

**PARÂMETROS FÍSICOS E MECÂNICOS DE BLOCOS PRENSADOS
E QUEIMADOS DE CERÂMICA VERMELHA PARA USO COMO
ALVENARIA ESTRUTURAL**

NIANDER AGUIAR CERQUEIRA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
JULHO - 2017**

**PARÂMETROS FÍSICOS E MECÂNICOS DE BLOCOS PRENSADOS
E QUEIMADOS DE CERÂMICA VERMELHA PARA USO COMO
ALVENARIA ESTRUTURAL**

NIANDER AGUIAR CERQUEIRA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias da
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte
das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.”

Orientador: Prof. D.Sc. Jonas Alexandre
Co-orientador: Prof. D.Sc. Gustavo de Castro Xavier

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
JULHO - 2017**

PARÂMETROS FÍSICOS E MECÂNICOS DE BLOCOS PRENSADOS
E QUEIMADOS DE CERÂMICA VERMELHA PARA USO COMO
ALVENARIA ESTRUTURAL

NIANDER AGUIAR CERQUEIRA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.”

Aprovada em 14 de julho de 2017.

Comissão Examinadora:

Prof^a. Alline Sardinha Cordeiro Morais (D.Sc., Eng. e Ciência dos Materiais) – IFF

Prof. Sérgio Rafael Cortes de Oliveira (D.Sc., Engenharia Civil) – IFF

Prof. Sérgio Luis Gonzáles Garcia (D.Sc., Engenharia Civil) - UENF

Prof. Gustavo de Castro Xavier (D.Sc., Engenharia Civil) – UENF
(Co-Orientador)

Prof. Jonas Alexandre (D.Sc., Ciências de Engenharia) – UENF
Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico essa vitória em minha vida a meu pai (em memória) e minha mãe, que sempre foram e serão minhas maiores referências de vida e motivação constantes.

Niander Aguiar Cerqueira

AGRADECIMENTOS

O Senhor Jesus nos ensina no evangelho que “A quem honra, honra”. Por isso não posso, de forma alguma, deixar de fazer esses agradecimentos a tantos que, direta ou indiretamente, fizeram esse trabalho possível.

Agradeço ao meu Deus que me deu a vida e me dotou de capacidades mentais, físicas, emocionais e intelectuais, me capacitando a realizar mais essa etapa em minha trajetória.

À minha família, em especial ao meu pai, Josué Garcia Cerqueira (In Memoriam) e à minha mãe, Carmen Lucia Aguiar Cerqueira que me deram a vida, me educaram e me mostraram o caminho dos estudos, face a seus exemplos pessoais e suas palavras de incentivo.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) através do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) pela importante oportunidade oferecida a mim por meio de seu programa de pós-graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelos recursos financeiros disponibilizados para o desenvolvimento de parte deste trabalho.

À Faculdade Redentor, por ter investido em mim e me liberado em tantos momentos para que eu pudesse me dedicar aos estudos e às pesquisas desta Tese. Aos meus alunos, ex-alunos e colegas professores pela parceria nesse tempo.

Aos professores D.Sc. Jonas Alexandre e D.Sc. Gustavo de Castro Xavier, pela confiança, paciência, amizade e por partilharem conhecimentos técnico-científicos fundamentais para a elaboração desta pesquisa.

Ao professor, D.Sc. Sergio Luís Gonzales Garcia, pela disponibilização dos equipamentos necessários ao desenvolvimento do programa experimental e a todos os professores do PPGEC do LECIV-UENF, pelos ensinamentos compartilhados, possibilitando, assim, minha formação como doutor em Engenharia Civil.

Ao amigo Rodolfo e à empresa Artecerâmica Sardinha, pela doação dos materiais necessários à realização do programa experimental.

Aos técnicos e bolsistas do LECIV e do LAMAV, em particular aos meus parceiros Gelcimar e Michel Picanço, pelo auxílio na realização das mais diversas tarefas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo M.Sc. Victor Barbosa de Souza pelo apoio em todo o processo de desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Alex Sandro, Luis Felipe, Mairyanne Souza, Euzébio Zanelato, Afonso Azevedo e todos os demais que foram parceiros ao longo dessa jornada.

À minha esposa por seu apoio constante, e a toda minha família por me trazer o alívio reconfortante aos momentos de maior estresse.

Por fim, agradeço a todos meus amigos que acreditaram e contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS	iii
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 – ASPECTOS GERAIS	1
1.2 – OBJETIVOS	3
1.3 – JUSTIFICATIVAS.....	4
1.4 – ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 - ALVENARIA ESTRUTURAL	6
2.2 – CERÂMICA VERMELHA.....	26
2.3 – BLOCOS PENSADOS	29
2.4 – SOLO-CIMENTO.....	31
2.5 – BLOCOS PENSADOS E QUEIMADOS	32
2.6 - MODELAGEM NUMÉRICA	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 – ASPECTOS GERAIS	41
3.2 – CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	44
3.3 – BLOCO ESTRUTURAL	48
3.4 – PRISMAS	55
3.5 – PEQUENAS PAREDES	59
3.6 – ARGAMASSA.....	60
3.7 – RESUMO DO NÚMERO DE AMOSTRAS DOS ENSAIOS.....	63
3.8 – TRATAMENTO DOS DADOS	63
3.8 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA	69
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	73
4.1 – MATÉRIA-PRIMA.....	73
4.2 – PRODUÇÃO DOS BPQ	78
4.3 – CARACTERIZAÇÃO DOS CERÂMICOS	78
4.4 – PRISMAS	84
4.5 – PEQUENAS PAREDES	90
4.6 – RESISTÊNCIA DA ALVENARIA.....	94
4.7 – ARGAMASSAS	95
4.8 – MODOS DE RUPTURA.....	96
4.9 – COMPARAÇÕES DE VALORES ENTRE BLOCOS E ARGAMASSA	100
4.10 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	101
5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA	108
5.1 – HIPÓTESES BÁSICAS E LIMITAÇÕES DO MODELO	108
5.2 – CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA SOLIDWORKS 16.0	109
5.3 - BLOCOS.....	110
5.4 - PRISMAS COM TRÊS FIADAS.....	111
5.5 - PRISMAS COM CINCO FIADAS.....	113

5.6 - PEQUENAS PAREDES	114
5.7 - MODELAGEM DAS PAREDES.....	115
6. CONCLUSÕES	117
6.1 – MATÉRIA-PRIMA.....	117
6.2 –PRODUÇÃO	118
6.3 – PARÂMETROS TECNOLÓGICOS.....	118
6.4 – COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	118
6.5 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA	119
6.6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
APÊNDICE A - TAMANHO MÍNIMO DO LOTE (TML).....	137
APÊNDICE B - BLOCOS.....	138
B.1 – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS BLOCOS.....	138
B.2 – ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS BLOCOS	138
B.3 – MASSA ESPECÍFICA APARENTE DOS BLOCOS.....	139
B.4 – RETRAÇÃO LINEAR DOS BLOCOS.....	139
B.5 – POROSIDADE APARENTE DOS BLOCOS.....	140
B.6 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BLOCOS	140
B.7 – MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DOS BLOCOS.....	141
APÊNDICE C - PRISMAS	142
C.1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PRISMAS.....	142
C.2 – MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DOS PRISMAS	145
APÊNDICE D - PEQUENAS PAREDES.....	147
D.1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PEQUENAS PAREDES	147
D.2 – FATOR DE EFICIÊNCIA DAS PEQUENAS PAREDES	147
D.3 – MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DAS PEQUENAS PAREDES	148
APÊNDICE E - ARGAMASSA.....	149
APÊNDICE F- CRITÉRIO DE CHAUVENET	153
APÊNDICE G - ILUSTRAÇÕES DE RUPTURAS DE ELEMENTOS ENSAIADOS.....	162
G.1 – RUPTURA DE BLOCOS	162
G.2 – RUPTURA DE PRIMAS DE 3 FIADAS	163
G.3 – RUPTURA DE PRIMAS DE 5 FIADAS	164

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelos de prismas.....	10
Figura 2.2 – Pequenas Paredes.....	10
Figura 2.3 – Modelo de Hilsdorf.....	11
Figura 2.4 – Modelo de Hamid e Drysdale.....	12
Figura 2.5 – Distribuição das tensões segundo Atkinson e Noland.....	13
Figura 2.6 – Mecanismos de falhas em alvenaria: (a) tração direta das juntas; (b) tensão diagonal das juntas; (c) compressão devido à dilatação da argamassa; (d) tração direta das unidades; (e) deslizamento ao longo das juntas.....	14
Figura 2.7 – Distribuição percentuais de produtos cerâmicos de Campos.....	28
Figura 2.8 – Prensagem Uniaxial.....	30
Figura 2.9 – Variação de prensagem.....	31
Figura 2.10 – Estratégias de modelagem: (a) amostra de alvenaria; (b) micromodelagem detalhada; (c) micromodelagem simplificada; (d) macromodelagem.....	35
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas de preparação da amostra.....	41
Figura 3.2 – Modelo do Tijolo Prensado e Queimado.....	42
Figura 3.3 – Prensa Eco Master 7000 Turbo II.....	42
Figura 3.4 – Processo de Produção dos BPQ – Vista superior.....	43
Figura 3.5 – Fabricação dos BPQ: (a) preparação do solo; (b) solo na prensa; (c) prensagem; (d) armazenamento para secagem; (e) queima no forno do tipo Caieira a 890°C; (f) armazenagem pós queima.....	44
Figura 3.6 – Equipamento de EDX.....	46
Figura 3.7 – Difratometro de Raio-X.....	47
Figura 3.8 – Sistema de Análises Térmicas.....	48
Figura 3.9 – Esquema das Medidas.....	49
Figura 3.10 – Medição de blocos: (a) medição de septos; (b) medição de largura.....	49
Figura 3.11 – Blocos submersos.....	50
Figura 3.12 – Prensa servo-hidráulica da marca EMIC.....	52
Figura 3.13 – Blocos com capeamento de pasta de cimento.....	53
Figura 3.14 – Extensômetro tipo PA-06-1000BA-120L.....	55
Figura 3.15 – Sistema de Aquisição de dados LYNX.....	55
Figura 3.16 – Modelos dos Prismas: (a) 5I; (b) 5M; (c) 3I; (d) 3M.....	56
Figura 3.17 – Capeamento de prisma.....	57
Figura 3.18 – Prismas com indicação de hastes para LVDT: (a) modelo; (b) prisma 3ICA; (c) Prisma 5ICA.....	59
Figura 3.19 – Construção das pequenas paredes (modelo PPCA).....	59
Figura 3.20 – Ensaios mecânicos em argamassa: (a) prensa EMIC DL-30; (b) ensaio de compressão; (c) equipamento para ensaio de tração na flexão.....	62
Figura 3.21 – Elemento tetraédrico utilizado no Solidworks.....	69
Figura 3.22 – Modelagem nos Blocos: (a) restrições e carregamento; (b) malha de elementos finitos.....	70
Figura 3.23 – Modelagem dos prismas: (a) 3I; (b) 3M; (c) 5I; (d) 5M.....	71
Figura 3.24 – Modelagem das pequenas paredes: (a) micromodelagem; (b) macromodelagem.....	71
Figura 3.25 – Modelo de parede (macromodelagem).....	72
Figura 4.1 – Limite de Liquidez.....	73

Figura 4.2 – Curva Granulométrica - massa argilosa.....	74
Figura 4.3 – Gráfico da Umidade ótima.....	74
Figura 4.4 – Difratoograma de raio-X (C= caulinita; Q = quartzo; M = mica muscovita e Gi = Gibsita).....	76
Figura 4.5 – Curvas de ATD/TG da massa argilosa.....	77
Figura 4.6 – Diagrama de Weibull (BPQ)	82
Figura 4.7 – Distribuição de Probabilidade Acumulada (BPQ)	82
Figura 4.8 – Curvas Tensão-Deformação longitudinal - blocos.....	83
Figura 4.9 – Resistências à compressão característica - prismas.....	84
Figura 4.10 – Resistências média à compressão – prismas.....	84
Figura 4.11 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 5ISA.....	85
Figura 4.12 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 5ICA.....	85
Figura 4.13 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 5MSA.....	86
Figura 4.14 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 5MCA.....	86
Figura 4.15 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 3ISA.....	86
Figura 4.16 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 3ICA.....	87
Figura 4.17 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 3MSA.....	87
Figura 4.18 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 3MCA.....	87
Figura 4.19 – Resistência à compressão - pequenas paredes.....	91
Figura 4.20 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - PPSA.....	91
Figura 4.21 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - PPCA.....	92
Figura 4.22 – Curvas Tensão-Deformação – Argamassa.....	96
Figura 4.23 – Ruptura de bloco.....	97
Figura 4.24 – Ruptura de prisma de 3 fiadas (3ICA)	98
Figura 4.25 – Ruptura de Prisma de 5 fiadas (5ISA).....	99
Figura 4.26 – Ruptura de pequena parede (PPSA)	100
Figura 4.27 – Comparação entre blocos e argamassa.....	100
Figura 4.28 – Comparação entre módulos de deformação longitudinal de prismas e pequenas paredes – com e sem uso de argamassa.....	101
Figura 4.29 – Comparação entre as resistências características de prismas e pequenas paredes – com e sem uso de argamassa.....	102
Figura 4.30 – Comparação entre módulos de deformação longitudinal de prismas sem uso de meio bloco (I) ou com emprego de meio bloco (M)	105
Figura 4.31 – Comparação entre resistências características de prismas sem meio bloco (I) e com meio bloco (M)	106
Figura 5.1 – Simulação de blocos: (a) deslocamentos; (b) deformações; (c) tensões em Y; (d) tensão principal 3.....	110
Figura 5.2 – Prisma 3ISA: (a) malha de Elementos Finitos; (b) deslocamentos verticais (direção Y)	112
Figura 5.3 – Distribuição de deformações em prisma 3ISA: (a) direção em Y; (b) deformações em X.....	112
Figura 5.4 – Distribuição de tensões em prisma 3ISA: (a) direção vertical (Y); (b) direção X.....	113
Figura 5.5 – Micromodelagem de pequena parede: (a) modelo; (b) malha de Elementos Finitos.....	114
Figura 5.6 – Macromodelagem de pequena parede: (a) modelo; (b) malha de Elementos Finitos.....	115

Figura 5.7 – Malha de Elementos Finitos – Parede.....	116
Figura G.1 – Bloco 1 rompido.....	162
Figura G.2 – Bloco 2 rompido.....	162
Figura G.3 – Bloco 3 rompido.....	162
Figura G.4 – Bloco 4 rompido.....	162
Figura G.5 – Bloco 5 rompido.....	162
Figura G.6 – Bloco 6 rompido.....	162
Figura G.7 – Prisma 3ICA 1 rompido.....	163
Figura G.8 – Prisma 3ISA 1 rompido.....	163
Figura G.9 – Prisma 3ICA 2 rompido.....	163
Figura G.10 – Prisma 3ISA 2 rompido.....	163
Figura G.11 – Prisma 3ISA 3 rompido.....	163
Figura G.12 – Prisma 3ICA 3 rompido.....	163
Figura G.13 – Prisma 5ICA 1 rompido.....	164
Figura G.14 – Prisma 5ISA 1 rompido.....	164
Figura G.15 – Prisma 5ICA 2 rompido.....	164
Figura G.16 – Prisma 5ISA 2 rompido.....	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fator de eficiência em diversas pesquisas.....	25
Tabela 2.2 – Resumo de Normas/autores (Módulo de Deformação)	26
Tabela 2.3 – Reações causadas pelo aumento da temperatura.....	29
Tabela 2.4 – Valores-limite segundo a ABNT NBR 10834 (2012)	32
Tabela 3.1 – Variações dimensionais.....	48
Tabela 3.2 – Valores de \emptyset em função da quantidade de blocos.....	54
Tabela 3.3 – Tipos de prismas.....	56
Tabela 3.4 – Valores de \emptyset em função da quantidade de prismas.....	58
Tabela 3.5 – Número de amostras de argamassa.....	61
Tabela 3.6 – Número de amostras por Ensaio.....	63
Tabela 3.7 – Valores de DR_0 para diferentes valores de n.....	66
Tabela 4.1 – Índices de Consistência.....	74
Tabela 4.2 – Composição química da massa argilosa (% em peso)	75
Tabela 4.3 – Medições nos blocos.....	78
Tabela 4.4 – Características Geométricas.....	79
Tabela 4.5 – Resumo das propriedades tecnológicas dos BPQ.....	79
Tabela 4.6 – Resistência à compressão média dos blocos.....	81
Tabela 4.7 – Módulos de Deformabilidade dos Blocos – Área Bruta.....	83
Tabela 4.8 – Valores do módulo de deformação - prismas.....	88
Tabela 4.9 – Relação entre módulo de deformação e resistência características – prismas.....	88
Tabela 4.10 – Valores do coeficiente de <i>Poisson</i> – prismas.....	89
Tabela 4.11 – Fator de Eficiência – Prisma/Bloco – resistência média.....	89
Tabela 4.12 – Fator de Eficiência – Prisma/Bloco – resistência característica.....	90
Tabela 4.13 – Módulos das pequenas paredes.....	92
Tabela 4.14 - Relação entre módulo de deformação e resistência característica – Prismas.....	92
Tabela 4.15 – Fator de eficiência pequenas paredes/blocos – Resistência média.....	93
Tabela 4.16 – Fator de eficiência pequenas paredes/blocos – Resistência característica.....	93
Tabela 4.17 – Fator de Eficiência – Pequenas Paredes/Prismas – resistência média.....	93
Tabela 4.18 – Fator de Eficiência – Pequenas Paredes/Prismas – resistência característica.....	94
Tabela 4.19 – Resistência característica da alvenaria.....	94
Tabela 4.20 – Resultados para ensaios das argamassas.....	95
Tabela 4.21 – Módulo de deformação longitudinal – Argamassas.....	96
Tabela 4.22 – Resultados teste F - prismas 5I.....	102
Tabela 4.23 – Resultados teste F - prismas 3I.....	103
Tabela 4.24 – Resultados teste F - prismas 5M.....	103
Tabela 4.25 – Resultados teste F - prismas 3M.....	104
Tabela 4.26 – Resultados teste F - pequenas paredes.....	104
Tabela 4.27 – Resultados teste F - prismas 5SA.....	106
Tabela 4.28 – Resultados teste F - prismas 5CA.....	107
Tabela 4.29 – Resultados Teste F - prismas 3SA.....	107

