das épocas houve avanço nesse tipo de sistema construtivo e nos dias atuais os “tijolos” fazem parte da “Moderna Alvenaria Estrutural”, tendo que se enquadrar em vários requisitos estipulados por normas nas mais diversas regiões do mundo, com climas diferenciados, sujeitos tanto a abalos sísmicos, quanto a outros eventos ambientais agressivos (ROMAN, 1983).

A qualidade desse tipo de material produzido pelo homem pode ser verificada através de ensaios que forneçam dados físicos, químicos e morfológicos. Dessa forma, a escolha do tipo de análise depende do escopo do objetivo final que se quer alcançar. O aperfeiçoamento do desempenho da alvenaria estrutural como um todo é extremamente dependente do arranjo compatível dos seus elementos constituintes e das interações físico-químicas que se processam entre eles (CAMACHO, 1986). Segundo Camacho (1995) as normalizações brasileiras só começaram a surgir no final da década de 70 em São Paulo e em 1983, em Porto Alegre.

A ampliação de formas de se obter informações confiáveis e rápidas sobre esses elementos é imprescindível para que a alvenaria estrutural seja mais amplamente utilizada como meio construtivo, uma vez que oferece vantagens em termos de execução e economia. Haja vista que um dos elementos da alvenaria estrutural, o “tijolo” (bloco cerâmico estrutural), encontra ampla reserva de matéria-prima disponível para sua confecção e muitas indústrias cerâmicas implantadas no mundo, bem como no Brasil, para produzi-lo. No entanto, apesar de ser um elemento construtivo utilizado em todo mundo, ainda é motivo de muitos estudos e muitas avaliações, objetivando aperfeiçoamento de seu desempenho para que seja cada vez mais aplicado nas edificações (TAUIL, 2010).

A alvenaria estrutural é um processo construtivo em que as paredes são elementos portantes, capazes de resistir a outras cargas além do seu peso próprio (PRUDÊNCIO *et al*, 2002). Segundo Almeida (2002), a alvenaria estrutural praticada no Brasil iniciou-se impulsionada pela implementação das políticas habitacionais do Governo, comandadas pelo extinto Banco Nacional da Habitação (BNH).

Nesse sentido, em relação às políticas habitacionais, foi elaborado um documento por Sabbatini (2003) com o objetivo de estabelecer os critérios e

exigências para a construção da estrutura de edifícios habitacionais, quando esta for constituída, essencialmente, de paredes resistentes de alvenaria, nos empreendimentos objeto de financiamento, ou contratação, pela Caixa Econômica Federal. Na Figura 1-3 observam-se edifícios com quatro pavimentos em alvenaria estrutural onde são utilizados blocos cerâmicos estruturais.

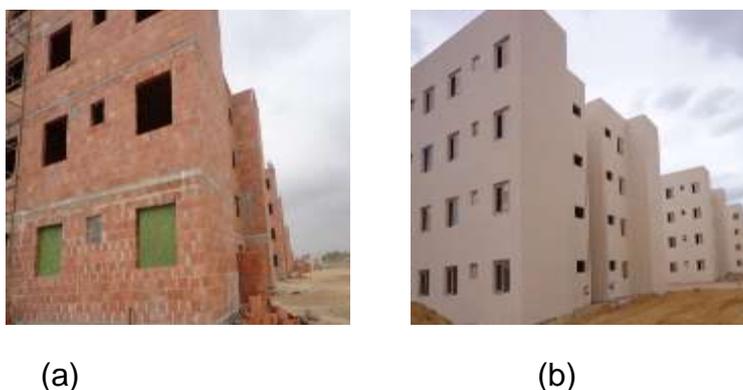


Figura 1-3 : Edifícios com quatro pavimentos em alvenaria estrutural.
(a) sem o revestimento; (b) em fase de acabamento.

Segundo Sabbatini (2003), quanto aos blocos cerâmicos estruturais, entre outras, são exigências: a) que tenham produção industrial por indústria legalmente estabelecida, com emissão de Notas Fiscais; b) que sejam fabricados em uma planta industrial que garanta uma produção com adequado grau de uniformidade por meio do controle tecnológico contínuo, a partir da correta seleção e tratamento de argilas, controle da secagem e queima uniforme dos blocos. Além das exigências relacionadas, há menção relativa ao coeficiente de variação, que não deve exceder 20% para a resistência à compressão dos blocos estruturais, uma vez que acima desse valor constitui-se indicação de produção inadequada de blocos com função estrutural.

A qualificação de indústrias cerâmicas que atendam a esta exigência deverá ser efetuada em conformidade com os termos do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) e do Programa Setorial de Qualidade (PSQ) das Indústrias de Cerâmica Vermelha. Portanto, a qualidade técnica do bloco estrutural — propriedade mecânica de resistência à compressão simples, taxa de absorção, dentre outros — constitui-se na mola mestra para o desenvolvimento do sistema construtivo em alvenaria estrutural, embora sua atuação não seja isolada do conjunto que a compõe (SABBATINI, 2003).

Para atestar a propriedade mecânica de resistência à compressão simples dos blocos estruturais em laboratórios, por ensaios destrutivos, uma expressiva demanda de tempo e dinheiro é exigida. Ensaios não destrutivos (END) podem reduzir o tempo e o custo de avaliação do lote — conjunto de blocos do mesmo tipo, qualidade e marca, fabricados nas mesmas condições — na própria indústria cerâmica.

Muitos métodos de avaliação da condição estrutural foram desenvolvidos especificamente para alvenaria estrutural, mas outras abordagens foram “emprestadas” de áreas, como arqueologia, biologia, agronomia, etc., ou vindas de aplicações na construção civil (cimento Portland, concreto, argamassa, rochas, etc.). A velocidade de pulso ultrassônico é uma boa técnica para se investigar localização de fissuras, problemas relacionados à durabilidade do material, resistência mecânica, profundidade de rachaduras, condições da superfície do material, dentre outros (BINDA *et al.*, 2003).

Nesse sentido, o ensaio não destrutivo por ultrassom foi selecionado para o estudo como forma de avaliação da qualidade técnica do bloco estrutural cerâmico, referente especificamente à resistência mecânica, mencionada anteriormente, produzido em indústria comercialmente estabelecida na cidade de Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

Esse tipo de ensaio não destrutivo, se implantado, dará celeridade à avaliação do lote produzido na indústria quanto aos requisitos normativos, uma vez que, por se tratar de um aparelho portátil possibilitará a sua utilização na própria indústria para avaliação da resistência mecânica do bloco cerâmico por meio da aplicação dos resultados das velocidades das ondas ultrassônicas em uma equação predeterminada. Apenas o lote não conforme teria necessariamente que passar por outros tipos de ensaios para aprofundamento da sua caracterização e classificação. Pesquisa correlacionando velocidade de pulso ultrassônico, com resistência à compressão e absorção 24h, de blocos cerâmicos estruturais para uso em sistema construtivo tipo alvenaria estrutural, não foi encontrada. Pretende-se, dessa forma, contribuir para que mais indústrias ceramistas façam a opção pela manufatura de blocos estruturais autoportantes, uma vez que a agilidade na avaliação dos lotes se constituiria em melhoria de competitividade para esse tipo de setor produtivo, com oferta de um produto com garantia devidamente comprovada.

A região em foco ocupa uma área acima de 4 mil km² do território Norte do Estado do Rio de Janeiro, com uma população maior que 450 mil habitantes, segundo o IBGE (2010). Com o crescente número populacional, a demanda por moradia também aumenta, naturalmente.

A localização do município em questão pode ser observada na Figura 1-4.

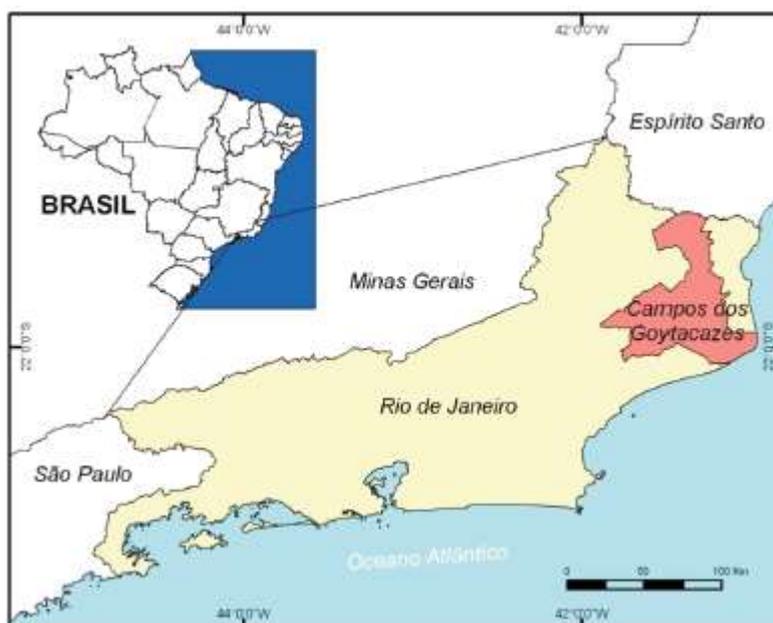


Figura 1-4: Localização do município.

Fonte: Oficina de Geologia e Geoprocessamento da UENF.

Uma das atividades econômicas dessa região é a produção de cerâmica vermelha, que tem sua característica evidenciada pela cor avermelhada de seus produtos. No Brasil, o setor de cerâmica vermelha é constituído por aproximadamente 7 mil empresas, com faturamento anual em torno de 18 bilhões de reais (IBGE, 2008). Segundo informação do Sindicato dos Ceramistas de Campos o número de empresas associadas na região é de 112, cujas produções giram em torno de artefatos tais como: tijolos maciços, blocos cerâmicos de vedação, blocos cerâmicos estruturais, telhas, lajotas para lajes pré-moldadas, dentre outros.

1.2. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia de avaliação de lote de blocos cerâmicos estruturais produzidos por uma indústria ceramista no município de Campos dos Goytacazes, RJ, por meio da técnica de ultrassom, com

vistas a agilizar a sua classificação e liberação, levando em conta a associação das propriedades físicas e mecânicas exigíveis pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 15.270:2005 com a velocidade do pulso ultrassônico.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do presente trabalho se encontram relacionados a seguir:

- a. caracterizar física, química e mineralogicamente a matéria-prima utilizada na indústria ceramista (Cerâmica Pau Brasil de Goytacazes) para a fabricação de blocos cerâmicos estruturais que são disponibilizados comercialmente;
- b. determinar as características geométricas das amostras de blocos cerâmicos estruturais da indústria ceramista;
- c. determinar as velocidades de pulso ultrassônico nas direções da largura, comprimento e altura dos blocos cerâmicos estruturais da indústria ceramista;
- d. determinar as propriedades físicas e mecânicas dos blocos cerâmicos estruturais da indústria ceramista;
- e. utilizar análise estatística para estabelecer correlações entre parâmetros obtidos em ensaios realizados;
- f. propor equações empíricas para descrever as relações entre as propriedades acústicas e mecânicas.

1.4. JUSTIFICATIVA

A racionalização do uso do sistema construtivo em alvenaria estrutural, com o emprego de blocos cerâmicos estruturais, poderá proporcionar benefícios ambientais, financeiros e sociais nos processos de construção de edificações visando o suprimento da variedade de padrões construtivos, desde faixa de baixa, até alta renda. Neste contexto, a pesquisa sobre a viabilidade de utilização de um ensaio não destrutivo (END) — teste de ultrassom — na avaliação dos blocos cerâmicos estruturais, poderá possibilitar, por exemplo, o agrupamento de tais blocos em lotes por faixa de características físicas como a resistência mecânica à compressão simples e absorção 24h, que se constituem nas principais exigências da ABNT NBR 15.270:2005 para que o bloco cerâmico seja empregado no sistema construtivo em alvenaria estrutural.

A caracterização do lote no local da produção, ou seja, no processo produtivo da indústria, permitirá o seu controle prévio, possibilitando a interferência de forma proativa na correção de eventual não conformidade. O teste de ultrassom é realizado com equipamento portátil, viabilizando o seu uso *in loco*, desde que guardada as recomendações normativas para sua adequada realização. Dessa forma, a indústria ceramista ganhará competitividade ao agregar o controle das principais características físicas dos blocos cerâmicos estruturais na sua rotina produtiva.

O tipo de controle da produção via teste de ultrassom permitirá à indústria atender à solicitação da construtora de um lote com resistência acima da exigida pela norma brasileira, que hoje é de no mínimo 3 MPa.

Apenas lote com resultados de resistência abaixo das exigências normativas teria necessariamente que passar por ensaio destrutivo convencional.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos, sendo o primeiro um capítulo introdutório, onde se apresenta um breve histórico do sistema construtivo em Alvenaria Estrutural, assim como a sua conceituação, tipo de unidade estrutural utilizada, em particular o bloco estrutural cerâmico, relevância do trabalho seus objetivos e justificativa. A estruturação desta tese também é apresentada no Capítulo 1.

No Capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica, onde os tópicos foram selecionados por uma avaliação preliminar dos conceitos considerados fundamentais para o desenvolvimento do trabalho, que envolve bloco cerâmico estrutural, especificamente, e a indústria de cerâmica vermelha em Campos dos Goytacazes-RJ, particularmente. Neste capítulo apresentam-se também os tipos de ensaios utilizados para caracterização da matéria-prima empregada na confecção de blocos cerâmicos estruturais, e para a caracterização física, dimensional e mecânica dos blocos, além dos ensaios onde se utiliza a velocidade de pulso ultrassônico. Várias publicações são apresentadas mostrando o panorama internacional e nacional. Buscou-se fundamentação em publicações consideradas clássicas dentro do tema e, ainda, naquelas mais recentes.

O programa experimental adotado é apresentado no Capítulo 3. Nele consta a caracterização da massa argilosa, a preparação das amostras de blocos cerâmicos

estruturais com queima em forno a gás na faixa de temperatura de 800 a 1000°C e a avaliação de suas propriedades, como: absorção 24h, densidade, área bruta, área líquida, desvio do esquadro, planeza das faces, resistência à compressão simples, velocidade de pulso ultrassônico nas três direções principais (Largura, Comprimento e Altura). Descreve-se a metodologia para os tratamentos estatísticos das variáveis (atributos, parâmetros).

Os resultados alcançados são apresentados no Capítulo 4, assim como as considerações gerais, estando inclusos os resultados da caracterização da matéria-prima e os resultados dos ensaios nos blocos cerâmicos estruturais, ou seja, dimensões, desvios do esquadro, planeza das faces, áreas brutas, áreas líquidas, densidade, resistência à compressão, velocidade de pulso ultrassônico.

As conclusões são apresentadas no Capítulo 5, onde se mostra uma síntese do trabalho e a análise dos resultados da pesquisa. No Capítulo 5 são apresentadas também sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre: as características da cerâmica; o papel desempenhado pela indústria de cerâmica vermelha no setor de construção civil; os métodos utilizados na caracterização dos blocos cerâmicos estruturais.

2.1. MATERIAIS CERÂMICOS

Quando se pensa em “cerâmica” a imagem que se pode vislumbrar vai desde um simples objeto utilitário cotidiano, como um prato, até placa de revestimento cerâmico de alta tecnologia empregada nos ônibus espaciais *Columbia*, *Challenger*, *Discovery*, *Atlantis* e *Endeavour*, que foram usados como lançadores de satélites e outras funções pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA)¹. Existe um imenso leque de possibilidades dependendo do tipo de matéria-prima utilizada e do processo tecnológico de fabricação. Portanto, ao se cogitar em tecer considerações sobre cerâmica há que se especificar do que se está tratando. Segundo Callister (2012), os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos e não-metálicos, onde a maioria das cerâmicas consiste em compostos que são formados entre elementos metálicos e elementos não-metálicos, para os quais as ligações interatômicas ou são totalmente iônicas ou são predominantemente iônicas com alguma natureza covalente.

Conforme a Sociedade Americana de Cerâmica (*American Ceramic Society*), materiais cerâmicos são de natureza cristalina, portanto, têm uma estrutura ordenada e são compostos formados por elementos metálicos e não-metálicos tais como o alumínio e oxigênio (alumina, Al_2O_3), o cálcio e o oxigênio (CaO), e o silício e o azoto (nitreto de silício Si_3N_4). A *American Ceramic Society* (2013) define materiais cerâmicos como todos os materiais de emprego em engenharia ou produtos químicos inorgânicos, utilizados perante tratamento térmicos elevados. Em geral, as propriedades dos materiais cerâmicos variam muito pelas diferenças das ligações químicas.

¹ Disponível em: www.nasa.gov

O termo “cerâmica” é originado da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria-prima queimada”. Os materiais que formam os produtos cerâmicos tradicionais são as argilas. Quimicamente as argilas são formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio (argilominerais), contendo ainda, certos teores de alcalinos e alcalinos terrosos (SANTOS, 1992).

Dependendo do produto a ser obtido e das propriedades desejadas, as matérias-primas são selecionadas e submetidas a uma série de operações, sendo que, pelo menos em uma delas ocorre tratamento térmico em temperaturas elevadas. Nesta operação pode ocorrer uma série de alterações nas características das matérias-primas, principalmente nas naturais, como: perda de massa, alteração na composição química, surgimento de novas fases cristalinas e formação de fase vítrea. Portanto, em função do tratamento térmico e das características das diferentes matérias-primas são obtidos produtos para as mais diversas aplicações. As principais etapas do processamento dos materiais cerâmicos incluem de uma forma geral a preparação das matérias-primas e da massa, a conformação, o processamento térmico e o acabamento (MOTTA *et al.*, 2001).

Ainda, segundo Motta *et al.* (2001), o setor cerâmico é amplo e heterogêneo o que induz a dividi-lo em subsetores ou segmentos em função de diversos fatores, como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização.

O Quadro 2.1 relaciona os setores cerâmicos, bem como seus produtos, as respectivas matérias-primas utilizadas e seu processo de fabricação. A partir da matéria-prima utilizada, identificam-se as cerâmicas tradicionais (ou silicáticas) de base argilosa, tais como cerâmica estrutural ou vermelha, cerâmica branca e de revestimentos. Observa-se que a cerâmica tradicional engloba grupos que utilizam matérias-primas de base argilosa como Cerâmica Vermelha, Cerâmica Branca e Revestimento Cerâmico. Estes grupos são grandes consumidores de matérias-primas minerais e a grande maioria das unidades fabris, bem como as minerações, concentram-se geograficamente nas regiões Sul e Sudeste (MOTTA *et al.*, 2001).

Quadro 2.1: Principais setores cerâmicos, matérias-primas e processos de fabricação.

Classificação		PRODUTO	Matéria-prima										Moagem via úmida	Moagem via seca	Processo de conformação				Temperatura de Queima (°C)							
Tipo de cerâmica	Grupo** / Setor		Plástica			Não-Plástica									Extrusão	Tornearia	Prensagem	Colagem	800	900	1000	1100	1200	>1200		
			Argila comum	Argila plástica	Caulim	Feldspato (***)	Filito	Talco	Calcário	Quartzo	Outros															
Cerâmica silicática de base argilosa (ou tradicional)	1	Cerâmica Vermelha	Blocos, lajes	P											P											
			Telha	P				O								P		P								
			Agregado leve	P												P									O	
	2	Cerâmica Branca	Grês Sanitário		P	S	P	P	O				S	O	P											
			Porcelana Mesa		P	P	P						P		P		S	S								
			Porcelana Eletr.		P	P	P						P		P		S	S								
			Faiança		P	O	S	S	S	P	S				P											
	3	Revestimentos	Pisos Rústicos	P	O									O		P										
			Pisos Via seca	P											P											
			Azulejo		P	P				O	S	S			P											
			Piso Gresificado	O	P	S	S	P	O				S		P		O									
			Grês Porcelânico		P	S	P		O				S	O	P											
Outras		4 Refratários			O							O	P													
		5 Isolantes				O						O	P													
		6 Especiais										O	P													
		7 Cimento	S								P	S	O		P											
		8 Vidro									S	P	P													
P = Processo ou composição principal (>20%)			S = Processo ou composição secundária (<10%)										O = Processo ou composição ocasional													

Fonte: MOTTA, José Francisco Marciano; ZANARDO, Antenor; CABRAL JÚNIOR, Marsis. As matérias-primas cerâmicas: parte I - o perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. Cerâmica Industrial, São Carlos, v.6., n.2, mar./abr., 2001.

Nota: (*) e (**) Classificação de Schuller & Henniche; (***) O feldspato (ou concentrado de feldspato) é usado apenas nas porcelanas e, eventualmente, no grês porcelânico, enquanto que nos demais produtos

Até as últimas cinco décadas os materiais mais importantes que se enquadravam nessa categoria eram conhecidos por “cerâmicas tradicionais”, e eram aquelas para os quais a matéria-prima primária era a argila. Os produtos considerados cerâmicos tradicionais são a louça, a porcelana, os tijolos, as telhas e os azulejos e, ainda, os vidros e os cerâmicos de alta temperatura. Recentemente uma nova geração desses materiais foi desenvolvida, e o termo “cerâmica” tomou um significado muito mais amplo. As indústrias de componentes eletrônicos, de computadores, de comunicação, a indústria aeroespacial e uma série de outras indústrias dependem do uso desses materiais (CALLISTER, 2012).

2.1.1. Principais propriedades dos materiais cerâmicos

As propriedades dos materiais cerâmicos variam bastante devido às diferenças de ligações químicas. Em geral, os materiais cerâmicos são duros e frágeis, com pouca tenacidade e pouca ductilidade. São bons isolantes térmicos e elétricos, devido à ausência de elétrons de condução. Têm geralmente temperaturas de fusão relativamente altas e grande estabilidade química em muitos ambientes hostis, devido à estabilidade das suas fortes ligações químicas (SMITH, 2012).

Para classificar um produto cerâmico deve-se levar em consideração o emprego dos seus produtos, natureza de seus constituintes, características texturais do biscoito (massa base), além de outras características cerâmicas, técnicas e econômicas (SEBRAE, 2008).

Portanto, podem-se classificar os materiais em dois grupos: os cerâmicos tradicionais e os cerâmicos técnicos, sendo que os cerâmicos tradicionais utilizam como matéria-prima a argila, sílica e feldspato e os cerâmicos técnicos são compostos por materiais puros ou quase puros (XAVIER, 2006).

Por meio de um processamento adequado, segundo Hollanda (1999), as propriedades dessas matérias primas são alteradas em sua composição química, em sua estrutura cristalina e no arranjo das diversas fases componentes. Geralmente, em uma das etapas do processamento, os materiais são submetidos a temperaturas elevadas para que as propriedades desejadas sejam desenvolvidas. Portanto, a queima é a operação fundamental e que define as características dos produtos cerâmicos, já que é nessa fase que eles sofrem transformações físico-químicas que alteram suas propriedades mecânicas (CABRAL, 2005).

De acordo com Callister (2012), nos argilominerais e cristais não argilosos, as ligações químicas após queima, são iônicas com caráter covalente, envolve a troca de carga eletrônica entre pares de átomos. Assim, quando os cristais iônicos e covalentes são deformados por aplicação de uma tensão, ocorre fratura frágil² devido à separação de ligações de pares de elétrons, sem haver restauração. Esta fratura é provocada ao longo de planos cristalográficos ou de clivagem por: poros, diferenças de tamanhos de partículas, fendas, crescimento de trincas entre outros, considerados defeitos da estrutura.

Conseqüentemente são materiais de pouca deformabilidade, visto que estes materiais não absorvem energia suficiente para que haja deformações consideráveis. Os materiais cerâmicos rompem em geral, quando sofrem deformação da ordem de 0,1% (CALLISTER, 2012).

2.1.2. Materiais cerâmicos vermelhos

A cerâmica vermelha compreende todos os produtos feitos com matérias-primas argilosas, que após a queima apresentam coloração avermelhada. Portanto, a matéria-prima básica para a fabricação da cerâmica vermelha é a argila, que é um tipo de solo sedimentar desenvolvido em milhões de anos, proveniente dos mais diversos minerais das rochas possíveis de alterações. É um material natural e que pode ser identificado pela sua textura terrosa, de granulometria fina e possível de adquirir plasticidade quando misturada com água. Esse tipo de solo argiloso se constitui em depósitos de grande abrangência e baixo custo em várias regiões do Brasil. Devido às condições de formação da argila não se pode ignorar a importância de sua utilização de forma racional, uma vez que é proveniente de fontes naturais não renováveis (ALEXANDRE, 2000).

A região focalizada é uma planície deltaica e aluvionar de maior porte da bacia do delta do Rio Paraíba do Sul, constituída por sedimentos quaternários com abundância em material argiloso. Esta região representa uma antiga baía, sobre a qual o Rio Paraíba do Sul discorreu em épocas geológicas passadas, originando após regressão marinha, a ascensão continental e diversas formações deltaicas até atingir seu curso atual (LAMEGO FILHO, 1996).

² Neste modo de fratura o material se deforma pouco antes de fraturar. O processo de propagação de trinca pode ser muito veloz, gerando situações catastróficas.

Estudos realizados na região por Alexandre, (2000); Xavier, (2001); Vieira, (2001) e Toledo, (2003) indicam que os materiais cerâmicos regionais são considerados policristalinos, possuindo vários tipos de cristais designados argilominerais, tais como caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e illita, cuja cristalinidade é de longo alcance e também a presença de cristais não argilosos, quartzo (sílica livre), hidróxido de alumínio (gibbsite), hidróxido de ferro (goetite), rutilo, anatásio, matéria orgânica, entre outros.

Do ponto de vista da tecnologia de cerâmica vermelha entre outros, a fração argila compreende uma faixa de partículas do solo, classificada como frações de diâmetros esféricos equivalentes menores do que 0,002 milímetros, escala considerada pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), *US Department of Agriculture* (USDA), *International Society of Soil Science* (ISSS), *British Standards Institution* (BS) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Estudos realizados por Alexandre (2000), Ramos (2000), Xavier (2001), Vieira (2001) e Azeredo *et al.* (2012) mostram que as massas argilosas para fins de cerâmica vermelha da região se enquadram em tal requisito.

2.1.3. A indústria cerâmica

A abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais, fizeram com que as indústrias cerâmicas brasileiras evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial com apreciável quantidade exportada (BUSTAMENTE, 2000).

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (2015), no Brasil as regiões que mais se desenvolveram foram a Sudeste e a Sul, em razão da maior densidade demográfica, maior atividade industrial e agropecuária, melhor infraestrutura, melhor distribuição de renda, associado ainda às facilidades de matérias-primas, energia, centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas. Portanto, são nestas regiões onde se tem uma grande concentração de indústrias de todos os segmentos cerâmicos. Convém salientar que as demais regiões do país têm apresentado certo grau de desenvolvimento, principalmente no Nordeste, onde tem aumentado a demanda de materiais cerâmicos, principalmente nos segmentos ligados à construção civil, o que tem levado a implantação de novas fábricas cerâmicas na referida região.

De acordo com o Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE, 2010), o segmento de Cerâmica Vermelha, pelo grande número de unidades produtivas e sua distribuição nos vários Estados, de modo geral, apresenta deficiências em dados estatísticos e em indicadores de desempenho, ferramentas indispensáveis para acompanhar o seu desenvolvimento e monitorar a competitividade. Os dados estatísticos hoje disponibilizados pelos órgãos representantes desse setor (Associação Nacional da Indústria Cerâmica/ANICER; Associação Brasileira de Cerâmica/ABC; Ministério das Minas e Energia/MME) são baseados no crescimento do PIB (Produto Interno Bruto *per capita*) e na média deste com o índice da Construção Civil (produção).

Dispositivos legais exigem a qualificação no Programa Setorial da Qualidade (PSQ), que atesta a qualidade do produto cerâmico, mas o mercado ainda apresenta um cenário desfavorável. Em 2014, a primeira fase das ações de bloco cerâmico acendeu um alerta para o setor. Nos estados de Alagoas, onde foram coletadas e ensaiadas 32 amostras de 16 pontos de vendas, e Minas Gerais, 20 amostras em 12 vendas, as ações resultaram em 100% das amostras não conformes (ANICER, 2015). Em 2015 as ações prosseguem em outros estados da federação.

No mercado da construção civil, segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (2015), tais dispositivos legais exigem dos fabricantes de materiais, componentes e sistemas construtivos a comprovação da qualidade e de atendimento às normas, como a emitida pelo PSQ através do certificado de qualificação, para a participação em obras do programa habitacional Minha Casa Minha Vida, do Governo Federal, e em projetos de engenharia e arquitetura com financiamentos da Caixa Econômica Federal (CEF), como a resolução nº 735/2013, publicada pelo Conselho Curador do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS), que exige a qualificação no PSQ de todos os materiais usados em quaisquer imóveis financiados pela Caixa com recursos do FGTS.

O macrossetor cerâmico³ no Brasil tem uma grande importância econômica, com uma participação no Produto Interno Bruto (PIB) nacional da ordem de 1,0%, além de apresentar características de capilaridade no cenário da economia, com a participação de micro, pequenas, médias e grandes empresas, estando presente em praticamente todos os estados, tanto no interior como nas regiões metropolitanas e

³ Macrossetor Cerâmico: envolve cerâmica vermelha, cerâmica branca, cerâmica de revestimento, isolantes térmicos, refratários, especiais (fritas e corantes), abrasivos, vidro, cimento e cal.

em grande parte dos municípios do País. Já o setor de cerâmica vermelha responde por cerca de 0,4% do PIB do País, valor equivalente a R\$ 6,8 bilhões/ano (MME, 2008). Possui cerca de 5.500 fábricas registradas e cerca de outras 2.500 unidades de produção, incluindo olarias e microempresas de operação informal e/ou sazonal, além de não automatizadas, com processos arcaicos, manuais, sem extrusão mecânica e que, com frequência, não se constituem em empresas devidamente registradas. No total, o Setor de Cerâmica Vermelha proporciona 403 mil postos de trabalho (ETENE, 2010).

No Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos do (MME, 2014), verifica-se que em 2013, o setor de cerâmica vermelha no Brasil, teve uma produção da ordem de 71 bilhões de peças entre telhas e blocos / tijolos, utilizou 141 Mt de argila, apresentou um faturamento de R\$21 bilhões, um consumo de 354 peças/hab, e um quantitativo de empresas de 7400, que geraram cerca de 400000 empregos.

Conforme o Ministério das Minas e Energia (MME, 2009), a produção mensal média por empresa é de 1,3 milhão de peças / empresa, enquanto a produtividade média é da ordem de 15,3 milheiros / trabalhador. O consumo específico de lenha e resíduos vegetais dominantes no País é da ordem de 588 m³/empresa/mês (1,6 m³ / milheiro). O consumo de energia elétrica do setor é da ordem de 113 milhões kWh / mês (47,6% do setor cerâmico), com uma média de 16.600 kWh/empresa/mês e de 91kW / 99kVA de demanda média de potência ativa e reativa por empresa. A potência elétrica total (ativa e aparente) para atender as 5.500 empresas do segmento no País é da ordem de 619MW / 673MW, valores equivalentes a cerca de 0,77% da capacidade instalada no País e 0,36 % do consumo de energia elétrica no Brasil.

Quanto à produção regional de cerâmica vermelha, o Sudeste contribuiu com a maior parcela (44,4%), o Nordeste com 21,3% da produção nacional, índice semelhante à região Sul. No que se refere ao Nordeste, o Ceará e a Bahia assumem a condição de maiores produtores, cabendo a esses Estados quase que metade da produção da Região, conforme estimativa do Departamento de Tecnologia e Transformação Mineral – DTTM da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM e do Ministério das Minas e Energia – MME, para 2008.

Existem muitas divergências de dados referentes ao setor cerâmico. De acordo com informações obtidas no MME (2011), o qual citou como fonte a ANICER, o Brasil possui em torno de 7400 empresas de cerâmica vermelha. Entretanto, de acordo com dados do site da ANICER, o mesmo apresenta 6903 empresas, gerando 293 mil empregos diretos e perto de 900 mil indiretos. Apresenta um faturamento anual da ordem de R\$ 18 bilhões, o qual representa 4,8% do faturamento da Indústria da Construção Civil. Destaca-se, no entanto, que estas informações referem-se ao ano de 2008 (LACER, 2013). É importante observar, que mesmo com essa variação nos indicadores do segmento, não se pode negar a importância do setor na economia do país e seus reflexos no campo social.

Em 2007 foi anunciado o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), com investimentos iniciais de R\$ 500 bilhões, focado em infraestrutura e habitação com o propósito de elevar o nível de investimentos da economia e potencializar a competitividade dos produtos brasileiros. Em 2009, foi lançado o programa Minha Casa Minha Vida, com investimentos previstos de R\$ 34 bilhões. Em 2010 o governo federal lançou o PAC 2 com investimentos distribuídos entre 2011 e 2014 e pós-2014, somando R\$ 1,6 trilhão em obras. A estimativa é de uma demanda aquecida por produtos da transformação dos não metálicos. Cabe mencionar também, como fatores favoráveis ao aumento do consumo de materiais, as obras em várias capitais para a Copa do Mundo 2014 e a escolha do Rio de Janeiro para a Olimpíada em 2016 (MME, 2010).

De acordo com Motta *et al.* (2001), as indústrias do setor de construção civil no Brasil vêm lentamente investindo na gestão da qualidade e produtividade, caracterizada pela aplicação de programas de qualidade, melhores equipamentos, aperfeiçoamento e treinamento da mão-de-obra responsável pela produção, entre outros.

Segundo Doloreux (2004), o conceito de sistemas regionais de inovação evoluiu para um quadro analítico gerando a base empírica para a formulação de políticas de inovação para a evolução de uma atividade regional. No entanto, abordagens que utilizam este quadro analítico permanecem ambíguas em questões-chave como a dimensão territorial da inovação, por exemplo, a região e o papel aparentemente importante desempenhado pelas "Instituições" ou o contexto institucional no surgimento e sustentação da região. Um exame crítico deve ser conduzido sobre questões como validação empírica, dimensão territorial de sistemas

regionais de inovação e o papel das instituições, para uma maior compreensão da recente teorização sobre sistemas regionais de inovação.

Para Souza (2003), as regiões definidas como entidades socioeconômicas, não diferem somente com respeito as suas habilidades de gerar e aplicar tecnologia, mas também diferem em sua capacidade adaptativa, devendo o órgão público regulador atentar para as dificuldades locais e incentivar as pesquisas regionais para realmente atender a carência de tal atividade.

Caso não sejam observados os atributos regionais, empresas cerâmicas podem encerrar suas atividades, podendo provocar problemas socioeconômicos graves para a região onde está inserida. Ressalta-se também a necessidade de se buscar mecanismos de produção que diminua os desperdiços, nas diferentes fases do processo produtivo, desde a lavra até a distribuição, passando pelo controle de qualidade com enquadramento das peças (lotes) em função das faixas de resistência e suas destinações para fins mais adequados.

Na Tabela 2.1 apresenta-se o demonstrativo da estimativa das reservas aproveitáveis de argila no Brasil segundo o Anuário Mineral Brasileiro (AMB), Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).

Tabela 2.1: Demonstrativo da estimativa das reservas aproveitáveis de argila.

Reservas Medidas (DNPM - AMB, 2010 – Ano base 2009) Milhões de toneladas		737.245.968	
Reservas Lavráveis Recuperação de 70% - Milhões de toneladas		516.072.178	
ANO		Produção de Revestimentos Milhões de m ²	Consumo de Argila Milhões de toneladas
	2010	429.000.000	6.692.400
	2011	506.000.000	7.893.600
	2012	535.790.000	8.358.324
Consumo de Argila – Período de 2010 a 2012 Milhões de toneladas		22.944.324	
Reservas Disponíveis a partir de 2013 Milhões de toneladas		493.127.854	

Fonte: <http://www.dnpm.gov.br>

2.1.4. Conceito de argila

Em síntese, a indústria cerâmica requer para o seu funcionamento quantidades suficientes de solo apropriado, água e combustível. O solo de natureza argilosa apresenta características de plasticidade, isto é, ao ser misturado à água adquire a forma desejada, a qual se mantém após secagem e cozimento. A primeira característica que diferencia os solos é o tamanho das partículas que os compõem. Numa primeira aproximação, pode-se identificar que alguns solos possuem grãos perceptíveis a olho nu, chamados de solos grossos, e que os outros têm grãos tão finos que não é possível percebê-los a olho nu, chamados de solos finos (GOMES, 1986). Denominações específicas são empregadas para as diversas faixas de tamanho de grãos. Pela ABNT NBR 6502:1995 as partículas dos solos são identificadas como: pedregulhos, areias, siltes e argilas. O Quadro 2.2 apresenta a classificação granulométrica adotada no Brasil.

Quadro 2.2: Classificação granulométrica brasileira ABNT NBR 6502:1995

Fração		Dimensões equivalentes dos grãos (mm)
Pedregulho	-	2 - 20
Areia	Grossa	2 - 0,6
	Média	0,6 - 0,2
	Fina	0,2 - 0,06
Silte	Grosso	0,06 - 0,02
	Médio	0,02 - 0,006
	Fino	0,006 - 0,002
Argila	-	menor que 0,002

A argila trata-se de um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade; quimicamente são as argilas formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio (SANTOS, 1992). No entanto, não basta apenas uma definição para dar conta de todo universo das argilas. A fração argila do solo é constituída por partículas cristalinas extremamente pequenas de um número restrito de minerais conhecidos como “argilominerais”. Uma determinada argila pode ter em sua

composição partículas de um argilomineral ou uma mistura de diversos argilominerais.

Segundo Santos (1992), quimicamente, os argilominerais são compostos por silicatos de alumínio hidratados ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e ferro, contendo também uma fração de elementos alcalinos e alcalino-terrosos. Em uma fração argila, além dos argilominerais, podem ser detectados outros materiais e minerais, tais como matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais. Alguns minerais não-cristalinos ou amorfos podem estar contidos na fração argila. Esses minerais de origem e ocorrência natural na crosta terrestre podem conter pequenas impurezas, têm composição química definida e estrutura cristalina característica. Um ou mais minerais compõem um determinado tipo de rocha, que degradada pode originar a argila.

Dessa forma, argila é uma rocha finamente dividida constituída essencialmente por argilominerais e impurezas em pequenas proporções. A fração argila do solo, cujo diâmetro equivalente é inferior a 0,002 mm ($2\mu\text{m}$) pode ser obtida após sedimentação de uma dispersão de argila em água. A dispersão coloidal obtida após sedimentação contém a fração argila, que contém os argilominerais, bem como, eventualmente, matéria orgânica e outros minerais que possuem diâmetros equivalentes inferiores a 0,002 mm. As argilas, por terem partículas de pequenas dimensões, possuem grande área específica, que é definida como a área da superfície externa das partículas, referida à unidade de massa (SANTOS, 1992).

A análise química das argilas revela a existência de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de férrico (Fe_2O_3), cal (CaO), magnésia (MgO), álcalis (Na_2 e K_2O), anidrido carbônico (CO_2) e anidrido sulfúrico (SO_3). A sílica compõe, em geral, 40 a 80% do total da matéria-prima; a alumina aparece com 10 a 40% do total da matéria-prima; o óxido férrico está presente em quantidade inferiores a 7%; a cal tem teores geralmente abaixo de 10%; a magnésia, abaixo de 1%, e os álcalis apresentam teores da ordem de 10%. O óxido férrico não só é importante fator de coloração do produto cozido, como age como fundente, baixando o ponto de fusão da argila. A sílica não combinada ajuda a diminuir a retração durante a queima; associada à fundentes, forma o vitrificado interior da cerâmica (ARAÚJO *et al.* 2000). Estudos realizados na região de Campos dos Goytacazes por Azeredo *et al.* (2014a) corroboram com os dados apresentados por Araújo *et al.* (2000).

Segundo Araújo *et al.* (2000), as argilas possuem água de absorção ou de plasticidade, aderente à superfície das partículas, e água de constituição, que compõem a rede cristalina do mineral, como exemplo cita-se a água de constituição dos hidróxidos de alumínio e ferro. Algumas argilas possuem água zeolítica, com suas moléculas intercaladas nos vazios da rede cristalina. O calor fornecido pelo forno durante o processo de cozimento elimina todo tipo de água presente nas argilas. A água de absorção é eliminada à temperaturas entre 100 e 110°C; a zeolítica, entre 300 e 400°C. Esse fenômeno é reversível, já que a estrutura cristalina ainda não foi quebrada e o material pode novamente hidratar-se. A água de constituição é eliminada a temperaturas entre 400 e 700°C, dependendo do tipo de argila (caulinítica, montmorilonítica ou micácea), destruindo a estrutura cristalina do material.

Entre 900 e 1000°C, a estrutura cristalina transforma-se em massa amorfa, quando então a sílica e a alumina se recombina e cristalizam, formando novos minerais. A formação de vidro no interior da cerâmica, pela fusão da sílica livre (1200°C) com posterior solidificação, também contribui para a estabilidade estrutural das cerâmicas, principalmente as de alta vitrificação (ARAÚJO *et al.* 2000)..

2.1.5. Processo de fabricação do bloco cerâmico estrutural

As atividades de uma indústria que atua no setor de cerâmica vermelha tradicional iniciam na lavra da matéria-prima. Muitas vezes são lavrados dois ou três tipos de materiais argilosos para que se obtenha as características desejadas no produto final. Grande parte das matérias-primas utilizadas é natural, encontrando-se em depósitos espalhados na crosta terrestre. Os produtos de cerâmica vermelha, em geral, são fabricados a partir da composição de duas ou mais matérias-primas. No pátio de estocagem da indústria as matérias-primas argilosas são misturadas em proporções consideradas adequadas. Na Figura 2-1 observa-se a estocagem a céu aberto e o lançamento da matéria-prima no equipamento de moagem (desintegrador), que terá a função de diminuir o tamanho dos sólidos, desenvolvendo-se assim maior superfície de contato entre os grãos da argila, facilitando a reação química e a homogeneização entre os sólidos (Figura 2-1).

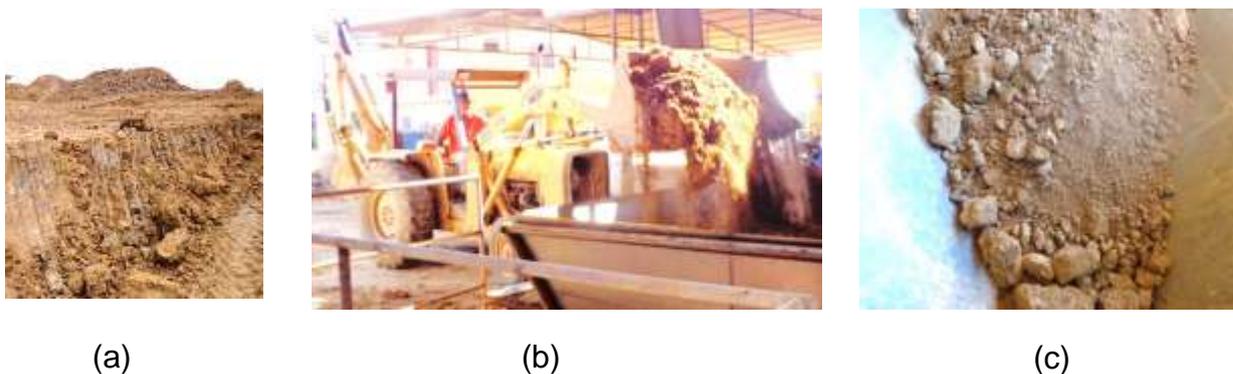


Figura 2-1: (a) Estocagem da matéria-prima; (b) Lançamento da matéria-prima no equipamento de moagem (desintegrador); (c) A matéria-prima em estado bruto dentro do equipamento de moagem (desintegrador).

Na sequência a matéria-prima é conduzida por correias transportadoras para os misturadores, que têm a função de homogeneizá-la, bem como a função de obter o índice de umidade desejado. A laminação da matéria-prima dos blocos cerâmicos é feita por meio do laminador, que por meio de velocidades diferentes de dois rolos laminadores consegue a desintegração da argila, proporcionando maior homogeneidade à massa. Na conformação dos blocos cerâmicos, a peça recebe forma e acabamento que não poderão ser modificados nas etapas posteriores. Há duas maneiras de se obter a moldagem dos blocos cerâmicos, através da prensagem, ou pelo processo de extrusão. A massa plástica é colocada numa extrusora, também conhecida como maromba, que é uma máquina constituída de uma carcaça metálica, cilíndrica, percorrida internamente por um eixo giratório, por onde a massa em lâminas é extrudada na forma de uma coluna através dos orifícios da boquilha, que é o molde dos blocos. Ao sair da boquilha, a coluna se movimenta sobre o transportador de rolo. Como resultado obtém-se a seção transversal com o formato e dimensões desejadas; em seguida, essa coluna recebe a identificação do bloco (Indústria, dimensões, data do lote) e depois é cortada por fios cortadores, nas dimensões adequadas ao tipo do bloco cerâmico desejado, tais como (14x19x29 cm), como pode-se observar na Figura 2-2 e outros tamanhos de formato regular (ABC, 2015). Azeredo *et al.* (2014b; 2015a) apresentam bloco cerâmico estrutural com dimensões nominais de 11,5x19,0x39,0 cm (largura, altura, comprimento) extrudados e o formato final, de acordo com a boquilha utilizada.



Figura 2-2: (a) Coluna saindo da extrusora; (b) Formato do bloco (14x19x29 cm) depois do corte por fios.

Após a etapa de formação, as peças em geral continuam a conter água, proveniente da hidratação da massa argilosa, sendo então colocados para secagem visando eliminar a água adicionada aos blocos cerâmicos durante a moldagem. Nessa etapa são obtidas as transformações desejadas, em estrutura e composição pela aplicação de energia térmica. Uma vez seco, os blocos cerâmicos adquirem consistência suficiente que permite o manuseio, transporte das peças e empilhamento no forno e está em condições de resistir às transformações físicas e químicas que ocorrem na queima.

A secagem é uma etapa bastante delicada e complexa no processo de fabricação dos blocos cerâmicos. É comum nesta etapa ocorrerem defeitos de secagem nos blocos cerâmicos e que são perceptíveis somente após a queima. Uma secagem demasiadamente rápida causa retração diferencial de tal ordem que produz trincas nos produtos. Um processo de secagem eficiente deve equilibrar as taxas de evaporação e difusão, tendo a primeira, valor no máximo igual à última. A secagem pode ser realizada de duas formas: secagem natural ou secagem artificial. Na secagem natural, os blocos cerâmicos são dispostos em prateleiras, em galpões cobertos e secas ao ar. Na secagem artificial o controle da taxa de evaporação pode ser feito através do controle da umidade e pela taxa de escoamento do ar (HOLLANDA, 1999).

Na Figura 2-3 observam-se os blocos cerâmicos prontos, depois da primeira secagem ao ar, para serem secos em estufa a temperatura estimada progressiva de

60 a 105°C por um período de até 24 horas, constituindo-se em um pré-aquecimento antes de prosseguirem para a queima em si. Nesse método há um controle sobre a secagem e existe uma maior homogeneidade das peças.



(a)



(b)

Figura 2-3: (a) Blocos cerâmicos secos ao ar sobre vagonetes; (b) Estufa para a secagem dos blocos cerâmicos.

Segundo Hollanda (1999), a queima é a fase mais importante do processo de fabricação dos blocos cerâmicos, pois é nela que o bloco cerâmico adquire as propriedades adequadas a seu uso como dureza, resistência mecânica, resistência às intempéries e agentes químicos. O processo de queima é composto de três fases: o aquecimento; a queima em temperatura elevada; o resfriamento. Processo essencial para evitar o aparecimento de defeitos ou inutilização dos blocos cerâmicos. No forno de queima os blocos ficam por 24h com temperatura estimada alcançando em torno de 850°C.

Os fornos mais utilizados na fabricação de blocos cerâmicos são os intermitentes e contínuos. O forno intermitente é o tipo de forno mais antigo e mais utilizado por pequenas e médias indústrias cerâmicas. O processo de queima consiste em carregar o forno, queimar até a temperatura de estabilização, resfriar e então retirar os blocos (ABC, 2015).

O forno contínuo é o tipo mais moderno e é mais usado por grandes indústrias cerâmicas. Os blocos cerâmicos são colocados em vagões que se movimentam ao longo do forno, que é subdividido em zonas de préaquecimento, queima e resfriamento. A temperatura ao longo do forno túnel é acompanhada por medidores já instalados e fixos, e também por furos para acesso de termopar, ou medidores portáteis de temperatura, em alguns pontos estratégicos

predeterminados. O forno túnel caracteriza-se por apresentar grande produtividade e menor consumo de energia e mão-de-obra (Figura 2-4).



Figura 2-4: Saída do vagão do forno contínuo.

Após a queima e antes da estocagem, os blocos cerâmicos devem sofrer um criterioso processo de seleção, onde são eliminados os blocos cerâmicos com defeito, como fissuras, empenos e mal queimadas (Figura 2-5).



Figura 2-5: Blocos eliminados por defeitos.

Durante a operação do cozimento ocorre redução da porosidade, provocando aumento da densidade e uma considerável melhora na resistência mecânica. O

aumento da temperatura fornece energia para as reações químicas que ocorrem no material, alterando sua estrutura cristalina. As mudanças ocorridas no material podem ser observadas no Quadro 2.3 elaborado a partir de dados dos ensaios de Alexandre (2000) e Xavier (2006).

Quadro 2.3: Reações químicas causadas pelo aumento da temperatura

Temperatura (°C)	Reações Químicas
Até 100	Perda de umidade.
100 a 200	Remoção de água adsorvida.
450	Perda dos grupos hidróxidos.
500	Oxidação da matéria orgânica.
550	Início da formação da metacaulinita.
573	Inversão do quartzo para a forma estável a altas temperaturas.
900	Nucleação de mulita.
980	Formação da espinélio a partir da argila e início da contração.
1000	Formação de mulita.
1050 a 1100	Formação de fase vítrea a partir do feldspato, a mulita cresce e a contração prossegue.
1200	Mais fase vítrea, a mulita cresce, os poros vão se fechando e alguma dissolução de quartzo.
1250	60% da fase vítrea, 21% de mulita, 19% de quartzo, percentagem de porosidade mínima.
1400	Início da formação de cristobalita.

O transporte dos blocos cerâmicos até o local de estoque é feito com carrinhos de mão na maioria das olarias, e empilhadeiras em algumas indústrias, como pode ser observado na Figura 2-6.



Figura 2-6: Empilhadeira para transporte dos blocos cerâmicos.

Os blocos cerâmicos ficam armazenados no pátio das empresas até serem transportados aos consumidores. A estocagem dos blocos cerâmicos deve ser feita em superfície plana, limpa e livre de umidade. Os blocos cerâmicos devem ser estocados em pilhas com altura máxima de 1,80 m e com os furos na posição vertical. Observa-se na Figura 2-7 a estocagem dos blocos no pátio prontos para o transporte para o mercado de construção civil.

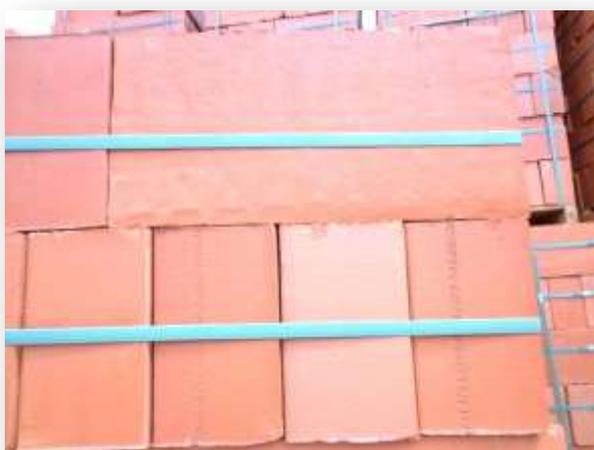


Figura 2-7: Detalhe da estocagem dos blocos cerâmicos.

O fluxograma apresentado na Figura 2-8 ilustra o processo de fabricação dos blocos cerâmicos estruturais. Observa-se o aspecto do tipo de bloco e as dimensões de fabricação (14x19x29 cm) no detalhe ampliado.

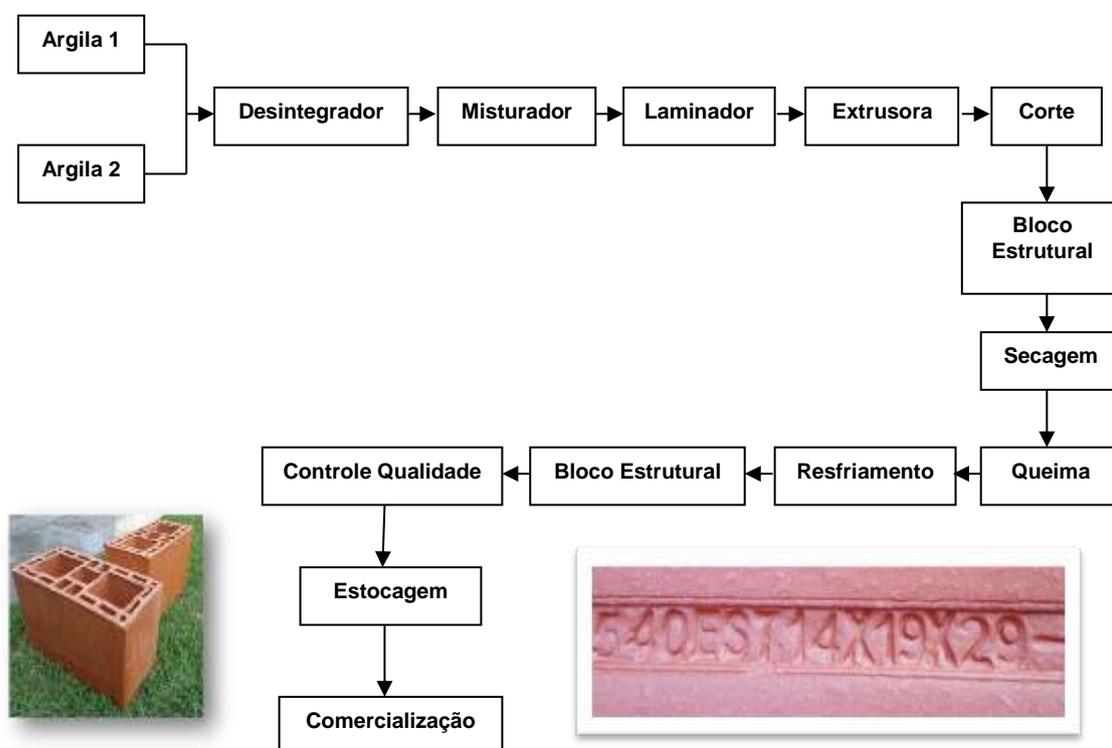


Figura 2-8: Exemplo de fluxograma de produção de blocos cerâmicos estruturais com dimensões de fabricação (14x19x29 cm).

2.1.6. Produção de cerâmica vermelha em Campos dos Goytacazes-RJ

Segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER) a região de Campos dos Goytacazes possui um universo das empresas que compõem um importante Arranjo Produtivo Local (APL) de base mineral do estado do Rio de Janeiro, constituindo-se em seu principal polo cerâmico (ANICER, 2015).

A equipe da Diretoria de Mineração, do Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (DRM-RJ) / Serviço Geológico realizou, durante o ano de 2014, 174 vistorias em cerâmicas e extrações de argila vermelha em Campos dos Goytacazes. Essa ação faz parte do convênio firmado entre o DRM-RJ, o Sindicato da Indústria de Cerâmica e Construção de Campos dos Goytacazes (Sindicer/RJ) e o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), com o objetivo de avaliar a renovação das licenças de operação das empresas na região bem como realizar o licenciamento

das que ainda não se encontram licenciadas (ANICER, 2015). Segundo o Sindicato/RJ, Campos possui 112 empresas sindicalizadas e outras tantas que não são sindicalizadas.

Existe uma política de soluções gerenciais, elaboradas pelo Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Estado do Rio de Janeiro (SEBRAE/RJ) em parceria com a ANICER e os sindicatos da indústria de cerâmica vermelha do referido Estado para qualificação de fábricas de artefatos cerâmicos e está composto por soluções personalizadas para o segmento, levando em consideração a dinâmica operacional e as características específicas da indústria ceramista, com informações sobre: planejamento estratégico; finanças; marketing e vendas; inovação tecnológica; qualificação nos Programas Setoriais de Qualidade / Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PSQs/PBQP-H); e eficiência energética (ANICER, 2015). O objetivo do programa é qualificar a gestão empresarial do ceramista fluminense através de um conjunto de ações, tendo como resultados esperados: qualificar os produtos nos PSQs/PBQP-H, melhorar a eficiência energética, aumentar a produtividade através da inovação tecnológica, o planejamento estratégico, finanças e marketing, além de execução de ensaios de produtos (ANICER, 2015).

A distribuição geográfica desse Arranjo Produtivo Local (APL) de base mineral indica claramente uma concentração industrial na região conhecida como “Baixada Campista”, localizada entre a cidade e o litoral, ao longo da rodovia que faz a interligação à região praiana de Farol de São Tomé, sendo esta a região de maior disponibilidade de matéria-prima e de mão de obra (PUPE, 2004).

O município apresenta grande potencial da atividade industrial de cerâmica vermelha, além dos condicionantes geológicos da região, se posiciona geograficamente em um raio 350 quilômetros de grandes centros consumidores como Rio de Janeiro-RJ, Grande Rio, bem como, Vitória-ES e Grande Vitória, além de algumas regiões de Minas e São Paulo, tornando os produtos ainda viáveis do ponto de vista da logística de transportes. Além disso, a região é provida de recursos como: política de desenvolvimento municipal, Fundo de Desenvolvimento de Campos (FUNDECAM), Câmara de Comércio, serviços de eletricidade, serviços de gás, disponibilidade de combustíveis, rodovias, construtoras, engenheiros e arquitetos, consultores, universidades e centros de pesquisa (PUPE, 2004).

Contudo, um dos grandes desafios do segmento ceramista é o de produzir uma grande quantidade de peças praticamente idênticas, com as mesmas características técnicas e estéticas, a partir de matérias-primas com características variadas (TEIXEIRA *et al.*, 2002).

Estudos relacionados aos blocos cerâmicos estruturais produzidos na região têm sido conduzidos por Azeredo *et al.* (2012; 2014a; 2014b; 2014c; 2015a; 2015b e 2015c).

2.1.7. Massas cerâmicas

A designação argila também é dada à fração do solo cujas dimensões sejam inferiores a 0,002 milímetros segundo a classificação da ABNT, ou seja, as partículas coloidais presentes no solo. Existem também outras escalas de classificação dos solos pela granulometria como: International Society of Soil Science, US Department of Agriculture, Continental e Massachuset Institute, que considera argila as partículas com diâmetro inferior a 0,002 mm.

A fração argila é composta por diferentes grupos de argilominerais (caolinita, esmectita, montmorilonita, illitas, etc.), óxidos, hidróxidos coloidais floculados, matéria orgânica nos mais diversos graus de alteração, materiais não cristalinos, ácidos, bases, sendo todos esses constituintes em proporções variadas (CALLISTER, 2012).

Os materiais argilosos utilizados na indústria de cerâmica vermelha são comercialmente e vulgarmente denominados de “barro” e que são também conhecidos como: “barro gordo” quando rico em substâncias argilosas de elevada plasticidade ou, “barro magro” quando o material argiloso contém certa quantidade de silte e areia fina dando um contato áspero ao tato. As argilas para telhas e tijolos são gordas, por exemplo, quando contém 80% de substâncias argilosas e magras quando contém 60% de areia e silte (SANTOS, 1992).

Normalmente as massas cerâmicas são constituídas por solo argiloso, em proporções variáveis, dependendo das características dos materiais (“barro gordo e barro magro”) e dos artefatos que se deseja produzir.

2.1.8. Massas cerâmicas da região de Campos dos Goytacazes-RJ

De acordo com Alves e Teixeira (2008) a região exhibe um patrimônio geológico diversificado devido aos diferentes ambientes geológicos, representados

por eventos que se estendem desde as áreas elevadas, do Pré-Cambriano até a planície litorânea Holocênica, com seus poderosos aquíferos, jazidas, lagoas e cordões litorâneos. A Figura 2-9 ilustra esse processo.

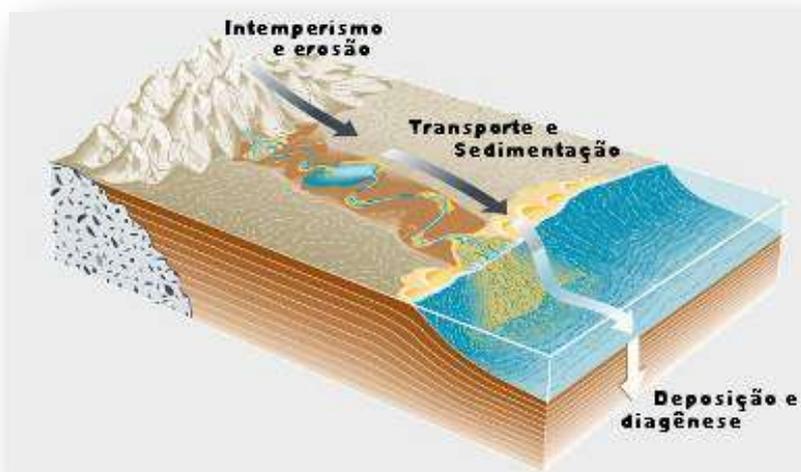


Figura 2-9: Bacia Sedimentar.
Fonte: www.google.com.br/imagens

Uma série de feições da planície holocênica pode ser destacada, cuja origem está intimamente associada à última transgressão marinha, há cerca de 5.100 anos, tais como a Lagoa Feia, a Lagoa de Cima, a Lagoa Salgada e as praias atuais. Além das feições, têm-se os sedimentos da planície de inundação do Rio Paraíba do Sul, usados como matéria-prima para a indústria cerâmica (ALVES e TEIXEIRA, 2008).

Na Figura 2-10 observa-se o rio Paraíba do Sul passando pelo centro da cidade de Campos dos Goytacazes e na Figura 2-11 a sua foz no município de São João da Barra, RJ.



Figura 2-10: Rio Paraíba do Sul e centro da cidade de Campos.
Fonte: <http://carlosferreirajf.blogspot.com.br>



Figura 2-11: Foz do Rio Paraíba do Sul em São João da Barra, RJ.

Fonte: www.folhadamanha.com.br

Segundo Alves e Teixeira (2008) o relevo continental da planície que constitui a feição geológica-geomorfológica dominante do município de Campos é composto de sedimentos holocênicos de origem deltaica e aluvionar. Numa grande enseada na parte sudeste do Município, posteriormente fechada pelos cordões litorâneos, hoje Lagoa Feia, desaguava em delta, o Rio Paraíba do Sul. Associado a formação de deltas, o curso do Rio derivou até a sua formação atual (Figura 2-11).

Os sedimentos holocênicos de base foram sendo soterrados sucessivamente pelos sedimentos das inundações tanto dos braços deltaicos como do próprio canal principal, dando origem então à planície de inundação atual. São, ainda, estreitamente ligadas ao processo de formação da planície de inundação e à deriva da foz do Paraíba, as transgressões e regressões marinhas, fatores de formação das lagunas e das restingas litorâneas (ALVES e TEIXEIRA, 2008).

Na Figura 2-12 observa-se o mapa do município Campos, RJ, com os municípios limítrofes e os rios da região.

em ambientes de água doce e pouco salobre, formados pelos depósitos de lagos e lagoas (RAMOS *et al.* 2006).

Segundo Ramos (2000), a região possui uma área de aproximadamente 620 Km² de sedimentos argilosos com cerca de 664 milhões de m³ de argilas plásticas e 927 milhões de m³ de argilas siltosas. Estudos realizados por Vieira (2001) indicam que os depósitos de argila da região de Campos/RJ perdurarão por mais 180 anos para uso em atividades de cerâmica vermelha.

Na Tabela 2.2 apresenta-se os componentes químicos da argila estudada por Xavier (2006), que se assemelham aos apresentados por Azeredo *et al.* (2014a; 2014c; 2015a; 2015b; 2015c).

Tabela 2.2: Componentes químicos da massa argilosa Xavier (2006).

Matéria Prima	P.F.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Argila – Pó Padrão	15,40	42,30	32,00	6,87	0,20	0,70	0,04	0,94	1,24

Verifica-se que a amostra da massa argilosa na quantidade de SiO₂ (42,30%) indica a provável presença de argilominerais tais como: caulinita (Al₂O₃. 2SiO₂. 2H₂O) e ilita, bem como a provável presença de quartzo livre na amostra total. A quantidade de Al₂O₃ (32,00%) apresenta-se quase totalmente formando argilominerais, podendo também ser devido a hidróxidos como gibsita (Al(OH)₃). O valor total de 74,30% (SiO₂ + Al₂O₃) indica o caráter refratário da matéria-prima (XAVIER, 2006).

A alta quantidade de óxido corante Fe₂O₃ (6,87%) caracteriza-se como agente fundente e indica a cor vermelha após queima do pó cerâmico, pode-se indicar também a presença de goetita (FeO.OH). Os óxidos de cálcio e magnésio (CaO + MgO) somam 1%, são agentes fundentes e baixam a refratariedade da argila na queima. Os álcalis presentes (Na₂O + K₂O) na quantidade de 0,98%, também são agentes fundentes, formando fase líquida na queima, reduzindo a porosidade do material (XAVIER, 2006).

O óxido corante Ti₂O na quantidade de 1,24% pode ser devido à presença de rutilo e/ou anatásio em massas cerâmicas de Campos/RJ (Toledo, 2003) e contribui para a cor amarela da matéria-prima e refratariedade na queima. A perda ao fogo (P.F.) de 15,40% indica a perda de água livre, adsorvida e de constituição da matéria-prima e, também, a degradação da matéria orgânica presente na amostra.

Os resultados da análise química da Tabela 2.2 da massa argilosa comparados com as análises químicas de argilas para cerâmica vermelha estudadas por Santos (1992), Alexandre (2000), Vieira (2001), Azeredo *et al.* (2012; 2014a; 2014c; 2015a; 2015b; 2015c) indicam que este material pode ser usado na indústria de cerâmica vermelha.

2.1.9. Características gerais de materiais cerâmicos

Desde os primórdios da humanidade os materiais cerâmicos são dos mais utilizados. Segundo Callister (2012) os materiais cerâmicos são inerentemente resilientes à oxidação e à deterioração a temperaturas elevadas, além de serem fortemente suscetíveis à fratura frágil. Em resumo, de acordo com Araújo *et al.* (2000) as características gerais de materiais cerâmicos podem ser relacionadas como segue:

- São menos densos que a maioria dos metais e suas ligas;
- Os materiais usados na produção das cerâmicas são abundantes e mais baratos;
- A ligação atômica em cerâmicas é do tipo mista: estando presentes a covalente e a iônica.
- Maior resistência ao calor que metais e polímeros;
- Alta capacidade calorífica;
- Baixo coeficiente de expansão térmica;
- Boa condutividade térmica.
- Propriedades mecânicas: descrevem a maneira como um material responde a aplicação de força, carga e impacto. Os materiais cerâmicos são:
 - Duros;
 - Resistentes ao desgaste;
 - Resistentes à corrosão;
 - Frágeis (não sofrem deformação plástica).

2.2. AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item apresentam-se os procedimentos para caracterização dos materiais, tanto a matéria-prima, quanto os blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir dela.

2.2.1. Caracterização da matéria-prima constitutiva do bloco cerâmico estrutural

Segundo Santos (1992), as argilas são sistemas complicados devido às suas variadas condições geológicas de formação. Elas podem variar na composição mineralógica qualitativa ou quantitativa dentro dos argilominerais. Os componentes não-argilominerais, cristalinos (silicatos, hidróxidos, óxidos, carbonatos, nitratos, sulfatos, sulfetos) ou amorfos (ácidos silícicos, hidróxidos, ácido húmico e humatos) também podem variar qualitativa e quantitativamente.

Sendo as argilas, na natureza, de dimensões coloidais, diferenças apreciáveis existem nas propriedades físico-químicas, tais como na capacidade de troca de cátions, natureza dos cátions trocáveis, distribuição granulométrica das partículas, área específica, potencial eletrocinético, viscosidades de suspensões, plasticidade e outras. Essas diferenças levam a propriedades tecnológicas diversas para as indústrias cerâmicas, borracha, papel, metalúrgica, de petróleo, agrícola, química e de engenharia civil. Sendo assim, não é possível descrever uma argila por um número pequeno de propriedades (SANTOS, 1992).

Geralmente são os seguintes fatores que controlam as propriedades que uma determinada argila possui, segundo Grim (1968) *apud* Santos (1992):

- a) A composição mineralógica dos argilominerais qualitativa e quantitativa, e a distribuição granulométrica das partículas;
- b) A composição mineralógica dos não-argilominerais, qualitativa e quantitativa, e a distribuição granulométrica das partículas;
- c) Teor em eletrólitos quer dos cátions trocáveis, quer dos sais solúveis, qualitativa e quantitativamente;
- d) Características texturais da argila, tais como forma dos grãos de quartzo, grau de orientação ou paralelismo das partículas dos argilominerais, silicificação e dentre outros.

As argilas contêm os elementos O, H, Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mg, K, Na. São esses os elementos que costumam ser determinados quantitativamente em uma análise técnica de argilas. Segundo Mason (1971) e Santini (1966) *apud* Santos (1992) os elementos mais abundantes na crosta terrestre em porcentagem ponderal são os apresentados no Quadro 2.4. Esses números justificam a abundância de argilas na superfície terrestre.

Quadro 2.4: Lista dos dez elementos mais abundantes na crosta terrestre em porcentagem ponderal.

Colocação	Elemento	Porcentagem (%)
1º	Oxigênio (O)	46,60
2º	Silício (Si)	25,72
3º	Alumínio (Al)	8,13
4º	Ferro (Fe)	5,00
5º	Cálcio (Ca)	3,63
6º	Sódio (Na)	2,83
7º	Potássio (K)	2,59
8º	Magnésio (Mg)	2,09
9º	Titânio (Ti)	0,44
10º	Hidrogênio (H)	0,14

Fonte: Mason (1971) e Santini (1966) *apud* Santos (1992)

Estudos de Azeredo *et al.* (2014a; 2014c; 2015a; 2015b; 2015c) apresentam composições compatíveis com a relação de elementos químicos apresentados no Quadro 2.4.

No Quadro 2.5 encontram-se exemplos de diferentes faixas de composições químicas de algumas argilas encontradas em diversas regiões, com ênfase nos Estados Unidos da América.

Quadro 2.5: Faixas de composições químicas de algumas argilas e suas localizações.

Argila	Perda ao Fogo (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO + MgO (%)	K ₂ O + Na ₂ O (%)
Caulinita, Flórida, EUA	13,92-15,3	44,60-46,55	36,75-39,94	0,22-0,80	0,18-0,70	T-0,20	0,20-0,50
Halóisita, Indiana, EUA	13,10-13,38	44,46-48,28	34,62-36,58	0,43-0,98	0,15-0,35	0,31-0,37	0,24-0,52
Ball Clay inglesa	9,20-14,98	45,02-55,00	30,10-34,74	1,09-3,96	0,61-0,95	0,56-0,75	1,74-4,43
Argila refratária, Kentucky, EUA	9,86	43,56	42,87	0,81	-	1,51	-
Argila Cer.Verm., Ohio	5,20-10,7	53,60-73,90	10,30-21,00	4,00-8,90	0,70-1,20	0,90-13,60	1,55-7,10
Terras fuller, Utah, EUA	13,8	75,17	15,24	1,78	-	6,10	0,39
Bentonita e montmorilonita, Arizona, EUA	7,70	49,91	17,20	2,43	0,24	5,76	0,32
Bentonita, Otay, Califórnia, EUA	22,96	49,56	15,08	3,44	0,40	8,92	-

Fonte: Adaptada Klinefelter e Hamlin (1957) *apud* Santos (1992).

Alguns tipos de argila são apresentados no Quadro 2.6, onde pode-se observar termos usados em português e respectivas traduções para o inglês.

Quadro 2.6: Alguns tipos de argila e tradução em inglês.