Tabela 4.30 – Resultados teste F - prismas 3CA.....	107
Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas utilizadas na micromodelagem.....	108
Tabela 5.2 – Resumo de restrições e carregamentos.....	108
Tabela 5.3 – Propriedades mecânicas utilizadas na modelagem de Pequenas Paredes.....	115
Tabela A.1 – TML.....	137
Tabela B.1 – Medidas dos Blocos.....	138
Tabela B.2 – Índice de Absorção de água dos Blocos (13 Corpos-de-prova)	138
Tabela B.3 – Índice de Absorção de água dos Blocos (12 Corpos-de-prova)	139
Tabela B.4 – Valores obtidos para MEA dos Blocos.....	139
Tabela B.5 – Valores obtidos para Retração Linear dos Blocos.....	139
Tabela B.6 – Valores obtidos para Porosidade Aparente (PA) dos Blocos.....	140
Tabela B.7 – Valores obtidos para Porosidade Aparente (PA) dos Blocos (5 amostras)...	140
Tabela B.8 – Valores obtidos para Resistência à Compressão (15 amostras).....	140
Tabela B.9 – Valores obtidos para Resistência à Compressão (14 amostras)	141
Tabela B.10 – Módulos de Elasticidade de Blocos.....	141
Tabela C.1 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 5ISA.....	142
Tabela C.2 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 5ICA.....	142
Tabela C.3 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 5MSA.....	142
Tabela C.4 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 5MCA.....	143
Tabela C.5 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 3ISA (6 amostras).....	143
Tabela C.6 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 3ISA (5 amostras).....	143
Tabela C.7 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 3ICA.....	144
Tabela C.8 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 3MSA.....	144
Tabela C.9 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 3MCA.....	144
Tabela C.10 – Valores de Elasticidade de Prismas 5ISA.....	145
Tabela C.11 – Módulos de Elasticidade de Prismas 5ICA.....	145
Tabela C.12 – Módulos de Elasticidade de Prismas 5MSA.....	145
Tabela C.13 – Módulos de Elasticidade de Prismas 5MCA.....	145
Tabela C.14 – Módulos de Elasticidade de Prismas 3ISA.....	145
Tabela C.15 – Módulos de Elasticidade de Prismas 3ICA.....	146
Tabela C.16 – Módulos de Elasticidade de Prismas 3MSA.....	146
Tabela C.17 – Módulos de Elasticidade de Prismas 3MCA.....	146
Tabela D.1 – Resistência à Compressão de Pequena Parede sem Argamassa – PPSA.....	147
Tabela D.2 – Resistência à Compressão de Pequena Parede com Argamassa – PPCA.....	147
Tabela D.3 – Eficiência de Pequenas Paredes.....	147
Tabela D.4 – Módulos de Elasticidade de Pequenas Paredes Sem Argamassa – PPSA.....	148
Tabela D.5 – Módulos de Elasticidade de Pequenas Paredes Com Argamassa – PPCA.....	148
Tabela E.1 – Taxa de Absorção para Argamassa.....	149
Tabela E.2 – Resistência à Tração na Flexão de Argamassas.....	149
Tabela E.3 – Resistência à Compressão de Argamassas (12 amostras).....	150
Tabela E.4 – Resistência à Compressão de Argamassas (11 amostras).....	150

Tabela E.5 – Resistência à Compressão de Argamassas (10 amostras).....	151
Tabela E.6 – Módulo de deformação longitudinal – Argamassas (12 amostras).....	151
Tabela E.7 – Módulo de deformação longitudinal - Argamassas (11 amostras).....	151
Tabela E.8 – Módulo de deformação longitudinal - Argamassas (10 amostras).....	152
Tabela E.9 – Módulo de deformação longitudinal - Argamassas (9 amostras).....	152
Tabela F.1 – DR – Absorção de Água de Blocos (13 CP).....	153
Tabela F.2 – DR – Absorção de Água de Blocos (12 CP).....	154
Tabela F.3 – DR – Absorção de Água de Blocos (11 CP).....	154
Tabela F.4 – DR – MEA dos Blocos.....	154
Tabela F.5 – DR – RL dos Blocos.....	154
Tabela F.6 – DR – PA dos Blocos (6 amostras).....	155
Tabela F.7 – DR – PA dos Blocos (5 amostras).....	155
Tabela F.8 – DR – Resistência à Compressão dos Blocos (15 amostras).....	155
Tabela F.9 – DR – Resistência à Compressão dos Blocos (14 amostras).....	155
Tabela F.10 – DR – Resistência à compressão de prismas 5ISA.....	156
Tabela F.11 – DR - Resistência à compressão de prismas 5ICA.....	156
Tabela F.12 – DR - Resistência à compressão de prismas 5MSA.....	156
Tabela F.13 – DR - Resistência à compressão de prismas 5MCA.....	156
Tabela F.14 – DR - Resistência à compressão de prismas 3ISA (6 amostras).....	156
Tabela F.15 – DR - Resistência à compressão de prismas 3ISA (5 amostras).....	156
Tabela F.16 – DR - Resistência à compressão de prismas 3ICA.....	157
Tabela F.17 – DR - Resistência à compressão de prismas 3MSA.....	157
Tabela F.18 – DR - Resistência à compressão de prismas 3MCA.....	157
Tabela F.19 – DR – Módulo de deformação de prismas 5ISA.....	157
Tabela F.20 – DR – Módulo de deformação de prismas 5ICA.....	157
Tabela F.21 – DR – Módulo de deformação de prismas 5MSA.....	157
Tabela F.22 – DR – Módulo de deformação de prismas 5MCA.....	158
Tabela F.23 – DR – Módulo de deformação de prismas 3ISA.....	158
Tabela F.24 – DR – Módulo de deformação de prismas 3ICA.....	158
Tabela F.25 – DR – Módulo de deformação de prismas 3MSA.....	158
Tabela F.26 – DR – Módulo de deformação de prismas 3MCA.....	158
Tabela F.27 – DR – Resistência à compressão de PPSA.....	158
Tabela F.28 – DR – Resistência à compressão de PPCA.....	158
Tabela F.29 – DR – Módulo de deformação – PPSA.....	159
Tabela F.30 – DR – Módulo de deformação – PPCA.....	159
Tabela F.31 – DR – Absorção de água para argamassa.....	159
Tabela F.32 – DR - Resistência à tração na flexão de Argamassa.....	159
Tabela F.33 – DR - Resistência à compressão de argamassa (12 amostras).....	159
Tabela F.34 – DR - Resistência à compressão de argamassa (11 amostras).....	160
Tabela F.35 – DR - Resistência à compressão de argamassa (10 amostras).....	160
Tabela F.36 – DR – Módulo de deformação - Argamassa (12 amostras).....	160
Tabela F.37 – DR – Módulo de deformação - Argamassa (11 amostras).....	161
Tabela F.38 – DR – Módulo de deformação - Argamassa (10 amostras).....	161
Tabela F.39 – DR – Módulo de deformação - Argamassa (9 amostras).....	161

RESUMO

A crescente demanda por uma maior racionalização na construção civil fomentou o surgimento de novos produtos como os Blocos Prensados e Queimados (BPQ), que possibilitam maior rapidez nas obras, com redução de desperdícios e de retrabalhos. Na presente pesquisa determinou-se parâmetros de deformabilidade do novo produto, que ainda não se tinha conhecimento. Foram objetos de estudo também as características físicas e mecânicas dos BPQ, verificando ainda os modos de ruptura. Para tanto, foram realizados ensaios em laboratório e posterior simulação numérica em elementos e em prismas e pequenas paredes de BPQ. A resistência característica dos blocos à compressão foi calculada em 3,62 MPa, valor este acima do mínimo requerido para alvenaria estrutural pela norma ABNT NBR 15270 (2005). O índice de absorção de água obtido foi de 20,8%, que atende aos parâmetros de qualidade, segundo a ABNT. Determinou-se os módulos de deformação longitudinal, transversal e o coeficiente de *Poisson* para o elemento de BPQ cujos valores foram 2,801 GPa, 1,185 GPa e 0,182, respectivamente. Os prismas e pequenas paredes apresentaram eficiência na faixa de 0,4 e 0,6. Verificou-se que na relação módulo de deformação e resistência característica dos prismas e das pequenas paredes, o valor padrão definido pela ABNT NBR 15812-1 (2010) foi superado, podendo o mesmo ser utilizado para fins estruturais, sem prejuízo de segurança. O modo de ruptura dos BPQ foi frágil, com tendência a falha no bloco. Os resultados obtidos ratificam a qualidade do BPQ, indicando sua aplicabilidade para execução de obras de pequeno porte.

Palavras chaves: Módulo de deformação; Resistência mecânica; Alvenaria estrutural; BPQ; Modo de ruptura.

ABSTRACT

The growing demand for a greater rationalization in civil construction has encouraged the emergence of new products such as Pressed and Burned Blocks (BPQ), which allow faster work, reducing waste and reworking. In the present research, it was determined the deformability parameters of the new product, which was not yet known. The physical and mechanical characteristics of the BPQ were also studied, as well as the rupture modes. For that, laboratory tests and numerical simulation were performed on elements and prisms and small walls of BPQ. The compressive strength of the blocks was calculated at 3.62 MPa, which is above the minimum required for structural masonry according to ABNT NBR 15270 (2005). The water absorption index was 20.8%, which meets the quality parameters, according to ABNT. The longitudinal, transverse strain and Poisson coefficients were determined for the BPQ element whose values were 2.801 GPa, 1.185 GPa and 0.182, respectively. The prisms and small walls presented efficiency in the range of 0.4 and 0.6. It was verified that in the relation modulus of deformation and characteristic resistance of the prisms and the small walls, the standard value defined by ABNT NBR 15812-1 (2010) was overcome, being able to be used for structural purposes, without prejudice of safety. The BPQ rupture mode was fragile, with a tendency to block failure. The results obtained confirm the quality of the BPQ, indicating its applicability for the execution of small works.

Keywords: Deformation module; Mechanical resistance; Structural masonry; BPQ; Breakout mode

1. INTRODUÇÃO

1.1 – ASPECTOS GERAIS

A indústria da construção civil passou por um grande momento de expansão, desenvolvimento muito impulsionado pela situação ascendente econômica que o Brasil vivenciou nos primeiros quinze anos do século XXI. Há que se ressaltar neste cenário as obras referentes ao PAC (Plano de Aceleração do Crescimento) nos governos petistas, com incremento na área de infraestrutura e políticas sociais para habitação, a exemplo do Programa Minha Casa Minha Vida, o desenvolvimento do setor petrolífero e as expectativas decorrentes da descoberta e da exploração do pré-sal e, em especial, os grandes eventos esportivos de importância mundial que o Brasil sediou, em 2014 e 2016, demandantes de um volume expressivo de construções.

Ainda que o panorama atual apresente alguns senões à manutenção deste volume de crescimento, o país ainda tem muito por se desenvolver e tal desenvolvimento passa diretamente pela modernização do setor da construção civil.

Desta forma, é de suma importância o domínio de técnicas e de produtos que permitam uma maior rapidez nos processos construtivos, menor custo e, ao mesmo tempo, um alto padrão de qualidade. Faz-se importante, no atual estágio de desenvolvimento, que as empresas prezem pela eficiência, visando à lucratividade, à satisfação do cliente e, por consequência, assegurem assim sua permanência no mercado.

A arte de construir exige otimização de materiais e de mão de obra, de maneira que as execuções de seus subsistemas contribuam para a obtenção da qualidade, redução de custos, diminuição de desperdícios nas construções, produtividade, praticidade e principalmente agilidade.

Destarte, o emprego de alvenaria estrutural ganhou novamente espaço como alternativa ao uso das estruturas em concreto armado, por possibilitar uma série de vantagens, tais como maior economia de material, menor geração de desperdício, melhoria na etapa de acabamento, dentre outros. Um fator relevante

é que tal método construtivo desempenha, ao mesmo tempo, as funções de elemento de vedação e estrutura.

Assim, alvenaria estrutural compõe fortemente as fases de projeto e construção, sendo um sistema completo que suporta, racionaliza e organiza todos os subsistemas da construção, desde que haja mão de obra qualificada. Neste cenário, os tijolos e blocos do tipo macho e fêmea contribuem de forma contundente para o processo de racionalização da construção em alvenaria estrutural, uma vez que, além de exigir projeto de modulação, o que em si já elimina tempo de execução, acrescenta agilidade no assentamento dos blocos pelo encaixe. Além de agilidade, também permite maior precisão, uma vez que o assentamento demandará maior cuidado com o prumo das paredes e menor gasto com argamassa, por permitir uma boa união dos blocos, garantindo maior estanqueidade.

Neste contexto, a indústria da cerâmica vermelha campista, que exerce hoje relevante papel econômico no município, pode contribuir na fabricação destes tijolos, trazendo assim um maior valor agregado para os seus produtos.

De acordo com Lamego (1974), a planície sedimentar campista foi formada no período quaternário pelas inundações do rio Paraíba do Sul. Portanto, as jazidas locais se caracterizam de material sedimentado e constituem fonte não renovável, o que ressalta a importância de se garantir um maior valor ao produto final obtido, como registrado por Miller (2008).

O processo de fabricação de artefatos cerâmicos para a construção civil, como tijolos, blocos, telhas, etc., apresentou um significativo avanço no Brasil nos últimos 70 anos, fruto de diversas pesquisas desenvolvidas nesse segmento (XAVIER, 2006). Entretanto, muito ainda pode ser feito pelo avanço desse processo construtivo.

Pedroti (2007), propôs substituir o processo de extrusão na fabricação de peças em tijolo cerâmico, pela prensagem de blocos em cerâmica, processo similar ao que é realizado com os tijolos de solo-cimento. Os blocos tipo “macho e fêmea” são então prensados e queimados, possibilitando um ganho de resistência e durabilidade a esses materiais (PEDROTI *et al.*, 2011).

Para o projeto estrutural de edificações em alvenaria estrutural um ponto de grande importância a ser estudado é a deformabilidade de painéis para definição

dos parâmetros elásticos (módulo de deformação, coeficiente de Poisson), além da tensão de ruptura à compressão e do modo de ruptura de blocos, prismas e paredes.

O presente trabalho avaliou comportamento mecânico à compressão e determinou os parâmetros de deformabilidade de blocos prensados e queimados (BPQ), no modelo de blocos de encaixe, tipo “macho e fêmea”, produzidos segundo metodologia desenvolvida por Pedroti (2007, 2011), Pedroti *et al.* (2011) e Alexandre (2012).

1.2 – OBJETIVOS

1.2.1 – Geral

A presente pesquisa teve como objetivo principal a definição de parâmetros de deformabilidade (módulos de deformação longitudinal e transversal e coeficiente de *Poisson*) e a correlação destes com a tensão de ruptura de blocos cerâmicos, parâmetros ainda desconhecidos para os BPQ, contribuindo assim para o emprego destes como blocos para projeto de estruturas de edificações.

Optou-se, nesta pesquisa, pela análise de prismas e pequenas paredes com uso de juntas secas (sem argamassa – SA) e juntas argamassadas (CA), para análise da contribuição que as argamassas utilizadas para o assentamento de blocos de encaixe podem trazer ao comportamento da parede de alvenaria estrutural.

Os BPQ também foram avaliados no que diz respeito às curvas tensão x deformação, ao modo de ruptura e à eficiência de prismas e pequenas paredes.

1.2.2 – Específicos

O escopo deste trabalho abrange as seguintes etapas:

- caracterização física, química (EDX), mineralógica (DXR) e térmica (ATD e TG) da matéria prima (massa argilosa) com a qual se confeccionaram os BPQ;
- produção dos BPQ na Cerâmica Sardinha;
- determinação de parâmetros de qualidade dos BPQ;

- determinação da forma de ruptura de blocos, prismas e pequenas paredes, com e sem juntas argamassadas;
- determinação dos módulos de deformação dos BPQ;
- comparação dos resultados obtidos para os prismas e pequenas paredes com e sem argamassa;
- modelagem e simulação numérica no software Solidworks 16.0.

1.3 – JUSTIFICATIVAS

A busca por sistemas construtivos mais eficientes que possam atender as demandas de um mercado cada vez mais competitivo e exigente tem proporcionado a procura e a introdução de tecnologias inovadoras, novos materiais e metodologias de execução. Essa necessidade de maior qualidade e menor custo tem sido propulsora de uma série de avanços na construção civil, como se pode verificar ao longo da história.

Nesse viés, a alvenaria estrutural com bloco de encaixe é um importante método construtivo que gera menor impacto ambiental, maior racionalização e contribui para uma maior sustentabilidade na indústria da construção civil, quando comparada às obras tradicionais em concreto armado, uma vez que reduz a produção de resíduos em uma obra, proporcionando assim melhoria na qualidade de vida.

As normas sobre alvenaria estrutural permitem o uso de valores padronizados para módulo de deformação e coeficiente de *Poisson* de blocos cerâmicos, porém, para o caso de um novo produto, esse valor não pode ser aplicado sem uma análise experimental que possa ser assim uma referência para futuros estudos e aplicações.

O BPQ, unidade cerâmica estudada nesta pesquisa, possui poucas referências na literatura, sendo que seus parâmetros de deformabilidade ainda não são conhecidos. Desta forma, se faz muito necessário o aprofundamento no conhecimento do produto e seu comportamento em serviço, contribuindo assim para viabilizar a sua utilização em projetos de edifícios em alvenaria estrutural.

A presente pesquisa teve esse objetivo quando buscou determinar os modos de ruptura, a resistência característica de projeto, o coeficiente de *Poisson* e

módulos de deformação, parâmetros fundamentais para o projeto de estruturas, utilizando os BPQ.

1.4 – ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Após este capítulo inicial da tese em que o tema e os objetivos são explanados, o texto se organiza da seguinte forma:

No Capítulo 2, foi realizada uma revisão bibliográfica, com os principais conceitos e o atual estado da arte dos temas abordados nesta tese;

No capítulo 3, apresentou-se a metodologia aplicada na consecução de cada objetivo específico da tese.

O capítulo 4 contém os resultados experimentais da pesquisa, divididos nos subitens: caracterização da massa argilosa para a produção dos blocos; ensaios em blocos para determinação de parâmetros de qualidade; ensaios em prismas, pequenas paredes e argamassa.

No capítulo 5, apresentaram-se os resultados da simulação numérica feita no Solidworks para blocos, prismas, pequenas paredes e paredes utilizando o Solidworks 16.0.

A conclusão desta pesquisa e a indicação de futuros temas a serem abordados para continuação da temática constam do capítulo 6, e no capítulo 7 são apresentadas as referências consultadas para a elaboração dessa Tese.

O texto ainda é complementado por Apêndices e Anexos, que servem de apoio ao entendimento dos resultados da presente pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - ALVENARIA ESTRUTURAL

A alvenaria estrutural é um processo construtivo caracterizado pelo uso de paredes como principal estrutura de suporte do edifício. As paredes desempenham um duplo papel: o suporte estrutural e a vedação vertical. As alvenarias são os elementos “portantes” das cargas até as fundações, por isso é conhecida por “autoportante”, que devem ser projetadas e executadas de forma racional (CAMACHO, 2006).

Nem todas as paredes de uma construção em alvenaria estrutural são portantes, devendo as não portantes serem convenientemente escolhidas para passagem de tubulações, encanamentos e conduítes, de modo a não haver rasgo de alvenaria com função estrutural para passagem destas tubulações.

Entre os sistemas construtivos atualmente utilizados, a alvenaria estrutural é um dos mais antigos e considerada como uma técnica muito tradicional. O uso de blocos constituídos por diversos materiais, como pedra, argila, entre outros, possibilitou a construção de obras que perduraram por milênios e exercem grande importância histórica. Povos como os sumérios, egípcios e romanos já faziam uso desse método construtivo há mais de 2.000 anos e algumas edificações como o Coliseu de Roma e as Pirâmides do Egito ainda existem, o que comprova a durabilidade da alvenaria como método construtivo. A Europa medieval também usou essa técnica em grandes e diversas catedrais. O uso deste método de alvenaria estrutural foi a principal técnica estrutural até o início do século XX. (SÁNCHEZ, 2013)

Algumas das principais vantagens da utilização da alvenaria estrutural são a redução de custos e o menor prazo de execução, fatores que possuem grande relevância num mercado imobiliário altamente competitivo.

Os primeiros tijolos cerâmicos empregados eram secos ao sol, sendo incorporada a etapa de queima apenas tempos depois. De acordo com Parsekian (2012), o ato de cozinhar ou queimar os tijolos naquela época era realizado de forma manual, moldados com palha ou estrume, com a finalidade de aumentar a resistência.

Por consequência da limitação dos conhecimentos científicos acerca da técnica, os edifícios antigos eram, em sua maioria, projetados utilizando o peso dos pavimentos, e suas paredes, muito espessas. Apenas a ação da gravidade assegurava a estabilidade da estrutura e seu uso era limitado em razão do custo ocasionado pelo grande gasto de material, conforme apresentado por Parsekian (2012). Devido a estas restrições, surgiu a busca por novas soluções técnicas (aço e concreto, por exemplo) que possibilitassem uma redução da espessura das paredes, ao mesmo tempo em que conservassem a segurança da estrutura.

O conceito estrutural da utilização da alvenaria estrutural é a transmissão de ações por meio de tensões de compressão, fundamental quando se trata de alvenaria como processo construtivo para criação de estruturas. Em alguns casos, pode-se admitir a existência de tensões de tração em determinadas peças que devem se restringir a pontos específicos da estrutura.

Nos últimos anos, muitas pesquisas têm sido realizadas ao redor do mundo para verificação das propriedades e o comportamento de novos produtos para alvenaria estrutural seja em blocos de concreto, em blocos cerâmicos ou em outros materiais, analisando o comportamento dos produtos (AHMED *et al.*, 2017; FRANZONI *et al.*, 2015; ILLAMPAS *et al.*, 2014; LIMA *et al.*, 2012; MICCOLLI *et al.*, 2014; SUKSIRIPATTANAPONG *et al.*, 2015; VELASCOS *et al.*, 2015) ou novas formas de dimensionamento (PARSEKIAN *et al.*, 2016; THEODOSSOPOULOS e SINHA, 2013), entre outras.

2.1.1 - Classificação da Alvenaria Estrutural

As alvenarias estruturais podem ser classificadas em três tipos básicos: alvenaria não armada, alvenaria armada e alvenaria protendida.

Segundo Cardoso *et al.* (2014), pode-se definir alvenaria não armada como aquela que é empregada em edifícios de médio e pequeno portes, em regiões sem atividade sísmica, podendo vir a apresentar elementos de reforço, como barras, telas e fios, que servem apenas nos casos de necessidade construtiva, tendo a finalidade de prevenção de fissuras, concentração de tensões, etc.

Alvenaria armada é aquela empregada em situações onde há necessidade de armadura passiva de aço para resistir aos esforços de tração e cisalhamento e aumentar a ductilidade. Nesse processo construtivo, as armaduras são dispostas

nas cavidades de blocos que são preenchidas com uso de graute (SÁNCHEZ, 2013).

Alvenaria protendida é aquela que apresenta armadura ativa de aço, pré-tensionada, inserida no elemento resistente. As construções onde há predomínio dos esforços de flexão são as mais indicadas para receber esse tipo de solução estrutural (PARSEKIAN, 2012).

2.1.2 - Componentes da Alvenaria Estrutural

Os principais componentes utilizados na execução de edifícios de alvenaria estrutural são as unidades, a argamassa, o graute e, quando for o caso, as armaduras construtivas (ativa ou passiva). De acordo com Parsekian (2012), pode-se definir cada um desses componentes como:

Unidade: são os blocos ou tijolos, responsáveis pela definição das características resistentes da estrutura. Quanto à sua forma, podem ser maciços ou vazados. São considerados maciços aqueles que possuem um índice de vazio de até 25% da área total; os que excederem esse limite são classificados como vazados.

Argamassa: é uma espécie de elo entre as unidades, uma vez que sua principal função é solidarizar as unidades. As argamassas também absorvem pequenas deformações e previnem a entrada de água e de vento nas edificações. Constituídas de cimento, areia, cal e água, comumente, uma argamassa de qualidade deve possuir boas características de trabalhabilidade, durabilidade e resistência. Outras funções que o material desempenha em paredes de alvenaria são: auxiliar na resistência de esforços mecânicos, distribuir as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos e absorver deformações de origem intrínseca à própria parede ou causadas por agentes externos.

Graute: é um concreto fluido com agregados de pequena dimensão, cuja função é preencher os vazios dos blocos ou tijolos, promover a aderência do bloco a eventuais armaduras e garantir aumento da resistência da parede sem necessidade de aumento da resistência das unidades.

Armaduras Construtivas: quando necessárias (alvenaria armada) são utilizadas armaduras cujas funções principais consistem em cobrir as necessidades construtivas e absorver os esforços de tração ou compressão.

2.1.3 – Prismas e Pequenas Paredes

Para conhecer melhor o comportamento de um tijolo ou bloco estrutural em serviço, as normas de ensaios e dimensionamentos apresentam alternativas ao ensaio de paredes em tamanho real que são as análises de prismas e de pequenas paredes.

Pode-se definir prisma como a justaposição de dois ou mais blocos unidos por juntas argamassadas, destinados a ensaios de resistência à compressão.

No anexo A da ABNT NBR 15812-2 (2010), é especificado o uso de prismas com dois blocos. No entanto, é preciso considerar que a altura dos prismas influencia na resistência à compressão. Parsekian (2012) indica que a altura precisa ser curta o suficiente para o ensaio não sofrer influência do efeito de esbeltez, porém não tão curta que sofra efeito de restrição das placas de aplicação de cargas nas extremidades do prisma.

Os prismas podem apresentar apenas juntas horizontais, ou juntas horizontais e verticais, sendo que diversos autores sugerem que para uma melhor eficiência prisma/parede, a correlação mais próxima do ideal seria utilizando os dois tipos de juntas, pois garante maior resistência ao cisalhamento (PASSOS *et al.*, 2002; VILATÓ, 2004; PARSESKIAN *et al.*, 2007; MIRANDA e CORRÊA, 2012)

A Figura 2.1 apresenta alguns tipos de prismas que são empregados em análises experimentais.

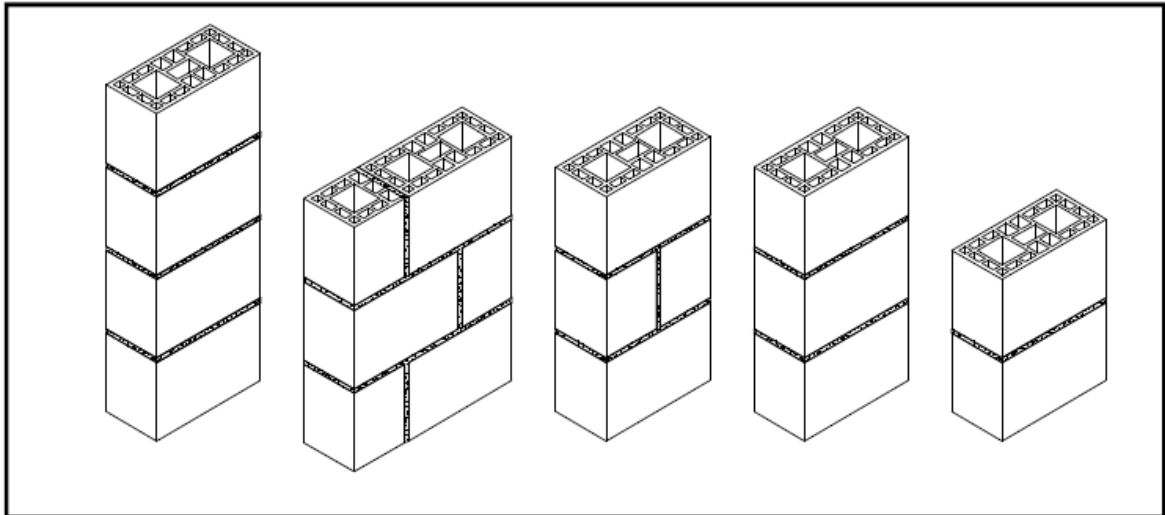


Figura 2.1 – Modelos de prismas
(Fonte: Santos, 2008)

Outra forma de avaliar o comportamento das paredes estruturais por estimativa é a utilização de pequenas paredes, por alguns autores denominadas paredinhas. Segundo o anexo B da norma ABNT NBR 15812-2 (2010), as pequenas paredes devem apresentar altura maior ou igual a, no mínimo, 5 vezes a espessura do bloco, e o comprimento deve ser maior ou igual a dois blocos.

Na Figura 2.2 são apresentados exemplos de pequenas paredes.

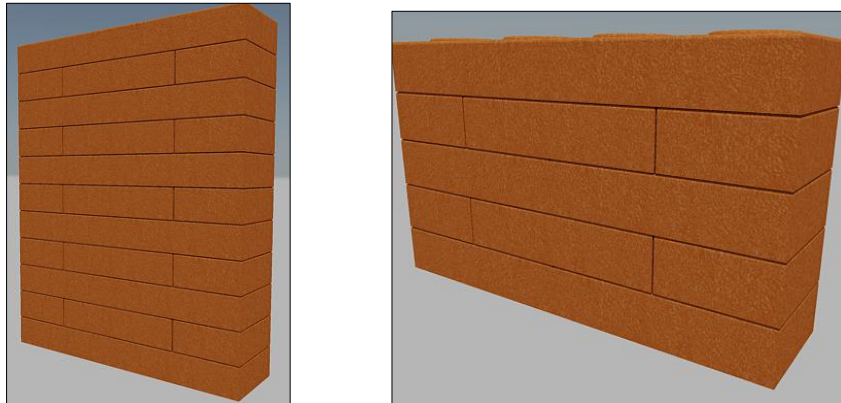


Figura 2.2 – Pequenas Paredes

2.1.4 - Deformabilidade e Ruptura de Alvenaria Estrutural

Conhecer a forma e quantidade de deformação de um elemento estrutural é fundamental para definir o seu comportamento estrutural e assim prevenir a manifestação de patologias.

Dada a importância do tema, vários pesquisadores implementaram estudos nas últimas décadas com o fim de conhecer o modo de ruptura, determinar as capacidades de deformação e a resistência à compressão em corpos-de-prova (cilíndricos e prismáticos) e de elementos (blocos isolados) e grupos de elementos (prismas, pequenas paredes e paredes em tamanho natural), tanto para blocos cerâmicos quanto para blocos de concreto.

Uma abordagem comumente realizada é o efeito do formato do bloco e suas dimensões para a resistência e a deformabilidade (PARSEKIAN, 2012). Segundo Monk (1967), o índice de esbeltez (h/t) depende das condições de apoio e da relação altura (h) e espessura (t) da parede, sendo o fator de geometria que exerce o maior impacto sobre a resistência da alvenaria.

Analisando os mecanismos de ruptura na alvenaria, Hilsdorf (1969) propôs um modelo matemático que considera os componentes da alvenaria com comportamento elástico. Esse mesmo modelo foi utilizado por diversos pesquisadores, conforme assinalado por Santos (2008) e Nessralla (2013).