Português	Inglês
Adobe ou adobo	Adobe
Argila	Clay
Argila plástica	Ball-clay
Argila refratária	Refractory clay, fire clay, ball-clay
Argila residual	Residual clay
Argila sedimentar	Sedimentar clay
Argila transportada	Sedimentar clay
Argila vitrificável	Vitrifying clay
Argila de coluvião	Colluvial clay
Argila de planície de inundação	Flood-plain clay
Argila para manilhas	Pipe clay
Argila para potes ou panelas de barro	Pot clay
Argila para tijolos	Brick clay
Argilito	Shale, shale clay, Flint-clay
Bauxita	Bauxite, bauxitic clay
Bentonita	Bentonite
Caulim	Kaolim, china-clay
Folhelho argiloso	Shale

Fonte: Santos (1992)

2.2.2. Ensaios dos blocos cerâmicos estruturais

Os ensaios realizados em blocos cerâmicos estruturais têm por finalidade as determinações: resistência à compressão simples; características geométricas; desvio em relação ao esquadro; planeza das faces; área bruta e área líquida; massa seca em estufa; massa seca ao ar; índice de absorção 24h; massa aparente e volume, na maioria dos estudos. Parsekian e Soares (2004) apresentam considerações sobre projeto, execução e controle de alvenaria estrutural em blocos cerâmicos estruturais. Ramalho e Corrêa (2003) tratam do projeto de edifícios construído com o sistema em alvenaria estrutural. Rizzati (2003) trata da influência da geometria do bloco cerâmico estrutural no desempenho mecânico da alvenaria estrutural sob compressão. Prado (1995) trata da resistência à compressão de tijolos e blocos cerâmicos de diferentes formas e dimensões. Manzione (2004) aborda projeto e execução de alvenaria estrutural de forma didática. Mohamad (2007) estuda mecanismos de ruptura da alvenaria de blocos à compressão. McNary (1984) aborda as propriedades mecânicas dos tijolos cerâmicos que compõem a alvenaria.

Os ensaios destrutivos realizados em blocos cerâmicos estruturais têm por finalidade a determinação da resistência à compressão simples para suporte da estrutura da edificação. Quanto ao uso do ultrassom para caracterizações de blocos cerâmicos estruturais, praticamente não se encontra na literatura trabalhos nesse sentido.

2.2.2.1. Determinação da resistência à compressão

Os ensaios para obtenção da resistência à compressão das unidades devem ser realizados conforme a ABNT NBR 15270-3:2005 para os blocos cerâmicos estruturais. Esse é um tipo de ensaio destrutivo, onde a ruptura frágil dos corpos-de-prova pode ser observada pelo rompimento dos septos internos e externos.

Para a realização do ensaio os blocos devem ser capeados com pasta de cimento com espessura máxima de três milímetros para que as faces em contato com as placas da prensa estejam completamente planas. Para materiais frágeis, a resistência à compressão é bem maior que a resistência à tração.

Na execução do ensaio os blocos devem estar na condição saturada, todos os corpos-de-prova devem ser ensaiados de modo que a carga seja aplicada na direção do esforço que o bloco deve suportar durante o seu emprego, sempre perpendicular ao comprimento e na face destinada ao assentamento; o corpo de prova deve ser colocado na prensa de modo que o seu centro de gravidade esteja no eixo de carga dos pratos da prensa; proceder ao ensaio de compressão de forma que a tensão aplicada, calculada em relação à área bruta (AB) se eleve progressivamente.

A resistência média à compressão deve ser expressa em megapascals (MPa), sendo esta calculada como a média dos valores individuais. A resistência característica à compressão (f_{bk}) dos blocos cerâmicos estruturais deve ser considerada a partir de 3,0 MPa, referida à área bruta. A estimativa da resistência à compressão da amostra dos blocos deve ser determinada de acordo com as formulações apresentadas no item 5.5 da ABNT NBR 15.270-2:2005, que também se encontram detalhadas em Azeredo *et al.* (2014b).

Azeredo *et al.* (2014a) trabalhando com blocos cerâmicos estruturais de dimensões nominais (11,5x19,0x36,0 cm) manufaturados com massa argilosa da região de Campos dos Goytacazes, queimados a 800°C verificaram que a

resistência característica à compressão (f_{bk}) apresentou valor compatível com a recomendação normativa.

Em relação à temperatura de queima Miller (2008) e Azeredo *et al.* (2012; 2014b) encontraram variações da temperatura influenciando na resistência à compressão dos blocos cerâmicos estruturais, que foram maiores nas temperaturas mais elevadas.

Segundo a ABNT NBR 15270:2005 o desvio-padrão deve ser expresso em MPa e o coeficiente de variação (C.V.) em porcentagem, sendo que esse coeficiente não deve exceder 20%.

2.2.2.2. Determinação das características geométricas

A inspeção por meio do Ensaio Visual é uma das mais antigas atividades nos setores industriais e de construções. Vem a ser o primeiro ensaio não destrutivo aplicado em qualquer tipo de peça ou componente e está frequentemente associado a outros ensaios de materiais.

Não existe nenhum processo industrial em que a inspeção visual não esteja presente. Simplicidade de realização e baixo custo operacional são as características deste método, mas que mesmo assim requer uma técnica apurada, obedece a sólidos requisitos básicos que devem ser conhecidos e corretamente aplicados. Além dessa inspeção visual procede-se à determinação das características geométricas dos corpos-de-prova.

Com paquímetro de sensibilidade mínima de 0,05 mm e régua metálica com sensibilidade mínima de 0,5 mm medem-se todos os pontos indicados na Figura 2-13.

O Anexo A da ABNT NBR 15.270-3:2005 para os blocos cerâmicos estruturais (Figura 3-13) prescreve o método de ensaio para determinação das características geométricas a seguir:

a) medidas das faces – os blocos devem ser colocados sobre uma superfície plana e indeformável. Os valores da largura (L), altura (H) e comprimento (C) são obtidos fazendo-se medições nos pontos intermediários, como no exemplo da Figura 2-13 ;

b) espessura dos septos e paredes externas dos blocos – as medições das espessuras dos septos devem ser obtidas na região central destes, utilizando no

mínimo quatro medições, procedendo da mesma forma para a espessura das paredes externas, como no exemplo da Figura 2-13.

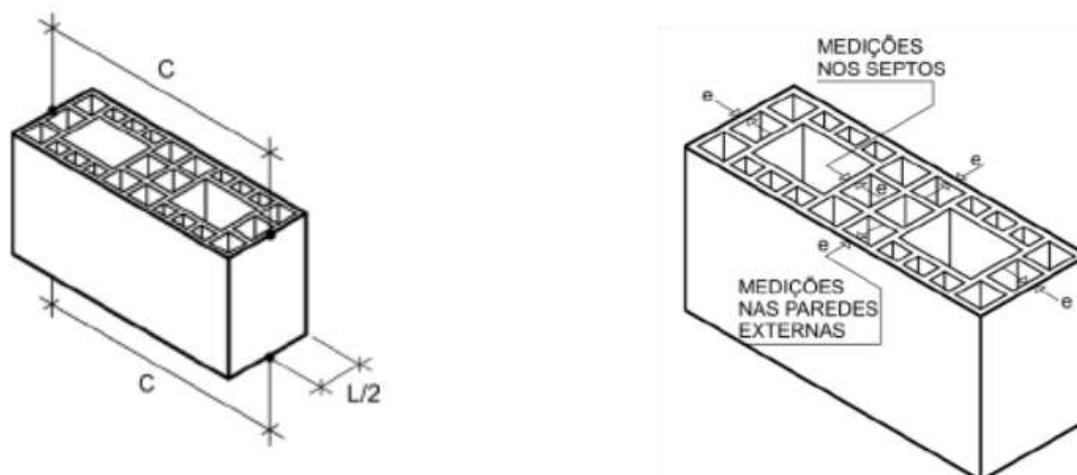


Figura 2-13: Locais para medições do comprimento (C) do bloco e Posições esquemáticas para as medições da espessura das paredes externas e septos.

2.2.2.3. Determinação do desvio em relação ao esquadro

Segundo a ABNT NBR 12.270-3:2005 os corpos-de-prova devem ser colocados sobre uma superfície plana e indeformável. Deve-se medir o desvio (D) em relação ao esquadro entre uma das faces destinadas ao assentamento e a maior face destinada ao revestimento do bloco, conforme a Figura 2-14, empregando-se o esquadro metálico e a régua metálica. O desvio deve ser no máximo de 3 mm, segundo a ABNT NBR 12.270-1:2005.

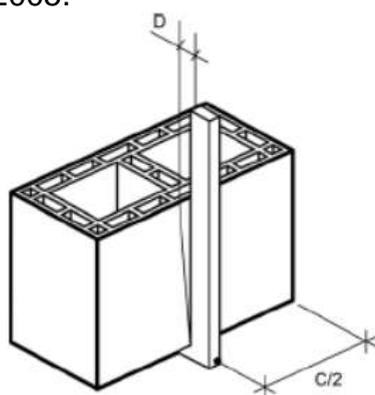


Figura 2-14: Desvio em relação ao esquadro - Representação esquemática.

2.2.2.4. Determinação da planeza das faces

Os corpos de prova devem ser colocados sobre uma superfície plana e indeformável. Deve-se determinar a planeza de uma das faces destinadas ao

revestimento através da flecha (F) formada na diagonal, conforme as Figura 2-15, empregando-se o esquadro metálico e a régua metálica. A flecha deve ser no máximo de 3 mm, segundo a ABNT NBR 12.270-1:2005.

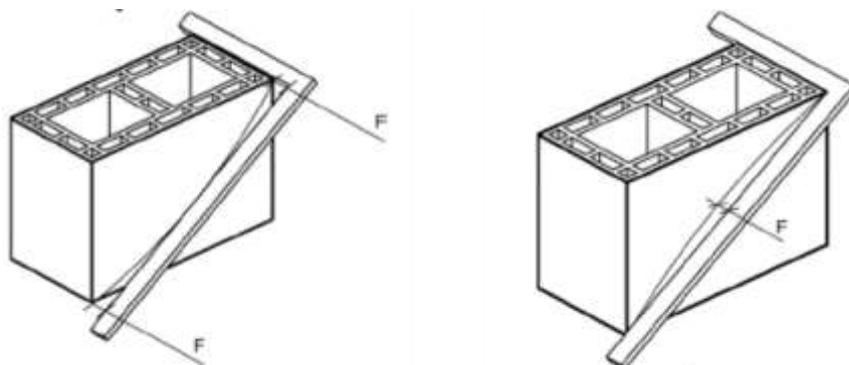


Figura 2-15: Planeza das faces – Representação esquemática – Bloco estrutural.

2.2.2.5. Determinação da área bruta (AB)

a) medir a largura (L), a altura (H) e o comprimento (C) dos blocos a serem ensaiados, conforme Figura 2-13;

b) a área bruta de cada bloco é obtida pela expressão $L \times C$, expressa em centímetros quadrados, com aproximação decimal.

2.2.2.6. Determinação da área líquida (AL)

a) após a determinação da área bruta, imergir os blocos em água fervente por 2 h ou em água à temperatura ambiente por 24 h;

b) após saturados, os blocos devem ser pesados imersos em água à temperatura de $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$; o valor obtido é a sua massa aparente (m_a);

c) retirar os blocos, enxugá-los superficialmente com um pano úmido e pesá-los imediatamente, obtendo-se a sua massa saturada m_u ;

d) área líquida, expressa em centímetros quadrados, de cada bloco, calculada segundo a expressão:

$$AL = \frac{m_u - m_a}{\gamma \cdot H} \quad (2.1)$$

onde:

AL é igual à área líquida, em centímetros quadrados (cm^2), com aproximação decimal;

m_u é igual à massa do bloco saturado, em gramas (g);

m_a é igual à massa aparente do bloco, em gramas (g);

H é igual à altura do bloco, em centímetros (cm);

γ é igual à massa específica da água, tomada igual a 1, em gramas por centímetro cúbico (g cm^{-3}).

2.2.2.7. Determinação da massa seca, da massa seca ao ar e do índice de absorção d'água

O Anexo B da NBR 15270-3/2005 prescreve o método de ensaio para determinação da massa seca e do índice de absorção d'água.

Determinação da massa seca (m_s):

- a) retirar do corpo de prova o pó e outras partículas soltas;
- b) submeter os corpos-de-prova à secagem em estufa a $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$;
- c) determinar a massa individual, em intervalos de 1 h, até que duas pesagens consecutivas de cada um deles difiram em no máximo 0,25%, pesando-os imediatamente após a remoção da estufa;
- d) medir a massa seca (m_s) dos corpos-de-prova após a estabilização das pesagens, nas condições acima estabelecidas, expressando-as em gramas.

A Figura 2-16 mostra massa do corpo de prova seco ao ar (m_{ar}) sendo estimada em balança eletrônica digital com certificado ISO 9000 (Toledo, 3400, Brasil).



Figura 2-16: Massa de bloco seco estimada em balança eletrônica digital.

Determinação da massa úmida (m_u):

a) após a determinação da massa seca (m_s), os corpos de prova devem ser colocados em um recipiente de dimensões apropriadas, preenchido com água à temperatura ambiente, em volume suficiente para mantê-los totalmente imersos. A Figura 2-17 mostra um exemplo de blocos estruturais imersos em água por no mínimo 24 horas.



Figura 2-17: Blocos imersos em água.

O índice de absorção d'água AA (%) de cada corpo de prova é determinado pela expressão:

$$AA (\%) = \frac{m_u - m_a}{m_a} \times 100 \quad (2.2)$$

onde m_u e m_s representam a massa úmida e a massa seca de cada corpo de prova, respectivamente, expressas em gramas.

O índice de absorção, AA (%), sofre variação em função da temperatura de queima, tendo Azeredo *et al.* (2012) verificado que a 800°C esse índice se apresentou em conformidade com a NBR 15.270:2005 e que abaixo dessa temperatura o índice de absorção excedeu o limite proposto, ou seja, foi acima de 20%.

2.2.2.8. Determinação da massa aparente, do volume e da densidade do bloco cerâmico estrutural

A determinação da massa aparente (m_a) é feita com o bloco saturado e imersos em água à temperatura em torno de 23°C. O valor obtido na balança é a sua massa aparente em gramas.

O volume (Vol) do corpo de prova é obtido em centímetros cúbicos utilizando a expressão (2.3):

$$\text{Vol (cm}^3\text{)} = m_{\text{ar}} - m_a \quad (2.3)$$

onde m_{ar} é a massa do corpo de prova seco ao ar e m_a é a massa aparente do corpo de prova imerso.

A densidade (DEN) do corpo de prova em gramas por centímetro cúbico é determinada pela expressão (2.4):

$$\text{DEN (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{m_{\text{ar}}}{\text{Vol}} \quad (2.4)$$

2.2.2.9. Exigências segundo a ABNT NBR 15.270:2005

Na Tabela 2.3 encontram-se as exigências estipuladas pela a ABNT NBR 15.270:2005 relacionadas aos ensaios dimensionais e de resistência à compressão.

Tabela 2.3: Exigências segundo a ABNT NBR 15.270:2005

Características	Bloco Estrutural
Tolerâncias dimensionais médias	±3mm
Espessura dos septos (internos/externos), mínimos	7mm / 8mm
Desvio em relação ao esquadro	3mm
Planeza das faces	3mm
Resistência à compressão*	≥ 3,0 MPa (furo vertical)
Índice de absorção 24h (AA%)	8 a 22%

* a resistência à compressão da amostra dos blocos ($f_{bk, \text{est}}$) é o valor estipulado pela equação o item 5.3 da ABNT NBR 15.270-2:2005.

Os ensaios dimensionais realizados por Azeredo *et al.* (2012; 2014a; 2014b) apresentaram resultados compatíveis com os limites exigíveis pela ABNT NBR 15.270:2005.

2.2.2.10. Ensaios de ultrassom

A maioria dos trabalhos envolvendo ensaios não destrutivos (END), em materiais de construção, foi feita em elemento de concreto. Dos métodos de ensaios não destrutivos, o ultrassom é o mais utilizado para avaliação da sua resistência e durabilidade. A frequência de ressonância da vibração está relacionada ao módulo de elasticidade dinâmico do material. Mudanças nesse módulo indicam deterioração do concreto, que pode estar sujeito a um meio agressivo, por exemplo. O ultrassom tem sido usado por décadas na avaliação da qualidade do concreto, da sua uniformidade e dos seus defeitos (BUNGEY, 1985).

Segundo a ABNT NBR 8802:2013, o ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos através de um componente de concreto, tem como principais aplicações a verificação da homogeneidade do concreto, a detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições, monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio ambiente, principalmente pela ação de sulfatos. Portanto, esse tipo de ensaio detecta descontinuidades internas em materiais, baseando-se no fenômeno de reflexão de ondas acústicas quando encontram obstáculos à sua propagação, dentro do material.

Além da ABNT NBR 8802:2013, outras normas internacionais podem ser relacionadas como: “Comité Mercosur de Normalización, NM 58/1996 - hormigón endurecido - determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos (COMITÉ MERCOSUR, 1996)”; “American Society for Testing and Materials ASTM: C597/1991 - standard test method for pulse velocity through concrete (ASTM, 1991)”; “British Standards Institution - BS 1881: Part 203:1986 - recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulse in concrete (BS, 1986)”; “Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux - RILEM NDT 1/1972 - testing of concrete by the ultrasonic pulse method (RILEM, 1972)”.

Para efeito da aplicação da ABNT NBR 8802:2013 algumas definições são adotadas, tais como, um pulso ultrassônico é gerado e transmitido através de um transdutor-emissor, encostado ou acoplado ao material por meio de um acoplante, que pode ser, por exemplo, vaselina, ou graxas de silicone ou mineral. Os pulsos ultrassônicos refletidos por uma descontinuidade, ou pela superfície oposta da peça, são captados pelo transdutor-receptor, convertidos em sinais eletrônicos e

mostrados na tela digital ou em um tubo de raios catódicos do equipamento, que se trata de um aparelho de pulso elétrico de baixa frequência ultrassônica, com alta estabilidade e precisão de leitura de pelo menos 0,1 microssegundos.

As ondas acústicas são classificadas de acordo com suas frequências e medidas em ciclos por segundo, ou seja, o número de ondas que passam por segundo pelos nossos ouvidos. A unidade “ciclos por segundos” é conhecida por Hertz, cuja abreviatura é Hz. As frequências acima de 20 kHz são inaudíveis, denominadas frequência ultrassônica (ANDREUCCI, 2008).

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.5)$$

onde:

f → frequência;

T → período, ou seja, tempo necessário para que duas cristas consecutivas passem pelo mesmo ponto.

Três tipos básicos de ondas de tensão são criadas quando um meio sólido é perturbado por uma carga vibratória. Estas ondas são chamadas de longitudinais ou compressivas, transversais ou cisalhantes, e de superfície. Estas ondas de tensão se propagam através de um meio elástico de maneira similar a viagem das ondas sonoras através do ar. Ondas compressivas se propagam mais rápido, seguidas das cisalhantes e das de superfície (ANDREUCCI, 2008).

Segundo Andreucci (2008), no método do ultrassom um pulso ultrassônico é criado em um ponto do objeto de ensaio, o tempo do percurso do pulso daquele ponto para outro é medido. Conhecendo-se a distância entre estes dois pontos, a velocidade do pulso pode ser determinada.

O transdutor de transmissão do instrumento de ultrassom transmite um pulso para uma face do corpo de prova e o transdutor de recepção, a uma distância L , recebe o pulso através do corpo de prova. Portanto, L é a distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores. O visor do instrumento de ultrassom indica o tempo t decorrido desde a emissão da onda até sua recepção através do corpo de prova.

A velocidade de propagação da onda é dada por:

$$V_L = L / t \quad (2.6)$$

onde:

V_L = velocidade de propagação (m/s)

L = dimensão do corpo de prova a ser percorrida pelo pulso ultrassônico (m)

t = tempo (s)

A Figura 2-18 ilustra esquematicamente o corpo de prova, bem como o posicionamento dos transdutores (emissor e receptor) em um ensaio direto.

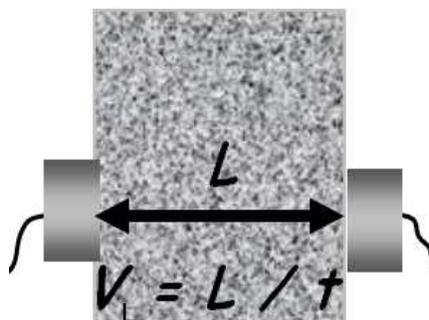


Figura 2-18: Transdutores posicionados para ensaio direto.

O pulso de vibração longitudinal transmitido ao corpo de prova passa por muitas reflexões nos diversos limites entre os seus componentes. Durante o tempo para o pulso alcançar o transdutor receptor ele se transforma em uma forma de onda complexa, que contém ondas compressivas e cisalhantes. É claro, ondas compressivas se propagam mais rápido chegando primeiro ao receptor (ANDREUCCI, 2008). Portanto, a disposição direta é a que assegura a transmissão máxima do sinal dos transdutores. A extensão do trajeto é a distância entre os centros de cada transdutor.

Segundo a ABNT NBR 8802:2013, a fim de transmitir ou receber o pulso, os transdutores devem estar em pleno contato com o meio testado, senão a bolsa de ar entre o transdutor e o meio testado introduzirá um erro na indicação do tempo de transmissão. Este erro é introduzido porque apenas uma quantidade pequena do pulso pode ser transmitida através do ar. Muitos acopladores disponíveis no mercado podem ser usados para simular um bom contato. Segundo Andreucci (2008) a vaselina tem provado ser um dos melhores acoplantes. A camada de acoplante deve ser mais fina quanto possível. Se a superfície do corpo de prova é muito rugosa então ela deve ser tratada para a execução do ensaio.

De acordo com Bodare (1995) as ondas que percorrem um material sólido de um corpo de prova podem ser do tipo longitudinal e transversal. Nas ondas longitudinais as partículas do meio oscilam na direção de propagação da onda. Propagam-se facilmente em sólidos, líquidos e gases. São também chamadas de ondas de compressão. Nas ondas transversais as partículas do meio oscilam na direção perpendicular à direção de propagação da onda. Propagam-se facilmente em sólidos, mas não se propagam em líquidos e gases. São também chamadas de ondas de cisalhamento.

Na Tabela 2.4 encontram-se relacionados alguns tipos de materiais e a respectiva velocidade longitudinal (V_L) e cisalhante (V_C).

Tabela 2.4: Exemplos de velocidade de ondas longitudinais e cisalhantes em alguns tipos de materiais.

Material	V_L (m/s)	V_C (m/s)
Granito	5000 - 6000	2500 - 3300
Basalto	5400 - 6400	2700 - 3500
Gnaisse	3500 - 7500	-
Mármore	3700 - 7000	-
Calcário	5900 - 6100	2800 - 3100
Folhelho	2100 - 3400	-
Arenito	1400 - 4300	-

Fonte: adaptado de Dobrin, M.B. (1976). Introduction to Geophysical Prospecting. Third edition, McGraw- Hill Book Company.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a velocidade do pulso para concretos comuns é tipicamente da ordem de 3660 m/s. Então, para uma distância, entre transdutores, de 300 mm o tempo de viagem é aproximadamente de 80 μ s (micro segundos). É evidente que o instrumento deve ser muito preciso para medir um tempo de trajeto tão pequeno. O método do ultrassom é uma técnica vibratória. Quaisquer fontes mesmo criando vibrações sem importância devem ser eliminadas durante o período de ensaio.

Na Figura 2-19 observa-se esquematicamente o posicionamento dos transdutores para avaliação do tempo que a onda longitudinal leva para percorrer um corpo de prova.

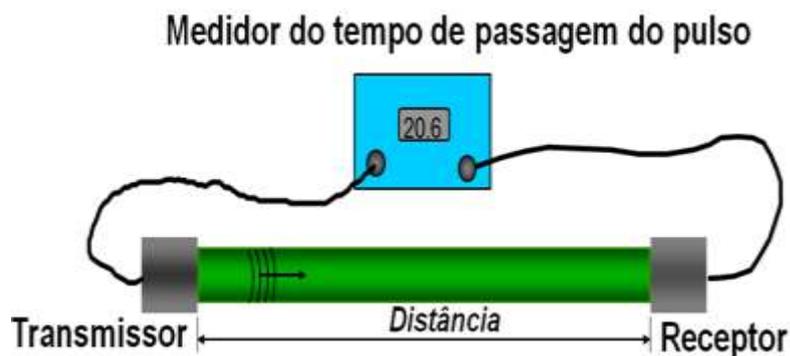


Figura 2-19: Posicionamento dos transdutores para avaliação do tempo de trânsito.

Existem três maneiras possíveis nas quais os transdutores podem ser arranjados, como mostra a Figura 2-20.

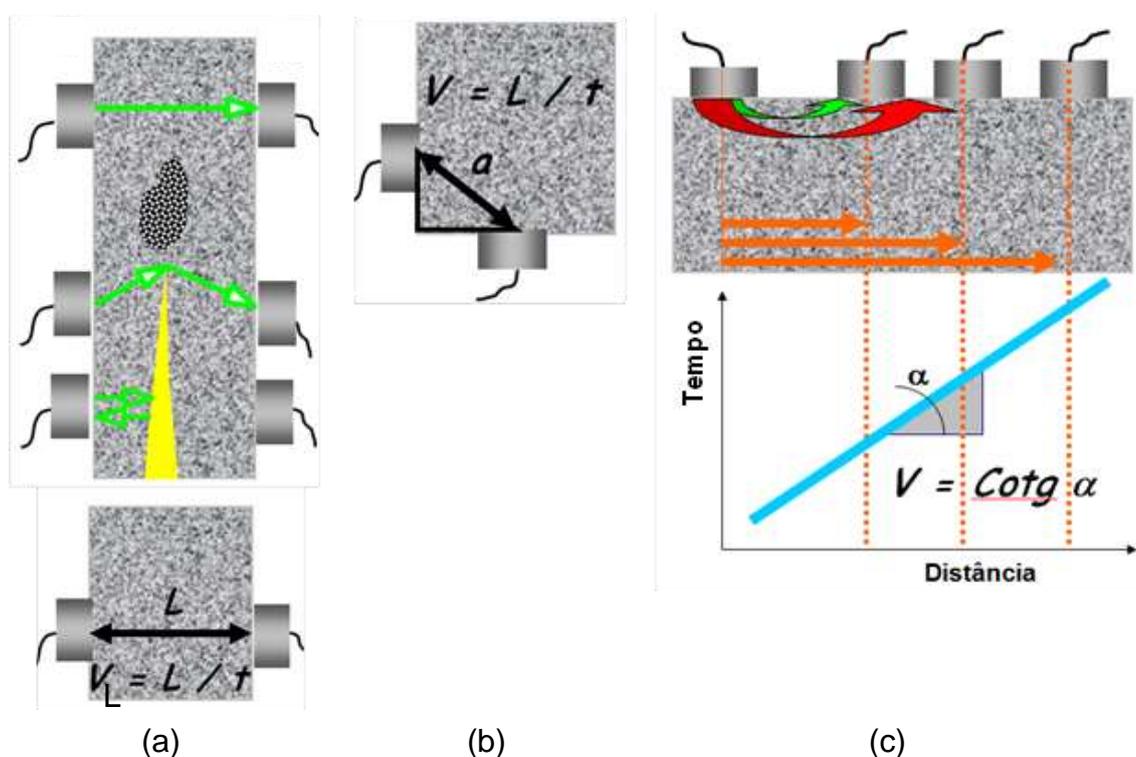


Figura 2-20: (a) transmissão direta; (b) transmissão semidireta; (c) transmissão indireta ou de superfície.

O método de transmissão direta, segundo Naik *et al.* (2004), é o mais desejável e o mais satisfatório porque a energia máxima do pulso é transmitida e recebida com este arranjo. A técnica de transmissão direta usa dois transdutores ultrassônicos localizados em lados opostos do objeto a ser inspecionado. Um transdutor atua como transmissor de ultrassom e o outro alinhado com o primeiro,

atua como receptor. Os transdutores podem estar em contato com o material de ensaio, ou o objeto de ensaio pode ser imerso em um tanque de líquido acoplante. Quando a peça não apresenta descontinuidades, todo o sinal emitido é recebido pelo segundo transdutor. Na presença de descontinuidades, parte ou toda energia ultrassônica é refletida e, conseqüentemente, menor ou nulo será o sinal recebido pelo transdutor receptor.

O instrumento de ensaio consiste em um meio de produzir e introduzir um pulso ultrassônico no corpo de prova (pulso gerador e transmissor), e um meio de medir precisamente o tempo gasto pelo pulso para se propagar através do corpo de prova. O equipamento também pode ser conectado ao cátodo de um osciloscópio. Uma descrição completa é fornecida no Método de Ensaio C 597 da ASTM.

Um exemplo de equipamento de ultrassom é o *Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester, Plus* (PUNDIT LAB⁺), fabricação suíça. Os detalhes sobre esse equipamento podem ser consultados em www.proceq.com.

O equipamento de ensaio por ultrassom deve ser capaz de: excluir a necessidade de um amplificador externo ao usar transdutores exponenciais e cabos longos; permitir a estimativa da resistência à compressão através de curvas de conversão; permitir a identificação da data e hora a cada medição registrada; permitir fazer revisão da lista das medições salvas diretamente no local sem a necessidade de uma conexão com o computador.

Em um estojo para transporte do equipamento (Figura 2-21) encontra-se:

- unidade de leitura de dados;
- 2 transdutores (54kHz);
- 2 cabos BNC com 1,5 m;
- pasta de acoplamento;
- bloco de calibração;
- carregador de pilhas com cabo USB;
- 4x pilhas AA(LR6);
- CD com software para transferência de dados para computador;
- Documentação.



Figura 2-21: Estojo com o equipamento de ultrassom.

Na Figura 2-22 observa-se a pasta de acoplamento, o bloco de calibração e o equipamento devidamente calibrado segundo informações do fabricante indicando o tempo de trânsito da barra de calibração. Essa operação deve ser feita sempre antes de se iniciar o teste de ultrassom. O acoplante do fabricante só deve ser utilizado para zerar o equipamento com o uso do bloco de calibração.

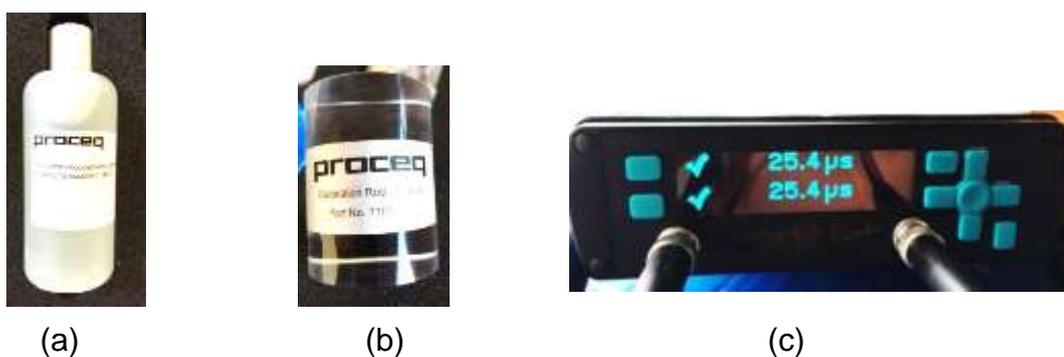


Figura 2-22: (a) Pasta de acoplamento; (b) Bloco de calibração; (c) Unidade de leitura de dados.

O equipamento portátil para testes não destrutivos por ultrassom (PROCEQ, PUNDIT LAB⁺, Suíça) em materiais como concreto, rocha, cerâmica, entre outros, deve apresentar as características listadas no Quadro 2.7.

Quadro 2.7: Características do equipamento de ultrassom.

Características do equipamento (PROCEQ, PUNDIT LAB⁺, Suíça)	
Faixa do tempo de trânsito	0,1 a 9999 μ s
Resolução	0,1 μ s
Pulso de excitação otimizado	125 V, 250V,350V, 500V, AUTO
Faixa de frequência de transmissão	20 kHz - 500 kHz
Tempo de trânsito	sim
Velocidade do pulso	sim
Extensão do trajeto	sim
Velocidade da superfície	sim
Profundidade da fissura	sim
Memória	>500 medições
Alimentação elétrica	5v, 500mA via carregador USB
Alimentação bateria	4 x pilha AA (>20h)
Alimentação computador	5v, 500mA via cabo USB
Passos de ganho selecionáveis Rx	1x, 2x,5x,10x,20x,50x,100x,200x,500x,1000x
Resistência à compressão	sim
Identificação para medições (visor)	79 x 21 mm OLED de matriz passiva
Lista de revisão das medições no instrumento	sim
Temperatura operacional	10° a 60°C
Umidade	<95%

Fonte: Catálogo PROCEQ.

O ultrassom tem sido usado por décadas na avaliação da qualidade do concreto, da sua uniformidade e dos seus defeitos. Vários pesquisadores têm procurado correlacionar resistência à compressão e à flexão do concreto com a velocidade de pulso ultrassônico, ou seja, a velocidade de propagação da onda. Malhotra (1976) e Naik *et al.* (2004) estabeleceram relações entre a velocidade e resistência à compressão no concreto. A durabilidade do concreto submetido ao ambiente agressivo tem sido avaliada por vários pesquisadores usando velocidade de pulso ultrassônico para dimensionar a extensão da agressão sofrida pelo elemento estrutural. Dessa forma, pode-se afirmar que, geralmente, haverá redução da velocidade de onda longitudinal, com a redução da magnitude sendo dependente do grau do dano imputado ao elemento estrutural.

A avaliação da alvenaria, através de ultrassom, segundo Kingsley *et al.* (1987) e Noland *et al.* (1990) tem sido uma adaptação dos métodos usados para outros materiais, como o concreto. Estudos de Noland *et al.* (1990) mostraram que a velocidade de propagação da onda poderia ser correlacionada à resistência à compressão de prismas de tijolos cerâmicos, mas nenhuma generalização foi desenvolvida. O método desenvolvido por eles mostrou-se mais viável na determinação de falhas do que na previsão da resistência à compressão. De acordo com Noland *et al.* (1990) o sinal do pulso ultrassônico deteriora-se rapidamente na

passagem por material de baixa densidade.

Popovics (2001) fez a maioria de suas pesquisas com o concreto, sendo esse um material largamente utilizado na infraestrutura de diversos tipos construções. Ele correlacionou a propriedade de resistência do concreto, tratando-se de uma avaliação essencial, com a velocidade de pulso ultrassônico. O seu objetivo com o trabalho foi contribuir com um desenvolvimento de um método prático para a determinação da resistência da estrutura através de um ensaio não destrutivo, o ultrassom.

Segundo a BS 1881:parte 203 as dimensões da peça a ser avaliada têm influência no tipo de transdutor a ser empregado no teste de ultrassom. Estas dependem do comprimento de onda da transmissão e da velocidade do pulso ultrassônico. Dessa forma, a recomendação é que a extensão mínima de trajeto deve ser igual ou maior que o comprimento de onda da transmissão, senão poderá ocorrer uma redução da velocidade de pulso. Portanto, no método do ultrassom a frequência da transmissão (kHz) pode ser controlada pela seleção apropriada dos transdutores. Uma vez que a velocidade das ondas sonoras depende também do tipo de material, do modo de vibração (longitudinal ou transversal), estudos sobre a correlação entre a medida do pulso e as propriedades relacionadas à porosidade do meio são muito importantes.

Estudos têm sido conduzidos em tijolos usados para revestimento de fachadas, principalmente em países onde essas unidades sofrem congelamento/descongelamento em serviço. Robinson *et al.* (1977) realizaram ensaios em tijolos comercialmente disponíveis, para estabelecer a relação entre as diferentes propriedades físicas dos tijolos e a sua resistência ao congelamento/descongelamento. Maage (1984) estudou a correlação entre a resistência ao congelamento/descongelamento, a porosidade, o tamanho e a distribuição dos poros dos tijolos.

Nakamura (1988) também fez estudos sobre a durabilidade dos tijolos, assim como Arnott (1990), no “National Research Council of Canada”.

Koroith *et al.* (1998) propuseram limites superior e inferior de velocidade de pulso ultrassônico para identificar tijolos cerâmicos maciços para revestimento duráveis e não duráveis, sujeitos ao congelamento/descongelamento. Os autores sugerem que o método proposto por eles poderá ser usado juntamente com as normas estabelecidas no Canadá e nos Estados Unidos da América, podendo

inclusive auxiliar no estabelecimento da dispensa de ensaios destrutivos, em muitos casos, uma vez que a durabilidade do tijolo está intimamente ligada às propriedades de resistência à compressão, absorção, porosidade. Os autores usaram a medição direta de transmissão do pulso ultrassônico, ou seja, o tempo de trânsito no caminho mais curto através do material (para a direção direta de transmissão do pulso, o tamanho do caminho mais curto é a distância entre os transdutores de transmissão e recepção).