As hipóteses do modelo de Hilsdorf consideraram que a ruptura se dá por cisalhamento (critério de Mohr). Há perfeita aderência entre bloco e argamassa e distribuição uniforme de tensões laterais e verticais. A Figura 2.3 apresenta estado de tensões gerado em prismas de alvenaria, indicando as tensões em unidades (blocos) e na argamassa (junta).

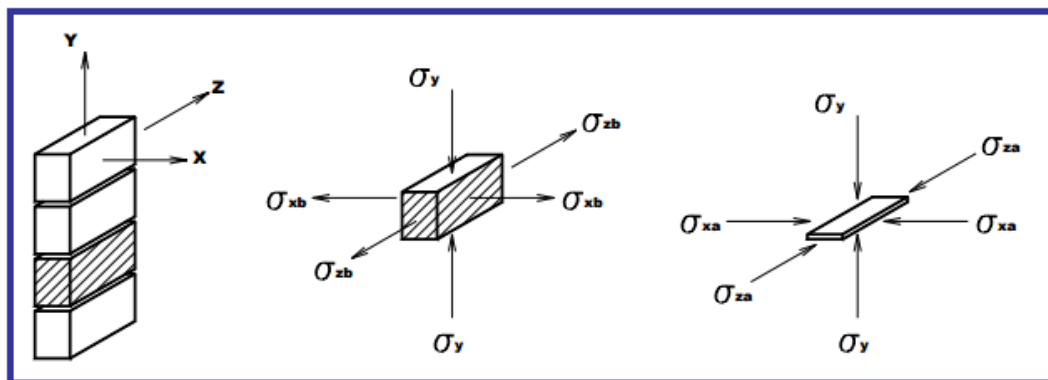


Figura 2.3 – Modelo de Hilsdorf
(Fonte: Nessralla, 2013)

Dessa forma, tem-se que os blocos estão sob um estado sob compressão na direção vertical, direção da aplicação da força, e sob tração nas direções do plano xz, plano perpendicular à aplicação da força. A argamassa, por sua vez, como pode depreender-se da Figura 2.3, está submetida a um estado triaxial de tração.

Esse modelo é muito importante, pois explica bem as formas de ruptura possíveis para paredes de alvenaria estrutural.

Nessralla (2013) verificou que as paredes no modelo de Hilsdorf, quando submetidas a um ensaio de compressão, tendem a romper devido às forças de tração, quando a tensão de tração no bloco supera o limite de resistência à tração.

Hamid e Drysdale (1979) estabeleceram um modelo que relaciona a resistência da parede de alvenaria estrutural a algumas propriedades obtidas por meio de testes dos elementos individuais. Eles desenvolveram ensaios de prismas de bloco de concreto grauteados, nos quais observaram que o rompimento ocorre com o surgimento de fissuras verticais no bloco. Todo estudo dos autores considerou que há compatibilidade entre as deformações na direção paralela à aplicação do carregamento, sendo o critério de ruptura dos blocos analisado sob um estado biaxial de tensões e a argamassa e o graute sob um estado triaxial de compressão (Figura 2.4). As considerações destes autores podem ser aplicadas tanto para alvenaria armada, quanto para a não armada.

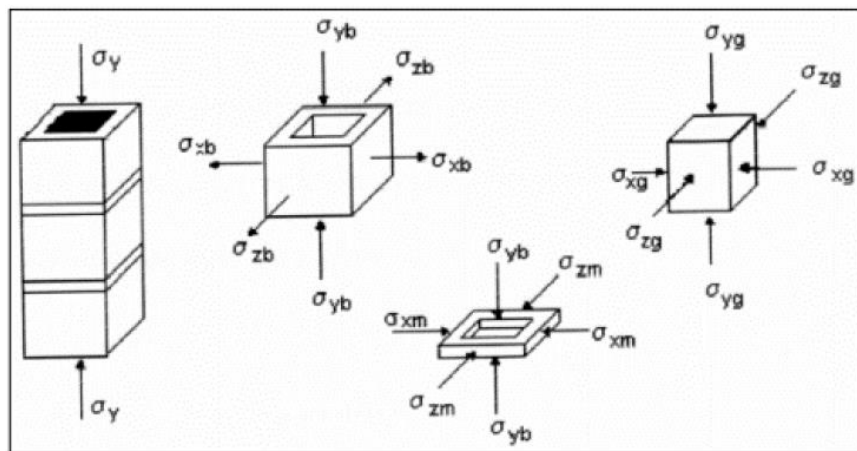


Figura 2.4 – Modelo de Hamid e Drysdale
(Fonte: Nessralla, 2013)

Miller *et al.* (1982) estudaram a influência de vários fatores sobre a resistência à compressão de blocos e prismas, observando que todos os prismas romperam por tração lateral. A ruptura ocorreu geralmente adjacente à face, sendo que os prismas confinados exibiram sinais de falha por cisalhamento.

Gomes (1983) estudou a deformação lenta em paredes de alvenarias cerâmicas armadas e não armadas, tendo sido um dos primeiros pesquisadores brasileiros a delinear os dois principais modelos de modos de ruptura das paredes em alvenaria. Ele desenvolveu seu estudo experimental no objetivo de caracterizar

mecanicamente os materiais e, em decorrência disso, verificar paredes e prismas. O autor conclui que a resistência da argamassa deve se situar entre 70 e 100% da resistência do bloco, uma vez que, para argamassas mais resistentes, a alvenaria passará a ter uma ruptura excessivamente frágil e também não acompanhará eventuais movimentos da estrutura sob cargas em serviço. Seu estudo aplicou o método das tensões admissíveis na análise teórica, bem como o método dos estados limites da norma inglesa na *BSI 5628* (1978).

Atkinson *et al.* (1985) estudaram o desempenho isolado de unidades de tijolos sob o estado de tensões biaxial, e da argamassa sob um estado de tensões triaxial. Os autores estabeleceram um modelo para prever a ruptura de prismas e determinar as variações do módulo de deformação e do coeficiente de *Poisson* com o aumento das tensões de confinamento e concluíram que o confinamento da argamassa acarreta a não linearidade da curva tensão deformação dos prismas.

Atkinson e Noland (1985) desenvolveram uma teoria que relaciona o desempenho da alvenaria à compatibilidade de deformação dos blocos e argamassas. Na hipótese, os autores consideraram o prisma sujeito a uma tensão de compressão uniforme, apresentando uma relação linear entre a tensão de compressão local e a resistência à tração lateral biaxial, como pode-se observar na Figura 2.5.

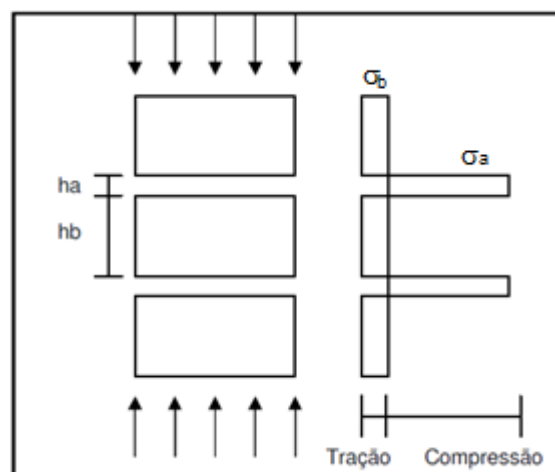


Figura 2.5 – Distribuição das tensões segundo Atkinson e Noland
(Fonte: Santos, 2008)

Na Figura 2.5, h_a e h_b são as alturas de argamassa e bloco, respectivamente, e σ_a e σ_b as tensões que atuam na argamassa e nos blocos, respectivamente. Conclui-se dessa teoria, dada a não linearidade da argamassa, que é possível acontecer o fendilhamento do bloco em vez do esmagamento da argamassa. O

modelo sugere ainda que o tamanho dos blocos está intimamente ligado à intensidade da ação de tração de forma que, quanto maiores os blocos, menores as tensões de tração que surgiram nos ensaios de compressão simples.

Cheema e Klingner (1986), estudando blocos de concreto, propuseram um modelo que associa o módulo de deformação dos materiais ao tipo de ruptura ocorrido na alvenaria sendo esses autores os primeiros a observar a correlação que existe entre o tipo de ruptura e a proporção de rigidez dos materiais.

Lourenço e Rots (1997) desenvolveram um modelo constitutivo de interface elastoplástica para a análise das estruturas de alvenaria não reforçada. Eles usaram o modelo para avaliar cisalhamento de paredes de alvenaria, podendo ser empregado para prever a carga de colapso experimental e comportamento com precisão. Nas Figuras 2.6 (a, b, c, d, e) são apresentados os mecanismos de falhas encontrados em paredes de alvenaria e que foram implementados ao modelo.

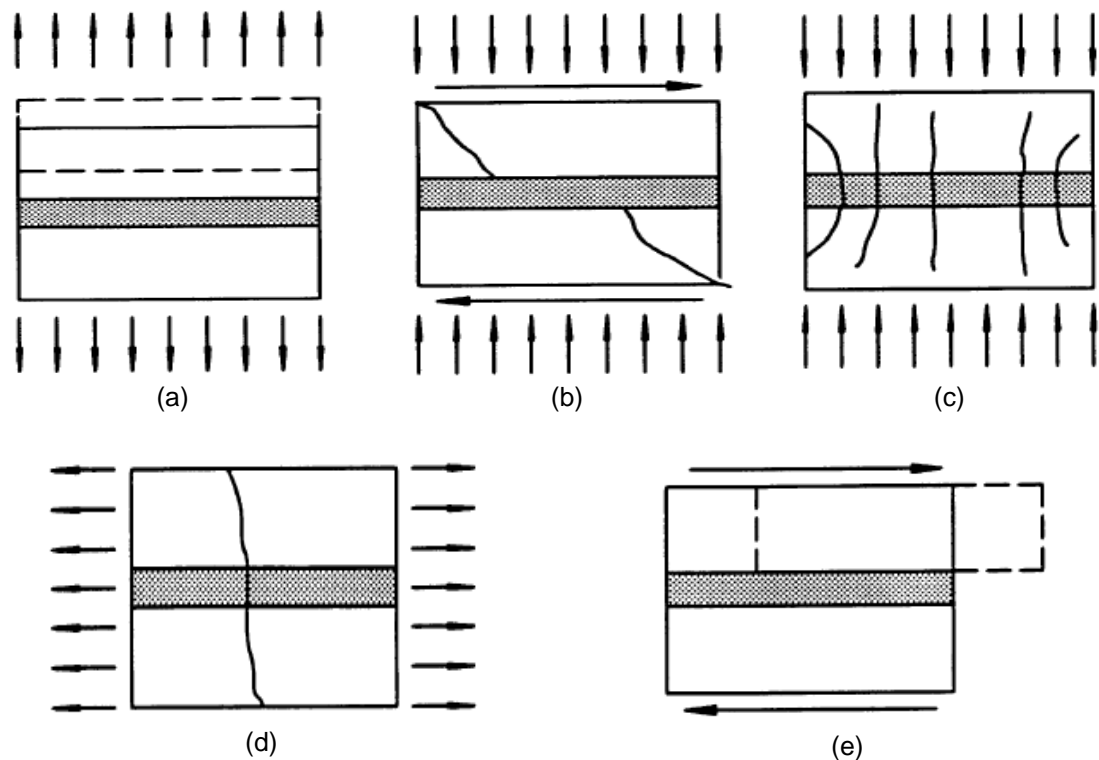


Figura 2.6 – Mecanismos de falhas em alvenaria: (a) tração direta das juntas; (b) tensão diagonal das juntas; (c) compressão devido à dilatação da argamassa; (d) tração direta das unidades; (e) deslizamento ao longo das juntas
(Fonte: Sutcliffe *et al.*, 2001)

Nota-se da Figura 2.6 que nos casos (a) e (b) a alvenaria falha na argamassa (junta), no caso (c) no bloco (unidade) e nos casos (d) e (e) a falha se dá no conjunto unidade-argamassa.

Mendes (1998), analisando a resistência à compressão de alvenarias de blocos cerâmicos, verificou que prismas assentados com argamassa de traço 1:1:6 (proporção de cimento: cal: areia em volume) apresentam ruptura avisada ou dúctil com esmagamento da junta de assentamento e, prismas assentados com argamassas de traço 1:1/4:3, ruptura frágil com trincas verticais cortando o bloco e argamassa. Essa diferença foi atribuída à maior deformabilidade das argamassas do primeiro grupo.

Garcia (2000), buscando obter parâmetros físicos para alvenaria estrutural, ensaiou paredes, blocos, prismas e corpos-de-prova cilíndricos de argamassa. A autora estabeleceu uma relação entre a resistência dos painéis e a resistência da argamassa, e entre as resistências últimas dos painéis, prismas e blocos. A eficiência entre parede e bloco encontrada foi de, aproximadamente, 0,3 e a resistência dos prismas de dois blocos vazios, aproximadamente igual à resistência das paredes não armadas. Gomes (1983), em sua pesquisa, verificou que, quanto ao fator de eficiência, as paredes que apresentaram melhores resultados de resistência e deformabilidade foram aquelas que tiveram fator de eficiência em torno de 30%.

Lindner (2001) estudou, em laboratório, os processos na fabricação de blocos cerâmicos estruturais queimados a um patamar de 930 °C. Ele avaliou a influência das variáveis de fabricação nas propriedades físicas e mecânicas desses blocos. Ele também aferiu a precisão de testes em modelos reduzidos de elementos de alvenaria. Na conclusão de sua pesquisa, afirma que tanto a resistência à compressão quanto o comportamento de uma alvenaria podem ser estudados utilizando modelos reduzidos com resultados confiáveis.

Lindner (2001), também verificou em sua pesquisa que, com o aumento da temperatura de queima dos blocos, ocorrem transformações químicas e físicas da massa argilosa. Isto resulta em perda e retração de massa (menor área líquida) acompanhada de redução de poros vazios (menor absorção de água), tornando o material mais compacto (maior massa específica) e com maior resistência à compressão.

Juste (2001) realizou uma pesquisa experimental em alvenaria de blocos de concreto submetida a esforços de compressão para determinar resistência e deformabilidade. Ela ensaiou blocos, argamassas, prismas de três blocos e

pequenas paredes de 80 cm x 80 cm² para avaliar a influência da resistência dos blocos, da resistência da argamassa e da direção de aplicação de forças no desempenho mecânico da alvenaria de blocos de concreto não-grauteada sob efeito de compressão.

Silva (2003) avaliou a influência da amarração das paredes de blocos cerâmicos, ensaiando um tipo particular de prisma denominado por ele de “H”, composto por dois blocos inteiros e seis meio blocos. Ele buscou avaliar a amarração proporcionada por grampos metálicos alocados nas juntas a prumo, obtendo bons resultados quanto a eficiência parede/prisma.

Gonçalves (2005) avaliou painéis de tijolo de terra crua (prensados e adobe), ensaiando blocos, prismas e paredes. Usou em seu trabalho o carregamento aplicado em ciclos, avaliando também o desempenho no descarregamento. As paredes foram instrumentadas com extensômetros mecânicos para acompanhar o seu comportamento, determinar os modos de falha e módulo de deformação. Os resultados sugerem boa capacidade suporte, tendo um comportamento suficiente para emprego em equipamentos e habitações de interesse social, pois com os tijolos prensados estabilizados com 74% de cimento, conseguiu-se 1,45 MPa e 1,80 MPa, respectivamente, para as tensões de fissuração da ordem e de ruptura de 0,55 MPa em paredes de 2,60 m de altura.

Rizzatti *et al.* (2011) avaliaram os modos de rupturas das paredes para diferentes tipos de bloco, tendo verificado que a propagação de trinca foi, basicamente, vertical, cortando a junta de argamassa de assentamento e bloco. Também foi constatado durante os ensaios experimentais, o esmagamento de algumas juntas de argamassa, onde aconteceram concentração de tensão e esmagamento do bloco.

Mohamad *et al.* (2011) analisaram a deformabilidade e o modo de ruptura de pequenas paredes de blocos de concreto objetivando entender os fenômenos presentes na ruptura do conjunto para melhoria do comportamento à compressão. Eles concluíram que o surgimento das primeiras trincas verticais se deu na interface bloco/argamassa da junta vertical, sendo este o ponto frágil do conjunto bloco/argamassa, o que foi observado quando a tensão atingiu cerca de 60% da tensão última de ruptura.