Cazalla *et al.* (1999) estudaram o grau de carbonatação em argamassas de cal por meio de ultrassom (transmissão direta), correlacionando a velocidade do pulso ultrassônico longitudinal com o grau de compactação do material. A composição química da cal utilizada na fabricação da argamassa é dependente da geologia local, dessa forma, as suas propriedades podem sofrer variações. Uma análise de variância foi realizada para determinar a composição, tipo e evolução no tempo e as interações das variáveis, para avaliação das características de argamassas de cal aérea, com finalidade de sua utilização em projetos de conservação do patrimônio cultural. A combinação das duas técnicas de análise, ultrassom e ANOVA, permitiu a avaliação da qualidade técnica dos materiais usados nas argamassas de forma rápida e com um custo reduzido. O estudo possibilitou a conclusão de que a elevação da velocidade do pulso ultrassônico implica em um decréscimo da anisotropia total das amostras (ΔM), conseqüentemente, maior taxa de carbonatação, maior grau de compactação. A anisotropia total (ΔM), que quantifica a anisotropia da estrutura de um material foi obtida pela equação (2.7).

$$\Delta M (\%) = \left[1 - \frac{2 V_1}{(V_2 + V_3)} \right] \quad (2.7)$$

onde:

ΔM → anisotropia total em porcentagem;

V_1, V_2, V_3 → velocidade da onda ultrassônica medida nas três direções perpendiculares do corpo de prova, sendo V_1 a menor delas, em metros por segundo.

Cultrone *et al.* (2001) usaram ensaios de ultrassom e mecânicos, combinados com ANOVA, para analisar as características mineralógicas e físicas de tijolos feitos de misturas de argila com pequenas quantidades de aditivos, queimados em temperaturas variando de 850 a 1100°C. De acordo com os autores, as adições

incorporadas à massa argilosa têm várias finalidades, uma delas é a redução da retração no processo de secagem e sinterização, o que pode afetar o comportamento do tijolo, quando materiais como calcita, ou dolomita, são usados como têmpera. Segundo os autores, a plasticidade da argila, a temperatura de queima e a porosidade do tijolo são as três propriedades fundamentais para a sua caracterização. Técnicas analíticas como Energia Dispersiva de Raios-X (EDX), Difração de Raios-X (DRX), microscopia óptica, porosimetria e ensaios mecânicos, entre outros, são frequentemente usados para examinar essas propriedades. Um ensaio adicional a essa lista, segundo os autores, é o teste de ultrassom, que permite um estudo não destrutivo de rochas, argamassa à base de cal e tijolos. A velocidade do pulso ultrassônico — devido à natureza heterogênea, descontínua, anisotrópica do material de que é feito o tijolo — é influenciada pela composição mineralógica, conexões intercristalinas, densidade, umidade e presença de vazios, fissuras ou rachaduras, refletida no decréscimo na velocidade como resultado da absorção e dispersão. Uma vez que a qualidade técnica e/ou estado de preservação do material de construção deveria preferencialmente ser baseado em ensaios não destrutivos, técnicas baseadas na propagação de onda ultrassônica são obviamente vantajosas. Os autores utilizaram a anisotropia total (ΔM), constituindo-se em um parâmetro que quantifica a anisotropia estrutural de um material, sendo calculado pela equação (2.7). Os autores correlacionaram ΔM com a resistência mecânica dos tijolos. Observaram que quanto menor a anisotropia total, maior a resistência mecânica.

Santos Neto e Castro (2004) propuseram a verificação da resistência mecânica de telhas em cerâmica vermelha através da técnica de ultrassom, concluindo que há correlação entre as propriedades. Com o auxílio do teste do ultrassom é possível obter a resistência das telhas, sem a necessidade de ensaio destrutivo.

Berutti (2004) investigou a aplicação de métodos de ultrassom para avaliação e caracterização da microestrutura de materiais cerâmicos à base de alumina e sua associação com as propriedades mecânicas destes materiais. Os resultados mostraram a correlação entre as propriedades acústicas do material com a sua microestrutura e com suas propriedades mecânicas, como, resistência, módulo de elasticidade e dano por choque térmico. O pesquisador estudou também a atenuação das ondas ultrassônicas no material.

Ferreira e Freire (2004) verificaram a qualidade de tijolos prensados de terra crua tratada quimicamente. Os autores utilizaram combinação de testes destrutivos e teste de ultrassom. Segundo, Cazalla *et al.* (1999) e Cultrone *et al.* (2001), é possível relacionar a velocidade do pulso ultrassônico longitudinal nas três direções ortogonais do prisma retangular, ou paralelepípedo, a partir da equação (2.7). Eles concluíram que quanto menor o valor de ΔM , menos espaços vazios possui o tijolo e conseqüentemente, maior resistência mecânica.

Silva (2005) utilizou a técnica de ultrassom em tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira, com intuito de correlacionar a resistência à compressão dos tijolos e corpos de prova compactados. A avaliação não destrutiva dos materiais através das ondas ultrassônicas possibilitou a análise da anisotropia total (ΔM) e da eficiência da compactação dos corpos-de-prova, tijolos e prismas. Permitiu também estabelecer uma relação entre a resistência e variáveis como a porcentagem de resíduo adicionada e a densidade aparente seca sem a destruição do espécime ensaiado.

Vasconcelos *et al.* (2008) fizeram pesquisa visando avaliar alvenarias em construções antigas feitas com blocos de granito, no sentido de obtenção das condições das propriedades físicas (densidade e porosidade) e mecânicas (resistência à compressão, módulo de elasticidade) dos elementos constitutivos de prédio histórico com necessidade de conservação, reabilitação e reforço estrutural. Nesse sentido, utilizaram medição da velocidade de pulso ultrassônico longitudinal com transdutores de 54 kHz e 150 kHz. Análises estatísticas dos dados obtidos possibilitaram a correlação entre a velocidade de pulso ultrassônico com as propriedades do granito.

Harvey Jr e Schuller (2010) apresentam várias técnicas de avaliação da estrutura em alvenaria, fazendo comparações entre elas em termos de complexidade, experiência necessária do operador e custo relativo. Entre os ensaios não destrutivos encontram-se relacionados os seguintes: inspeção cadastral dos elementos estruturais, esclerometria, ultrassom, termografia infravermelha, radiografia (Raios X e Gama), método da indução, líquido penetrante, partículas magnéticas, dentre outros. Segundo os autores, muitos ensaios não destrutivos permitem a avaliação de propriedades do material constitutivo da alvenaria, como resistência e absorção, possibilitando dessa forma uma interferência no reparo, ou proposta de solução adequada para a recuperação da estrutura em alvenaria.

Molina *et al.* (2013) estudaram a durabilidade de rochas usando a combinação dos testes de ultrassom, compressão, degradação e porosidade. Segundo os pesquisadores, a maneira como as ondas ultrassônicas de propagam dentro da rocha dependem da direção e da orientação, o que propicia um retrato do grau da anisotropia total (ΔM), que varia de acordo com: orientação dos componentes (grãos, poros, por exemplo), o tipo de rocha e sua estrutura. A distribuição da anisotropia total exerce influência sobre a durabilidade da rocha, segundo os autores.

De Rosa e Cultrone (2014) utilizaram a técnica de ultrassom para verificação da compacidade de tijolos moldados à mão, com dois tipos de material argiloso, queimados em temperaturas variando de 750 a 1000°C. Segundo os autores houve mudança do filossilicato pela cristalização da mulita em apenas um dos tipos de material argiloso. Temperaturas de queima diferentes alteram a capacidade de resistência à compressão e a absorção dos tijolos. No estudo realizado, os resultados da anisotropia total (ΔM) mostraram decréscimos à medida que a temperatura de queima se elevava, indicando maior compacidade e resistência do corpo de prova.

Foram apresentados alguns exemplos de estudos relacionados ao método acústico do ultrassom para a determinação de diversos parâmetros, tais como resistência à compressão simples, durabilidade em tijolos usados para revestimento em países cujo clima os fazem estarem sujeitos ao congelamento/descongelamento; assim como exemplos de detecção de anomalias e de defeitos, como fissuras e trincas. Depois de diversos exemplos, nota-se que o setor de cerâmica vermelha, para fins do tipo de sistema construtivo em alvenaria estrutural, é pouco explorado em relação ao uso do ultrassom como ferramenta de avaliação de resistência mecânica, absorção e compacidade da unidade principal da alvenaria, que vem a ser o bloco cerâmico estrutural.

CAPÍTULO 3

3. PARTE EXPERIMENTAL

Neste capítulo, apresenta-se a sequência de ensaios realizados para a identificação da matéria-prima empregada na confecção dos blocos cerâmicos estruturais, a avaliação de amostras procedentes do lote, produzido com a matéria-prima caracterizada, e as velocidades dos pulsos ultrassônicos nos blocos e suas relações com as temperaturas de queima.

3.1. MATERIAIS: ARGILA E BLOCO CERÂMICO ESTRUTURAL

Tanto a matéria-prima utilizada para a confecção dos blocos cerâmicos estruturais, quanto os blocos em si foram coletados no município de Campos dos Goytacazes, RJ, na indústria Cerâmica Pau Brasil (situada na Rodovia Sérgio Viana Barroso, s/n km 01, na localidade de Goytacazes).

A matéria-prima previamente misturada foi retirada diretamente da esteira que a encaminha para a extrusora — onde os blocos tomam a conformação final — com a finalidade de se proceder à sua caracterização física, química e mineralógica. Os blocos confeccionados com essa matéria-prima foram coletados da seguinte forma: do lote, coletou-se blocos secos ao ar e depois em estufa na própria indústria, para serem queimados em forno a gás com temperatura controlada por termopar de 800, 850, 900, 950 e 1000°C. O Quadro 2-3 mostra as mudanças que ocorrem no material argiloso durante a queima, portanto, optou-se por essa faixa de queima, uma vez que a partir de 800°C as alterações químicas alteram a estrutura cristalina do material, sendo que em torno de 900°C acontece a nucleação da mulita e sua formação a 1000°C. Uma amostra queimada na própria indústria à temperatura estimada de 850°C foi coletada para atuar como controle.

3.2. MÉTODOS

Um organograma simplificado das etapas envolvidas na metodologia aplicada é apresentado na Figura 3-1 como forma de se ter uma visão geral do processo até a realização dos ensaios, para obtenção das resistências dos blocos cerâmicos estruturais.

Também é mostrado no item o tratamento estatístico aplicado aos atributos estudados.

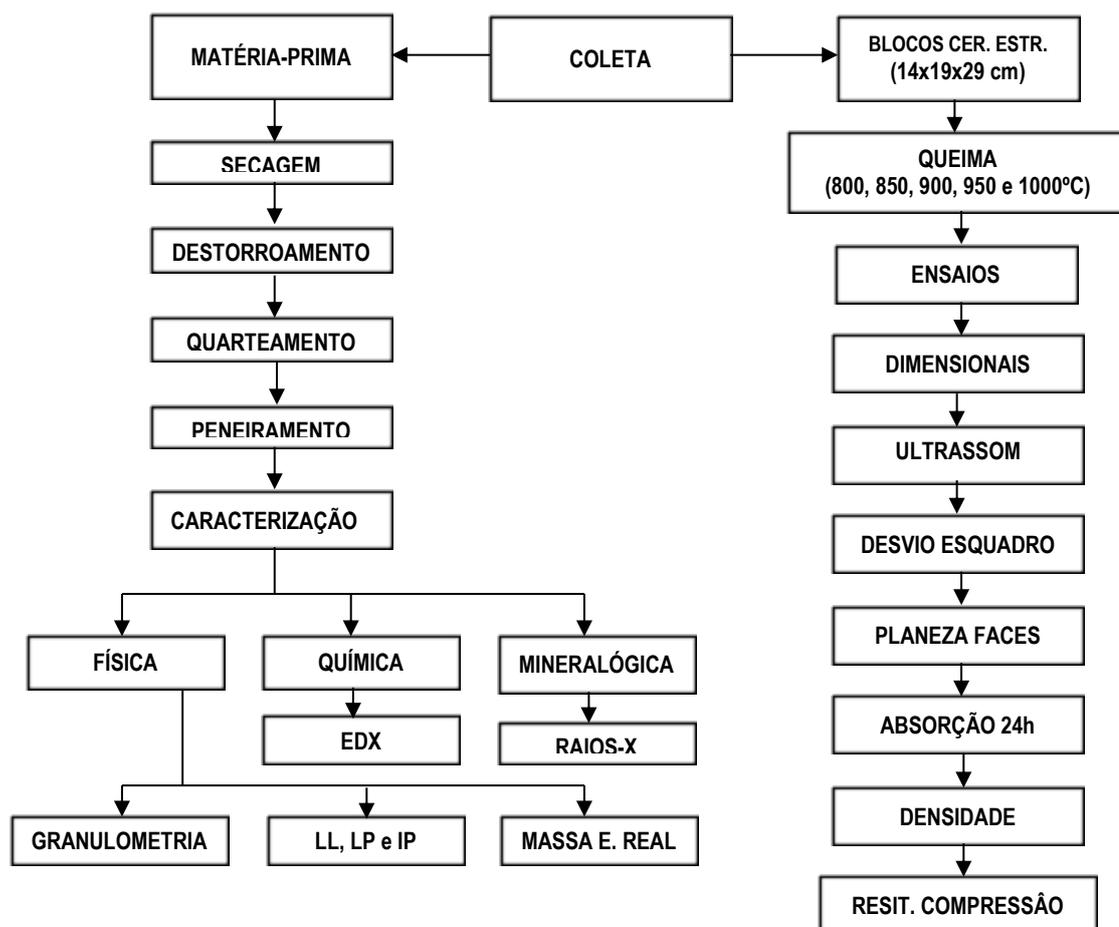


Figura 3-1: Organograma dos ensaios.

3.2.1. Caracterização da matéria-prima

A matéria-prima foi coletada diretamente da esteira em quatro sacos plásticos com capacidade para 50 kg (Figura 3-2) e encaminhada ao laboratório para secagem ao ar livre.



Figura 3-2: Coleta da matéria-prima.

Após a secagem, os torrões foram desfragmentados com auxílio de marreta, destorroados até a obtenção de partículas mais finas. As recomendações da ABNT NBR 6457:1986 foram seguidas como forma de se obter homogeneidade.

3.2.1.1. Caracterização física

Análise granulométrica

A curva de distribuição granulométrica da massa argilosa foi determinada via úmida, segundo a prescrição da ABNT NBR 7181:1984, que consiste na combinação entre peneiramento e sedimentação do material. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).

Na Figura 3-3, observa-se o processo de destorroamento da amostra úmida em um almofariz com a utilização de mão de gral para o peneiramento grosso e fino, além da amostra passada na peneira n^o40 devidamente identificada com o nome do responsável e procedência.

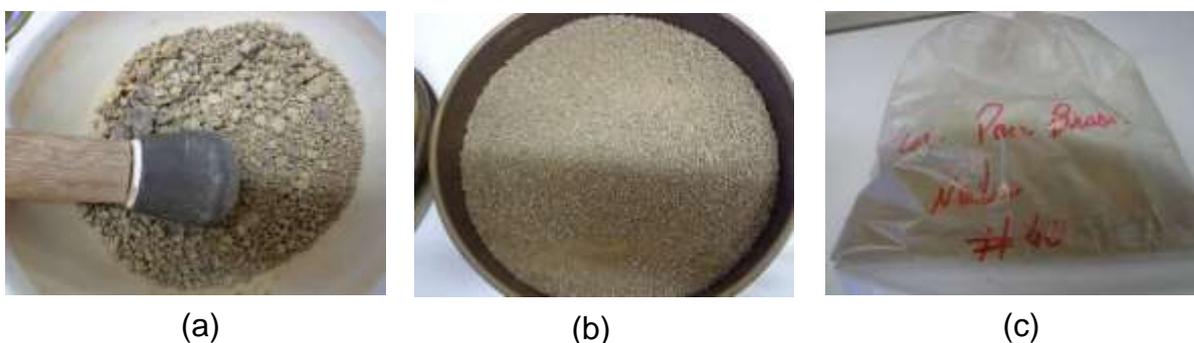


Figura 3-3: a) Almofariz e mão de gral; b) Peneiramento; c) Amostra passada na peneira n^o40.

Parte da amostra foi recolhida para verificação da umidade higroscópica e densidade real dos grãos. Outra parte foi separada e pesada para o ensaio de sedimentação, que segundo Caputo (2008) aplica a lei de Stokes. Dessa forma, foram colocados 52,63 g de amostra num recipiente com defloculante hexametáfostato de sódio para a dispersão das partículas por 24h possibilitando assim a realização do ensaio de sedimentação. Na Figura 3-4 observa-se o recipiente com a devida identificação da amostra e alguns dos equipamentos necessários para a realização do ensaio, como o dispersor, proveta graduada, depósito com água destilada e densímetro.

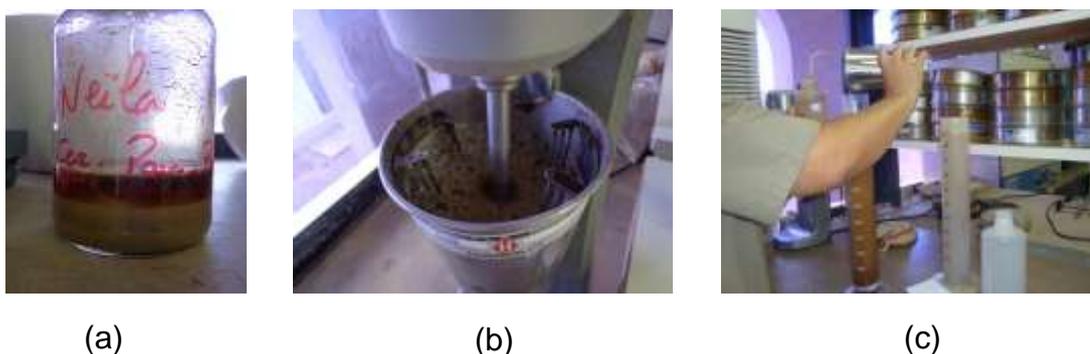


Figura 3-4: a) Recipiente identificado; b) Dispensor; c) Proveta graduada, densímetro, água destilada.

Índices de consistência

Os limites de consistência estão baseados no conceito de que um solo de granulação fina pode existir em qualquer dos quatro estados físicos, dependendo do seu teor de umidade. Adicionando, gradualmente, água num solo inicialmente seco, pode-se verificar que sua consistência variará do estado sólido, passando pelo plástico e atingindo o estado líquido. Os teores de umidade correspondentes às mudanças de estado são definidos como limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração (LC), segundo (CAPUTO, 2008).

O LL foi obtido por meio de ensaio, cujos procedimentos são normalizados pela ABNT NBR 6459:1984b. Foi utilizado o aparelho de Casagrande, sendo o LL conceituado como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura nele requer 25 golpes para fechar na concha do aparelho, o que corresponde à passagem do estado líquido para o plástico (Figura 3-5).



Figura 3-5: Aparelho de Casagrande.

O LP é definido como o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, correspondendo à passagem do estado

plástico para o semissólido. Este ensaio foi feito de acordo com a ABNT NBR 7180:1984.

Na Figura 3-6 observa-se o bastão de argila que foi moldado sobre uma placa de vidro e a sua comparação com o cilindro padrão de 3 mm. Cortou-se o bastão do tamanho do modelo e prosseguiu-se com o ensaio, rolando o bastão sobre a placa até o seu rompimento. Em seguida colocou-se o material rompido em cápsulas. Esse procedimento é repetido cinco vezes, para se obter a média dos resultados.



Figura 3-6: Cilindro padrão de 3 mm para o ensaio do limite de plasticidade.

Segundo Caputo (2008), esses limites, também conhecidos como limites de Atterberg, servem para classificar e descrever algumas características do solo quanto aos seus estados de consistência e, ainda, possibilitam fazer, em primeira aproximação, inferências sobre o seu comportamento mecânico.

O Índice de plasticidade (IP) é obtido pela expressão:

$$IP = LL - LP \quad (3.1)$$

Na Tabela 3.1 observa-se a classificação do solo quanto ao índice de plasticidade.

Tabela 3.1: Classificação do solo quanto ao IP.

Classificação	Índice de Plasticidade
Fracamente plásticos	$1 < IP < 7$
Mediamente plásticos	$7 < IP < 15$
Altamente plástico	$IP > 15$

Fonte: Vargas, Milton (1981)

Massa específica real dos grãos

A determinação da massa específica real dos grãos da matéria-prima foi realizada segundo a prescrição da ABNT NBR 6508:1984 e ABNT NBR 6457:1986. Estes ensaios foram executados no Laboratório de Solos do LECIV/CCT/UENF, com a utilização de picnômetros.

Na Figura 3-7 pode-se observar uma porção da amostra de solo sendo inserida em um picnômetro com o auxílio de um funil. A massa específica é apresentada em gramas por centímetro cúbico. Para a maioria dos solos o valor da massa específica está entre 2,65 a 2,85 g cm⁻³, segundo Caputo (2008).



Figura 3-7: Picnômetro com amostra de solo.

3.2.1.2. Caracterização química

Para análise, uma parte da amostra da matéria-prima, previamente peneirada na peneira nº40 e seca em estufa a 110°C por um período de 24 horas, foi cominuída em um moinho de esferas planetário (Fritsh, Pulverisette, Alemanha) a 200 RPM por dois ciclos de 20 minutos cada (Figura 3-8). O material natural foi então passado na peneira nº 200 (0,075 mm) para a determinação da sua composição química.



Figura 3-8: Moinho de esferas, painel e argila mais esferas.

A composição química da matéria-prima foi obtida por meio da técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX) em um equipamento (Shimadzu, EDX700, Japão), Figura 3-9, sob condição de ajuste de vácuo de dois canais com o material em pó finíssimo colocado em um porta-amostra. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil, LECIV/CCT/UENF.



Figura 3-9: Equipamento (Shimadzu, EDX700, Japão).

A Perda ao Fogo (PF) foi determinada por meio da estimativa da massa de amostra argilosa antes e depois de ser levada às temperaturas de 450, 600, 750, 950 e 1100°C em forno elétrico tipo mufla.

Foi utilizado um cadinho de 12,087 g em temperatura ambiente e que, após aquecimento por 5 minutos em estufa a 105°C, apresentou 12,080 g (Figura 3-10).



Figura 3-10: Cadinho de 12,087 g.

Depois de atingir cada temperatura mencionada e após um tempo em torno de uma hora, o forno foi desligado e mantido fechado até que a temperatura atingisse $\pm 100^{\circ}\text{C}$, de modo a permitir o manuseio e a retirada do cadinho, transferindo-o para um dessecador com sílica gel para impedir a absorção de umidade, sendo mantido assim até a etapa de estimativa da massa em balança de precisão.

A perda ao fogo foi obtida pela seguinte expressão:

$$\text{PF (\%)} = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (3.2)$$

onde

M_i → massa de solo antes da queima;

M_f → massa de solo depois da queima.

3.2.1.3. Caracterização mineralógica por difração de raios-X

Para essa análise, uma parte da amostra obtida anteriormente por meio de cominuição em moinho de esferas planetário (Fritsh, Pulverisette, Alemanha) a 200 RPM por 2 ciclos de 20 minutos cada e passada na peneira nº 200 (0,075 mm) foi submetida à difração de raios-X (DRX) para identificação dos argilominerais e minerais presentes na mesma. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Avançados, LAMAV/CCT/UENF, equipamento (Shimadzu, XRD700, Japão), com radiação $\text{Cu-K}\alpha$, com 40 kV e 30 mA. A varredura foi efetuada com 2θ variando entre os ângulos de 5° a 80° com velocidade de varredura de $2^{\circ}/\text{minuto}$ (Figura 3-11).



Figura 3-11: Equipamento (Shimadzu, XRD700, Japão).

O padrão de difração de raios-X foi obtido por meio do programa Excel da Microsoft e comparado com valores de fichas *Joint Comitee of Powder Diffraction Standards* (JCPDS).

3.2.2. Atributos dos blocos cerâmicos estruturais

3.2.2.1. Queima dos blocos em temperaturas de 800, 850, 900, 950 e 1000°C.

Os blocos cerâmicos estruturais utilizados no ensaio, procedentes de um lote do dia 31 de janeiro de 2014, foram queimados em forno a gás a temperaturas de 800, 850, 900, 950 e 1000°C (Figura 3-12).



Figura 3-12: Temperaturas de queima dos blocos cerâmicos estruturais.

O forno modelo A900, produzido por JRicardo (www.jricardo.com.br), empregado para a queima, apresenta dimensões internas de 60 mm de largura, 800 mm de profundidade e 900 mm de altura e pode alcançar temperatura de até 1300°C. O equipamento possui 04 maçaricos, é construído com tijolos refratários e manta fibrocimento. O controle da temperatura é feito por meio de regulagens no fornecimento do gás através de manômetros, com acompanhamento por termopar introduzido na porta do forno, como pode ser observado na Figura 3-13.

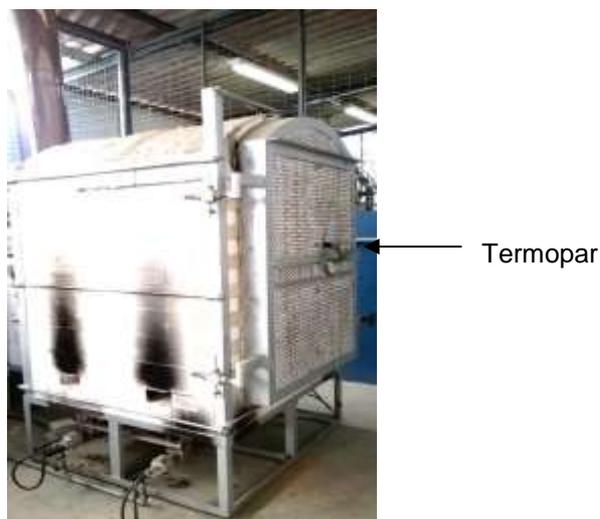


Figura 3-13: Forno (JRicardo, A900, Brasil) com o termopar na parte frontal.

A variação das temperaturas, para cada valor de queima desejado, é observada na Figura 3-14, na qual se verifica que ao atingir a temperatura estabelecida ela foi mantida estabilizada até que se completasse o tempo final de nove horas.

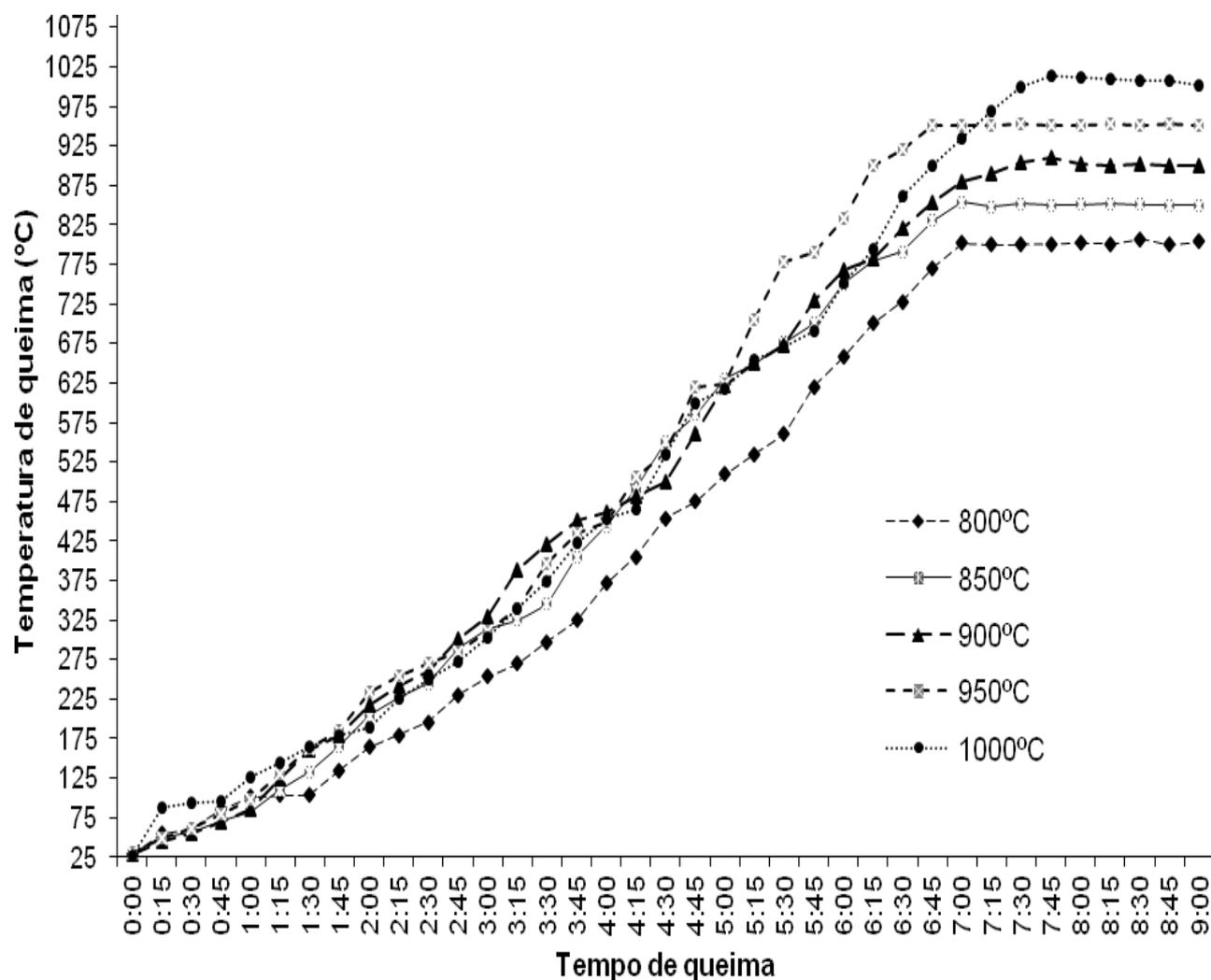


Figura 3-14: Evolução da temperatura durante a queima dos blocos.

As elevações das temperaturas durante o tempo de queima variaram entre 1,25 a 3,0°C por minuto, o que caracteriza o processo como queima lenta, conforme Dutra *et al.* (2009).

Na Figura 3-15, momento de tomada da temperatura por meio de um termopar posicionado na parte frontal do forno. O visor do termômetro indica a temperatura dentro do forno.



Figura 3-15: Leitura da temperatura

A disposição dos blocos cerâmicos estruturais no forno, 30 no total, antes e após a queima pode ser vista na Figura 3-16.



Figura 3-16: Disposição dos blocos no forno.

Os blocos utilizados como controle foram queimados pela empresa produtora, Cerâmica Pau Brasil, à temperatura estimada de 850°C, em forno tipo túnel (Hoffman) com aproximadamente 100 m de comprimento (Figura 3-17).

Na Figura 3-17 são apresentadas as temperaturas observadas entre a entrada do forno tipo túnel até a saída da fornalha, onde se dá propriamente a queima. Essa avaliação do processo de queima adotado na indústria foi feita com vistas a reproduzi-lo o mais fielmente possível durante a queima em forno a gás das amostras recolhidas no pátio industrial.

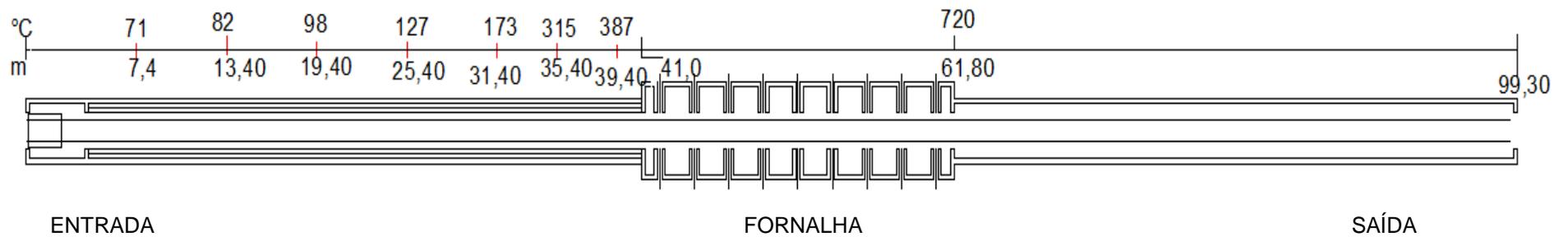


Figura 3-17: Representação esquemática do forno da cerâmica e temperaturas.

Antes de serem levados nos vagões (Figura 3-18) para a queima, os blocos cerâmicos são pré-aquecidos em estufas, que utilizam gases quentes do forno, até temperaturas da ordem de 160°C.



Figura 3-18: Transporte dos blocos para queima no forno.

Entre a entrada e a saída do forno, os vagões com os blocos estruturais cerâmicos demandam 12 horas, permanecendo na fornalha por cerca de 5 horas (Figura 3-19), com a temperatura variando de 387°C no início da área de queima a 720°C na saída, com o máximo da temperatura sendo observada na área intermediária da dimensão total da fornalha.



Figura 3-19: Detalhes da fornalha: portas de alimentação e lenha de eucalipto

No interior da fornalha, que emprega madeira de reflorestamento de eucalipto como fonte de calor, a temperatura sofre variações, principalmente nos momentos

de abastecimento, e podem ultrapassar dos 850°C desejáveis, como mostra o painel com indicadores de temperatura (Alutal, IS4000, Brasil) observados na Figura 3-20.

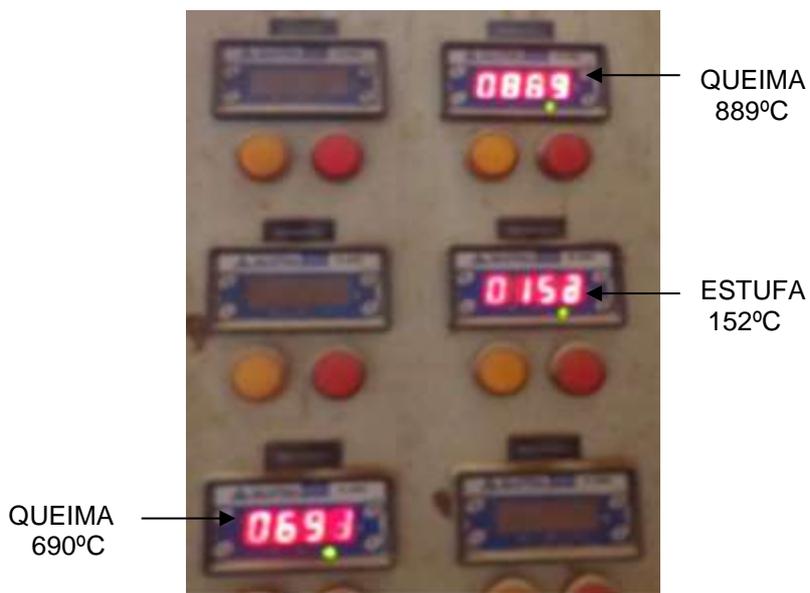


Figura 3-20: Temperaturas observadas em diferentes pontos do forno e na estufa.

As medições manuais das temperaturas no forno tipo túnel foram feitas com o uso de um termopar portátil (Alutal-SIEBEDK SENSORS, ALUterm 1200, Brasil). O equipamento indica a temperatura através de display de cristal líquido até 1200°C, com um termopar tipo K (Chromel – Alumel). Os equipamentos possuem certificação ISO-9001:2008 (Figura 3-21).



Figura 3-21: Equipamento portátil utilizado para leitura de temperaturas.

3.2.2.2. Ensaios dimensionais

O ensaio dimensional é uma importante etapa do estudo, uma vez que as características geométricas dos blocos devem atender aos critérios normativos, para que tenham desempenho adequado. Os blocos estruturais devem possuir a forma de um prisma reto, as áreas brutas (AB) — que correspondem às áreas das seções de assentamento delimitadas pelas arestas dos blocos, sem desconto das áreas dos furos — devem ser determinadas, uma vez que esses dados são necessários para o cálculo das resistências à compressão (ABNT NBR 15.270:2005).

Nos blocos cerâmicos estruturais de paredes vazadas, a espessura mínima dos septos deve ser de 7 mm e das paredes externas deve ser no mínimo de 8 mm, conforme mostrado esquematicamente na Figura 3-22, cuja tolerância relacionada à média das variações dimensionais efetivas deve ser de $\pm 3\text{mm}$. A espessura dos septos dos blocos cerâmicos está diretamente relacionada com a sua resistência mecânica à compressão. Quanto menor a espessura, menor será a resistência e, conseqüentemente, haverá o comprometimento estrutural da construção.