Sandoval *et al.* (2011) realizaram pesquisa experimental e numérica sobre a falha por flambagem de paredes de alvenaria cerâmica empregando blocos numa escala 1/4 caracterizadas por diferentes combinações de relações de esbeltez e excentricidades de carga. A aplicação numérica forneceu previsões satisfatórias da capacidade final e da deformabilidade lateral das paredes até a falha de encurvamento. O artigo se constitui em importante referência para a discussão sobre a influência de alguns parâmetros relevantes, como a resistência à tração de alvenaria, a esbeltez da parede e a excentricidade da carga sobre a capacidade de carga das paredes. Eles também utilizaram-se do método analítico fornecido pelo Eurocode 6 (2005) no trabalho para comparar com os resultados obtidos.

Miranda (2012) realizou um estudo do efeito na resistência à compressão e ao cisalhamento de pequenas paredes do não preenchimento das juntas verticais de blocos cerâmicos, avaliando também a influência do graute em prismas e pequenas paredes submetidos à compressão. Ela verificou que o não preenchimento das juntas verticais não influenciou na resistência à compressão e nos módulos de elasticidade longitudinal das pequenas paredes, mas influenciou na resistência ao cisalhamento. Quanto ao graute, concluiu que a resistência à compressão na pequena parede aumentou proporcionalmente ao ganho de área dado pelo grauteamento de seus vazios.

Lima *et al.* (2012) realizaram estudo com o objetivo de analisar o efeito da adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (SBA) em blocos de terra comprimidos (CEBs) por meio do ensaio de dois conjuntos de blocos que foram preparados com 6% e 12% de cimento além da terra e adição de SBA em proporções de 0%, 2%, 4% e 8% cada. Foram analisados blocos e prismas à compressão simples e compressão diagonal, sendo determinados os deslocamentos, as deformações e as forças de ruptura em cada caso. Os resultados de testes de resistência à compressão e à absorção de água mostraram que o SBA pode ser incorporado nas CEBs e na alvenaria sem danificar as propriedades mecânicas. Segundo conclusão dos autores, a série produzida com 12% de cimento Portland e 8% de SBA, em peso, pode ser utilizada na fabricação de componentes de alvenaria não estruturais, o que comprova a viabilidade técnica deste material.

Ma *et al.* (2012) avaliaram a contribuição de pré-esforço externo para melhorar o desempenho sísmico das estruturas de alvenaria. Eles objetivaram o aumento da resistência ao cisalhamento no plano e concomitantemente a melhora da resistência de flexão fora do plano das paredes de alvenaria, permitindo assim uma melhoria geral da estrutura sob cargas sísmicas. Os resultados experimentais mostraram que, após a introdução do pré-esforço vertical nas paredes com a técnica proposta, o modo de falha das estruturas de alvenaria testadas foi influenciado e a resistência de torção melhorou significativamente. Além disso, o pré-esforço também melhorou a capacidade de dissipação de energia das paredes e aumentou a rigidez geral da estrutura de alvenaria.

Sánchez (2013) afirma que a ruptura de blocos cerâmicos se dá por cisalhamento diagonal em decorrência da configuração geométrica desses blocos e pela relação entre as dimensões da base e altura, o que induz à ação do confinamento exercido pelas placas utilizadas no ensaio de bloco. Já os prismas tendem a apresentar dois modos básicos de ruptura: i) por tração do bloco no limite de resistência do material à tração; ii) por esmagamento da junta de assentamento ao atingir a resistência à compressão confinada da argamassa. Destarte, a ruptura deve sempre ser tratada como uma combinação de efeitos.

Teodossopoulos e Sinha (2013) analisaram as novas formas de análise de estruturas em alvenaria com relação à sua capacidade de melhorar a prática de projeto, execução e recuperação de estruturas. Os autores avaliaram os avanços na homogeneização, micro e mesomodelagem ou estado limite são discutidos em associação com técnicas numéricas mais efetivas (Elemento finito ou discreto), evidência experimental específica que continua o trabalho seminal de Sinha e Hendry e critérios de falha relevantes. Embora a filosofia dos códigos de design ainda se baseie na análise da linha de rendimento, as tendências atuais fornecem informações sobre a reação complexa às cargas. O efeito dessas ferramentas no estudo e na conservação da alvenaria histórica permitiu que uma variedade cada vez maior de tipos e formas fosse compreendida e reparada com mais precisão.

Bernat *et al.* (2013) estudaram a eficiência de argamassa reforçada com têxteis para o fortalecimento de paredes de alvenaria. Eles avaliaram a influência de diferentes tipos de argamassa e fibra e as vantagens do emprego de âncoras para melhorar a conexão entre as paredes e o reforço externo, verificando um

aumento de mais de 100% da capacidade de carga inicial sob carga axial excêntrica, além de um comportamento mais rígido e mais homogêneo.

Silva (2014) realizou análise experimental e numérica da variação da distribuição das tensões verticais entre paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos usando um modelo físico reduzido na escala 1:5. Ele determinou os parâmetros de módulo de deformação, resistência à compressão em blocos, prismas e paredes, usando modelo reduzido, para implementar no modelo numérico, usando elementos finitos, encontrando uma boa correlação entre os valores reais com os encontrados para o modelo reduzido.

Franzoni *et al.* (2015) estudaram o comportamento de blocos cerâmicos avaliando a diferença de na resistência à compressão e o módulo de Young e de argamassas à base de cimento e à base de cal, bem como prismas de alvenaria, em condições secas e úmidas, interpretando os resultados à luz das características microestruturais dos materiais, isto é, quantidade de vazios totais e distribuição de tamanho de poros.

Partene *et al.* (2015) realizaram um programa experimental para avaliar o comportamento de paredes de alvenaria estrutural cerâmica submetidas a cargas verticais constantes e horizontais cíclicas no plano. Elas procuram determinar a capacidade de cisalhamento para paredes de alvenaria não reforçadas e paredes de alvenaria reforçadas. Os blocos cerâmicos utilizados têm as dimensões comprimento, largura e altura de 37,5 x 25,0 x 23,8 cm³, com seção líquida de 0,52 da área da seção bruta. As propriedades dos blocos cerâmicos encontradas foram de 0,14; 3,98; 2350 MPa, respectivamente para resistência à tração, resistência à compressão e módulo de elasticidade longitudinal. Os resultados apontaram até 76% de incremento na resistência nos casos em que foram usados reforços nas alvenarias. O reforço melhora o comportamento sob cargas verticais e horizontais.

Izquierdo (2015) estudou o comportamento da interface bloco/graute para blocos cerâmicos e de concreto, com e sem armadura, quando submetidos a solicitações que provocam tração e compressão empregando ensaios experimentais e análise numérica.

Nascimento (2015) estudou o desempenho estrutural à compressão da alvenaria de blocos estruturais cerâmicos preenchidos com argamassa de assentamento, como componente integrante do sistema construtivo. Para atingir o

objetivo do trabalho, realizou-se a análise das propriedades mecânicas dos prismas, correlacionando-as com as propriedades obtidas com a caracterização dos blocos, argamassas e grautes. Ele notou que há um aumento na resistência à compressão dos prismas com a utilização da argamassa como preenchimento estrutural, o que o levou a concluir que há suficientes evidências da viabilidade de utilização desta técnica, desde que a escolha entre os componentes dos prismas seja adequada.

Oliveira (2015) avaliou a influência da variação da espessura e da resistência à compressão de juntas de argamassa para blocos estruturais cerâmicos tomando como base a experiência de obras realizadas em Campos dos Goytacazes, RJ. Ele ensaiou prismas de dois blocos variando a dimensão das juntas em cinco níveis: 5, 10, 15, 20 e 25 mm, e a resistência à compressão em dois níveis: 2,72 e 7,41 MPa. A pesquisa empregou bloco cerâmico estrutural com dimensões de 14x19x29 cm³, com resistência à compressão de 7,66 MPa. O resultado obtido indicou que a resistência do prisma é inversamente proporcional à espessura da argamassa, porém que é diretamente proporcional à sua resistência.

Mantovan *et al.* (2016) avaliaram a influência do modo como se realizam os ensaios em blocos de alvenaria nos valores obtidos de sua resistência mecânica. Os autores utilizaram blocos de concreto e os resultados demonstraram que a velocidade de ensaio não implica fundamentalmente nos resultados

Parsekian *et al.* (2016) realizaram estudo comparando resultados obtidos analiticamente aplicando as definições das normas brasileira, americana, canadense, europeia e australiana em comparação a uma análise experimental que abarcou 18 ensaios de paredes de blocos cerâmicos e de concreto com alta esbeltez, pela utilização de blocos de pequena espessura. Os resultados analíticos da capacidade de carga para o caso de blocos de concreto de geometria vazada foram próximos aos resultados dos ensaios, o que não se verificou plenamente para os blocos cerâmicos, onde apenas a aproximação da norma canadense permitiu obter os resultados dos ensaios com algum grau de segurança e proximidade. Dessa forma, eles concluíram da pesquisa que para paredes mais esbeltas e com blocos de geometrias complexas se fazem necessários procedimentos mais depurados para o cálculo tais como o processo P-Delta e a verificação da seção com material não resistente à tração.

Martinez (2017) estudou paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos de diversas geometrias com o objetivo de avaliar a ductilidade dessas paredes quando do deslocamento do elemento de apoio. O autor confrontou os resultados experimentais com os limites da norma brasileira ABNT NBR 15812-1 (2010) quanto aos deslocamentos de base das paredes no Estado Limite de Serviço (ELS), tendo concluído que os blocos com 65% de relação entre altura e comprimento apresentaram os melhores desempenhos.

Oliveira *et al.* (2017) avaliaram experimentalmente o desempenho à compressão de blocos, prismas e pequenas paredes de tijolos cerâmicos de vedação utilizados com função estrutural no estado de Pernambuco. Os autores estudaram a influência da argamassa de assentamento, concluindo que houve um ganho de capacidade resistente e de rigidez das paredes, diretamente proporcionais à espessura e ao maior consumo de cimento da argamassa. Eles também verificaram o uso de argamassa de revestimento, bem como de reforço com telas e conectores, concluindo que o emprego apenas de argamassa incorpora resistência, mas não muda a forma brusca de ruptura. Já o uso de telas e conectores, além de agregar resistência à compressão, também agrega ductilidade, possibilitando uma reserva de resistência e uma mudança na forma de ruptura.

2.1.5 – Equações para Estudo da Resistência da Alvenaria

Ao longo das últimas décadas, diversas formulações foram propostas para determinar e explicar matematicamente a resistência da alvenaria até a sua ruptura. Aqui são apresentadas algumas dessas equações definidas por diversos autores e também em normas técnicas de alguns países para determinação da resistência da alvenaria.

2.1.5.1 – DHANASEKAR (1985)

Segundo Dhanasekar (1985), o módulo de elasticidade da alvenaria de tijolos é usualmente relacionado com a resistência última da mesma. A formulação proposta considera que a relação entre o módulo de elasticidade da alvenaria (E_{alv}) e sua resistência à compressão é não linear, expressa por

$$E_{alv} = 1180 \cdot (f_c)^{0,83} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

2.1.5.2 – ABNT NBR 10837 (1989)

A norma brasileira ABNT NBR 10837 (1989) trata apenas de blocos de concreto, utilizando o critério de tensões admissíveis para o cálculo da compressão de paredes, P_{adm} , pela expressão:

$$P_{adm} = 0,2 \cdot f_p \cdot \left[1 - \left(\frac{h}{40 t} \right)^3 \right] \cdot A \quad (\text{Eq. 2.2})$$

sendo:

f_p : resistência média do prisma;

t : espessura efetiva;

h : altura efetiva;

A : área líquida da parede.

2.1.5.3 – BSI 5628-1 (1992)

A norma britânica pode ser aplicada tanto para blocos de concreto como para blocos cerâmicos, definindo a resistência característica à compressão, f_k , pela expressão:

$$f_k = \frac{f_m}{A} \cdot \frac{\psi_v \cdot \psi_m}{1,2} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

em que:

f_m : carga máxima média de dois painéis;

A : área da seção transversal de qualquer painel;

ψ_m : fator de redução da resistência da argamassa (Tabela 2.1 da BSI 5628-1, 1992);

ψ_v : fator de redução para amostras de elementos estruturais.

2.1.5.4 – La Rovere e Soliz (1995)

Utilizando o critério de Hilsdorf, La Rovere e Soliz (1985) propuseram a seguinte expressão para determinação da resistência à compressão da alvenaria (f'_m):

$$f'_m = \frac{\sigma_y}{k_1} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

sendo:

σ_y : resistência à compressão do bloco;

k_1 : coeficiente que considera a não uniformidade de distribuição de tensões laterais, que variam de 1,1 a 2,5.

2.1.5.5 – Mohamad (1998)

Propôs equações para alvenaria com blocos de concreto não grauteados. Para a compressão de prismas (f_p) em função da resistência de argamassa (f_a), o autor apresentou a expressão

$$f_p = f_a \cdot 0,5794 \cdot \left(\frac{E_a}{E_b}\right)^{-1,1093} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

em que:

E_a : Módulo de Deformação da argamassa;

E_b : Módulo de Deformação do bloco.

Para a compressão de prismas (f_p) em função da resistência à tração do bloco (f_{bt}), o autor apresentou a expressão:

$$f_p = f_{bt} \cdot \left[5,4491 \cdot \left(\frac{E_a}{E_b}\right)^2 + 3,6377 \cdot \left(\frac{E_a}{E_b}\right) + 10,219 \right] \quad (\text{Eq. 2.6})$$

2.1.5.6 – EUROCODE 6 (2005)

A norma europeia, na versão de 2005, para determinação da resistência característica da alvenaria à compressão (f_k), considera a expressão

$$f_k = k \cdot f_b^\alpha \cdot f_a^\beta \quad (\text{Eq. 2.7})$$

sendo:

k : coeficiente constante;

α e β : constante;

f_a : resistência à compressão média da argamassa;

f_b : resistência à compressão média da unidade.

2.1.5.7 – ABNT NBR 15812-1 (2010)

A norma brasileira para blocos cerâmicos estabelece que a resistência à compressão da alvenaria (f_k) pode ser estimada em função da resistência

característica de compressão simples de prismas (f_{pk}) ou pela resistência característica de compressão simples de pequenas paredes (f_{ppk}):

$$f_k = 0,7 \cdot f_{pk} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

$$f_k = 0,85 \cdot f_{ppk} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

No Brasil, blocos com resistência de 6 MPa são usuais em todas as regiões do país, sendo que na região sudeste encontram-se blocos com resistência maior, de até 12 MPa, normalmente com dimensões de 140 mm x 290 mm. No Sul, predomina a produção de blocos com modelo de paredes maciças e com resistência de até 18 MPa, com as mesmas características dimensionais dos anteriores, conforme Parsekian (2012).

Nos Estados Unidos, os valores da resistência à compressão da unidade básica da alvenaria, variam de 12 a 200 MPa, em relação a área líquida. No Canadá, estes valores estão na ordem de 40 a 80 MPa, também tendo como referência a área líquida. (DRYSDALE, HAMID e BAKER, 1994).

2.1.6 – Eficiência

Eficiência é um importante fator que representa a relação entre a resistência de bloco (f_{bk}) e resistência de componentes com prisma (f_{pk}) ou de pequenas paredes (f_{ppk}), sendo determinado pelas expressões:

$$\eta_p = \frac{f_{pk}}{f_{bk}} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

$$\eta_{pp} = \frac{f_{ppk}}{f_{bk}} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

em que:

η_p : eficiência prisma/bloco;

η_{pp} : eficiência pequena parede/bloco;

Gomes (1983) determinou a eficiência parede/bloco variando entre 0,16 e 0,39, recomendando 0,30 como um valor desejável.

Outros autores estudaram a eficiência para blocos cerâmicos, segundo exposto por Santos (2008), que são resumidos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Fator de eficiência em diversas pesquisas

Autores	Fator de Eficiência (%)
Monk (1967)	10 a 40
Mendes (1998)	35 a 55
Garcia (2000)	33
Arantes (2003)	56 a 59
Rizzatti (2003)	35 a 41
Sahlin	25 a 50
Prudêncio	18 a 30

Fonte: Santos (2008, p. 53 e 54, adaptado)

Os diversos autores indicaram que a variação nessa eficiência depende do tipo de bloco, da resistência da argamassa, do tipo de assentamento. Normalmente quanto mais resistente o bloco, menor será o valor da eficiência e vice-versa.

2.1.7 – Módulo de Deformação

Além da resistência mecânica e da forma de ruptura, os ensaios de compressão permitem a determinação de outros parâmetros importantes para a alvenaria, tais como o módulo de deformação, que permite qualificar e quantificar fenômenos que ocorrem nas paredes estruturais. É importante salientar que não basta conhecer o valor, deve-se analisar o comportamento do gráfico tensão-deformação.

Hamid e Drysdalle (1979) afirmam que o capeamento influencia na deformação e que a não linearidade da deformação é perceptível entre 35 e 50 % da resistência da unidade.

A norma brasileira ABNT NBR 15812-2 (2010), no anexo A, define que o módulo de deformação deve ser determinado pelo ensaio de compressão com o uso de LVDT e tomado da curva tensão-deformação da inclinação da reta secante à curva entre 5 e 30% da tensão de ruptura de cada corpo-de-prova. Ele também pode ser estimado pela expressão que consta da Tabela 1 da ABNT NBR 15812-1 (2010):

$$E = 600 \cdot f_{pk} \leq 12 \text{ GPa} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Tomando por base os estudos apresentados por Parsekian (2002), Santos (2008) apresentou um resumo de normas e autores sobre a relação entre o módulo de deformação longitudinal e a resistência de blocos cerâmicos, que consta da Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Resumo de Normas/autores (Módulo de Deformação)

Fonte	Tipo de bloco	Argamassa	E_p (MPa)	Observações
AS 3700 (2011)	$5 \leq f_{bk} \leq 30 \text{ MPa}$	M2 e M3	$700f_{pk}$	Carga de curta duração
	$f_{bk} \geq 30 \text{ MPa}$	M3 e M4	$1000f_{pk}$	
BSI 5628 (1992)	Qualquer	Qualquer	$900f_{pk}$	-
ACI 530/TMS 402/ASCE 5 (1999)	-	-	$700f_{pk}$	Inclinação da reta secante à curva entre 5 e 33% da tensão de ruptura
Lenczner (1986)	Padrão britânico	(i) e (ii)	$3750\sqrt{f_{pk}} - 1000$	-
Wolde-Tinsae <i>et al</i> (1983)	Vazados (18 a 30)	-	$500f_{pk}$	Grauteados ou não

Fonte: Santos (2008, p. 60, adaptado)

Outros autores pesquisaram o módulo de deformação para blocos cerâmicos, conforme Pasquali (2007), utilizando diferentes metodologias, estudando prismas, pequenas paredes e paredes, encontrando valores que variam de $478f_{pk}$ a $1152f_{pk}$, o que indica uma variação muito grande nesses valores.

Garcia (2000) utilizou como referência para sua pesquisa os valores no gráfico tensão-deformação entre 30 e 40% da carga de ruptura dos elementos, concluindo que deve ser utilizado o terço médio para obtenção do módulo, por ser uma região que sofre menor influência dos pratos da prensa no ensaio.

2.2 – CERÂMICA VERMELHA

As cerâmicas ou materiais cerâmicos são materiais não-metálicos, inorgânicos, na maioria das vezes obtidos após tratamento térmico elevado. Eles são considerados materiais frágeis, duros, com baixa tenacidade e baixa ductilidade, rompendo a uma deformação de aproximadamente 0,1% (CALLISTER, 2012). A temperatura de fusão dos cerâmicos é relativamente alta e os mesmos

ainda se caracterizam por grande estabilidade química e uma estrutura cristalina complexa.

Cerâmicas vermelhas, classificadas como Cerâmica Tradicional, são materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, etc.), que usam como matéria prima a argila.

Argila, de acordo com Santos (1975), “é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade”. Ele ainda assevera as argilas são “formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio”.

Sánchez (2013) destaca algumas características importantes para uma argila apropriada à produção de blocos e tijolos: plasticidade (moldável com pequena quantidade de água); resistência à tração (capacidade de manter a forma após moldada); e capacidade de fundir as partículas quando da queima.

A cidade de Campos dos Goytacazes, norte do estado do Rio de Janeiro, se destaca no cenário nacional como um respeitável polo da indústria cerâmica vermelha. Em 2012, segundo dados do DRM-RJ (2012), das 222 cerâmicas fluminenses, 113 situavam-se em Campos dos Goytacazes, perfazendo um total de 51% das unidades de produção de cerâmicos. Em 2012, no polo cerâmico de Campos eram produzidos cerca de 80.000 milheiros/mês, tendo predomínio da produção de blocos de vedação.

Na Figura 2.7 é apresentado um gráfico com a distribuição dos percentuais de produtos fabricados em Campos dos Goytacazes (DRM-RJ, 2012).

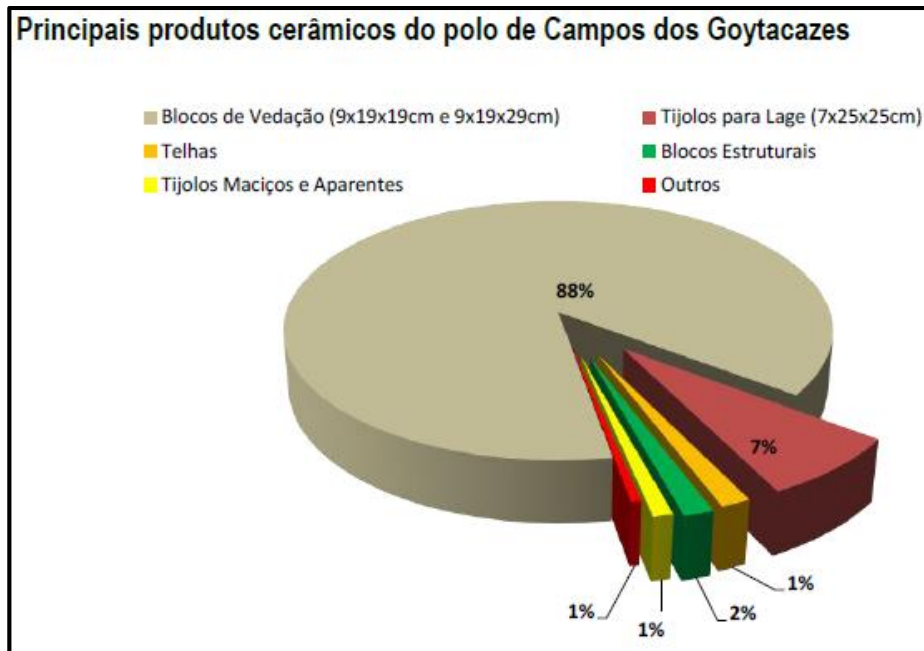


Figura 2.7 – Distribuição percentuais de produtos cerâmicos de Campos (Fonte: CAM/DRM-RJ)

Alexandre (2000), Xavier (2001), Vieira (2001) e Xavier (2006) indicaram em suas pesquisas que há grande abundância de material argiloso na região de Campos dos Goytacazes, o que ratifica o papel estratégico da indústria ceramista campista no panorama nacional.

A origem das jazidas de argila da região é sedimentar e em sua composição há predominância de Caulinita (ALEXANDRE, 2000; MONTEIRO e VIEIRA, 2002).

A produção regional tem como principal produto a alvenaria de vedação (88%), um produto com baixo valor agregado. A produção de tijolos e blocos com função estrutural, produto com maior valor agregado, hoje representa apenas 2% do setor produtivo das cerâmicas campistas, aproximadamente.

Um problema da indústria cerâmica de Campos, apontado por Alexandre (1997), e que timidamente foi alterado em algumas cerâmicas campistas, é a baixa temperatura de queima dos blocos, o que não permite aos artefatos a aquisição das características de qualidade a que poderiam alcançar.

Buscando contribuir para a resolução desse problema, várias pesquisas já foram implementadas na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), tanto no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) quanto no Laboratório de Engenharia e Ciências dos Materiais (LAMAV) nos últimos anos.

Ross (1991) resumiu o objetivo da queima dos cerâmicos como a transformação de um material friável num produto resistente pelo processo de sinterização. Nesse processo de queima, acontece uma série de transformações químicas e físicas no material como perda de massa, densificação e vitrificação.

Na Tabela 2.3 é apresentado um resumo elaborado por Miller (2008) sobre as mudanças ocorridas no material, que tomou como base Santos (1975).

Tabela 2.3 – Reações causadas pelo aumento da temperatura

Temperatura (°C)	Reações Químicas
Até 100	Perda de umidade
100 – 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 - 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

(Fonte: Miller, 2008)

2.3 – BLOCOS PRENSADOS

Blocos ou tijolos prensados são aqueles obtidos pela moldagem de terra por meio de uma prensa. Os blocos mais comuns são os de solo-cimento, obtidos pela compactação de solo com acréscimo de cimento para a estabilização em prensa manual ou hidráulica, que lhes dá a forma.

Prensar um material é uma operação de amoldamento ou conformação por meio da compactação de um pó granulado por pressão, usando uma forma ou molde para dar a forma ao material. Sua operacionalização segue três fases: preenchimento do molde, compactação e extração da peça.

A operação de prensagem objetiva a obtenção de peças uniformes, com boa conformidade das dimensões e da geometria pré-estabelecida, bem como contribuir para obter uma microestrutura adequada às características finais almejadas.

A prensagem uniaxial em matriz rígida é um dos métodos de compactação de pós secos ou semi-secos mais empregados na indústria cerâmica, geralmente empregada na confecção de peças que não apresentam relevo superficial na direção de prensagem, de acordo com Reed (1992).

Para peças com formato simplificado, como o necessário para a produção dos blocos do presente trabalho, a carga pode ser aplicada em apenas um sentido, conforme ilustrado na Figura 2.8.

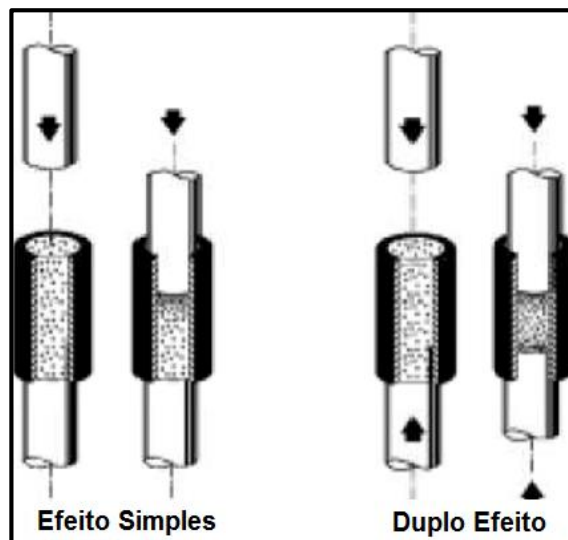


Figura 2.8 – Prensagem Uniaxial
(Fonte: Albero, 2000)

No entanto, para produzir peças de grande espessura e de geometria complexa, a uniformidade de compactação dependerá do uso de forças de prensagem nos dois sentidos (Figura 2.8) ou de moldes com múltiplos pontos de compressão.

Albero (2000), destacou a importância de se considerarem os gradientes de densidade que surgem nos materiais compactados (conforme pode ser visto na Figura 2.9), por causa do atrito entre as partículas do pó e entre elas e a superfície do molde que impedem que a pressão aplicada a uma ou mais das superfícies da peça seja integralmente transmitida e de forma uniforme a todas as regiões da peça.

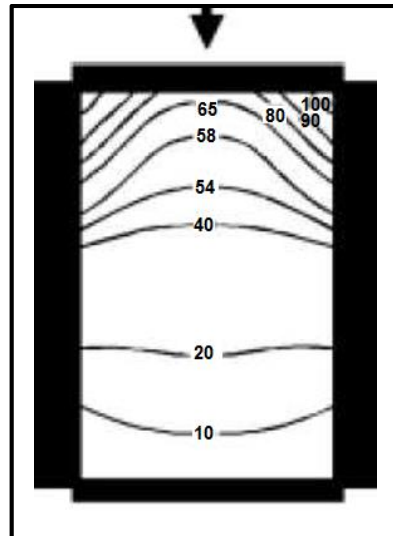


Figura 2.9 – Variação de prensagem
(Fonte: Albero, 2000)

Pedroti (2011) também salientou a importância da pressão aplicada sobre a massa argilosa, que influencia a porosidade e a resistência mecânica de artefatos cerâmicos.

2.4 – SOLO-CIMENTO

Freire (1976) definiu solo-cimento como um material estruturalmente resistente, estável, durável e de baixo custo formado da combinação de solo pulverizado, cimento Portland e água compactados e com uma umidade ótima.

Fiquerola (2004), numa retrospectiva histórica do uso de tijolos de solo-cimento, assevera que, já no início do século XX, o solo-cimento tem sido utilizado no ramo da Construção Civil, sendo que os primeiros registros de pesquisas a respeito do emprego desse material foram feitos em 1935, junto a Portland Cement Association, PCA (Associação de Cimento Portland). No Brasil, apenas a partir de 1960, o tema passa a ser estudado com mais afinco, em particular capitaneado por instituições como o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland).

Segundo Alexandre *et al.* (2006), o emprego do solo-cimento, no entanto, somente no fim da década de 70, século XX, passou a ser empregado numa maior escala, devido à aprovação da técnica para construções de habitações populares pelo antigo BNH (Banco Nacional de Habitação)

A ABNT NBR 8491 (2012) define tijolo maciço de solo-cimento como aquele “cujo volume não é inferior a 85% de seu volume total aparente e constituído por uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos”. A fabricação e os ensaios devem seguir as diretrizes das normas ABNT NBR 10833 (2013), ABNT NBR 10834 (2013), ABNT NBR 8491 (2012) e ABNT NBR 8492 (2012).

A Highway Research Board of América (HRB, 1961) instituiu que o limite de fração fina de solo para confecção de blocos de solo-cimento deve ser de 50% para que haja viabilidade econômica.

LIMA (2006) analisou amostras de solos oriundo da cidade de Campos dos Goytacazes – RJ para uso na fabricação de blocos de solo-cimento com adições de 5% e 10% de cimento, em relação ao volume total, tendo obtido desempenhos distintos de absorção e de resistência mecânica dos blocos.

A ABNT NBR 10834 (2012), apresenta valores limites para a resistência mecânica e a absorção de água aos 28 dias, dos blocos de solo-cimento sem função estrutural, que são resumidos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Valores-limite segundo a ABNT NBR 10834 (2012)

Valores-limite (aos 28 dias)	Média	Individual
Resistência à compressão (MPa)	$\geq 2,0$	$\geq 1,7$
Absorção de água (%)	≤ 20	≤ 22

Fonte: Adaptado

2.5 – BLOCOS PRENSADOS E QUEIMADOS

Pedroti (2007) pesquisou a possibilidade do emprego de blocos prensados e queimados do tipo macho-fêmea na construção civil para uso como alvenaria estrutural seguindo critérios da ABNT NBR 15270-2 (2005). A técnica de moldagem dos BPQ tomou por base o procedimento empregado na produção dos blocos em solo-cimento, com ajustes para a substituição do uso do cimento pelo processo de queima.

Os blocos foram produzidos por prensagem manual e por prensagem mecânica, sendo queimados em laboratório a uma temperatura de 900°C. Os BPQ foram avaliados por Pedroti (2007) quanto à absorção d’água, resistência mecânica e durabilidade em comparação aos blocos cerâmicos comuns e aos blocos de solo-

cimento. Os resultados indicaram uma taxa de absorção alta, com média de 31,85% para blocos prensados manualmente e de 30% para os blocos mecanicamente prensados, valores muito acima do limite máximo de 22% de proposto pela norma. Os resultados para resistência mecânica encontrados foram de 3,10 MPa para blocos prensados à mão e 3,65 para blocos mecanicamente prensados (PEDROTI, 2007).

Pedroti *et al.* (2011) apresentaram a metodologia de produção de BPQ, comparando os valores obtidos para resistência mecânica e taxa de absorção de água aos obtidos para blocos de solo-cimento e de blocos cerâmicos extrudados, verificando melhor comportamento de resistência, embora com alta taxa de absorção de água.

Pedroti (2011) propôs a introdução de resíduos de granito para minimizar os problemas de absorção de água e de porosidade aparente identificados anteriormente para os BPQ. Ele fez um estudo da melhor composição de massa argilosa misturando dois tipos de argilas e diferentes percentuais de resíduo de granito, verificando uma melhora para a taxa de absorção de água para temperaturas de queima de 1050°C e um pequeno ganho de resistência mecânica.

Alexandre e Silva (2012) implementaram estudos com BPQ produzidos manualmente e queimados a 700°C e 900°C em laboratório. As resistências médias observadas por eles na pesquisa foram de 2,3 MPa e 3,2 MPa, para as temperaturas de 700°C e 900°C, respectivamente.

Pedroti *et al.* (2012), apresentaram resultado de análise por simplex da composição de uma massa argilosa com resíduo de granito, indicando que a melhor mistura é composta de 16,6% de resíduo, 66,6% de argila “forte” e 16,6% de argila fraca, para uma temperatura de queima de 1050°C e prensagem a 100 toneladas de capacidade de compactação.