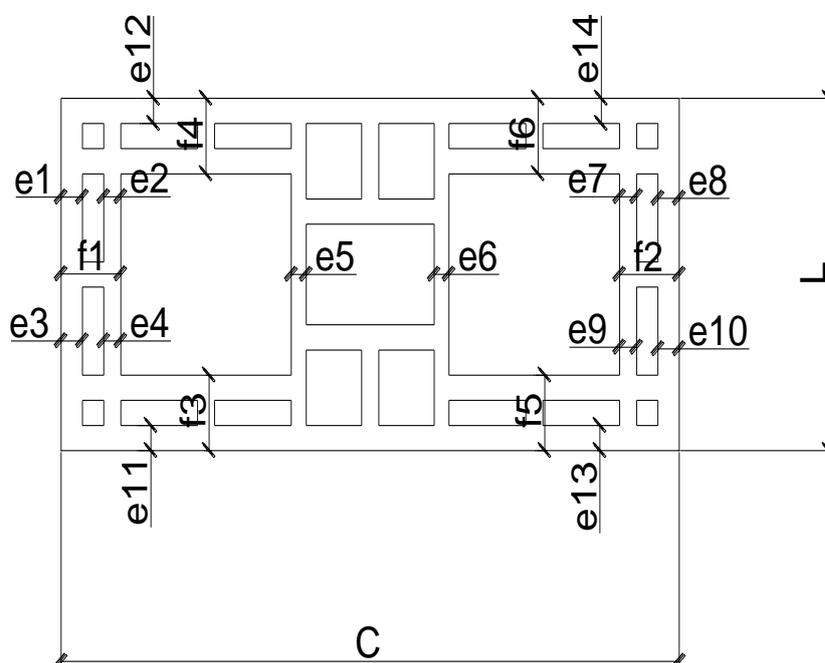


Figura 3-22: Planta do bloco cerâmico para levantamento dos dados dimensionais.
Fonte: Adaptação da ABNT NBR 15.270:2005.

As medidas dos septos foram efetuadas com um paquímetro universal Mitutoyo Série 530 e as medidas de largura, altura e comprimento foram efetuadas com uma escala de aço rígida Mitutoyo.

3.2.2.3. Velocidade direta de pulso ultrassônico longitudinal

Na revisão bibliográfica não foram encontrados trabalhos que utilizassem o teste de ultrassom em blocos cerâmicos estruturais, cujos assentamentos são feitos com os furos na vertical e, em particular, com as dimensões de fabricação (14 x 19 x 29 cm) e com o tipo de arranjo de septos do bloco mostrado na Figura 3-22. Dessa forma, utilizou-se a média da largura ($L = 0,136$ m), da altura ($H = 0,188$ m) e do comprimento ($C = 0,289$ m), de 09 blocos queimados a 950°C em forno a gás, com temperatura controlada por termopar, para verificação da influência dos espaços vazios em torno dos septos internos e externos dos blocos, na leitura da velocidade da onda ultrassônica longitudinal (V_L) com medição na disposição direta, blocos secos ao ar, temperatura ambiente abaixo de 30°C . As leituras foram feitas nos septos contínuos na direção da largura (V_1), altura (V_2) e comprimento (V_3), que se constituem nas extensões do trajeto entre os dois transdutores, de transmissão e de recepção (Figura 3-25). A Figura 3-23 mostra a planta do bloco cerâmico estrutural com a localização do Corte – AB, a vista de frente com o referido corte, onde os septos contínuos na direção da largura podem ser identificados e a vista lateral esquerda.

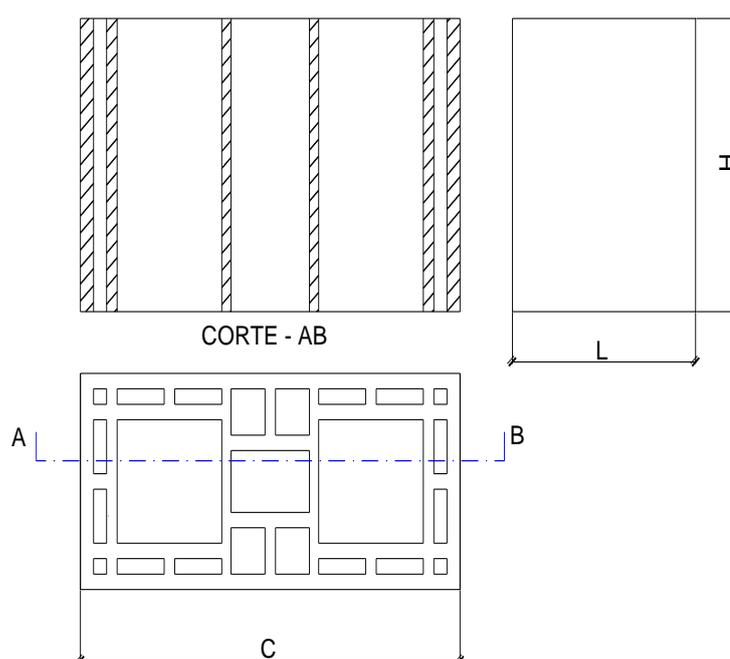


Figura 3-23: Corte visto de frente, planta e vista lateral do bloco (14x19x29 cm).

A Figura 3-24 mostra que o posicionamento dos transdutores foi efetuado na posição intermediária da altura do bloco, quando da leitura na direção da largura. O posicionamento na direção do comprimento e da altura foi feito igualmente na posição intermediária dos septos contínuos.

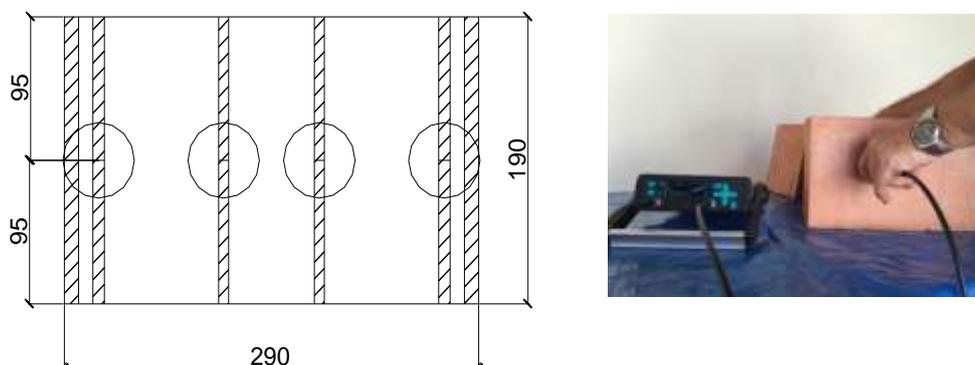


Figura 3-24: Localização dos transdutores

Em cada uma das direções foram feitas de duas a quatro medições da velocidade do pulso ultrassônico, sendo V_1 , V_2 e V_3 a média das leituras nas respectivas extensões de trajeto (Figura 3-25).

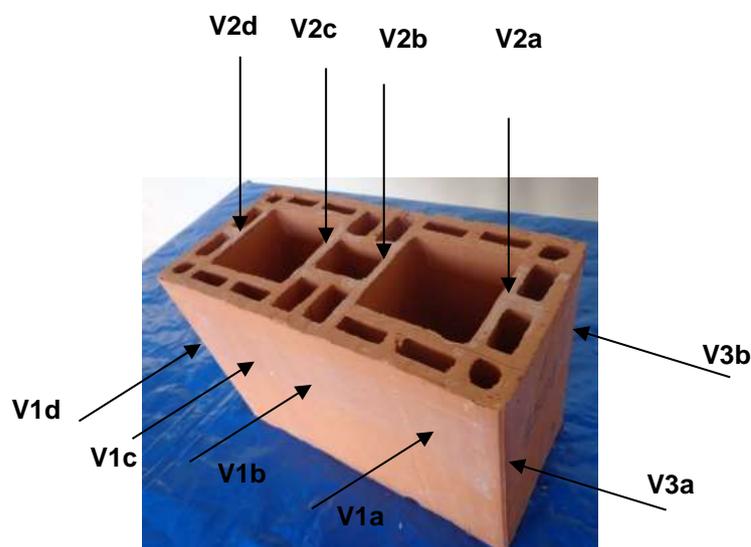


Figura 3-25: Posicionamento das leituras V_1 , V_2 e V_3 .

V_1 → média de quatro medições na dimensão da largura (L);

V_2 → média de quatro medições na dimensão da altura (H);

V_3 → média de duas medições na dimensão do comprimento (C).

Foram usados transdutores de 54 kHz, que se encontram dentro da especificação da Tabela 3.2, com ganho do receptor (Rx) variando de 1x a 500x e com voltagem automática, seguindo as recomendações do fabricante (PROCEQ) e com acoplamento acústico adequado dos transdutores à superfície em teste, com a utilização de vaselina.

A temperatura ambiente de testes até 30°C e umidade relativa do ar em torno de 50%, não exige que se faça uso de um fator de correção. Em seguida manteve-se Rx em 100x e variação da voltagem de 125 V a 500 V.

O equipamento apresentou no visor, em porcentagem, o nível de sinal recebido. Portanto, optou-se pelo ganho de Rx 100x e voltagem 500 V depois de se fazer o estudo e comparar os maiores níveis de sinal nas variações estudadas. Para medições estáveis, o nível do sinal deve ser superior a 75%, segundo recomendação no manual do equipamento. A medição da velocidade no sentido do comprimento apresentou níveis de sinal abaixo dos outros dois sentidos, mas dentro do limite proposto pelo fabricante.

Foi utilizado o pulso de transmissão na opção *burst*, que envia pacotes de pulsos até que se obtenha uma leitura estável e então fixa automaticamente, permitindo a anotação da medição na planilha de dados elaborada para o estudo.

Na Tabela 3.2 encontram-se as recomendações da BS 1881:parte 203 para as dimensões laterais mínimas recomendadas para o objeto de teste.

Tabela 3.2: Dimensões mínimas do objeto de teste (BS 1881: parte 203)

Frequência da transmissão kHz	Velocidade do pulso 3.500 m/s	Velocidade do pulso 4.000 m/s	Velocidade do pulso 4.500 m/s
Dimensões laterais mínimas do objeto de teste			
24	146 mm	167 mm	188 mm
54	65 mm	74 mm	83 mm
150	23 mm	27 mm	30 mm

Na Tabela 3.3 observam-se as velocidades dos pulsos ultrassônicos nas três direções ortogonais (V_1 , V_2 e V_3) em blocos cerâmicos estruturais e as velocidades nas três direções ortogonais (V_1' , V_2' e V_3') medidas em septos isolados dos respectivos blocos, extraídos com serra elétrica (Figura 3-26).



Figura 3-26: PUNDIT LAB⁺, bloco e septos extraídos de blocos cerâmicos estruturais.

Tabela 3.3: Média, desvio padrão e coeficiente de variação das medições das velocidades nas três direções ortogonais em bloco cerâmico estrutural (V_1 , V_2 e V_3) e nos septos isolados (V_1' , V_2' e V_3').

	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_3 (m/s)	V_1' (m/s)	V_2' (m/s)	V_3' (m/s)
Média	2840	3536	3100	2804	3505	3136
Desv.Pad.	274,5	374,7	477,0	232,8	371,6	422,0
Coef.Var. (%)	9,7	10,6	15,4	8,3	10,6	13,5

Verifica-se pelos dados da Tabela 3.3, que o uso do ultrassom para a leitura das velocidades dos pulsos, nas três direções ortogonais dos blocos cerâmicos estruturais (V_1 , V_2 e V_3) e de seus septos isolados (V_1' , V_2' e V_3') revelou valores similares, evidenciando que os furos existentes na configuração dos blocos não constituem impedimento para a utilização do ultrassom no artefato cerâmico. Os coeficientes de variação de 8,3 a 15,4% são considerados baixos para o tipo de material estudado. As leituras das velocidades nos blocos e/ou nos septos isolados foram efetuadas com as peças secas ao ar, em temperatura menor que 30°C e umidade relativa em torno de 50%.

3.2.2.4. Desvio do esquadro

Para esse ensaio utilizou-se os procedimentos detalhados no item 2.2.2.3.

O desvio D foi medido com o auxílio de um instrumento denominado esquadro metálico com vistas a verificar a perpendicularidade entre a base do bloco, onde é feito o assentamento, e a sua face externa destinada ao revestimento (Figura 3-27). A não conformidade neste ensaio indica que a parede poderá ter problemas de esquadro, ou seja, poderá ficar desalinhada.



Figura 3-27: Desvio do esquadro.

3.2.2.5. Planeza das faces

Para esse ensaio procedeu-se como detalhado no item 2.2.2.3.

Nesse ensaio realizado com o auxílio de uma régua metálica foi verificado se as faces externas das amostras de blocos cerâmicos estavam planas, ou seja, se não apresentavam depressões acima do limite permitido por norma (Figura 3-28). Nesse caso, a não conformidade afeta principalmente a etapa de revestimento, pois a argamassa de reboco apresentará variações de espessura, o que representará maiores custos para os consumidores que, na tentativa de corrigir o problema, terão que utilizar maior quantidade de argamassa.



Figura 3-28: Planeza das faces.

3.2.2.6. Absorção

Para esse ensaio utilizaram-se os procedimentos detalhados no item 2.2.2.7.

Esse ensaio verificou o percentual de água absorvido pelo bloco cerâmico estrutural, obtido a partir da diferença entre a massa seca e a massa úmida da amostra.

De acordo com a metodologia de ensaio descrita no item 2.2.2.7, primeiro foi determinada a massa do bloco cerâmico após ter sido seco em estufa. Após essa etapa, os blocos foram imersos em água por um período mínimo de 24 horas e determinada a massa do bloco úmido. Através da diferença entre os dois valores encontrados, obteve-se o percentual de água absorvido pela amostra.

Alvenarias executadas com blocos cerâmicos estruturais com alta absorção de água revelam problemas de aderência da argamassa de reboco, pois a água existente na composição da argamassa é absorvida, resultando em uma massa seca, sem poder de fixação. Além disso, as alvenarias podem sofrer aumento de carga quando expostas à chuva, podendo acarretar problemas estruturais à construção.

3.2.2.7. Densidade dos blocos

Para esse ensaio foram utilizados os procedimentos detalhados no item 2.2.2.8. Na Figura 3-29 observam-se os procedimentos utilizados para a obtenção da massa aparente (m_a) do bloco.



Figura 3-29: Avaliação da massa aparente do bloco.

3.2.2.8. Resistência à compressão simples

Esse ensaio verificou a capacidade de carga dos blocos cerâmicos estruturais submetidos à força de compressão simples por prensa hidráulica.

Capecamento dos blocos cerâmicos estruturais

Para efetuar o ensaio de compressão simples alguns procedimentos foram adotados, começando pelo capecamento dos blocos cerâmicos seguindo as recomendações normativas. Utilizou-se uma superfície lisa feita de pisos cerâmicos para ajustar os blocos sobre uma base feita de pasta de cimento. Essa pasta foi elaborada medindo-se a massa de uma quantidade de cimento tipo CP III 32 RS. Inicialmente foram usados 3 kg de cimento e um fator água/cimento de 0,40. Com uma proveta mediu-se 1200 ml, volume de água suficiente para a elaboração da pasta. A consistência deve ser tal que permita trabalhabilidade, sem escorrer totalmente da colher de pedreiro.

Na Figura 3-30 observa-se a proveta graduada, a preparação da pasta e a consistência adequada para o capecamento dos blocos.



Figura 3-30: Preparação da pasta de cimento para capeamento dos blocos.

A superfície do piso cerâmico foi pincelada com óleo diesel, antes de fazer a base do capeamento, que pode ser vista na Figura 3-31.



Figura 3-31: Base de pasta de cimento para capeamento.

Com uma leve pressão, o bloco é posicionado sobre a base de pasta de cimento e as rebarbas retiradas e reaproveitadas. Essa operação é feita em uma face do bloco e depois repetida para a outra face. Na Figura 3-32 observa-se o processo de capeamento de alguns blocos cerâmicos estruturais.

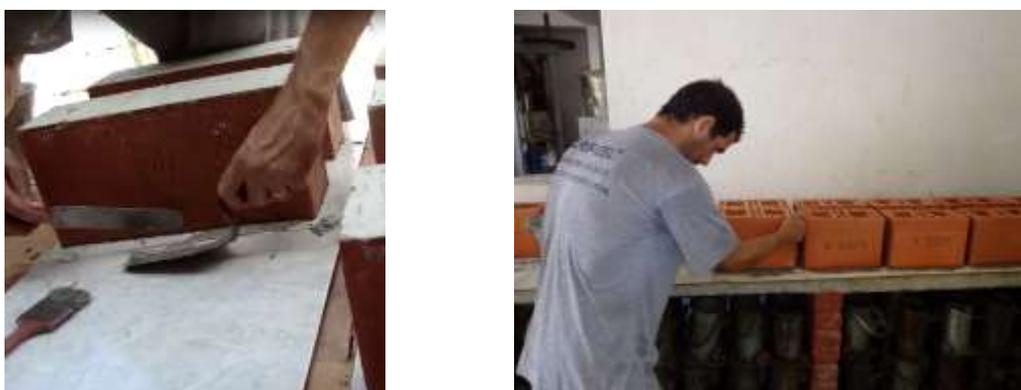


Figura 3-32: Capeamento das amostras de blocos cerâmicos estruturais.

Para o ensaio de resistência à compressão simples, os blocos capeados foram imersos por um período de aproximadamente seis horas, depois postos sobre apoios para drenar o excesso de água, uma vez que a ABNT NBR 15270-3:2005 recomenda que os blocos, em vez de secos, sejam ensaiados em uma situação desfavorável, ou seja, saturados. Essa etapa pode ser observada na Figura 3-33.



Figura 3-33: Etapa de saturação de blocos cerâmicos estruturais.

Para verificação da sensibilidade e calibração do equipamento, uma amostra queimada em temperatura estimada de 850°C na Cerâmica Pau Brasil foi submetida ao ensaio de compressão na prensa universal (Shimadzu, UH-F 500 kN, Japão) no LECIV/UENF (Figura 3-34) e outra amostra de igual procedência foi submetida ao ensaio de compressão na prensa (Cotenco/Pavitest, I.3001.C, Brasil) com capacidade de 100 toneladas e relatório de calibração e ajustes feitos pela Fortis Automação, certificado 6905/2014, com calibração feita no dia 04/02/2015 e validade até 02/04/2016 pertencente ao LAB-TEC Laboratório de Solo e Asfalto e Concreto Ltda, situado na Rua Ayer Campos, nº 100, Parque Aurora, Campos dos Goytacazes, RJ (Figura 3-35).



Figura 3-34: Prensa (Shimadzu, UH-F 500 kN, Japão).



Figura 3-35: Prensa (Cotenco/Pavitest, I.3001.C, Brasil).

Verificou-se que em ambas as prensas não houve variação expressiva em relação aos valores obtidos para a resistência à compressão. Neste sentido, optou-se pela realização dos ensaios, no total de 136 blocos cerâmicos estruturais, no LAB-TEC, em função da disponibilidade de infraestrutura e de pessoal treinado, para realização de todas as determinações no espaço de tempo necessário para a condução do trabalho.

3.2.3. Tratamento estatístico

Os ensaios com blocos cerâmicos estruturais foram realizados segundo delineamento inteiramente casualizado desequilibrado, utilizando-se como unidades experimentais 20 a 25 corpos de prova (=blocos cerâmicos estruturais) com diferentes temperaturas de queima (800, 850, 900, 950 e 1000°C) e como controle a queima industrial a 850°C (Cerâmica Pau Brasil), totalizando seis tratamentos. Os dados obtidos foram submetidos à análise da variância e comparação de médias por meio do teste de Tukey ($P < 0,05$). Utilizou-se a correlação de Pearson (R) entre as variáveis avaliadas a partir do critério de 0,70. Os dados referentes às temperaturas de queima foram submetidos à análise da variância da regressão polinomial e cálculo das equações de regressão. Utilizou-se a ferramenta computacional Sistema de Análises Estatísticas - SAEG 9.2 (UFV, 2007).

Além das análises descritas, os dados referentes à propriedade mecânica de resistência à compressão simples foram submetidos à Análise de Weibull da Máxima Verossimilhança (MV) e Método Gráfico de Probabilidades (MGP) considerando 95% de probabilidade, bem como submetidos à análise segundo recomendações da ABNT NBR 15.270:2005 para o cálculo da resistência característica do bloco cerâmico estrutural (f_{bk}). A partir desses dados foram construídos gráficos comparativos entre as análises realizadas. O detalhamento das análises de Weibull (MV e MGP) pode ser consultado em Azeredo *et al.* (2015a; 2015b).

Um resumo do método científico encontra-se na Figura 3-36, que inclui a definição do problema a ser estudado — no caso deste trabalho foi a avaliação das propriedades físicas e mecânicas em blocos cerâmicos estruturais através de ensaio não destrutivo utilizando o pulso ultrassônico —, o estabelecimento do planejamento da pesquisa, a coleta dos dados de variáveis, revisão crítica dos dados e avaliação dos valores encontrados, apresentação dos dados após a crítica por meio de tabelas e gráficos ilustrativos e descrição dos dados.



Figura 3-36: Diagrama resumido do trabalho.

3.2.3.1. Análise de Variância (ANOVA) e o Teste de Tukey

O teste mais rigoroso que verifica a diferença ou contraste entre as médias é o teste de Tukey. Este teste está contido nos princípios básicos da experimentação considerando-se que os dados se comportam como uma distribuição normal.

Antes de ser descrito o teste de Tukey, tornam-se necessários à apresentação dos conceitos do Delineamento Inteiramente Casualizados (DIC), que se encontra listado a seguir, segundo (Gomes, 2000):

- **Ensaio:** é o trabalho previamente planejado, que segue determinados princípios básicos, no qual se faz a comparação dos efeitos dos tratamentos;
- **Tratamento:** é o método, elemento ou material cujo efeito deseja-se medir ou comparar em um experimento;
- **Unidade experimental ou parcela:** é a unidade que recebe os tratamentos e fornece os dados que deverão refletir seu efeito;
- **Delineamento experimental:** é o plano utilizado na experimentação que implica na forma como os tratamentos serão designados nas unidades experimentais e em um amplo entendimento das análises a serem feitas quando todos os dados estiverem disponíveis.

A partir destes conceitos, os dados são repetidos com a finalidade de proporcionar a obtenção do erro experimental desde que proporcionem a todos os tratamentos a mesma probabilidade de serem designados a quaisquer unidades experimentais, sendo este, o conceito do Princípio da Casualização.

Consequentemente, divide-se o ambiente heterogêneo em subambientes homogêneos, atendendo o Princípio do Controle Local, tornando o delineamento experimental mais eficiente pela redução do erro experimental. O ambiente heterogêneo são todas as amostras de todos os tratamentos.

Para a realização do delineamento, as amostras foram organizadas sequencialmente, e os resultados obtidos nos ensaios tecnológicos foram avaliados pela análise de variância de acordo com o teste de hipóteses estabelecido. Neste caso, a análise de variância é realizada quando a variância da população é desconhecida para uma variável x , estimando a variância com base nos dados da amostra, ou seja, conhece-se a variância da amostra (Sx^2).

O modelo matemático para um delineamento inteiramente casualizado é expresso pela equação (3.3) (Gomes, 2000):

$$(\mu) = (\bar{y}) + (\tau_i) + e_{ij} \quad (3.3)$$

onde (μ) representa a média populacional da variável; (\bar{y}) representa a média amostral; (τ_i) representa o efeito do tratamento; e_{ij} representa o erro de resíduo procedente da amostra e dependente do tratamento. O valor de um ponto ij qualquer é função da média geral, do efeito do tratamento e da variação do acaso.

O número total parcelas (N) é dado pelo número de repetições (J) vezes o número de tratamentos (I).

Os dados podem ser dispostos em um quadro cuja visualização torna-se mais fácil e prático para a análise de variância conforme o Quadro (3.1).

Quadro 3.1: Distribuição dos dados experimentais (y_{ij})

Tratamentos (I)	Repetições (J)				
	J ₁	J ₂	J ₃	...	J _j
I ₁	y ₁₁	y ₁₂	y ₁₃	...	y _{1j}
I ₂	y ₂₁	y ₂₂	y ₂₃	...	y _{2j}
I ₃	y ₃₁	y ₃₂	y ₃₃	...	y _{3j}
.
.
.
I _i	y _{i1}	y _{i2}	y _{i3}	...	y _{ij}
Somatório					Σy_{ij}

Em seguida, os dados são tratados na tabela de Análise de Variância (ANOVA) para um delineamento inteiramente casualizado realizando o teste F de Fisher, que é a razão entre duas variâncias. Neste trabalho, utilizou-se de 20 a 25 repetições de corpos de prova sob diferentes temperaturas de queima, totalizando 6 tratamentos.

A Tabela 3-1 apresenta o modelo de tabela para a Análise de Variância do delineamento inteiramente casualizado.

Tabela 3-1: Modelo de tabela ANOVA para DIC

ANOVA PARA DIC						
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F_{cal}	F_{tab}	SIG
TOTAL	IJ - 1	SQ _{Total}				
TRAT	I - 1	SQ _{Trat}	QM _{Trat}	F _{cal}	F _{tab}	
RESÍDUO	I(J-1)	SQ _{Res}	QM _{Res}			

C.V. (%) =

Onde:

Fonte de Variação (F.V.) – a fonte de variação é dada pelo modelo matemático (Equação 3.3);

Grau de Liberdade (G.L.) – O grau de confiabilidade de uma amostra é maior naquela que tem um maior número de elementos. O grau de liberdade não apresenta impacto sobre grandes amostras, mas é extremamente rigoroso com as pequenas amostras. Nas tabelas estatísticas, quanto maior for uma amostra, menor rigor probabilístico é imposto na tabela. Portanto, quanto menor for a amostra, maior rigor probabilístico é imposto nas tabelas.

Número total de amostras $N = I \times J$, onde (I) representa o número de tratamentos e (J) o número de repetições.

$$GL_{total} = (I \times J) - 1$$

$$GL_{trat} = (I) - 1$$

$$GL_{residual} = GL_{total} - GL_{trat}$$

Soma dos Quadrados (SQ)

$$SQ_{Total} = \sum (y_{ij})^2 - \frac{(\sum y_{ij})^2}{N} \quad (3.4)$$

$$SQ_{Trat} = \frac{1}{J} \sum_{l=1}^I (T_l)^2 - \frac{(\sum y_{ij})^2}{N} \quad (3.5)$$

$$SQ_{Residuo} = SQ_{total} - SQ_{Trat} \quad (3.6)$$

$$QM_{\text{Trat}} = \frac{SQ_{\text{trat}}}{GL_{\text{trat}}} \quad (3.7)$$

$$QM_{\text{Resíduo}} = \frac{SQ_{\text{trat}}}{GL_{\text{Resid}}} \quad (3.8)$$

onde SQ_{Total} é a soma quadrática total, SQ_{Trat} é a soma quadrática do tratamento, $SQ_{\text{Resíduo}}$ é a quadrática do resíduo referente ao erro experimental, QM_{Trat} é o quadrado médio do tratamento, $QM_{\text{Resíduo}}$ é o quadrado médio do resíduo.

Teste F de Fisher - é a razão entre duas variâncias, onde é criada uma relação probabilística entre o QM_{Trat} e QM_{Residual} , ou seja, a razão entre a quantidade de desvio ocasionado pelo efeito de Tratamento e a quantidade de desvio ocasionado pelo efeito residual.

$$F_{\text{cal}} = \frac{QM_{\text{Trat}}}{QM_{\text{Res}}} \quad (3.9)$$

No teste F as hipóteses a serem avaliadas são as seguintes:

$$\begin{aligned} H_0: QM_{\text{trat}} &= QM_{\text{resid}} \\ H_1: QM_{\text{trat}} &> QM_{\text{resid}} \end{aligned} \quad (3.10)$$

A hipótese H_0 significa que todos os possíveis contrastes entre médias do tratamento são estatisticamente nulos, ou seja, não houve diferença entre os tratamentos. A hipótese H_1 é a hipótese alternativa, significando que o efeito de tratamento é superior ao efeito do erro. Para rejeitar H_0 , ou seja, para que haja efeito de tratamento, $F_{\text{calc.}} \geq F_{\text{tab.}}$.

Dessa forma, o teste de hipóteses é verificado pelo teste F. O teste F é resumido abaixo:

$$\begin{aligned} \text{Se } F_{\text{calc.}} &\geq F_{\text{tab.}} \rightarrow \text{Rejeita-se } H_0 \\ \text{Se } F_{\text{calc.}} &\leq F_{\text{tab.}} \rightarrow \text{Aceita-se } H_0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

A partir das hipóteses apresentadas (Equação 3.10), se houver a aceitação de H_0 (3.11), significa que não existe diferença entre as médias proveniente dos tratamentos. Assim os tratamentos não têm influência sobre as amostras e não são significativos no nível de significância exigida. Caso haja rejeição de H_0 , pelo menos uma média entre as médias da amostragem é diferente entre si ao nível de probabilidade da acurácia desejada, deste modo, os tratamentos influenciam as amostras. O F_{tab} é o teste F tabelado, que pode ser consultado em Gomes (2000).

Coefficiente de Variação (C.V.%) – essa variação é o teste que depende da quantidade de erro cometido nas avaliações. Essa quantidade de erro é em relação a uma medida central, que é a média geral.

$$\text{C.V. (\%)} = \frac{\sqrt{\text{QM resid}}}{\bar{y} \text{ geral}} \times 100 \quad (3.12)$$

onde $\text{QM}_{\text{Resíduo}}$ é o quadrado médio do resíduo, \bar{y} é a média geral.

A Análise de Variância é uma ferramenta muito eficiente quando se deseja inferir sobre o universo da amostragem, no entanto, não identifica qual ou quais médias são diferentes uma das outras. Essa discriminação é realizada pelo teste de Tukey. As características do teste de Tukey são: compara médias com o mesmo número de repetições, é mais rigoroso e se baseia na amplitude estudantizada “q” e no desvio padrão residual. Este teste se baseia na teoria dos contrastes que são funções lineares das médias.

$$H_0: \bar{y}_i = \bar{y}_j$$

$$H_1: \bar{y}_i \neq \bar{y}_j, \text{ sendo } i \neq j \quad (3.13)$$

Sendo \bar{y}_i a média paramétrica do tratamento i e \bar{y}_j a média paramétrica do tratamento j.

O teste de Tukey baseia-se na diferença mínima significativa Δ_{DMS} , dada por (Júnior, 2004):

$$\Delta_{DMS} = q \times \frac{\sqrt{QM_{resid}}}{\sqrt{r}} \quad (3.14)$$

Sendo Δ_{DMS} a diferença mínima significativa, “q” amplitude total estudantizada, que depende da acurácia ($\alpha = 0,05$); $k=1$ (tratamentos) e do grau de liberdade. Os valores de “q” podem ser consultados em Gomes (2000). Ainda, $\sqrt{QM_{resid}}$ é o desvio padrão residual e “r” é o número de repetições.

Pela regra: $\Delta_{calculado} \geq \Delta_{DMS}$ para que se rejeite H_0 . Se H_1 é aceito, então as médias são estatisticamente diferentes. Portanto, se o contraste for maior do que a amplitude total estudantizada, o contraste é significativo ao nível $\alpha = 0,05$ de probabilidade. Caso contrário, os tratamentos impostos às amostras não surtiram efeito.

Correlação Linear de Pearson

O método usualmente conhecido para medir a correlação entre duas variáveis independentes do observador é o Coeficiente de Correlação Linear de Pearson, também conhecido como Coeficiente de Correlação do Momento Produto. Este foi o primeiro método de correlação, estudado por Francis Galton e seu aluno Karl Pearson, em 1897 (SCHULTZ e SCHULTZ, 1992). Este coeficiente de correlação é utilizado na Análise de Componentes Principais, Análise Fatorial, Análise de Confiabilidade. Utilizou-se neste trabalho a correlação de Pearson (R) entre as variáveis avaliadas a partir do critério de 0,70 que pressupõem uma forte correlação.

3.2.3.2. Análise de Weibull

Segundo Askeland e Phulé (2005), o Modelo de Frequência de Weibull se aplica a diversos problemas de Engenharia, destacando-se a determinação da vida útil ou da resistência mecânica de peças, por exemplo. Sua formulação permite uma plasticidade que emula a maior parte dos modelos de frequência. Esse modelo é empregado na caracterização de materiais frágeis tais como os produtos cerâmicos, dentre eles os blocos estruturais cerâmicos deste estudo.

Distribuição de frequência de Weibull

A função de densidade de probabilidade de Weibull é definida, segundo Kapur e Lamberson (1977), como:

$$f(x) = \frac{\beta (x - \delta)^{\beta-1}}{\theta^\beta} e^{-\left(\frac{x-\delta}{\theta}\right)^\beta} \quad (3.15)$$

onde:

β é o parâmetro (fator) de forma, ou Módulo de Weibull;

θ é o parâmetro de escala;

δ é o parâmetro de localização.

O parâmetro de localização nesta análise foi estipulado como zero, uma vez que $\delta \neq 0$ altera drasticamente os valores de β e θ . O parâmetro de localização refere-se a uma grandeza inicial, sendo o recomendado para a atual análise que seja adotado $\delta = 0$.

Dodson (2006) apresenta equações para estimativa da média de distribuição de Weibull, da variância, da função confiabilidade, da função de risco que são relacionadas a seguir:

A média de distribuição de Weibull é definida como:

$$E(x) = \delta + \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (3.16)$$

onde Γ é a Função Gama, tabulada em textos estatísticos.

A variância da distribuição de Weibull é definida como:

$$V(x) = \theta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) + \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] \quad (3.17)$$

A função de Confiabilidade descreve a probabilidade de sobrevivência em função do tempo, ou de fratura em função de tensão. Essa função é definida como:

$$R(x) = e^{-\left(\frac{x-\delta}{\theta}\right)^\beta} \quad (3.18)$$

A função de Risco representa a taxa de falha instantânea e pode ser usada para caracterizar falhas ocorridas. Essa função é definida como:

$$H(x) = \frac{\beta (x - \delta)^{\beta-1}}{\theta^{\beta}} \quad (3.19)$$

As estimativas de parâmetros de Weibull podem ser feitas por alguns métodos, como: Gráfico de Probabilidade, Gráfico de Risco, Máxima Verossimilhança, Estimadores de Momento e Estimadores Lineares.

Neste trabalho foi utilizado o Método Gráfico de Probabilidade e o Método da Máxima Verossimilhança como estimador dos parâmetros que compõe a distribuição de Weibull.

Distribuição de Rank

Segundo Kapur e Lamberson (1977), dada uma sequência ordenada de dados, x_1, x_2, \dots, x_n cujo número total de amostras é n e tem uma função de distribuição cumulativa $F(x)$, onde x é um valor contínuo, deseja-se determinar os valores dos estimadores $F(x_1), F(x_2), \dots, F(x_n)$. Para se estimar o valor de $F(x_n)$, neste trabalho, adotou-se o Rank Mediano

O Rank Mediano é definido pela expressão:

$$\text{Rank Mediano} \rightarrow (x_j) = \frac{j - 0,3}{n + 0,4} \quad (3.20)$$

onde:

j é a ordem da amostra;

n é o número total de amostras em um lote.

Intervalo de confiança

O Teorema do Limite Central prevê que quanto maior for o número de amostras estudado, mais a distribuição desse número tende a ser uma Normal. Para esse estudo foram utilizados de 20 a 25 amostras de bloco cerâmico para cada temperatura de queima. A ABNT NBR 15270:2005 recomenda um mínimo de 13 blocos para ensaio de resistência à compressão. No entanto, um número pequeno de amostras pode ser utilizado no Modelo de Weibull com estimativa de limites de confiança quase exatas, segundo Dodson (2006).

Intervalos de Confiança para o Parâmetro de Forma (β)

Segundo Prabhakar *et al.* (2003) e Abernethy (2006) um dos métodos para a determinação do intervalo de confiança de β é o da Máxima Verossimilhança, que é o empregado neste trabalho. O valor de β é estimado fazendo-se com que os dois lados da Equação (3.21) sejam iguais:

$$\sum_{i=1}^r \frac{\ln(x_i - \delta)}{r} = \frac{\sum_{i=1}^r (x_i - \delta)^\beta \ln(x_i - \delta)}{\sum_{i=1}^r (x_i - \delta)^\beta} - \frac{1}{\beta} \quad (3.21)$$

Os limites de confiança são da seguinte forma:

$$\beta_{\text{inferior}} = \frac{\beta}{\exp\left(\frac{K\sqrt{F_{(2,2)}^{-1}}}{\beta}\right)} \quad (3.22)$$

onde K é o $[100(1-\alpha/2)]$ -ésimo percentil normal para $100(1-\alpha)$ limite percentual. Para um limite de 95%, como empregado neste estudo, K é igual ao 97,5-ésimo percentil normal, que equivale a 1,96.

Para o limite superior:

$$\beta_{\text{superior}} = \beta \exp\left(\frac{K\sqrt{F_{(2,2)}^{-1}}}{\beta}\right) \quad (3.23)$$

F é a matriz composta dos seguintes elementos:

$$F = \begin{pmatrix} -\frac{\partial L_T^2}{\partial \theta^2} & -\frac{\partial L_T^2}{\partial \beta \partial \theta} \\ -\frac{\partial L_T^2}{\partial \beta \partial \theta} & -\frac{\partial L_T^2}{\partial \beta^2} \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

onde:

$$\frac{\partial L_T^2}{\partial \theta^2} = \frac{\beta}{\theta^2} - \left(\frac{x_i}{\theta}\right)^\beta \left(\frac{\beta}{\theta^2}\right)(\beta + 1) \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial L_T^2}{\partial \beta^2} = \frac{-1}{\beta^2} - \left(\frac{x_i}{\theta}\right)^\beta \left[\ln\left(\frac{x_i}{\theta}\right)\right]^2 \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial L_T^2}{\partial \beta \partial \theta} = \frac{-1}{\theta} + \left(\frac{x_i}{\theta}\right)^\beta \left(\frac{1}{\theta}\right) \left[\beta \ln\left(\frac{x_i}{\theta}\right) + 1\right] \quad (3.27)$$

Intervalos de Confiança para o Parâmetro de Escala (θ)

O Método da Máxima Verossimilhança estima o valor de θ a partir da seguinte expressão:

$$\theta = \left(\sum_{i=1}^r \frac{(x_i - \delta)^\beta}{r} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.28)$$

da mesma forma que no parâmetro anterior, seus limites são:

$$\theta_{\text{inferior}} = \frac{\theta}{\exp\left(\frac{K\sqrt{F_{(1,1)}^{-1}}}{\theta}\right)} \quad (3.29)$$

$$\theta_{\text{superior}} = \theta \exp\left(\frac{K\sqrt{F_{(1,1)}^{-1}}}{\theta}\right) \quad (3.30)$$

Intervalos de Confiança para o Parâmetro de Localização (δ)

Este estudo adota o Parâmetro de Localização (δ) com o valor zero, segundo recomendações de Dodson (2006). Um software acadêmico que implementa o Método da Máxima Verossimilhança, assim como o Método Gráfico de Probabilidades, dentre outros é utilizado para as análises. O número de blocos relativo à faixa de temperatura estudada para a análise de Weibull segue o número recomendado para a análise segundo a ABNT NBR 15.270:2005.

CAPÍTULO 4

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios para a caracterização da matéria-prima utilizada para a confecção dos blocos cerâmicos estruturais, assim como os ensaios realizados nas amostras de tais blocos em diferentes temperaturas de queima, 800, 850, 900, 950 e 1000°C. Os resultados das análises estatísticas também são apresentados em forma de tabelas e gráficos. As discussões dos resultados são apresentadas concomitantemente.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

4.1.1. Caracterização física

Análise granulométrica

Na Figura 4-1 observa-se o resultado do ensaio de granulometria da matéria-prima realizado no LECIV/UENF.

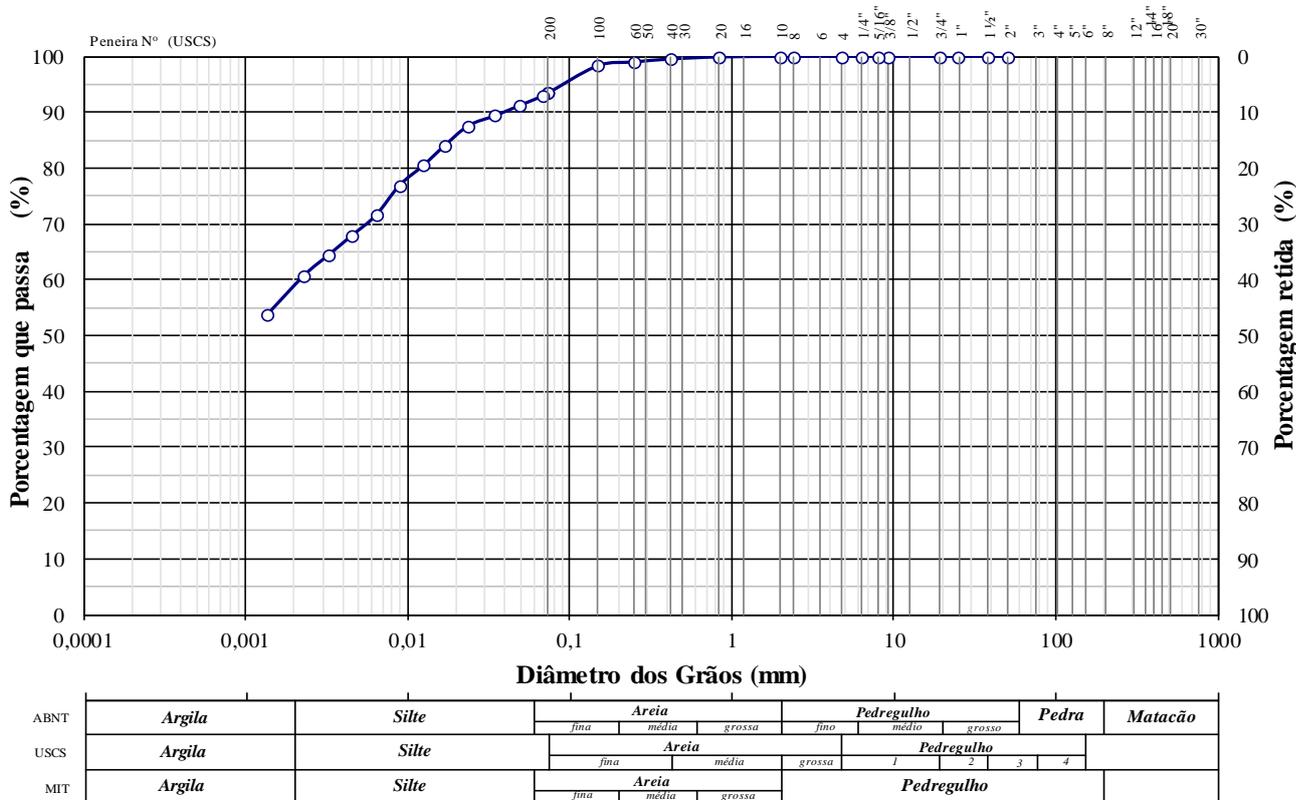


Figura 4-1: Curva de distribuição granulométrica da matéria-prima.

Os resultados obtidos para a caracterização da granulometria da matéria-prima constitutiva dos blocos são apresentados em porcentagem das frações de areia, silte e argila. A Tabela 4.1 apresenta a granulometria estimada da massa argilosa estudada.

Tabela 4.1: Características Granulométricas.

Diâmetro dos Grãos (mm) - ABNT NBR 6502:1995 – Rochas e Solos							
Argila	Silte	AREIA			PEDREGULHO		
		Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso
< 0,002	0,002 a 0,06	0,06 a 0,2	0,2 a 0,6	0,6 a 2	2 a 6	6 a 20	20 a 60
Características Granulométricas							
Pedregulho			Areia			Silte	Argila
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina		
-	-	-	-	1,0%	6,0%	34,0%	59,0%

A massa argilosa é classificada como uma argila siltosa pouco arenosa (59,0% de fração argila; 34,0% de fração silte; 6,0% de fração areia fina; 1,0% de fração areia média e 0% de fração areia grossa). Pelos resultados obtidos da distribuição granulométrica da massa argilosa estudada e considerando os resultados obtidos por Xavier (2006), Pedroti (2007), Miller (2008), Azeredo *et al.* (2012), Azeredo *et al.* (2014a; 2014c; 2015b), na região no estudo de matéria-prima com finalidade de aplicação em cerâmica vermelha, — cuja fração argila deve ser igual ou superior a 30% e igual ou inferior a 70% — pode-se inferir que a massa argilosa possui faixa granulométrica recomendada para o uso em cerâmica vermelha em geral, em bloco estrutural cerâmico em particular.

Índices de consistência

Os resultados dos Limites de Atterberg são apresentados na Tabela 4.2, sendo que os valores correspondem à média de até cinco das determinações para LL e para LP. O IP também é apresentado, sendo o seu resultado obtido por meio da equação (3.1).

Tabela 4.2: - Limites de Atterberg

Limites de Atterberg		
Limite Liquidez (LL)	Limite Plasticidade (LP)	Índice Plasticidade (IP)
68,5%	33,7%	34,7%

A classificação da massa argilosa pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS) é de que se trata de uma argila siltosa, pouco arenosa, de alta plasticidade (CH), uma vez que o seu limite de liquidez é acima de 50%.

A massa argilosa apresenta limites de Atterberg dentro da faixa de valores das massas cerâmicas caulínicas utilizada na indústria cerâmica da região em estudo e semelhante aos resultados encontrados por Xavier (2006), Pedroti (2007), Miller (2008), Azeredo (2012) e Azeredo *et al.* (2014a).

Massa específica real dos grãos

O resultado da massa específica aparente, obtido por meio da média de duas determinações com picnômetros, foi de 2,62 g cm⁻³. Esse resultado encontra-se dentro da faixa de valores para a densidade real dos grãos das argilas da região avaliadas por Xavier (2006), Pedroti (2007), Miller (2008), Azeredo (2012) e Azeredo *et al.* (2014a).

4.1.2. Caracterização química

Os resultados obtidos por meio da técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX) são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Composição química da massa argilosa natural (% em peso).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	CaO	MnO	V ₂ O ₅	ZrO ₂	CuO	SrO
47,31	37,85	8,10	2,03	2,20	1,57	0,67	0,07	0,13	0,02	-	0,008

Observa-se na Tabela 4.3 que a massa argilosa tem uma quantidade de 47,31% de sílica (SiO₂), o que indica a provável presença de argilominerais tais como: caulinita (Al₂O₃. 2SiO₂. 2H₂O) e illita, bem como a provável presença de quartzo livre na amostra total. A quantidade de 37,85% de alumina (Al₂O₃) sugere a formação de argilominerais e hidróxidos como gibsitita Al(OH)₃. A quantidade de sílica e alumina somadas totaliza 85,16% indicando a refratariedade da matéria-prima.

A cor avermelhada do bloco cerâmico estrutural após a queima, por exemplo Figura 3-25, é devido ao teor de 8,10% de óxido férrico (Fe₂O₃), tratando-se de um agente fundente, baixando o ponto de fusão da argila, podendo também indicar a presença de goetita (FeO.OH). O óxido de cálcio (CaO) também é um agente fundente e sua quantidade na amostra é de 0,67%, não sendo um teor elevado. Outro agente fundente presente é o álcalis (K₂O) com 2,03%. Este forma a fase

líquida na queima, reduzindo a porosidade do material. A sílica não combinada ajuda a diminuir a retração durante o processo de sinterização; associada a fundentes, forma o vitrificado interior da cerâmica, tratando-se de fator positivo no processo de queima.

O dióxido de titânio (Ti_2O) na quantidade de 1,57% trata-se de um óxido corante e comumente encontrado em massas argilosas empregadas no setor cerâmico da região em foco nesse trabalho, como pode ser atestado em Azeredo *et al.* (2014a).

A quantidade de 2,20% de óxido de enxofre (SO_3) indica a presença de gesso na massa argilosa estudada. A quantidade dos demais óxidos é muito pequena para desempenhar influência na cor ou na resistência da peça produzida com esse tipo de argila.

A característica das argilas utilizadas para produção dos blocos cerâmicos estruturais ensaiados neste trabalho mostram-se semelhantes às características da argila utilizada por outra unidade produtora da região de Campos dos Goytacazes, RJ, conforme Azeredo *et al.* (2014a).

A Tabela 4.4 apresenta a Perda ao Fogo (PF) em porcentagem nas temperaturas de 450, 600, 750, 950 e 1100°C.

Tabela 4.4: Perda ao Fogo em porcentagem (%)

	Temperatura de queima (°C)				
	450	600	750	950	1100
Perda ao Fogo (PF) em porcentagem (%)	2,05	6,47	10,40	12,24	12,61

A média dos cinco valores da PF é de 8,75%. Observa-se que a PF é maior nas temperaturas mais elevadas e que a matéria-prima estudada possui em torno de 12% de perda ao fogo. Segundo Santos (1992), essa perda de massa ao fogo representa a porcentagem de perda de água livre, adsorvida e de constituição da matéria-prima e, também, a degradação da matéria orgânica presente na amostra, além de sulfetos, sulfatos e carbonatos, quando presentes.

Os resultados apresentados na Tabela 4.4 indicam uma similaridade com resultados obtidos por outros pesquisadores da região como, Toledo (2003), Xavier (2006) e Pedroti (2007), indicando a aplicabilidade da massa argilosa na indústria de cerâmica vermelha.

4.1.3. Caracterização mineralógica por difração de raios-X

Os resultados obtidos por meio da técnica de difração de raios-X (DRX) para identificação dos argilominerais e minerais presentes na amostra podem ser observados no espectro de Raios-X da Figura 4-2.

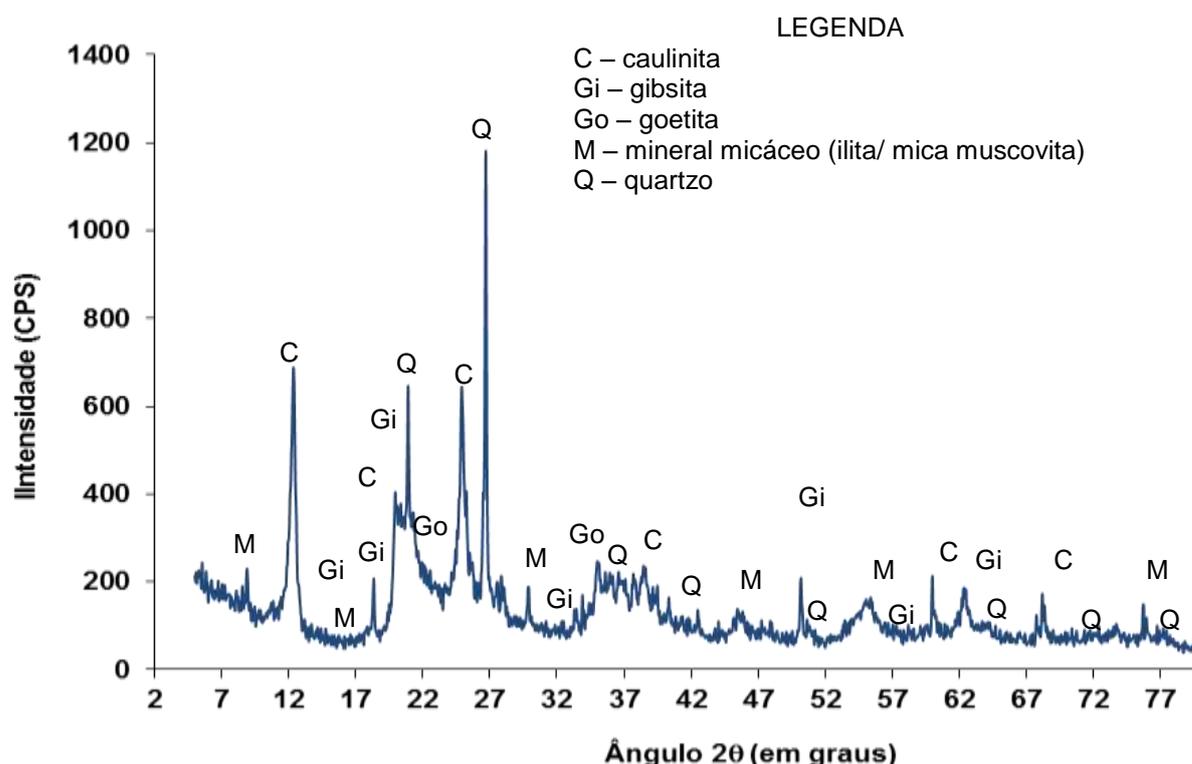


Figura 4-2: Difratograma de raios-X da massa argilosa.

Observa-se uma presença predominante de picos de difração característicos da caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), além da presença do quartzo livre e da gibsitita ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Há ainda indícios de minerais micáceos (ilita/ mica muscovita) e goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$). Os resultados encontrados são similares aos de Xavier (2006); Pedroti (2007) e Azeredo *et al.* (2014a; 2015c).

A importância da caracterização das matérias-primas utilizadas na produção de tijolos e blocos cerâmicos estruturais se dá pelo fato de apresentarem uma ampla variação da composição química, diferentes características granulométricas e diferentes índices de plasticidade, o que influenciam nas propriedades tecnológicas de produtos cerâmicos submetidos a um ciclo de queima rápida em comparação com um ciclo de queima tradicional (DUTRA *et al.*, 2009).

4.2. ATRIBUTOS DOS BLOCOS CERÂMICOS ESTRUTURAIS

Os padrões normativos estabelecidos pela ABNT foram adotados para os ensaios dos blocos estruturais cerâmicos cuja NBR 15.270:2005 estabelece diretrizes para os testes envolvendo blocos cerâmicos estruturais, bem como tijolos cerâmicos de vedação. Os ensaios realizados de acordo com a referida norma são os relacionados a seguir: dimensionais, desvio do esquadro, planeza das faces, absorção 24 horas, densidade e resistência à compressão simples. Os testes de ultrassom foram realizados segundo a ANBT NBR 8802:2013, que é relacionada ao concreto, uma vez que não existe uma normativa específica para a cerâmica vermelha. Por meio dos ensaios os seguintes atributos foram estimados: Área Bruta (AB), Área Líquida (AL), Densidade (DEN), Desvio do Esquadro Lado Liso (DELL), Desvio do Esquadro Lado Informativo (DELI), Planeza das Faces Lado Liso (PLL), Planeza das Faces Lado Informativo (PLI), Absorção 24h (ABS), Resistência à Compressão Simples (RES), Velocidade de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais do bloco: largura (L), altura (H) e comprimento (C), V_1 , V_2 e V_3 , respectivamente. Os blocos cerâmicos estruturais, quando são extrudados, recebem nessa etapa do processo uma identificação da indústria, seu contato telefônico e a data do lote. Essa informação é exigência normativa e também serviu de guia para as localizações de leituras de DELL, DELI, PLL, PLI, V_1 , V_2 e V_3 (Figura 4-3).

4.2.1. Queima dos blocos em temperaturas de 800, 850, 900, 950 e 1000°C.

Foram queimados 30 blocos cerâmicos estruturais em cada uma das temperaturas (800, 850, 900, 950 e 1000°C), no entanto houve perdas no processo, o que tornou a quantidade de blocos diferenciada. O número de blocos ensaiados em cada temperatura pode ser visto na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Temperatura de queima (°C) e número de blocos (n) testados.

Temperatura (°C)	Número de blocos (n)
800	20
850	24
900	25
950	21
1000	21

Obs.: O número de blocos queimados na indústria, que atuou como controle nos testes, foi de 25.

4.2.2. Atributos dimensionais

A Tabela 4.6 apresenta as médias das medidas totais (L, H, C) em centímetros. As médias dos septos (e_1+e_3), (e_2+e_4), (e_7+e_9), (e_8+e_{10}), ($e_{11}+e_{13}$), ($e_{12}+e_{14}$) em milímetros. As médias das áreas brutas em centímetros quadrados. As médias dos septos nas direções de f_1 a f_6 em milímetros (Figura 4-3).

Os blocos cerâmicos estruturais foram queimados em forno a gás a 800, 850, 900, 950 e 1000°C. A amostra de blocos cerâmicos estruturais empregada como controle foi queimada na indústria cerâmica em temperatura estimada de 850°C. A indústria utiliza lenha de eucalipto de reflorestamento como combustível no forno tipo túnel (Figura 3-19).

Tabela 4.6: Médias (L, H, C) e médias dos septos internos e externos em milímetros.

Queima (°C)	L cm	H cm	C cm	Área cm ²	mm																	
					(e ₁ e ₃)	(e ₂ e ₄)	e ₅	e ₆	e ₇	e ₉	(e ₈ e ₁₀)	(e ₁₁ e ₁₃)	(e ₁₂ e ₁₄)	f ₁	f ₂	f ₃	f ₅	f ₄	f ₆			
800	13,9	18,90	29,20	405,68	8,34	6,47	8,41	5,92	6,60	8,45	9,19	8,84	33,0	33,60	30,12	29,60	28,45	30,26				
Controle	13,8	18,81	29,13	402,26	8,64	6,67	8,46	6,74	6,93	8,53	9,40	9,17	32,8	33,25	29,89	30,09	29,14	30,14				
850	13,7	18,85	29,10	400,97	8,36	6,67	8,50	6,37	6,76	8,58	9,13	8,95	33,07	33,71	30,17	29,47	28,09	30,47				
900	13,7	18,83	28,99	397,99	8,37	6,68	8,45	6,56	6,70	8,61	9,09	8,97	32,80	33,34	30,11	29,73	28,62	30,61				
950	13,6	18,74	28,91	395,57	8,16	6,61	8,65	6,24	6,74	8,30	9,24	8,90	32,46	33,12	30,16	29,30	28,88	30,33				
1000	13,3	18,28	28,25	376,83	7,80	6,30	8,13	5,96	6,49	7,99	8,83	8,46	31,89	32,44	28,72	28,59	26,98	29,47				

Os blocos cerâmicos queimados nas temperaturas variando de 800 a 1000°C apresentaram médias dimensionais compatíveis com as exigências estabelecidas (Tabela 2.3).

4.2.3. Desvio do esquadro e planeza das faces

Na Figura 4-3 observa-se a Vista Superior do bloco cerâmico estrutural com a indicação dos septos, do posicionamento do lado com identificação do fabricante e do lado liso. As medições foram efetuadas de acordo com essa configuração do bloco, sempre levando em consideração esse arranjo.

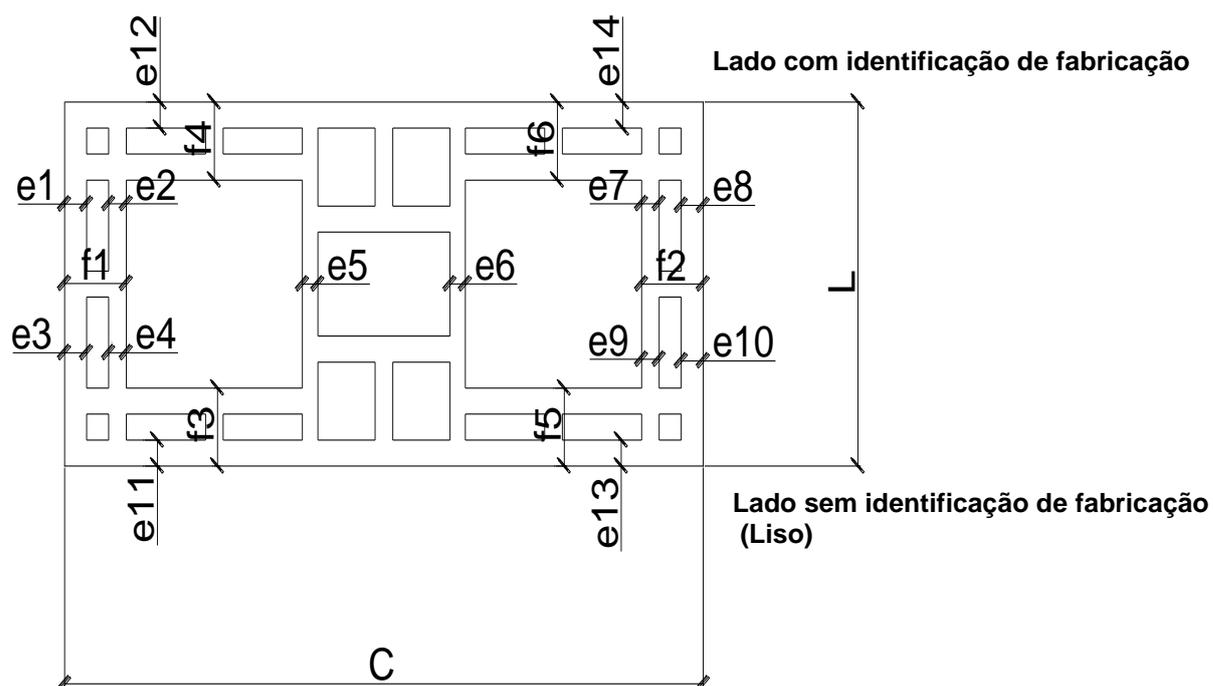


Figura 4-3: Vista superior do bloco cerâmico com indicação do lado com identificação do fabricante.

Um resumo dos valores estimados para as médias dos desvios de esquadro e para as médias das planezas das faces para faixa de temperatura de 800 a 1000°C é apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Médias desvio de esquadro e planeza das faces

Blocos Estruturais Cerâmicos (14 x 19 x 29 cm)				
	Desvio de esquadro (mm)		Planeza das faces (mm)	
	Lado Liso	Lado Informativo	Lado Liso	Lado Informativo
	Temperatura de queima 800°C			
Médias	1,17	1,22	0,52	0,90
	Temperatura de queima 850°C			
Médias	1,35	1,25	0,68	1,06
	Temperatura de queima 850°C (Controle)			
Médias	1,58	1,26	0,66	1,00
	Temperatura de queima 900°C			
Médias	1,74	1,26	0,54	0,88
	Temperatura de queima 950°C			
Médias	1,64	1,33	0,71	1,07
	Temperatura de queima 1000°C			
Médias	1,21	1,40	0,90	1,57

Observa-se na Tabela 4.7 que as médias — desvio de esquadro e planeza das faces, dos blocos cerâmicos queimados nas temperaturas variando de 800 a 1000°C — apresentaram valores em conformidade com a tolerância estabelecida pela ABNT NBR 15.270-1:2005.

A análise da variância para o efeito das temperaturas de queima sobre a área líquida (AL) em centímetros quadrados (cm²), área bruta (AB) em centímetros quadrados (cm²), desvio do esquadro lado liso (DELL) em (mm), desvio do esquadro lado informativo (DELI) em (mm), planeza da face lado liso (PLL) em (mm), planeza da face lado informativo (PLI) em (mm), indicou efeito significativo ($P < 0,05$) em todos os casos, exceto para o DELL. Os coeficientes de variação para AL e AB foram considerados baixos, enquanto os coeficientes de variação para os desvios do esquadro e planeza das faces foram considerados altos (Tabela 4.8). Porém, como foi observado anteriormente na Tabela 4.7, os seus valores médios encontram-se abaixo da tolerância normativa.

A análise de variância para a regressão em função das temperaturas de queima exceto a de queima industrial, apresentou efeito significativo ($P < 0,05$) para

o coeficiente de determinação (R^2) para todas as variáveis em estudo e conforme indicam as equações apresentadas na Tabela 5.9. O efeito significativo ($P < 0,05$) da temperatura de queima sobre AL e AB pode ser verificado a partir da temperatura de 950°C, isso pode ser justificado pelo fato de que durante a queima em altas temperaturas ocorre o efeito de retração do bloco cerâmico, com diminuição dos valores das áreas. Quanto aos desvios e planezas das faces o efeito da temperatura não foi significativo, o que demonstra ser um ponto positivo, uma vez que não é desejável que os blocos fiquem fora de esquadro.

Tabela 4.8: Análise da variância para efeito da temperatura de queima sobre AL, AB, DELL, DELI, PLL, PLI para a análise dimensional de blocos cerâmicos estruturais.

FV	GL	AL		AB		DELL		DELI		PLL		PLI	
		QM	F	QM	F	QM	F	QM	F	QM	F	QM	F
Tratamentos	5	433,48	39,25**	2202,95	68,13**	1,24	2,74*	0,096	0,20 ^{ns}	0,41	4,08*	1,38	5,44*
Resíduo	130	11,05		32,34		0,45		0,475		0,10		0,25	
C.V.(%)=			2,33		1,43		45,90		53,60		47,37		46,85

*Efeito significativo segundo o Teste F ($P < 0,05$) ; **Efeito significativo segundo o Teste F ($P < 0,01$)

ns – não significativo segundo o Teste F ($P < 0,05$)

O coeficiente de variação, tanto da AL, quanto da AB apresentaram-se baixos, enquanto os coeficientes de variação dos demais atributos foram elevados. No entanto, as médias dos desvios do esquadro e da planeza das faces encontram-se dentro da tolerância especificada pela ABNT NBR 15270-1:2005, ou seja, menor que 3 mm.

Observa-se pela Tabela 4.8 que houve efeito de tratamento para todos os atributos, exceto para o DELI, o que demonstra não ter ocorrido influência da temperatura no desvio do esquadro no lado informativo dos blocos.

A Tabela 4.9 mostra os atributos de qualidade física dos blocos cerâmicos, ou seja, AL (cm^2), AB (cm^2), DELL (mm), DELI (mm), PLL (mm), PLI (mm) para a análise dimensional de blocos estruturais cerâmicos. O controle é referente aos 25 blocos queimados na indústria a 850°C . O teste de Tukey ($P \leq 0,05$) demonstra que na linha, as médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si. O desvio padrão encontra-se em parênteses abaixo das médias; o efeito significativo segundo o Teste F para o coeficiente de regressão (R^2) e segundo o Teste t para a contribuição dos termos de B_1 e B_2 ao modelo de regressão é indicado por asterisco.

Tabela 4.9: Atributos de qualidade física dos blocos cerâmicos AL (cm²), AB (cm²), DELL (mm), DELI (mm), PLL (mm), PLI (mm) para a análise dimensional de blocos estruturais cerâmicos.

Atributos físicos	Temperatura de Queima (°C)						Equação $\hat{y} = B_2x^2 + B_1x + B_0$	Teste t		
	Controle n= 25	800 n=20	850 n=24	900 n=25	950 n=21	1000 n=21		B ₁	B ₂	R ²
AL	144,65A (±2,39)	144,73A (±2,46)	145,19A (±2,97)	143,83AB (±3,61)	141,24B (±3,96)	133,50C (±4,20)	$\hat{y} = 0,0005000x^2 + 0,8500x - 213,56$	5,87**	-6,25**	0,99*
AB	401,62AB (±4,87)	405,68A (±4,32)	400,98AB (±6,11)	398,00BC (±7,24)	395,58C (±5,22)	376,83D (±5,53)	$\hat{y} = -0,000770x^2 + 1,2600x - 111,39$	4,78**	-5,27**	0,92*
DELL	1,58A (±0,51)	1,17A (±0,61)	1,35A (±0,63)	1,74A (±0,61)	1,64A (±0,86)	1,21A (±0,77)	$\hat{y} = -0,000490x^2 + 0,0900x - 386,58$	3,07*	-3,05*	0,84*
DELI	1,26 (±0,48)	1,22 (±0,52)	1,25 (±0,55)	1,26 (±0,50)	1,33 (±0,71)	1,40 (±1,18)	$\hat{y} = 0,0000045x^2 - 0,0073x + 4,17$	-0,25	0,28	0,98*
PLL	0,66AB (±4,87)	0,52B (±4,32)	0,68AB (±6,11)	0,54B (±7,24)	0,71AB (±5,22)	0,90A (±5,53)	$\hat{y} = 0,0000110x^2 - 0,0188x + 8,40$	-1,36	1,47	0,73*
PLI	1,00B (±0,24)	0,90B (±0,30)	1,06B (±0,25)	0,88B (±0,25)	1,07B (±0,37)	1,57A (±0,46)	$\hat{y} = 0,0000300x^2 - 0,0518x + 23,09$	-2,35	2,47	0,82*

Legenda: AL – área líquida; DELL – desvio do esquadro lado liso ; DELI – desvio do esquadro lado informativo; PLL – planeza da face lado liso; PLL – planeza da face lado informativo . Controle - queima industrial a 850°C; (*) Efeito significativo segundo o Teste F (P ≤ 0,05) para o coeficiente de regressão (R²); (**) Efeito significativo segundo o Teste t (P ≤ 0,05) para a contribuição dos termos de B₁ e B₂ ao modelo de regressão; Número de blocos testados em cada temperatura (n); Dados em média (± desvio padrão). Médias seguidas das mesmas letras na linha não diferem entre si, segundo o teste Tukey (P ≤ 0,05).

Observa-se pela Tabela 4.9 que tanto a área bruta, quanto a área líquida apresentam valores menores para temperaturas de queima mais elevadas. Esse fato revela a retração dos blocos, corroborando com a literatura, que é repleta de trabalhos sobre a retração de artefatos produzidos a partir do tipo de matéria-prima estudada. O controle dimensional dos blocos foi necessário para verificação do impacto sobre o teste de ultrassom, uma vez que a distância de trânsito do pulso ultrassônico nas três direções ortogonais varia de acordo com a temperatura de queima. O desvio do esquadro e a planeza das faces não foi significativo de forma a exercer influência sobre o teste de ultrassom.

Dutra *et al.* (2009), trabalhando com diferentes tipos de argila, com temperaturas de 850, 950 e 1050°C em dois ciclos de queima (tradicional e rápido), verificaram variação na retração dos corpos de prova devido aos tipos de argila. Portanto, a avaliação dimensional dos blocos queimados em diferentes temperaturas é primordial para a definição da distância a ser percorrida pelo pulso ultrassônico, uma vez que esse dado exerce influência sobre os resultados do teste, como mencionado anteriormente.

4.2.4. Atributos físicos dos blocos cerâmicos estruturais: velocidade do pulso ultrassônico, absorção 24 horas, densidade, resistência à compressão simples.

A Tabela 4.10 mostra a Matriz de Correlações de Pearson (R) entre as variáveis relacionadas, como segue: velocidade de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais dos blocos cerâmicos estruturais (V_1 , V_2 e V_3), resistência à compressão simples (RES), absorção por imersão em 24h (ABS), área líquida (AL) e área bruta (AB).

Na correlação de Pearson (R) utilizou-se o critério de 0,70. Este coeficiente de correlação é utilizado na análise de componentes principais, análise fatorial, análise de confiabilidade. Portanto, a correlação de Pearson (R) entre as variáveis avaliadas a partir do critério de 0,70 pressupõem uma forte correlação, o que pode ser observado na Tabela 4.10, onde a menor correlação foi a de 0,57 entre a absorção e a velocidade de pulso ultrassônico na direção do comprimento dos blocos. As demais correlações apresentam-se no critério considerado forte, o que pressupõe, por conseguinte forte confiabilidade.

Tabela 4.10: Matriz de Correlações de Pearson (R).

	V ₁	V ₂	V ₃	RES	ABS	AL	AB
V ₁	1,00	0,98	0,90	0,70	-0,68	-0,95	-0,77
V ₂		1,00	0,87	0,66	-0,64	-0,94	-0,76
V ₃			1,00	0,72	-0,57	-0,89	-0,72
RES				1,00	-0,79	-0,75	-0,80
ABS					1,00	0,70	0,76
AL						1,00	0,83
AB							1,00

Legenda: V₁ – velocidade na direção da largura do bloco cerâmico estrutural (L); V₂ – velocidade na direção da altura (H); V₃ – velocidade na direção do comprimento (C); RES – resistência do bloco por compressão simples; ABS - Absorção por imersão em 24h; AL – área líquida; AB – área bruta.

A análise de variância das velocidades ultrassônicas em metros por segundo nas três direções perpendiculares dos blocos cerâmicos estruturais e a anisotropia total em porcentagem, calculada segundo a Equação (2.7), encontra-se na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Análise da variância da Velocidade (1000 m^s) de ultrassom em diferentes sentidos (V₁, V₂ e V₃) anisotropia total (ΔM) para a análise da resistência de blocos estruturais cerâmicos.

FV	GL	V ₁		V ₂		V ₃		ΔM	
		QM	F	QM	F	QM	F	QM	F
Tratamentos	5	2,014	33,86**	1,962	27,02**	1,908	22,92**	81,929	13,32**
Resíduo	130	0,059		0,072		0,082		6,152	
C.V.(%)=		10,25		9,29		10,39		15,16	

**Efeito significativo segundo o Teste F ($P < 0,01$)

Os resultados apresentados na Tabela 4.11 mostram coeficiente de variação similares e dentro da faixa considerada baixa para o tipo de material estudado.