Gonçalves (2005) assevera que “o tipo de prensa é importante, pois quanto maior a compactação imposta ao solo, o produto final vai ser melhor”. Existe um número grande e diversificado de marcas e tipos de prensas, sendo que neste trabalho optou-se pelo uso de uma prensa hidráulica, disponibilizada por uma parceria da UENF com uma cerâmica do polo de Campos dos Goytacazes.

2.6 - MODELAGEM NUMÉRICA

Dado o avanço tecnológico, a disponibilidade de computadores potentes e de softwares robustos, a modelagem numérica de estruturas tornou-se uma ferramenta fundamental para auxílio em pesquisas e projetos de estruturas. Sua aplicação permite entender melhor o comportamento mecânico, a distribuição dos esforços e os potenciais mecanismos geradores de falha e colapso nas estruturas. Os métodos numéricos podem ser utilizados para confirmar os resultados de ensaios ou para evitar a necessidade de realização de ensaios experimentais, principalmente os destrutivos, prevendo assim o comportamento de determinada estrutura ou de material.

O método mais empregado é o de elementos finitos, a técnica de modelar a estrutura discretizada com elementos lineares, planos ou espaciais, permitindo a compatibilização de deslocamentos ao nível de cada nó.

Na modelagem, via elementos finitos, indicam-se valores importantes de características físicas e mecânicas dos materiais estudados tais como módulo de deformação, coeficiente de *Poisson* e tensão de ruptura.

Barreto (2002) destacou, em sua pesquisa, os valores dos resultados obtidos pela modelagem numérica, que permitiram conhecer o real comportamento do elemento estrutural, com baixo custo e excelente aproximação de resultados. Porém, é necessário cuidado na análise dos resultados, em particular na montagem dos dados de forma que o modelo represente corretamente o comportamento do elemento a ser estudado (RAMALHO E CORRÊA, 2003).

Por ser um material anisotrópico e apresentar juntas que atuam como planos de fraquezas, a representação numérica de alvenaria pode se concentrar na micromodelagem dos componentes individuais ou na macromodelagem da alvenaria como um compósito (LOURENÇO, 1996).

De acordo com Peleteiro (2002), o nível de precisão desejada para a simulação vai determinar o tipo de modelagem. Na Figura 2.10 são apresentados três modelos de modelagem comumente empregados nas simulações numéricas de alvenaria.

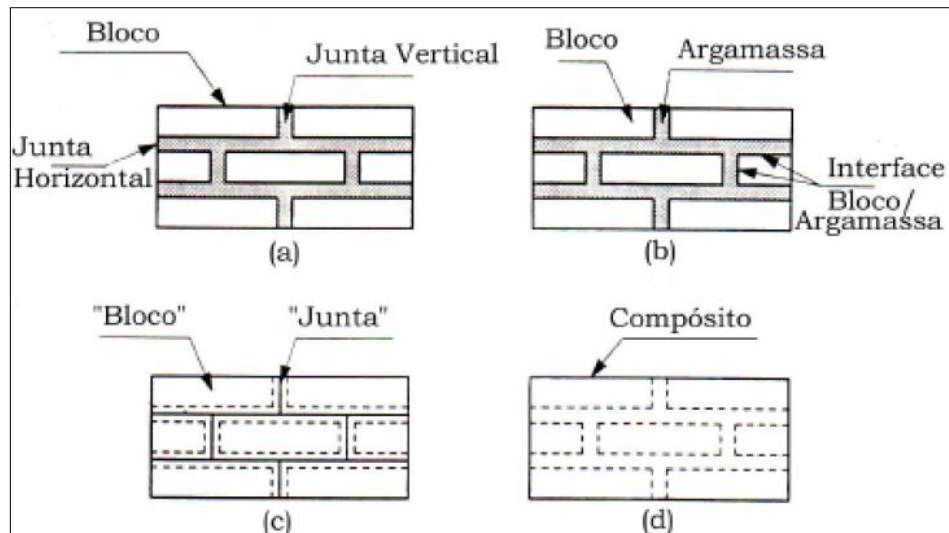


Figura 2.10 - Estratégias de modelagem: (a) amostra de alvenaria; (b) micromodelagem detalhada; (c) micromodelagem simplificada; (d) macromodelagem
 Fonte: Peleteiro (2002)

Na Figura 2.10 (b), é apresentada a micromodelagem detalhada, onde as unidades e a argamassa nas articulações são representadas por elementos contínuos, enquanto a interface unidade-argamassa é representada por elementos descontínuos. Nesse modelo, módulo de deformação, coeficiente de *Poisson* e, opcionalmente, as propriedades inelásticas da unidade e da argamassa são levadas em consideração.

Na Figura 2.10 (c) é apresentada a micromodelagem simplificada, em que as unidades são expandidas e representadas por elementos contínuos, enquanto o comportamento das juntas de argamassa e da interface unidade-argamassa é agrupado em elementos descontínuos. Cada junta composta de argamassa e as duas interfaces argamassa-unidade são agrupadas em uma interface "média" enquanto as unidades são expandidas para manter a geometria inalterada. A alvenaria é assim considerada como um conjunto de blocos elásticos ligados por possíveis linhas de deslizamento nas articulações. A precisão está perdida, já que o efeito de *Poisson* da argamassa não está incluído.

A Figura 2.10 (d) apresenta a macromodelagem, onde unidades, argamassa e a interface unidade-argamassa são tratadas como um contínuo anisotrópico homogêneo, sem distinção entre unidades individuais e articulações.

Peleteiro (2002) adverte que uma estratégia de modelagem não deve ser preferida sobre a outra porque existem campos de aplicação diferentes para micro e macromodelos. Estudos de micromodelagem são necessários para uma melhor

compreensão sobre o comportamento local das estruturas de alvenaria, quando se deseja obter maiores detalhes sobre o comportamento estrutural. Os macromodelos devem ser usados quando a estrutura é composta por paredes sólidas com dimensões suficientemente grandes para que as tensões ao longo de um comprimento sejam essencialmente uniformes. Este tipo de modelagem é mais indicado quando um compromisso entre precisão e eficiência é necessário.

A precisão de micro ou macromodelagem de estruturas de alvenaria requer uma descrição experimental a mais completa possível do material.

2.6.1 – Estudos de Alvenaria por Análise Numérica

Ao longo das últimas quatro décadas, a simulação por meio do uso de técnicas de elementos finitos tem evoluído continuamente para melhor simular o complexo comportamento estrutural de paredes de alvenaria e estruturas associadas.

Arya e Hegemier (1978) e Page (1978) propuseram-se a modelar a alvenaria usando uma abordagem simplificada de micromodelagem em que unidades de alvenaria foram consideradas como elementos contínuos e juntas de argamassa como elementos de interface. Lotfi e Shing (1994) utilizaram-se dessa abordagem para estudar o comportamento das montagens de alvenaria, incluindo a fratura das juntas de argamassa no modelo através de elementos de interface. A iniciação e a evolução do crack das juntas de argamassa de alvenaria foram simuladas com sucesso sob tensões combinadas normais e de cisalhamento em regiões de tensão e cisalhamento de compressão, mas a simulação de alvenaria não foi bem sucedida sob alto estresse de compressão.

Lourenço e Rots (1997) desenvolveram um modelo de interface multi-superfície que é definido com base em três funções de rendimento, nomeadamente: um corte de tensão para falha de tração, um invólucro de falha Mohr-Coulomb para falha de cisalhamento e um modelo de tampa para falha compressiva. Além disso, possíveis fissuras verticais foram colocadas no meio das unidades de alvenaria, o que permitiu a simulação de rachaduras verticais sob tensão pura.

Shing e Cao (1997) realizaram análise de elementos finitos para paredes de cisalhamento de alvenaria parcialmente perfumadas. Foi adotado um modelo de fissuras manchadas para simular o comportamento de fratura das unidades de

alvenaria, e elementos de interface baseados em plasticidade foram utilizados para simular as respostas das juntas de argamassa sob tensão e cisalhamento estresse. Embora o modelo tenha simulado com sucesso os modos de falha das paredes de alvenaria, a resistência lateral das paredes foi maior do que a resistência obtida a partir de experimentos. Por exemplo, em um dos modelos relatados, a resistência lateral da análise numérica foi 60% superior aos resultados experimentais.

Sutcliffe *et al.* (2001) estudaram uma técnica computacional usando formulação do Limite Inferior para analisar paredes de alvenaria não reforçadas, quanto ao cisalhamento, sob condições de deformação plana.

Holanda (2002) mediu as implicações de recalque nas alvenarias de edifícios, mostrando suas patologias. Em seus estudos, ele modelou paredes de 2,60 metros de altura e 4,00 metros de comprimento montadas em três apoios, empregando o elemento PLANE 42, que é um elemento quadrilátero com quatro nós e dois graus de liberdade por nó, do software ANSYS (versão 5.5).

Ramalho e Corrêa (2003) modelaram numericamente painéis de alvenaria para determinar a alteração na distribuição de tensões em análise plana linear empregando o elemento SHELL 32, que se trata de um elemento plano quadrangular de quatro nós com dois graus de liberdade por nó, do software ANSYS (versão 5.5).

Oliveira e Lourenço (2004) propuseram um modelo 2D para simular o comportamento da alvenaria sob cargas cíclicas usando elementos de interface entre unidades de alvenaria.

Pedroti (2007) aplicou análise numérica no estudo de blocos isolados e prismas de três blocos inteiros de BPQ, pelo método dos elementos finitos com auxílio do programa ANSYS 9.0. Ele fez uso de do elemento SOLID 92, que possui 10 nós com 3 graus de liberdade em cada nó, em todas as simulações realizadas.

Miller (2008), estudando alvenaria estrutural de blocos cerâmicos, fez uso de dois modelos: bidimensional e tridimensional. Para confecção do modelo bidimensional, foi utilizado o elemento PLANE 42 e para confecção do modelo tridimensional o elemento SOLID 92, ambos empregando o software ANSYS 9.0.

Chen *et al.* (2009) estudaram o efeito da diferença da carga vertical no comportamento de edifícios de alvenaria de andares múltiplos empregando simulação numérica. Eles também usaram o software ANSYS.

Mangueira *et al.* (2012) empregaram simulação numérica pelo modelo de dano contínuo (MDC) para a análise estrutural de paredes de alvenaria estrutural de tijolos de cerâmica. Eles aplicaram os parâmetros obtidos num programa baseado no método dos elementos de contorno (MEC), que pouco é empregado em Alvenaria Estrutural, tendo obtido resultados satisfatórios, tanto para o modelo MDC quanto para o software empregando MEC.

Silva (2014) aplicou um modelo de elementos finitos como parte de seus estudos, em comparação a outros métodos de cálculo, para estudar o comportamento de edifício em alvenaria estrutural, num modelo reduzido de 1:5. Ele destacou em sua tese, que para modelar qualquer estrutura em elementos finitos, é necessário conhecer algumas características mecânicas tais como módulo de deformação e coeficiente de *Poisson*, no caso do tratamento do problema como elástico.

La Mendola *et al.* (2014), empregando elementos finitos, simularam o comportamento não-linear do plano da alvenaria empregando elementos de interface para simular a iniciação e propagação de fissuras nas juntas de alvenaria. As formações de fissuras nas articulações encontradas ficaram de acordo com os resultados experimentais. Os componentes de alvenaria foram modelados usando lei elástica linear isotrópica.

Kumar *et al.* (2014) desenvolveram um modelo de interface para simular a iniciação e difusão de rachaduras em juntas de alvenaria e fendas verticais potenciais nas juntas de unidades de alvenaria sob tensões normais e de cisalhamento. O modelo proposto foi analisado via Abaqus, fazendo uso de uma sub-rotina definida pelo usuário, que definiu o comportamento constitutivo. Os modelos Micro 2D simplificados foram utilizados para simular apenas o comportamento de alvenaria no plano em condições normais e de cisalhamento.

Abdula *et al.* (2017) propuseram uma abordagem simplificada de micro modelo utilizando uma combinação de modelos constitutivos baseados em plasticidade e o método de elementos finitos estendidos (XFEM) para análise do comportamento 3D da alvenaria. Os modelos constitutivos incluíram o

comportamento coesivo baseado na superfície para capturar o comportamento elástico e plástico das juntas de alvenaria e um modelo de plasticidade Drucker Prager (DP) para simular o esmagamento da alvenaria sob compressão, utilizando o software de elementos finitos Abaqus 6.13, seguida de uma solução de algoritmo Newton Raphson. A capacidade do modelo em termos de captura de comportamento não-linear e modos de falha de alvenaria sob cargas verticais e horizontais foi considerada satisfatória, sendo demonstrada por meio de comparação com uma série de estudos experimentais publicados.

Miglietta *et al.* (2017) utilizaram a modelagem de elementos finitos / discretos (DEM) para simular o comportamento da alvenaria sob cargas cíclicas reversas invertidas. O modelo 2D implementado por eles considerou as relações tensão-deslocamento entre os elementos de alvenaria adjacentes, simulando assim o comportamento de abertura e deslizamento dos elementos das juntas de alvenaria. Os resultados indicaram que o modelo mostrou-se eficiente na determinação dos modos de resposta e falha de alvenaria sob cargas cíclicas reversas invertidas, sem no entanto, considerar o esmagamento de alvenaria sob compressão, que é um possível modo de falha de alvenaria sob cargas cíclicas.

Kiefer *et al.* (2017) propuseram uma ferramenta de simulação numérica de blocos cerâmicos com base em uma abordagem célula-unidade com condições de fronteira periódicas. No modelo, a interação entre blocos pode ser considerada, permitindo modelar rachaduras discretas e, portanto, os modos de falha frágil e as forças de compressão podem ser preditas corretamente.

Santos (2016) avaliou numericamente a interação entre paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto, sob ações verticais. Para determinação da resistência à compressão e do módulo de deformação dos elementos estruturais, ela optou por fazer a micromodelagem de prismas, que serviram como base de dados de entrada para alimentar o modelo numérico das paredes. Para as paredes foi utilizada a macromodelagem, tratando a parede como um material compósito.

Sandoval e Arnau (2017) realizaram um programa experimental para caracterização do comportamento de alvenaria, focando nos materiais e interfaces constituintes. Eles testaram numericamente diferentes deslocamentos controlados, enfatizando a caracterização da resposta de cisalhamento na interface horizontal

de argamassa-unidade para apontar a influência que picos de argamassa que penetram nos poros dos tijolos podem exercer no comportamento da alvenaria, empregando uma abordagem numérica de micromodelagem. Os resultados apontaram que as estratégias numéricas propostas levaram a uma reprodução satisfatória, mostrando que a resposta estrutural complexa da alvenaria de tijolos de argila pode ser reproduzida de forma adequada a partir de evidências experimentais.

Santos *et al.* (2017) avaliaram o comportamento mecânico de prismas com blocos de concreto comuns e de alta resistência através de análise experimental e numérica por micromodelagem detalhada. Os valores obtidos numericamente para resistência à compressão e módulo de deformação foram validados a um nível de 5% de diferença dos valores verificados experimentalmente.

Silva *et al.* (2017) propuseram um modelo de homogeneização, pela uma discretização de elementos finitos grosseiros, que apresentou comportamento robusto, permitindo a obtenção de relações de curvatura de torque e a duplicação de torque homogeneizada (também em presença de pré-compressão de membrana) a serem utilizadas em nível estrutural dentro de um modelo rígido de massa mola e corpo (RBSM). O procedimento foi testado em um conjunto de painéis de alvenaria com janelas e cheio em flexão bidirecional, sendo validado de forma muito coesa pela comparação com dados experimentais e abordagens numéricas previamente apresentadas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tem por finalidade apresentar os materiais, bem como as metodologias empregadas nesta pesquisa. Aqui estão descritos os procedimentos empregados na realização dos ensaios deste trabalho.

A realização deste programa experimental buscou a determinação das propriedades físico-mecânicas da massa argilosa e do produto (BPQ), o conhecimento das propriedades dos componentes isolados (blocos) e do desempenho destes como parte de prismas e pequenas paredes.

3.1 – ASPECTOS GERAIS

Na execução da presente pesquisa, foram realizados ensaios para determinar as características da matéria-prima (massa argilosa), sendo apresentado na Figura 3.1 um fluxograma simplificado com a indicação das etapas de preparação da amostra.