A Tabela 4.12 mostra o número (n) de blocos utilizados para os testes em cada uma das temperaturas de 800 a 1000°C; as médias das velocidades nas três direções seguidas de letras na linha, segundo o teste Tukey ($P \leq 0,05$) e os seus respectivos desvios padrões em parênteses; a equação quadrática obtida e os seus termos B1 e B2 ao modelo de regressão segundo o Teste t ($P \leq 0,05$) e o coeficiente de regressão (R^2). O número total de blocos testados foi de 136.

Tabela 4.12: Velocidade ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$) de ultrassom em diferentes sentidos (V_1 , V_2 e V_3) e anisotropia total (ΔM) para a análise da resistência de blocos estruturais cerâmicos, Campos de Goytacazes, 2015.

Velocidades e Anisotropia	Temperatura de Queima ($^{\circ}\text{C}$)						Equação $\hat{y} = B_2x^2 + B_1x + B_0$	Teste t		
	Controle n= 25	800 n=20	850 n=24	900 n=25	950 n=21	1000 n=21		B_1	B_2	R^2
V_1	2,22 C ($\pm 0,14$)	2,26 BC ($\pm 0,23$)	2,16 C ($\pm 0,19$)	2,27 BC ($\pm 0,27$)	2,45 B ($\pm 0,28$)	2,98 A ($\pm 0,32$)	$\hat{y} = 0,000037x^2 - 0,064x + 29,70$	-6,02**	6,35**	0,99*
V_2	2,77 BC ($\pm 0,14$)	2,75 BC ($\pm 0,28$)	2,67 C ($\pm 0,20$)	2,81 BC ($\pm 0,30$)	2,98 B ($\pm 0,30$)	3,49 A ($\pm 0,36$)	$\hat{y} = 0,000034x^2 - 0,058x + 27,27$	-4,87**	5,18**	0,99*
V_3	2,68 BC ($\pm 0,15$)	2,64 BC ($\pm 0,28$)	2,51 C ($\pm 0,22$)	2,67 BC ($\pm 0,35$)	2,88 B ($\pm 0,35$)	3,34 A ($\pm 0,34$)	$\hat{y} = 0,000035x^2 - 0,060x + 28,16$	-4,74**	5,02**	0,99*
ΔM	18,66 A ($\pm 1,86$)	16,07 B ($\pm 2,06$)	16,61 B ($\pm 1,68$)	17,13 AB ($\pm 1,61$)	16,17 B ($\pm 1,62$)	12,85 C ($\pm 4,77$)	$\hat{y} = -0,00026x^2 + 0,460x - 183,09$	4,29**	-4,42**	0,95*

Legenda: V_1 - avaliação no sentido da largura (L) do bloco cerâmico; V_2 - no sentido da altura (H); V_3 - no sentido do comprimento (C); Controle - queima industrial a 850°C ; (*) Efeito significativo segundo o Teste F ($P \leq 0,05$) para o coeficiente de regressão (R^2); (**) Efeito significativo segundo o Teste t ($P \leq 0,05$) para a contribuição dos termos de B_1 e B_2 ao modelo de regressão; Número de blocos testados em cada temperatura (n); Dados em média (\pm desvio padrão). Médias seguidas das mesmas letras na linha não diferem entre si, segundo o teste Tukey ($P \leq 0,05$).

A análise da variância para o efeito das temperaturas de queima sobre a velocidade de ultrassom (V_1 , V_2 e V_3) indicou efeito significativo ($P \leq 0,05$) em todos os casos e os coeficientes de variação foram considerados moderados de 9,26 a 15,16% (Tabela 4.11). A análise da variância para a regressão em função das temperaturas de queima, exceto a de queima industrial, apresentou efeito significativo ($P < 0,05$) para o coeficiente de determinação (R^2) para todas as variáveis em estudo e conforme indicam as equações apresentadas (Tabela 4.12).

O efeito significativo ($P < 0,05$) da temperatura de queima sobre as V_1 , V_2 e V_3 pode ser verificado a partir da temperatura de 950°C , isso pode ser justificado pelo fato que durante a queima em altas temperaturas podem ocorrer alterações químicas e estruturais, inclusive originando aspectos visuais diferentes, que podem ser observados na Figura 4-4.

Alguns fragmentos de septos externos no sentido da altura dos blocos, após o rompimento na prensa são mostrados na Figura 4-4. Observa-se que nos blocos queimados de 800 a 850°C existe uma coloração diferenciada, enquanto que nos blocos queimados de 900°C a 1000°C há uma uniformidade na coloração avermelhada, evidenciando a importância da temperatura adequada para a queima dos blocos cerâmicos, pois a queima, segundo Hollanda (1999), é a fase mais importante do processo de fabricação, por ser nela que o bloco cerâmico adquire as propriedades como dureza, resistência mecânica, resistência às intempéries, entre outras.



Figura 4-4: Fragmentos de septos externos dos blocos

Na Figura 4-5, a temperatura de queima mostra sua influência sobre a velocidade de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais (V_1 , V_2 e V_3), com confiabilidade de 99%. Observa-se que as maiores velocidades (V_2) são alcançadas na direção do assentamento dos blocos cerâmicos estruturais, ou seja, na direção da altura. As velocidades na direção da largura do bloco (V_1) são inferiores às encontradas nas outras direções e as velocidades na direção do comprimento (V_3) aproximam-se às encontradas na direção da altura. Isso pode ser devido ao fato de que sendo a cerâmica vermelha um material anisotrópico, o pulso ultrassônico é afetado pelos poros do material, que se torna mais homogêneo, mais compacto, à medida que a temperatura se eleva. Nas altas temperaturas, a partir de 950°C, as velocidades de ultrassom se tornam significativamente maiores, o que corrobora estudos apresentados por Cultrone *et al.* (2001), De Rosa e Cultrone (2014). Observa-se também um decréscimo da anisotropia total (ΔM), indicando maior compacidade e resistência do bloco cerâmico.

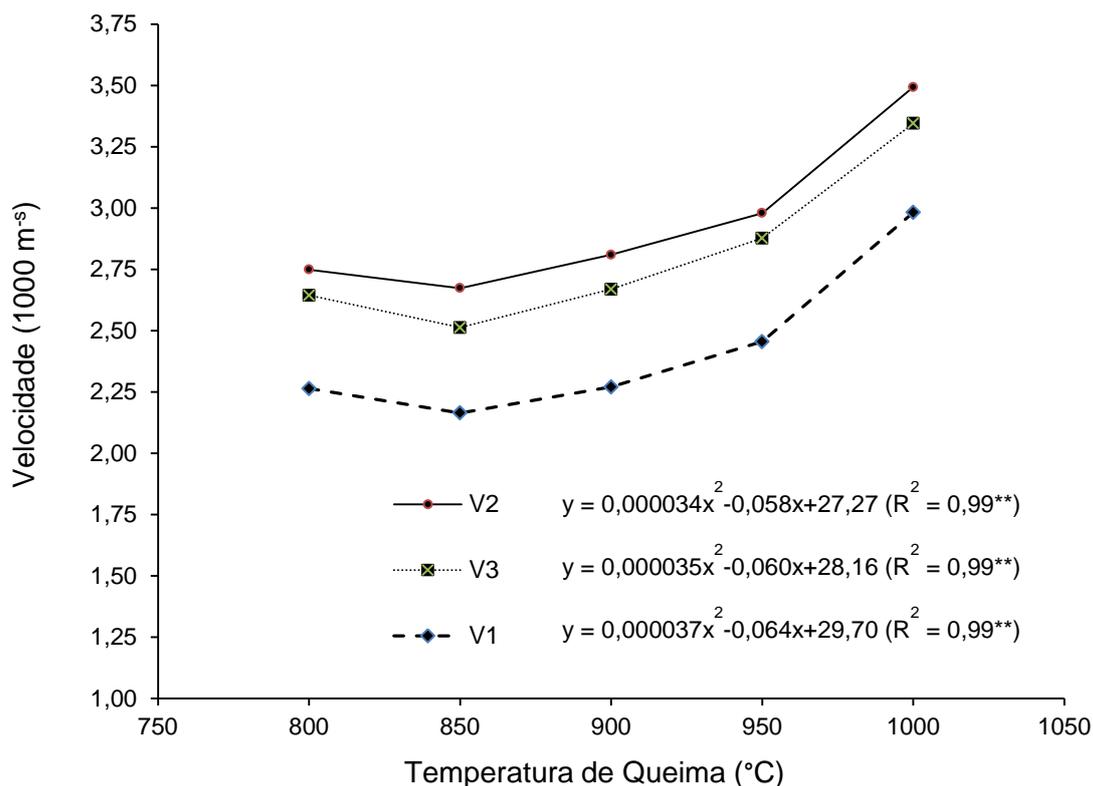


Figura 4-5: Influência da temperatura (800 a 1000°C) na velocidade de pulso ultrassônico (V_L)

A análise da variância para o efeito das temperaturas de queima sobre a resistência à compressão simples (RES) em megapascals (MPa), a absorção 24 horas (ABS) em porcentagem (%) e a densidade do bloco (DEN) em centímetro cúbico (cm³) indicou efeito significativo ($P < 0,05$) em todos os casos e os coeficientes de variação foram considerados de baixo a moderados, de 1,08 a 14,54% (Tabela 4.13). A análise da variância para a regressão em função das temperaturas de queima, exceto a de queima industrial, apresentou efeito significativo ($P < 0,05$) para o coeficiente de determinação (R^2) para todas as variáveis em estudo e conforme indicam as equações apresentadas (Tabela 4.14).

O efeito significativo ($P < 0,05$) da temperatura de queima sobre RES, ABS e DEN pode ser verificado a partir da temperatura de 900°C. Esse comportamento do bloco cerâmico estrutural condiz com estudos realizados por Azeredo *et al.* (2012; 2014a; 2014b; 2015a), apresentando similaridades com estudos realizados por De Rosa e Cultrone (2014).

Tabela 4.13: Análise da variância para efeito da temperatura na RES, ABS e DEN.

FV	RES			ABS		DEN	
	GL	QM	F	QM	F	QM	F
Tratamentos	5	83,38	59,43**	136,74	211,14**	0,0479	57,51**
Resíduo	130	1,40		0,65		0,0008	
C.V.(%)=			14,54		3,54		1,08

**Efeito significativo segundo o Teste F ($P < 0,01$)

O coeficiente de variação de 14,54% apresentado na Tabela 4.13 para a resistência à compressão simples é menor do que os 20% recomendados por Sabbatini (2003). Os coeficientes de variação da absorção e da densidade são considerados baixos, com testes significativos segundo Teste F ($P < 0,01$).

Na Tabela 4.14 apresentam-se os atributos de qualidade de blocos cerâmicos estruturais a partir das variáveis de resistência à compressão (MPa), absorção AA(%) e densidade (g cm^{-3}).

Tabela 4.14: Atributos de qualidade de blocos cerâmicos estruturais a partir das variáveis resistência à compressão (MPa), absorção AA(%) e densidade (g cm^{-3}).

Atributos de qualidade	Temperatura de Queima ($^{\circ}\text{C}$)						Equação	Teste t		
	Controle n= 25	800 n=20	850 n=24	900 n=25	950 n=21	1000 n=21	$\hat{y} = B_2x^2+B_1x+B_0$	B_1	B_2	R^2
RES	7,84BC ($\pm 1,57$)	7,10CD ($\pm 1,06$)	6,58D ($\pm 0,97$)	7,06CD ($\pm 0,98$)	8,83B ($\pm 0,85$)	11,89A ($\pm 1,43$)	$\hat{y} = 0,000240x^2 - 0,41x + 181,19$	-9,35**	9,90**	1,00*
ABS	23,80A ($\pm 0,53$)	23,87A ($\pm 0,83$)	24,29A ($\pm 0,84$)	23,92A ($\pm 0,78$)	22,39B ($\pm 0,67$)	17,69C ($\pm 1,10$)	$\hat{y} = -0,000320x^2 + 0,55x - 212,53$	14,70**	-15,48**	0,98*
DEN	2,63C ($\pm 0,04$)	2,63C ($\pm 0,01$)	2,63C ($\pm 0,02$)	2,74A ($\pm 0,04$)	2,70B ($\pm 0,02$)	2,67B ($\pm 0,02$)	$\hat{y} = -0,000006x^2 + 0,01x - 2,49$	7,13**	-6,97**	0,55*

Legenda: Resistência à Compressão - avaliação da resistência do bloco por compressão simples (RES); Absorção por imersão em 24h (ABS) ; Densidade dos blocos (DEN). Controle - queima industrial a 850°C ; (*) Efeito significativo segundo o Teste F ($P \leq 0,05$) para o coeficiente de regressão (R^2); (**) Efeito significativo segundo o Teste t ($P \leq 0,05$) para a contribuição dos termos de B_1 e B_2 ao modelo de regressão; Número de blocos testados em cada temperatura (n); Dados em média (\pm desvio padrão). Médias seguidas das mesmas letras na linha não diferem entre si, segundo o teste Tukey ($P \leq 0,05$).

A influência que a taxa de absorção 24h (%) exerce sobre a velocidade de pulso ultrassônico (V_L) — V_1 (direção da largura), V_2 (direção da altura) e V_3 (direção do comprimento) — pode ser observada, com confiabilidade elevada, acima de 97%. A taxa de absorção para os blocos cerâmicos estruturais deve estar entre 8 e 22%, segundo indicações normativas. A Figura 4-6 mostra também que as velocidades são mais elevadas para taxas de absorção menores, indicando um material mais compacto e homogêneo.

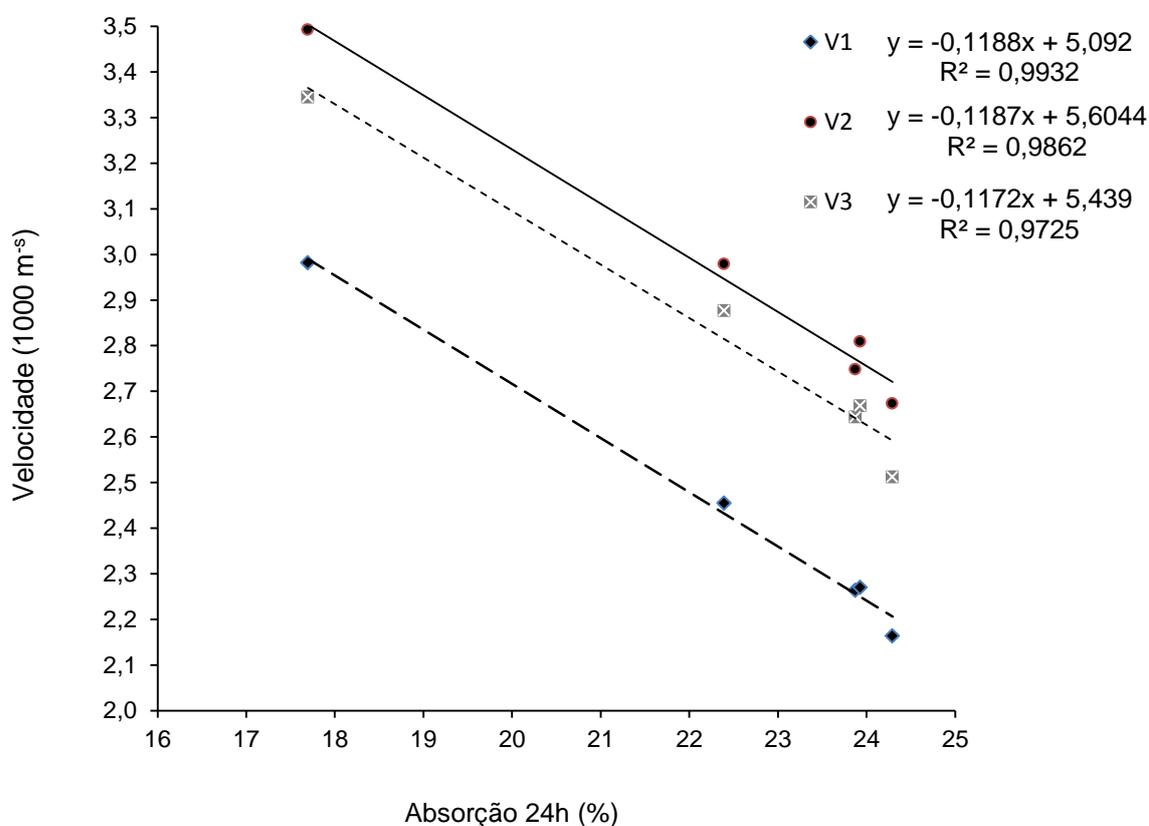


Figura 4-6: Influência da absorção AA(%) na velocidade de pulso ultrassônico (V_L)

A influência que a área bruta (AB) exerce sobre a velocidade de pulso ultrassônico (V_L) — V_1 (direção da largura), V_2 (direção da altura) e V_3 (direção do comprimento) — pode ser observada, com confiabilidade elevada, acima de 90% na Figura 4-7. A área bruta e a absorção estão intimamente relacionadas, uma vez que as menores taxas de absorção são observadas em temperaturas mais elevadas e que exercem influência sobre a retração do bloco cerâmico. Nesse sentido, observa-se que os valores das áreas são inversamente proporcionais aos valores das velocidades.

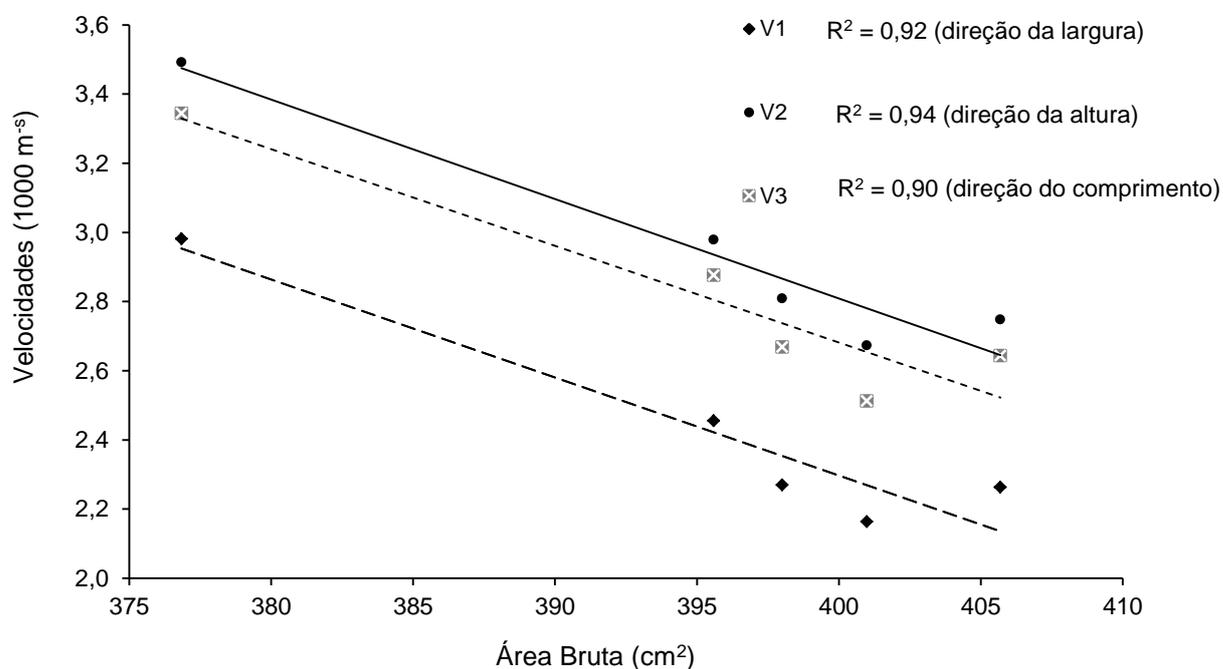


Figura 4-7: Influência da área bruta (AB) na velocidade de pulso ultrassônico (V_L)

A influência que a temperatura de queima exerce sobre a taxa de absorção pode ser observada, com confiabilidade de 98% na Figura 4-8. À medida que a temperatura se eleva a absorção decresce. Essa propriedade exerce influência na compacidade dos blocos e na sua resistência mecânica, como pode ser observado na Figura 4-9, com confiabilidade de 98%.

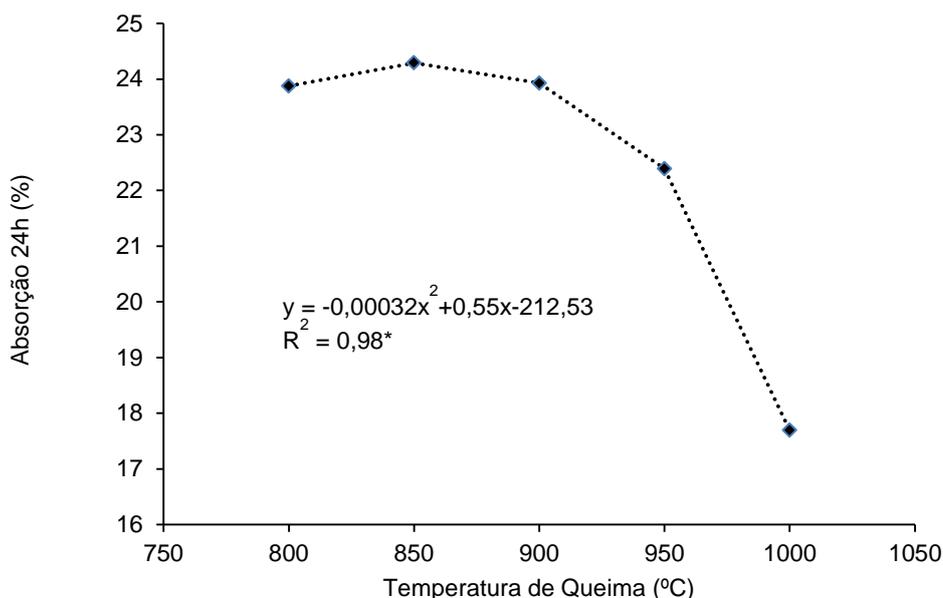


Figura 4-8: Influência da temperatura (800 a 1000°C) na absorção AA(%).

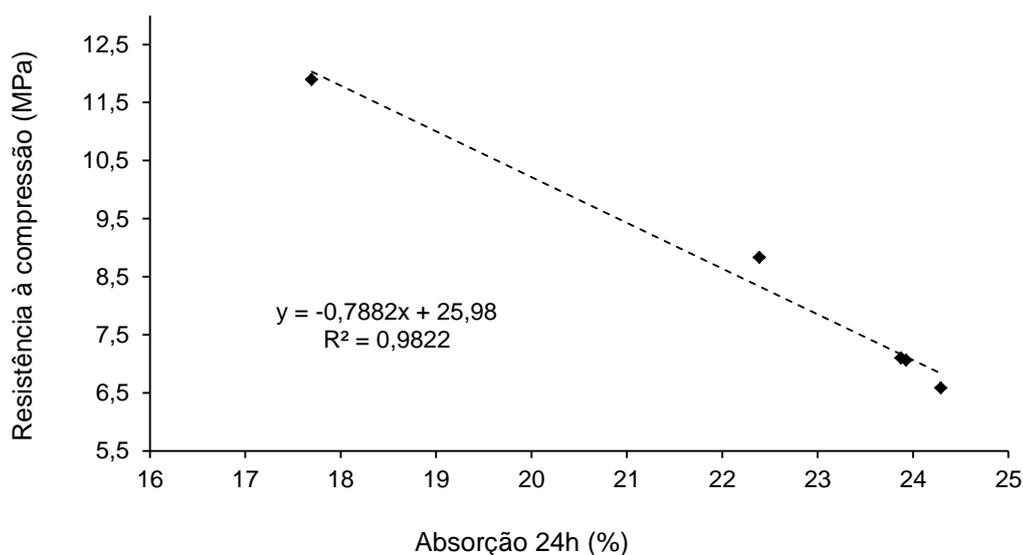


Figura 4-9: Influência da absorção AA(%) na resistência à compressão simples

A influência que a temperatura de queima (800 a 1000°C) exerce sobre a resistência à compressão simples pode ser observada, com confiabilidade de 100%, na Figura 4-10. Observa-se a elevação na propriedade mecânica de resistência para as temperaturas mais elevadas, principalmente acima de 900 a 1000°C.

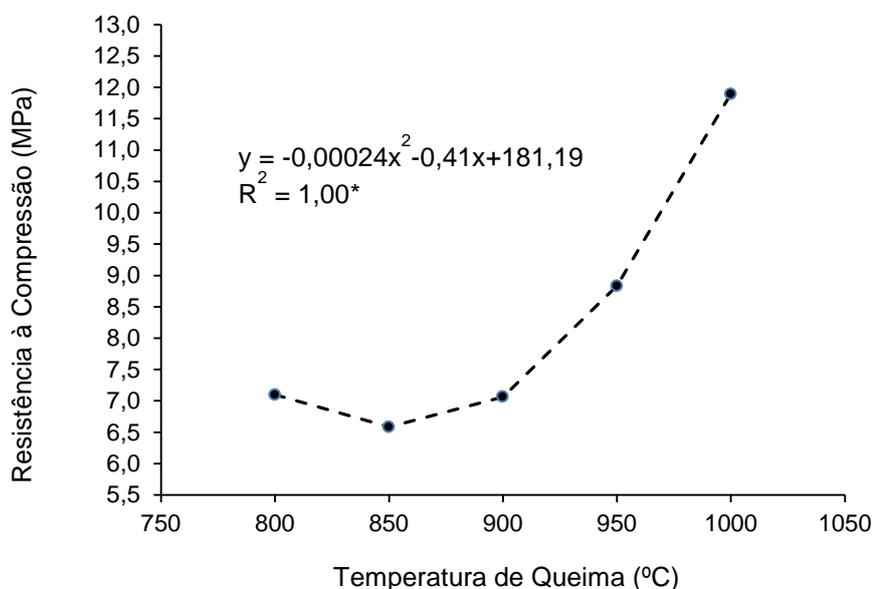


Figura 4-10: Influência da temperatura na resistência à compressão simples

Berutti (2004), trabalhando com material cerâmico à base de alumina (94,3% massa) utilizado na confecção de corpos cerâmicos, em temperaturas de sinterização de 1100 a 1600°C, constatou que a resistência mecânica tem comportamento similar à velocidade do ultrassom para as diferentes temperaturas de sinterização, crescendo com a elevação da temperatura, e que o incremento da resistência mecânica tende a acompanhar a redução da porosidade dos corpos cerâmicos à base de alumina, revelando um paralelismo bastante significativo entre os valores de resistência mecânica com os obtidos para a densificação.

A Tabela 4.15 mostra a média geral da resistência à compressão simples (RES, em MPa) e a média geral das velocidades de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais das amostras de blocos cerâmicos estruturais — V_1 , V_2 e V_3 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$) — além do respectivo desvio padrão entre parênteses.

Tabela 4.15: Médias gerais das amostras de blocos cerâmicos estruturais: RES, V_1 , V_2 e V_3 , (\pm Desvio Padrão).

Atributos	Médias
RES	8,22 ($\pm 2,2$)
V_1	2,42 ($\pm 0,38$)
V_2	2,93 ($\pm 0,40$)
V_3	2,79 ($\pm 0,42$)

A Tabela 4.16 mostra a Matriz de Correlações entre a resistência à compressão simples (MPa), que trata-se da variável dependente, e as velocidades de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais, V_1 , V_2 e V_3 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$).

Tabela 4.16: Matriz de Correlações (RES, V_1 , V_2 e V_3)

	RES	V_1	V_2	V_3
RES	1,00	0,70	0,66	0,72
V_1		1,00	0,98	0,90
V_2			1,00	0,87
V_3				1,00

Observa-se que a correlação de Pearson (R) entre as variáveis avaliadas atende ao critério de 0,70.

Na Tabela 4.17 apresenta-se a análise de variância envolvendo os atributos da regressão, ou seja, a resistência à compressão (MPa) e as velocidades de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais, V_1 , V_2 e V_3 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$).

Tabela 4.17: Análise da variância da resistência à compressão (MPa) e das velocidades de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais, V_1 , V_2 e V_3 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$).

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Devido à Regressão	3	295,0235	98,3412	43,50**
Independente	107	241,8770	2,2605	

Utilizou-se o SAEG 9.2 (UFV, 2007) para uma regressão múltipla envolvendo resistência à compressão (MPa) em função das velocidades de ultrassom nas três direções ortogonais do bloco, ou seja, V_1 , V_2 e V_3 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$), visando com isso estimar a resistência em função de três medidas de ultrassom.

Pretende-se, por meio de teste de ultrassom, avaliar os lotes de bloco cerâmico estrutural, com a estimativa da sua resistência à compressão. De cada lote recém-queimado na indústria e em condições de temperatura e umidade adequadas coleta-se o número mínimo estipulado pela ABNT NBR 15270:2005 ($n=13$) para proceder às medições das velocidades e aplicação dos valores na equação obtida na análise de regressão e que teve como coeficiente de Pearson (R) um valor de 0,74.

Dessa forma, aplicando-se a equação (4.1), a resistência à compressão simples do bloco cerâmico estrutural é obtida a partir das velocidades de ultrassom nas três direções do bloco V_1 , V_2 e V_3 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$).

$$\text{RES (MPa)} = -1,0112 + 5,0689 V_1 - 3,3191 V_2 + 2,3981 V_3 \quad (4.1)$$

A Figura 4-11 mostra a influência da resistência à compressão (MPa) sobre as velocidades de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais, V_1 , V_2 e V_3 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$).

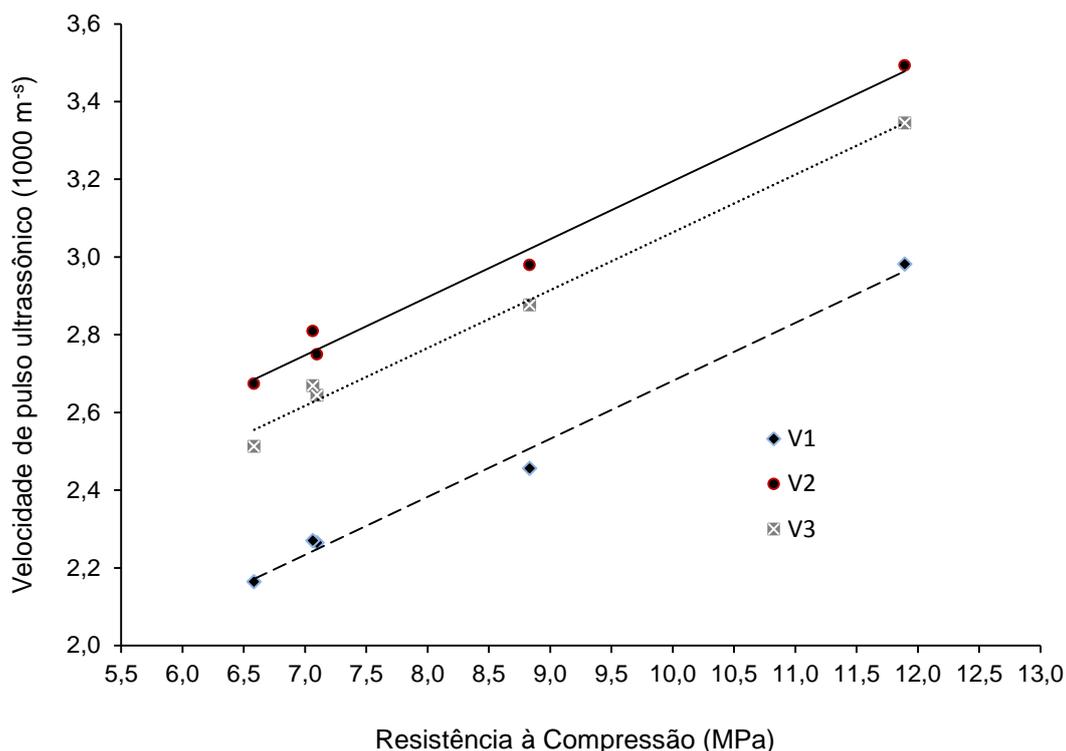


Figura 4-11: Influência da resistência à compressão na velocidade de pulso (V_L)

A Tabela 4.18 mostra a temperatura de queima dos blocos, os valores das médias das resistências à compressão (MPa), as velocidades de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais, V_1 , V_2 e V_3 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$), os valores das resistências à compressão (MPa) obtidos por meio da equação (5.1) e o erro.

Tabela 4.18: Temperatura de queima, RES (MPa), velocidades pulso ultrassônico, resultados obtidos por meio da equação (4.1) e o erro (%).

Temp. (°C)	Resistência Média (MPa)	V_1 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$)	V_2 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$)	V_3 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$)	Resistência Equação (MPa)	Erro (%)
800	7,10	2,26	2,75	2,64	7,68	0,09
850	6,58	2,16	2,67	2,51	7,11	0,09
900	7,06	2,27	2,81	2,67	7,57	0,09
950	8,83	2,46	2,98	2,88	8,44	0,10
1000	11,89	2,98	3,49	3,35	10,53	0,11

Observa-se pela Tabela 4.18 que os valores das médias da resistência à compressão para cada faixa de temperatura — obtidas por meio de ensaios laboratoriais —, e os valores da resistência à compressão para cada faixa de

temperatura obtidos por meio da equação (4.1) apresentam pequena diferença, demonstrando a sua aplicabilidade na avaliação da resistência mecânica à compressão do tipo de bloco cerâmico estrutural estudado. Os resultados expressos na Tabela 4.18 mostram-se de acordo com Binda *et al.* (2003), que afirma ser a velocidade de pulso ultrassônico uma boa técnica para se investigar a resistência mecânica.

Na Tabela 4.19 apresenta-se a resistência à compressão média, a resistência característica (f_{bk}) calculada segundo a ABNT NBR 15270:2005, a resistência característica obtida pela análise de Weibull por meio da Máxima Verossimilhança (Limite Inferior) e do Método Gráfico de Probabilidades.

Tabela 4.19: Resistência à compressão média, resistência característica f_{bk} segundo a ABNT NBR 15270:2005, resistência característica segundo análise de Weibull Máxima Verossimilhança (Limite Inferior) e Método Gráfico de Probabilidades.

	Temperatura de Queima (°C)						Equação $\hat{y} = B_2x^2 + B_1x + B_0$	Teste t		
	Controle n= 25	800 n=20	850 n=24	900 n=25	950 n=21	1000 n=21		B ₁	B ₂	R ²
RES	7,84BC (±1,57)	7,10CD (±1,06)	6,58D (±0,97)	7,06CD (±0,98)	8,83B (±0,85)	11,89A (±1,43)	$\hat{y} = 0,00024x^2 - 0,41x + 181,19$	-9,35**	9,90**	1,00*
C.V.(%)	20,02	14,99	14,83	13,96	9,7	12,1				
	n= 12	n= 10	n= 12	n= 12	n= 10	n= 10				
f_{bk}	5,90 (±0,84)	5,90 (±0,49)	5,24 (±0,51)	5,81 (±0,49)	7,96 (±0,30)	9,56 (±1,18)	$\hat{y} = 0,00010x^2 - 0,18x + 79,30$			0,95
MV	6,64 (±0,75)	6,19 (±0,56)	6,00 (±0,49)	6,54 (±0,43)	8,17 (±0,31)	10,83 (±0,94)	$\hat{y} = 0,00020x^2 - 0,32x + 143,11$			0,99*
MGP	7,00 (±0,95)	6,50 (±0,58)	6,23 (±0,57)	6,71 (±0,49)	8,31 (±0,34)	11,32 (±1,39)	$\hat{y} = 0,00020x^2 - 0,37x + 163,36$			0,99*
C.V.(%)	12,73	7,89	8,53	6,72	3,64	10,92				

Legenda: RES - resistência do bloco por compressão simples (MPa); Controle - queima industrial a 850°C; (*) Efeito significativo segundo o Teste F ($P \leq 0,05$) para o coeficiente de regressão (R^2); (**) Efeito significativo segundo o Teste t ($P \leq 0,05$) para a contribuição dos termos de B_1 e B_2 ao modelo de regressão; dados em média (\pm desvio padrão); (C.V.%) - coeficiente de variação; (n) - número de blocos testados em cada temperatura; Média - média da resistência de (n) blocos em ordem crescente (MPa); f_{bk} - resistência característica segundo ABNT NBR 15270:2005 (MPa); MV - resistência característica, limite inferior, segundo Método da Máxima Verossimilhança de Weibull (MPa); MGP - resistência característica, segundo Método Gráfico de Probabilidade de Weibull (MPa). Médias seguidas das mesmas letras na linha não diferem entre si, segundo o teste Tukey ($P \leq 0,05$).

A influência que a temperatura de queima (800 a 1000°C) exerce sobre a resistência média à compressão simples (RES), sobre a resistência característica do bloco segundo a NBR 15.270:2005 (f_{bk}), sobre a resistência característica (MV) e a resistência característica (MGP) pode ser observada na Figura 4-12. Observa-se a elevação na propriedade mecânica de resistência para as temperaturas mais elevadas, principalmente acima de 900°C.

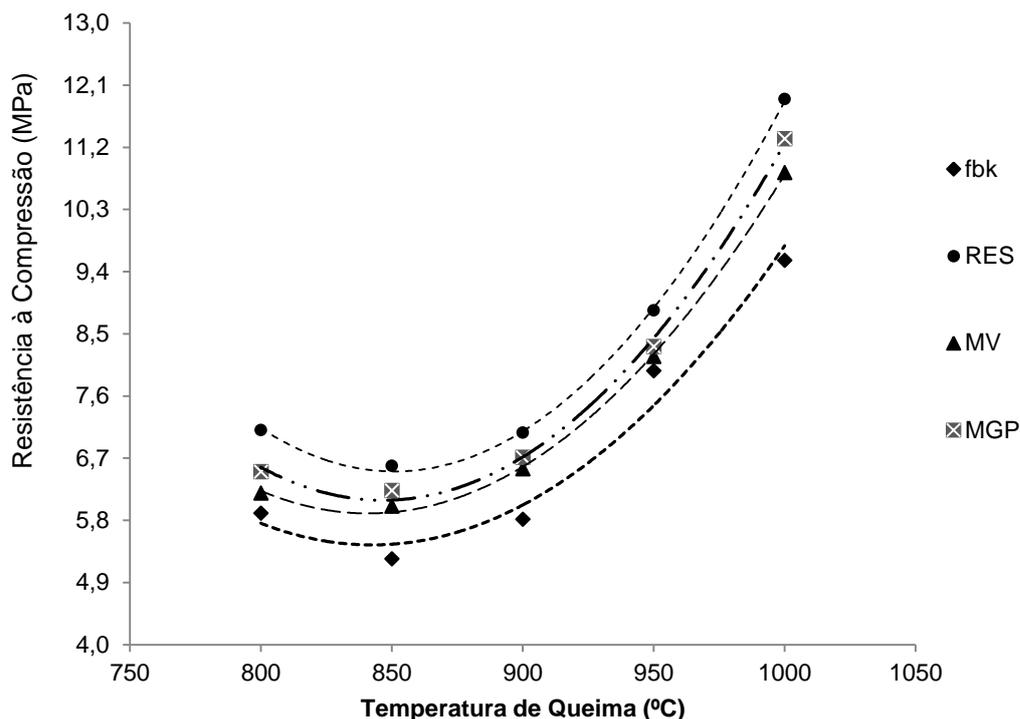


Figura 4-12: Influência da temperatura na resistência à compressão simples

Na Figura 4-12 são apresentadas quatro curvas correlacionando a temperatura de queima com a resistência à compressão média (RES), a resistência característica (f_{bk}) calculada segundo a ABNT NBR 15270:2005, a resistência característica obtida pela análise de Weibull por meio da Máxima Verossimilhança (MV) e do Método Gráfico de Probabilidades (MGP). A curva que relaciona a resistência à compressão média (RES) com a temperatura é a que apresenta os maiores valores e a que relaciona resistência característica (f_{bk}) com a temperatura é a que apresenta os menores valores. A análise de Weibull apresenta valores intermediários, sendo o de Máxima Verossimilhança em torno de 10% maiores que os de f_{bk} , mostrando a viabilidade de sua aplicação.

CAPÍTULO 5

Neste capítulo apresentam-se as considerações finais e as conclusões por meio de uma síntese do trabalho conjuntamente com análises dos resultados.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados do conjunto de ensaios realizados neste trabalho, pode-se inferir as seguintes conclusões:

Matéria-prima

- A amostra ensaiada apresenta semelhança física, química e mineralógica com massas argilosas de Campos dos Goytacazes, sendo classificada como uma argila siltosa pouco arenosa, de alta plasticidade, com limites de Atterberg dentro da faixa de valores das massas cerâmicas cauliníticas utilizadas na indústria cerâmica da região.
- O teor da composição química da massa argilosa natural de sílica e de alumina, totalizou 85,16%. A cor avermelhada do bloco cerâmico estrutural após a queima é devida ao teor de 8,10% de óxido férrico. O teor de álcalis (K_2O) de 2,03% forma a fase líquida na queima, reduzindo a porosidade do material. O dióxido de titânio (Ti_2O) encontrado foi de 1,57%. A Perda ao Fogo foi 8,75%.
- Os argilominerais e minerais identificados por meio da técnica de difração de raios-X (DRX), apresentam a predominância de picos de difração característicos da caulinita ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), além da presença do quartzo livre e da gibsita ($Al(OH)_3$). Há ainda indícios de minerais micáceos (ilita/ mica muscovita) e goetita ($FeO(OH)$).

Blocos cerâmicos estruturais

- Os blocos cerâmicos queimados nas temperaturas entre 800 e 1000°C apresentaram médias dimensionais compatíveis com as exigências estabelecidas pela ABNT NBR 15.270:2005.
- As médias dos desvios do esquadro e da planeza das faces encontram-se dentro da tolerância especificada pela ABNT NBR 15270-1:2005.

- A correlação entre os valores encontrados para área líquida e área bruta dos blocos cerâmicos estruturais apresenta valores menores para temperaturas de queima mais elevadas.
- A Matriz de Correlações de Pearson (R) entre as variáveis relacionadas, como: velocidade de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais dos blocos cerâmicos estruturais, resistência à compressão simples, absorção por imersão em 24h, área líquida e área bruta encontram-se dentro do critério de 0,70.
- A análise de variância das velocidades ultrassônicas em metros por segundo nas três direções perpendiculares dos blocos cerâmicos estruturais e a anisotropia total em porcentagem mostra coeficientes de variação similares e dentro da faixa considerada baixa para o tipo de material estudado.
- O efeito das temperaturas de queima sobre a velocidade de ultrassom (V_1 , V_2 e V_3) indicou efeito significativo ($P < 0,05$) em todos os casos e os coeficientes de variação foram considerados moderados. A análise da variância para a regressão em função das temperaturas de queima, exceto a de queima industrial, apresentou efeito significativo ($P < 0,05$) para o coeficiente de determinação (R^2) para todas as variáveis em estudo.
- A temperatura de queima mostra uma boa relação com a velocidade de pulso ultrassônico nas três direções ortogonais (V_1 , V_2 e V_3), com confiabilidade de 99%. As maiores velocidades (V_2) são alcançadas na direção do assentamento dos blocos cerâmicos estruturais, ou seja, na direção da altura. As velocidades na direção da largura do bloco (V_1) são inferiores às encontradas nas outras direções e as velocidades na direção do comprimento (V_3) aproximam-se às encontradas na direção da altura.
- Nas temperaturas de 950 e 1000°C as velocidades de ultrassom foram significativamente maiores, provavelmente devido ao melhor arranjo físico-químico das microestruturas da argila, bem como ao decréscimo da anisotropia total (ΔM).
- A velocidade de pulso ultrassônico (V_L) diminui com a elevação da absorção. A relação entre a Absorção 24h AA(%) e a velocidade de pulso ultrassônico — V_1 , V_2 e V_3 (1000 m^s) — apresenta um coeficiente de regressão de 97 a 99%, ou seja, uma elevada confiabilidade.
- As áreas líquidas, e as áreas brutas mostram relação linear com a absorção 24h AA(%), decrescendo com a elevação da temperatura.

- A resistência à compressão simples mostra uma boa relação com a temperatura de queima, com confiabilidade de 100%.
- A quantificação da resistência à compressão simples (RES) em MPa, utilizando as velocidades ultrassônicas nas três direções do bloco cerâmico estrutural — V_1 , V_2 e V_3 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$) — pode ser obtida através da equação:

$$\text{RES (MPa)} = -1,0112 + 5,0689 V_1 - 3,3191 V_2 + 2,3981 V_3$$

- Os valores das médias da resistência à compressão para cada faixa de temperatura — obtidas por meio de ensaios laboratoriais —, e os valores da resistência à compressão para cada faixa de temperatura obtidos por meio da equação, com o emprego das velocidades V_1 , V_2 e V_3 ($1000 \text{ m}^{-\text{s}}$) apresentam pequena diferença, demonstrando a aplicabilidade das técnicas de ultrassom, método não destrutivo, na avaliação da resistência à compressão simples do tipo de bloco cerâmico estrutural estudado.

Análise segundo ABNT NBR 15270:2005 e Weibull

- As correlações das temperaturas de queima com a resistência à compressão média (RES), com a resistência característica (f_{bk}), com a resistência característica pela análise de Weibull (Método Gráfico de Probabilidade – MGP e Máxima Verossimilhança – MV), mostraram os maiores valores para RES, os menores para f_{bk} e intermediários para MGP e MV evidenciando a viabilidade da análise de Weibull.

Sugestões para trabalhos futuros

Diante dos resultados obtidos ao final deste trabalho, algumas sugestões são apresentadas:

Aplicação da equação obtida relacionando as velocidades do pulso ultrassônico nas três direções ortogonais do bloco cerâmico estrutural (L x H x C) para obtenção da estimativa das propriedades de resistência à compressão e absorção em um lote produzido atualmente, na indústria Cerâmica Pau Brasil, assim como em outras indústrias produtoras do mesmo tipo de bloco cerâmico estrutural na região de Campos

dos Goytacazes, RJ e em outras regiões do Brasil que utilizem massa argilosa com características semelhantes às apresentadas neste trabalho.

Verificação da anisotropia total (ΔM) com a utilização dos resultados das velocidades do pulso ultrassônico nas três direções ortogonais do bloco cerâmico estrutural para avaliação da compacidade dos blocos em diferentes faixas de temperaturas.

Novos estudos devem envolver tipos de blocos cerâmicos estruturais produzidos com matérias-primas argilosas distintas, a fim de refinar e validar ainda mais o método. No presente trabalho as propriedades foram avaliadas utilizando a velocidade de pulso ultrassônico com o modo de vibração longitudinal, ou seja, apenas um único parâmetro de transmissão. No entanto, o estudo de atenuação — análise de frequência da passagem do pulso ultrassônico através do material — poderá revelar mais sobre sua condição, que a velocidade apenas, sendo, portanto, recomendada para trabalhos futuros.

Fazer testes com a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com preparação de lâminas delgadas de cada amostra de septo de blocos queimados na faixa de temperatura adotada neste trabalho, uma vez que por meio desse procedimento o grupo dos filossilicatos e o quartzo presente nas amostras têm maior possibilidade de serem identificados visualmente, podendo elucidar a variação de velocidade nas três direções ortogonais do bloco cerâmico estrutural.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6.1. REFERÊNCIAS DE NORMAS TÉCNICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM: C597-02:1991 - *standard test method for pulse velocity through concrete*.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1984) Solo - esta Norma prescreve o método de determinação da massa específica dos grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: NBR 6.508. Rio de Janeiro, RJ, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1984) Solo - esta Norma prescreve o método para a determinação dos limites de liquidez dos solos: NBR 6.459. Rio de Janeiro, RJ, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1984). Solo - esta Norma prescreve o método para a determinação do limite de plasticidade e para cálculo do índice de plasticidade dos solos: NBR 7180:1984 Versão Corrigida:1988. Rio de Janeiro, RJ, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1984). Solo - esta Norma prescreve o método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por combinação de sedimentação e peneiramento: NBR 7181:1984. Versão Corrigida:1988. Rio de Janeiro, RJ, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1986) Solo - esta Norma prescreve o método para a preparação de amostras de solos para os ensaios de compactação e de caracterização: NBR 6457. Rio de Janeiro, RJ, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1995). Rochas e Solos. Esta Norma define os termos relativos aos materiais da crosta terrestre, rochas e solos, para fins de engenharia geotécnica de fundações e obras de terra: NBR 6502. Rio de Janeiro, RJ, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1997). Peneiras de ensaio - Tela de tecido metálico, chapa metálica perfurada e lâmina eletroformada – Tamanhos nominais de abertura: NBR NM-ISO 565. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2001). Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio. NBR 6484. Rio de Janeiro, RJ, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2005). NBR 15270-1. Blocos Cerâmicos para Alvenaria de Vedação – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2005). NBR 15270-2. Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2005). NBR 15270-3. Blocos cerâmicos para Alvenaria Estrutural e de Vedação – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2013). NBR 8802. Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. (BS). (1986). BS 1881: Part 203: 1986. *Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*. BSI: London, 1986. 16p. (BS, 1986).

COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. (1996). NM 58/1996 - *hormigón endurecido - determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos*. COMITÉ MERCOSUR, 1996.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION (ISO). (2004). ISO 1920-7:2004. *Testing of concrete- Part 7. Nondestructive tests on hardened concrete*. 2004.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX (RILEM). (1972). NDT 1/1972 - *testing of concrete by the ultrasonic pulse method* (RILEM, 1972).

6.2. OBRAS CITADAS

ABERNETHY, R. *The New Weibull Handbook: 5th Edition, Reliability and Statistical Analysis for Predicting Life, Safety, Risk, Cost and Warrant Claims*. Robert Abernethy Editor, (2006).

Anuário Mineral Brasileiro (AMB). Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Brasília, DF. (2010). Disponível em: < <http://www.dnpm.gov.br>>. Acesso em: maio 2015.

ALEXANDRE, J. (2000). *Análise de matéria-prima e composição de massa utilizada em cerâmicas vermelhas*. Tese (Doutorado) Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF – Ciências de Engenharia – Geotecnia. Campos dos Goytacazes – RJ, 174p.

ALEXANDRE, J., AZEVEDO, A. R. G., XAVIER, G. C., MARGEM, F. F., MONTEIRO, S. N., PIAZZAROLLO, C. B., MENDONCA, T. A. O., AZEREDO, N.G. (2014). *Análise da Alteração de peças cerâmicas incorporadas com resíduo de granito*. In: 21º CBECIMAT- Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014, Cuiabá, MT. 21º CBECIMAT- Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.

ALEXANDRE, J., Azevedo, A.R.G., Theophilo, M.M.D., Xavier, C.G., Paes, A.L.C., Monteiro, S.N., Margem, F.M., Azeredo, NG. (2015). *Analysis of the Feasibility of Using Soil from the Municipality of Goytacazes/RJ for Production of Soilcement Brick*. In: *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2015*. 100 ed.: John Wiley & Sons, Inc., 2015, p. 595-600.

ALMEIDA, C. A. (2002). *Construções em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos – Um breve panorama do empreendimento: Aspectos do mercado, importância do planejamento e ações para prevenir falhas frequentes. Alvenaria Estrutural – Novas tendências, técnicas e de mercado.* Organizador: Emil de Souza Sanchez Filho – Rio de Janeiro, RJ.

ALVES, Maria da Glória; TEIXEIRA, Simone. (2008). *Patrimônio Natural e Cultural de Campos dos Goytacazes.* EDUENF. Campos dos Goytacazes, RJ, 32p.

American Ceramic Society (ACS). Disponível em: <<http://ceramics.org/knowledge-center/learn-about-ceramics>>. Acesso: jun 2013.

ANDREUCCI, R. (2008). *Ensaio por ultrassom: manual de aspectos básicos.* Disponível em: Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos, Rio de Janeiro, RJ. 77p.

Anuário Mineral Brasileiro (AMB). Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Brasília, DF. (2010). Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br>>. Acesso em: maio 2015.

Anuário Mineral Brasileiro (AMB). Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Brasília, DF. (2011). Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br>>. Acesso em: maio 2015.

ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. G. A. (2000). *Produtos cerâmicos. Materiais de construção.* EDUR, Rio de Janeiro, RJ. 203p.

ARNOTT, M. *Investigation of freeze-thaw durability.* (1990). NRC-IRC Report N° CR 5680. National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, Canada.

ASKELAND, D.R; PHULÉ, P.P. *The Science and Engineering of Materials*, 5th ed., Thompson Engineering, (2005).

Associação Brasileira de Cerâmica (ABC). Acesso em maio 2015. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br>>. (2015)

Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER). Programa Setorial da Qualidade (PSQ) atesta a qualidade do produto cerâmico. Disponível em: <<http://portal.anicer.com.br/psq-atesta/>>. Acesso em: maio 2015.

AZEREDO, N. G., COSTA, B. B., ALEXANDRE, J. (2012). *Respostas ao Controle de Temperatura em Blocos Cerâmicos Estruturais.* In: 56° Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2012, Curitiba, Paraná. 56° Congresso Brasileiro de Cerâmica.

AZEREDO, N. G., ALEXANDRE, J. , AZEVEDO, A. (2014a). *Diagnóstico da Matéria-Prima Argilosa Empregada na Produção de Blocos Cerâmicos Estruturais em Campos dos Goytacazes-Rj, Brasil.* In: XIV Safety, Health and Environment World Congress, 2014. v.14. p.301 – 304. (2014a). doi:10.14684/shewc.14.2014.301-304.

AZEREDO, N. G., ALEXANDRE, J., AZEVEDO, A. R. G., XAVIER, G. C., VIEIRA, C. M. F., MONTEIRO, S. N. (2014b). *Temperature Control Responses of Structural Clay Masonry Blocks.* Materials Science Forum (Online). , v.805, p.525 - 529, (2014b). doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.805.525

AZEREDO, N. G., ALEXANDRE, J. , AZEVEDO, A. R. G., MONTEIRO, S. N., XAVIER, G. C. (2014c). *Characterization of the Clay Used in Manufacturing Structural Clay Brick* In: Materials Science & Technology 2014, 2014, Pittsburgh, Pennsylvania USA. The leading forum addressing structure, properties, processing and performance across the materials community. (2014c).

AZEREDO, N. G.; ALEXANDRE, J.; AZEVEDO, A. R. G.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N. (2014d). *Caracterização de Massa Argilosa Empregada em Conformação com Blocos Cerâmicos Estrutural*. In: 58° Congresso Brasileiro de Cerâmico, 2014, Bento Gonçalves. 58° Congresso Brasileiro de Cerâmico. (2014d).

AZEREDO, N. G.; ALEXANDRE, J.; AZEVEDO, A. R. G.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N. (2014e). *Emprego de Blocos Cerâmicos Estruturais em Empreendimento Imobiliário*. In: 58° Congresso Brasileiro de Cerâmico, 2014, Bento Gonçalves. 58° Congresso Brasileiro de Cerâmico. (2014e).

AZEREDO, N. G.; ALEXANDRE, J.; Azevedo, A.R.G.; Xavier, C.G.; Monteiro, S.N.; Zanelato, E. B.; Oliveira, R. P. (2015a). *Evaluation of Structural Clay Brick Masonry Units by Weibull Analysis and Brazilian Code and Specifications*. In: Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2015.100 ed. : John Wiley & Sons, Inc., 2015, p. 353-360. (2015a).

AZEREDO, N. G.; ALEXANDRE, J.; Azevedo, A.R.G.; Xavier, C.G.; Candido, V. S.; Monteiro, S.N. (2015b). *Characterization of Precursor Clay Body and Weibull Analysis of the Compressive Strength of Structural Blocks*. Materials Science Forum (on line). Vol 820 (2015b) pp 438-442. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.820.438 (2015b).

AZEREDO, N. G.; Zanelato, E. B.; Alexandre, J.; Azevedo, A.R.G.; Xavier, C.G.; Candido, V. S.; Monteiro, S.N. *Performance of Precursor Materials and Fired Ceramics for Structural Blocks*. Materials Science Forum Vol 820 (2015c) pp 13-17. (2015c) Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.820.13

BERUTTI, F.A. (2004) *Aplicação de métodos de ultrassom para avaliação e caracterização da microestrutura de materiais cerâmicos à base de alumina e sua associação com propriedades mecânicas*. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. Porto Alegre, RS – , 152p.

BINDA, L., M. LUALDI, A. SAISI, and L. ZANZI. (2003). *The Complementary Use of On Site Non-Destructive Tests for the Investigation of Historic Masonry Structures*. In Proceedings of the 9th North American Masonry Conference, 978–989. Clemson, S.C.: The Masonry Society, (2003).

BODARE, A. *Non Destructive Test Methods of Stone and Rock. Department of Civil and Environmental Engineering*. (1995). Division of Soil and Rock Mechanics. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. 32p.(1995).

BUNGEY, J.H. (1985). *The Testing of Concrete in Structures*. Chapter 3 – Ultrasonic methods.

BUSTAMANTE, G.M.; BRESSIANI, J.C. (2000). *A Indústria Cerâmica Brasileira*. Revista Cerâmica Industrial. Vol. 5 (3). Maio/junho. (2000).

CABRAL, G. L.L. (2005). *Metodologia de Produção e Emprego de Agregados de Argila Calcinada para Pavimentação*. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro- RJ. IME – Instituto Militar de Engenharia. 358p.(2005).

CALLISTER, William D. (2012). *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares; revisão técnica José Roberto Moraes D' Almeida. 8.ed Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2012. xvii, 817 p., il. color. ISBN 978-85-216-2124-9. (2012).

CAMACHO, J.S. (1986). *Alvenaria Estrutural não Armada – Parâmetros básicos a serem considerados no projeto dos elementos resistentes*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), UFRGS, Porto Alegre, RS.

CAMACHO, J.S. (1995). *Contribuição ao estudo de modelos físicos reduzidos de alvenaria estrutural cerâmica*. 1995. 157f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

CAPUTO, Homero Pinto. (2008). *Mecânica dos solos e suas aplicações*. Volume 1: fundamentos. 6ª ed., ver. e ampl., Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, (2008).

CAZALLA, O.; SEBASTIÁN, E.; CULTRONE, G.. NECHAR, M.; BAGUR, M.G. (1999). *Three-way ANOVA interaction analysis and ultrasonic testing to evaluate air lime mortars used in cultural heritage conservation projects*. Cement and Concrete Research. Ed. Pergamon, 29, p.1749-1752, 1999.

CULTRONE, G., SEBASTIÁN, E.. CAZALLA, O., NECHAR, M., ROMERO, R. BAGUR, M. G. (2001). *Ultrasound and mechanical tests combined with ANOVA to evaluate brick quality*. Ceramics International 27. 401-406. (2001).

DE ROSA, B., CULTRONE, G. (2014). *Assesment of two clayey materials from northwest Sardinia (Alghero district, Italy) with a view to their extraction and use in traditional brick production*. Applied Clay Science 88-89 (2014) 100-110. Ed. Elsevier. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.11.030>.

DOBRIN, M.B. (1976). *Introduction to Geophysical Prospecting*. Third edition, McGraw- Hill Book Company. (1976).

DODSON, B. *The Weibull Analysis Handbook*, 2nd ed., ASQ Quality Press, (2006).

DOLOREUX, David; PARTO, Saeed. (2004). *Regional Innovation Systems: A Critical Review*. 2004. Disponível em: www.ulb.ac.be/soco/asrdlf/documents. Acesso em jun 2013.

DUTRA, R.P.S.; VARELA, R.M.; NASCIMENTO, R.M.; GOMES, U.U.; MARTINELLI, A.E.; PASKOCIMAS, C.A. (2009). *Estudo comparativo da queima rápida com a queima tradicional nas propriedades de materiais cerâmicos de base argilosa*. Cerâmica 55, 100-105.

Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE). (2010). *Informe Setorial Cerâmica Vermelha*. Disponível em: < www.banconordeste.gov.br>. Acesso em: maio 2015.

FERREIRA, Regis de Castro; FREIRE, Wesley Jorge (2004). *Eficiência da estabilização do solo e qualidade de tijolos prensados de terra crua tratada com aditivos químicos, avaliadas pela combinação de testes destrutivos e não-destrutivos*. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 1-15, maio/ago 2004.

FRANCO, L. S. (1992). *Aplicação de Diretrizes de Racionalização Construtiva para a Evolução Tecnológica dos Processos Construtivos em Alvenaria Estrutural*. São Paulo, Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FRANCO, L.S. (1987). *Desempenho estrutural do elemento parede de alvenaria empregado na alvenaria estrutural não armada, quando submetido à esforços de compressão*. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

GOMES, C.F. (1986). *Argilas: O que são e para que servem*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 457 p.

GOMES, F. P. (2000). *Curso de estatística experimental*. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 14^a ed. rev.e ampl. Editora Piracicaba: Nobel, Piracicaba-SP. 477p.

HARVEY JR., D.W.; SCHULLER, M.P. (2010). *Nondestructive evaluation: Structural performance of masonry*. Association of Preservation Technology International. Vol. Vol. XLI, No. 2-3, of the APT Bulletin, The Journal of Preservation Technology.

HOLANDA, J.N.F. (1999). *Notas de Aula: Princípios de Processamento de Cerâmica Vermelha/Estrutural* - Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF/ Laboratório de Materiais Avançados – Campos dos Goytacazes/RJ.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – CENSO 2010 Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>.

IBGE 2008 - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - 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.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Disponível em: <www.inmetro.gov.br/>. Acesso: jun 2013.

JÚNIOR, J.I.R. (2004). *Análises Estatísticas no Excel*. Guia Prático. Viçosa-MG. Editora da UFV. 251p.

KAPUR, K.C. ; LAMBERSON, L. R. *Reliability in Engineering Design*. John Wiley & Sons, (1977).

KINGSLEY, G. R., NOLAND, J. L., and ATKINSON, R. H. (1987). *Nondestructive evaluation of masonry structures using sonic and ultrasonic pulse velocity techniques*. Proc. 4th North American Masonry Conference Dept. of Civil Engrg., Univ. of California, Los Angeles, II, 67.1-67.16.

KOROTH, Surej R. ; FAZIO, Paul; FELDMAN, Dorel. (1998). *Evaluation of Clay Brick Durability Using Ultrasonic Pulse Velocity*. Journal of Architectural Engineering, Vol. 4, No.4, december,

Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER). (2013). Escola de Engenharia Departamento de Materiais. UFRGS. Disponível em: <<http://sindicerrrs.org.br>>. Acesso em: maio 2015.

LAMEGO FILHO, Alberto. *A Planície do Solar e da Senzala*. Edição: 2ª rev. – Rio de Janeiro: Arquivo Público do Estado do Rio de Janeiro / Imprensa Oficial do Estado do Rio de Janeiro, 208p.

MAAGE, M. (1984). *Frost resistance and pore size distribution in bricks*. Mat. and Struct., (RILEM), Bordas-Gauthier-Villars, France, 17(101), 345-350.

MOHAMAD, Gihad. (2007). *Mecanismo de ruptura da alvenaria de blocos à compressão*. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil. Guimarães, Portugal. 312p.

MOLINA, E.; CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; ALONSO, F. J. (2013). *Evaluation of stone durability using a combination of ultrasound, mechanical and accelerated aging tests*. Journal of Geophysics and Engineering 10 (2013) 035003 (18pp). doi: 10.1088/1742-20132/10/3/035003.

MALHOTRA, V. M. (1976). *Testing hardened concrete: Nondestructive methods*. ACI Monograph No.9, Am. Concrete Inst., Detroit, Michigan, USA.

MANZIONE, L. (2004). Projeto e Execução em Alvenaria Estrutural. 1ªEd. Edit.: O NOME DA ROSA. São Paulo, SP. 120p.

McNARY, S.W. (1984). *Basic properties of clay-unit masonry in compression*. M.Sc Thesis, University of Colorado, Boulder, USA.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. (1994). *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. Editora Pini, São Paulo, SP.

MILLER, C. P. (2008). *Determinação de parâmetros mecânicos e modelagem numérica em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos da indústria de Campos dos Goytacazes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes-RJ, 2008.161p.

Ministério de Minas e Energia (MME). Anuário Estatístico 2009. (2009). Setor de transformação de não metálicos. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: maio 2015.

Ministério de Minas e Energia (MME). Anuário Estatístico 2010. (2010). Setor de transformação de não metálicos. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: maio 2015.

Ministério de Minas e Energia (MME). Anuário Estatístico 2011. (2011). Setor de transformação de não metálicos. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: maio 2015.

Ministério de Minas e Energia (MME). Anuário Estatístico 2014. (2014). Setor de transformação de não metálicos. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: maio 2015.

MOTTA, J.F.M.; ZANARDO, A.; CABRAL, M.J. (2001). *As Matérias-primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das principais Indústrias Cerâmicas e seus Produtos*. Revista Cerâmica Industrial. Vol. 6 (2). Março/Abril/2001.

NAIK, T. R., MALHOTRA, V. M., POPOVICS, J. S. (2004). *The ultrasonic pulse velocity method*. In: Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. 2 ed. CRC Press, London, 2004.

NAKAMURA, M. (1988). *Indirect evaluation of frost susceptibility of building materials*. American Ceramic Society. Bull., 67(12), 1964-1965.

NOLAND, J. L.; KINGSLEY, G. R. and ATKINSON, R. H. (1990). *Nondestructive evaluation of masonry: An update*. Masonry: Components to assemblages; STP 1063, J. H. Matthys, ed., ASTM, West Conshohocken, Pa., 248-262, 1990.

OLIVEIRA SANTOS, C. E. (2011). Análise de blocos estruturais de concreto utilizando a técnica da ultrassonografia. Dissertação (Mestrado). UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Belo Horizonte, MG.

PARSEKIAN, G. A.; SOARES, M. M. (2010). *Alvenaria Estrutural em Blocos Cerâmicos: projeto, execução e controle*. 1ªEd. Edit.: O NOME DA ROSA. São Paulo. 240p.

PEDROTI, L. G. (2007). *Estudo de conformidades em relação à ABNT de blocos cerâmicos prensados e queimados*. Dissertação (Mestrado) Engenharia Civil – Universidade Estadual do Norte Fluminense , UENF. Campos dos Goytacazes – RJ , 97 p.

POPOVICS, Sandor. (2001). *Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship*. *Materials Evaluation*. v.59, n.2, p.123-130. February (2001).

PRABHAKAR, D.N.; XIE, M.; JIAN, R. Weibull Models (Wiley Series in Probability and Statistics), Wiley Interscience, (2003).

PRADO, S.H. (1995). *Resistência à compressão de tijolos e blocos cerâmicos de diferentes formas e dimensões*. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

PROGIR. (1984). *Estudos e Levantamentos Pedológicos. Projeto de Irrigação e Drenagem de Cana-de-açúcar na Região Norte Fluminense-RJ. Relatórios Técnicos Setoriais*. Vol I Tomo I e III.(1984).

PRUDÊNCIO JR., L. R.; OLIVEIRA, A. L.; BEDIN, C. A. (2002). *Alvenaria estrutural de blocos de concreto*. Florianópolis, SC: Editora Gráfica Pallotti, 207p.

PUPE, L. A. A. (2004). *Diagnóstico do Aglomerado Industrial da Indústria Cerâmica do Município de Campos dos Goytacazes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Campos dos Goytacazes-RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense –UENF. 125p.

- RADIVOJEVIC, A.; KURTOVIC-FOLIC, N. (2006). *Evolution of Bricks and Brick Masonry in the Early History of Its Use in the Region of Today's Serbia*. In: Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, No. 5, October 1, ©ASCE, ISSN 0899-1561/2006/5-692-699.
- RAMALHO, M. A. ; CORRÊA, M. R. S. (2003). *Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural*. 1ªEd. Edit.: PINI. São Paulo, 174p.
- RAMOS, I. S.; ALVES, M. G.; ALEXANDRE, J. (2006). *Diagnóstico do Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes – RJ*. Cerâmica Industrial, 11 (1) Janeiro/Fevereiro,
- RAMOS, I.S. (2000). *Delimitação, Caracterização e Cubagem da Região de Exploração de Argila no Município de Campos dos Goytacazes*. Dissertação de Mestrado em Ciências de Engenharia com ênfase em Geotécnica – Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. Vol I 83p. Vol II 311p.
- RIZZATTI, E. (2003). *Influência da geometria do bloco cerâmico no desempenho mecânico da alvenaria estrutural sob compressão*. 2003. 170f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- ROBINSON, G. C. (1984). *The relationship between pore structure and durability of brick*. American Ceramic Society. Bull., 63(2), 295-300.
- ROBINSON, G. C., Holman, J. R., and Edwards, J. F. (1977). *Relation between physical properties and durability of commercially marketed brick*. American Ceramic Society .Bull., 56(12), 1071-1075.
- ROMAN, H. R. (1983). *Determinação das Características Físicas e Análise Estatística da Capacidade Resistência de Tijolos Cerâmicos Maciços*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), UFRGS, Porto Alegre, RS.
- SABBATINI, F. H. (1989). *Desenvolvimento de Métodos, Processos e Sistemas Construtivos - Formulação e Aplicação de uma Metodologia*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – São Paulo – SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, USP. 321 p.
- SABBATINI, F. H. (2003). *Alvenaria estrutural: materiais, execução da estrutura e controle tecnológico*. Caixa Econômica Federal,.36 p.
- SABBATINI, F.H. (1984). *O Processo Construtivo de Edifícios de Alvenaria Estrutural Sílico-Calcária*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 298p.
- SANTOS NETO, A. P.; CASTRO, P. F. (2004). *A aplicação do ultrassom para verificação de tração à flexão das telhas em cerâmica vermelha*. In: Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção, nº3, p.15 - 26, out 2004.
- SANTOS, P.S. (1992). *Ciência e Tecnologia das Argilas*. 2 ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blücher. V.01. 408p.(1992).
- SCHULTZ, Duane P.; SCHULTZ, Sydney Ellen. *História da psicologia moderna*. 16. ed.São Paulo: Cultrix, 1992. 439 p.

Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas - SEBRAE – (2008). *Cerâmica Vermelha para Construções: Telhas, Tijolos e Tubos*. ESTUDOS DE MERCADO SEBRAE / ESPM, 40p. 2008.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Acesso em: jul 2013. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br> > .

SILVA, S. R. (2005). Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira. Dissertação (Mestrado). UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Belo Horizonte, MG. 2005.

SMITH, W.F. (2012). *Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais*. Porto Alegre: AMGH Ed., 707p. (2012).

SOUZA, S.D.C. (2003). *Uma Abordagem Evolucionária da Dinâmica Competitiva em Arranjos Produtivos Locais*. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção – Campos dos Goytacazes-RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. 342p.

TAUIL, C. A. ; NESSE, F. J. (2010). *Alvenaria Estrutural*. 1ªEd. Edit.: PINI. São Paulo, 2010.184p.

TEIXEIRA, R.A.; MELCHIADES, F.G.; BOSCHI, A.O. (2002). *A Variação das Características das Argilas e o Processo das Cerâmicas*. Revista Cerâmica Industrial. Vol. 7 (3). Maio/junho/2002.

THOMAZ, Ercio; HELENE, Paulo.(2000). Qualidade no projeto e na execução de alvenaria estrutural e de alvenarias de vedação em edifícios. EPUSP- BT/PCC/252. São Paulo, SP. 2000.31p.

TOLEDO, R. (2003). *Técnicas Fototérmicas e de Raios-X para o Monitoramento de Sólidos e Gases em Materiais Cerâmicos*. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. 315p.

VASCONCELOS, G.; LOURENÇO, P.B.; ALVES, C.A.S.; PAMPLONA, J. (2008). *Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites*. ScienceDirect. Ultrasonics 48 (2008) 453-466. Doi:10.1016/j.ultras.2008.03.008.

VARGAS, M. (1981). *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo, SP: McGraw-Hill. USP, 1981. 509p.

VIEIRA, C.M.F. (2001). *Caracterização de Argilas de Campos dos Goytacazes Visando à Fabricação de Revestimento Cerâmico Semiporoso*. Tese de Doutorado em Engenharia de Materiais – Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. 118p.

VIEIRA, C.M.F. (2002). *Notas de Aula: Introdução à Tecnologia de Cerâmica Vermelha* - Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF – Campos dos Goytacazes/RJ.

VIEIRA, L.S., SANTOS, P.C.T. e VIEIRA, M.N.S. (1988). *Solos: Propriedades, Classificação e Manejo*. Brasília, MEC/ABEAS, 154 p.

XAVIER, G. C. (2006). *Resistência, alterabilidade e durabilidade de peças cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduo de granito*. Tese (Doutorado) Engenharia Civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF– Ciências de Engenharia – Campos dos Goytacazes, RJ. 202 p.

XAVIER, G.C. (2001). *Utilização de Resíduos de Mármore e Granito na Massa de Conformação de Cerâmica Vermelha*. Dissertação de Mestrado em Ciências de Engenharia – Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. 285p.