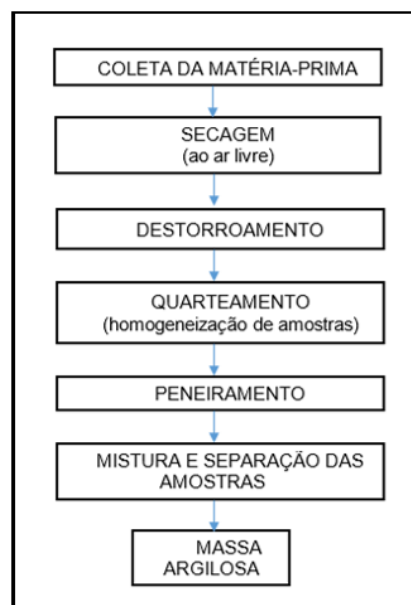


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas de preparação da amostra

Após as caracterizações físicas, químicas, mineralógicas e térmicas do material, foram confeccionados BPQ, em metodologia adaptada de Pedroti (2007), que consiste na moldagem dos blocos cerâmicos por prensagem. Essa etapa foi realizada em parceria com a empresa Arte Cerâmica Sardinha, situada no distrito de São Sebastião, município de Campos dos Goytacazes, RJ.

Os blocos que foram produzidos têm as dimensões nominais de 30 x 15 x 7 cm³ (Figura 3.2), prensados em Prensa Eco Master 7000 Turbo II (Figura 3.3).

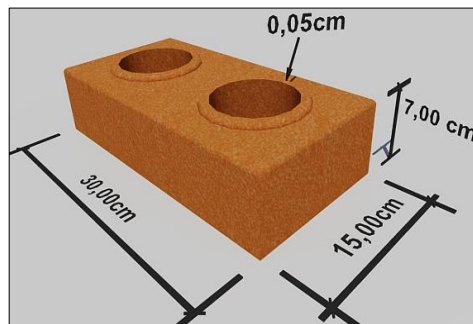


Figura 3.2 – Modelo do Tijolo Prensado e Queimado



Figura 3.3 – Prensa Eco Master 7000 Turbo II

De acordo com a empresa fabricante da Prensa Eco Master 7000 Turbo II, tal máquina acompanha matriz aquecida, comando hidráulico, motor de 7,5 CV, sensor fim de curso e é capaz de uma compactação de até 36 toneladas.

Na Figura 3.4 está apresentado um esquema indicando as etapas para a produção dos BPQ.

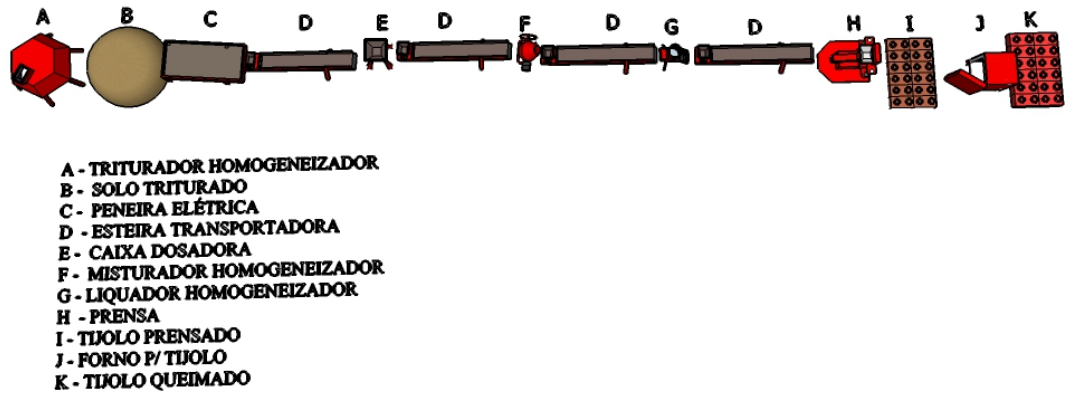


Figura 3.4 – Processo de Produção dos BPQ – Vista superior

O processo consiste em triturar para homogeneizar os grãos da argila recebida e dispor em lugares separados. Os materiais triturados passaram por um sistema de peneiramento e em seguida foram depositados numa caixa dosadora, onde foram feitas as composições da massa argilosa.

Após a composição feita, o solo passou por um misturador para homogeneizar a mistura que recebeu a dosagem de umidade necessária para a etapa seguinte de prensagem. Os BPQ passaram pela etapa de secagem em galpão por duas semanas e posterior queima em forno do tipo Caieira com uso de lenha como combustível, por 7 dias, a uma temperatura de 890°C de patamar de queima.

As figuras (Figura 3.5 a, b, c, d, e, f) a seguir ilustram o processo utilizado na confecção dos blocos.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.5 – Fabricação dos BPQ: (a) preparação do solo; (b) solo na prensa; (c) prensagem; (d) armazenamento para secagem; (e) queima no forno do tipo Caieira a 890°C; (f) armazenagem pós queima

3.2 – CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Foram coletados quinze quilos (15,0 kg) de amostra de massa argilosa, composta de 70% de argila e 30% de areia fina, na Arte Cerâmica Sardinha para caracterização em laboratório. O material foi colocado em sacos, para manter a umidade característica. No laboratório, a amostra foi seca ao ar livre, destorroada, homogeneizada e quarteada para ser utilizada nos ensaios, conforme prescreve a ABNT NBR 6457 (1986).

Com as amostras preparadas, foram realizados ensaios de caracterização da matéria-prima utilizando equipamentos disponíveis no LECIV-UENF e LAMAV-UENF, para definir parâmetros importantes para a produção dos blocos.

3.2.1 – Caracterização Física

3.2.1.1 Análise Granulométrica

Foram realizados ensaios de peneiramento e sedimentação, no Laboratório de Solos do LECIV, para determinação das curvas de distribuição granulométrica da massa argilosa empregada na fabricação dos blocos, segundo a ABNT NBR 7181 (2016).

Dos resultados de Santos (1992), Alexandre (2000) e Vieira (2001), entende-se que a faixa granulométrica recomendada para uso em cerâmica vermelha da fração argila está entre 30% e 70%

3.2.1.2 Limites de Atterberg

Foram realizados ensaios para determinação da consistência da matéria-prima, por meio da determinação dos Limites de Atterberg. Os índices que definem a consistência do material são: o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP). Foram determinados no Laboratório de Solos do LECIV, segundo o prescrito nas normas ABNT NBR 6459 (2016) e ABNT NBR 7180 (2016).

3.2.1.3 Massa Específica Real dos Grãos

A massa específica real dos grãos da amostra da massa argilosa, foi definida no Laboratório de Solos do LECIV, de acordo com a norma ABNT NBR 6508 (1984).

Para calcular a densidade real do solo (δ_t) em determinada temperatura t aplicou-se a seguinte equação (Eq. 3.1):

$$\delta_t = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

sendo:

P_1 : peso do picnômetro vazio e seco (g);

P_2 : peso do picnômetro mais o peso da amostra (g);

P_3 : peso do picnômetro mais o peso da amostra e da água (g);

P_4 : peso do picnômetro mais o peso da água (g).

De acordo com Alexandre (1997), Alexandre (2000) e Paes Mothé (2004) as argilas da região apresentam massa específica real dos grãos que variam entre 2,55 a 2,77 g/cm³.

3.2.2 – Umidade Ótima

Realizou-se o ensaio de *Proctor Normal*, segundo as definições da ABNT NBR 7182 (2016) com o objetivo de determinar a curva de compactação, definindo assim a umidade ótima de compactação da massa argilosa.

Este procedimento foi realizado, uma vez que a compactação do material sob umidade ótima garante maior massa específica aparente seca, pela redução do índice de espaços vazios, o que pode conformar a esse material um melhor desempenho mecânico (CAPUTO, 1988).

3.2.3 – Análise Química

Segundo Santos (1975), a análise química, conquanto não permita uma avaliação final no que tange à composição mineralógica e às propriedades físico-químicas da massa argilosa, oferece dados que são importantes no estudo e emprego de tais materiais.

A determinação da composição química das matérias-primas foi realizada no LECIV-UENF com equipamento Shimadzu EDX-700 (Figura 3.6), com material passante na peneira 200 mesh, sendo utilizada da técnica de análise semiquantitativa por efluorescência de raios X de energia dispersiva (EDX).

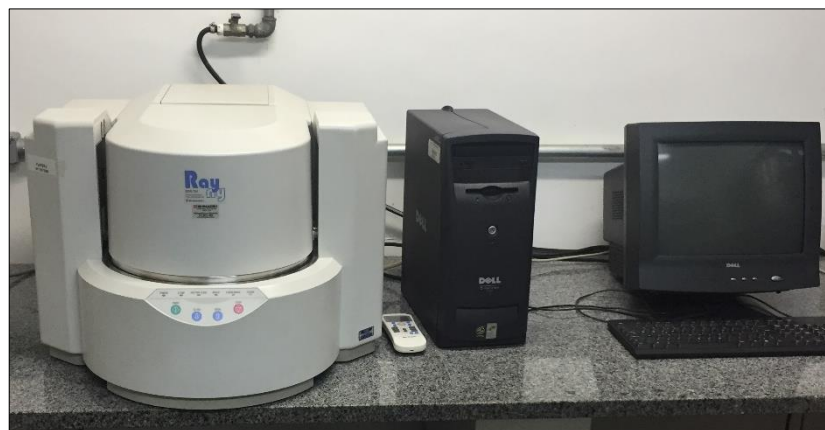


Figura 3.6 – Equipamento de EDX

3.2.4 – Análise Mineralógica

A determinação da mineralogia como ferramenta para a avaliação das propriedades dos solos é muito importante para o entendimento das diferentes relações químicas e físicas que ocorrem nele (MIGUEL, 2014). Destarte, a

caracterização mineralógica de uma massa argilosa permite a determinação das propriedades que seus componentes e do produto final esperado.

No presente trabalho, a determinação das fases mineralógicas da matéria-prima foi realizada no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV-UENF) utilizando o equipamento de Difração de raios X, Modelo XRD-7000 da marca SHIMADZU (Figura 3.7) operando com radiação $\text{Cu-K}\alpha$ e varredura de 2θ , variando de 5 a 60° , com material passante na peneira 325 mesh.



Figura 3.7 – Difratormetro de Raio-X

3.2.5 – Análise Térmica

De acordo com a *International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry* (ICTAC), análise térmica é “um grupo de técnicas nas quais uma propriedade física de uma substância e/ou seus produtos de reação é medida como função da temperatura, enquanto a substância é submetida a um programa controlado de temperatura”.

O método de Análise Térmica Diferencial (ATD) é o aquecimento, em velocidade constante, de uma amostra de massa argilosa em conjunto com uma substância termicamente inerte, em geral a $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\alpha$, onde as diferenças de temperatura entre esse padrão inerte e a amostra de massa argilosa em estudo são registradas, sendo apontadas as transformações físicas e químicas que ocorrem no aquecimento através de picos endo e exotérmicos.

Já a Análise Termogravimétrica (ATG) é a técnica termoanalítica que acompanha a variação da massa da amostra em função da programação de temperatura.

As análises térmicas (ATD e ATG) das amostras foram realizadas em “Sistema de Análises Térmicas”, Modelo RB-3000 BP Engenharia (Figura 3.8)

operando a 10°C/min no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV), com material passante na peneira 325 mesh. O ensaio foi executado sob atmosfera de nitrogênio (28° C) até 1000° C.

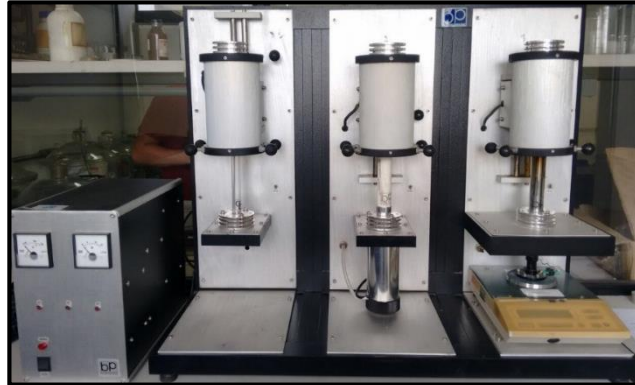


Figura 3.8 – Sistema de Análises Térmicas

3.3 – BLOCO ESTRUTURAL

3.3.1 – Características Dimensionais dos Blocos

A ABNT NBR 15270-1 (2005) regulamenta os requisitos dimensionais de blocos estruturais de forma a não permitir a aceitação de um lote de blocos que se apresentem muito diferentes das dimensões pré-estabelecidas. As variações máximas das medidas estão resumidos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Variações dimensionais

Características	Estrutural	Vedação
Tolerâncias dimensionais individuais (mm)	±5	
Tolerâncias dimensionais médias (mm)	±3	
Desvio em relação ao esquadro (mm)	3	
Planeza das faces (mm)	3	

Fonte: ABNT NBR 15270-1 (2005)

A ABNT NBR 10834 (2012) define que as tolerâncias dimensionais para os blocos de solo-cimento são de ± 1 mm. Neste trabalho, por se tratar de um bloco cerâmico, mas com dimensões semelhantes ao bloco de solo-cimento, utilizou-se de ambas as normas citadas anteriormente para estudar as dimensões e apresentar um desvio padrão das medidas encontradas.

Na Figura 3.9 é apresentado um esquema com a indicação das referências utilizadas para a determinação das medidas dos BPQ.

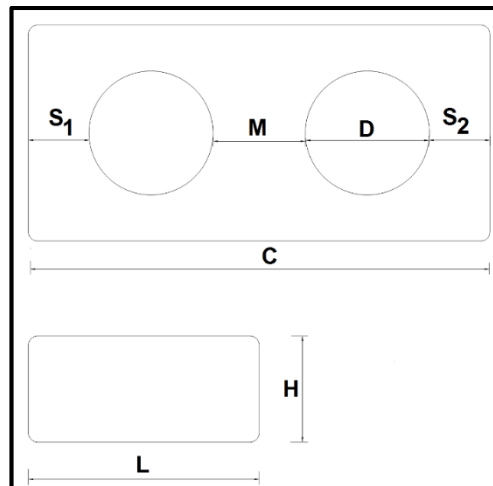


Figura 3.9 – Esquema das Medidas

No esquema da Figura 3.9, tem-se que L é largura, H é altura, C é comprimento, S_1 e S_2 são as medidas dos septos laterais na direção maior, D é o diâmetro dos furos e M é a medida da parte central que fica entre os dois furos dos BPQ.

Foram avaliadas 30 amostras de BPQ e suas dimensões comparadas com relação ao molde de $30 \times 15 \times 7 \text{ cm}^3$ (comprimento, largura e altura). As medições foram realizadas utilizando paquímetro com precisão de 0,05 mm, conforme Figura 3.10.

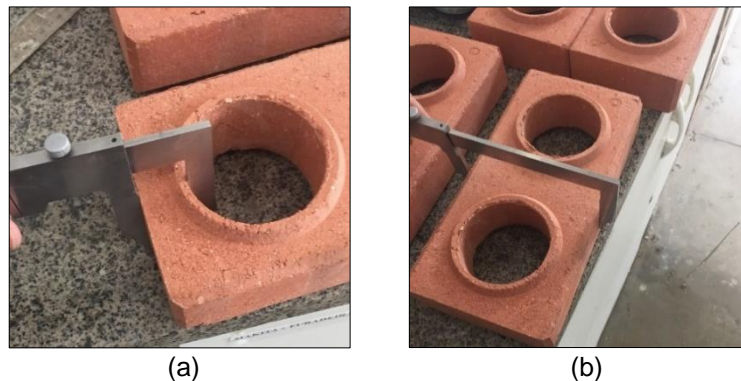


Figura 3.10 – Medição de blocos: (a) medição de septos; (b) medição de largura.

3.3.2 – Propriedades Tecnológicas dos Blocos

3.3.2.1 – Absorção de Água (AA)

A absorção de água do material cerâmico queimado é um parâmetro útil na determinação da porosidade aberta do material. Segundo Casagrande (2002), pode-se definir absorção da água como o ganho em peso que a peça apresenta

quando introduzidas em água em ebulição durante um determinado período de tempo.

Chih-Huang *et al.* (2003) destacam a importância da determinação da absorção de água para se prever a durabilidade da peça cerâmica, uma vez que quanto menor a infiltração de água nas peças, maior durabilidade e resistência ao ambiente natural ao qual o material é submetido. Deste modo, a estrutura interna do tijolo deverá ter uma superfície capaz de impedir a entrada de água, porém a superfície externa terá que possuir no mínimo 8% de capacidade de absorção para ancoragem da argamassa do chapisco e reboco.

Foram escolhidas 13 amostras de BPQ para secagem em estufa a uma temperatura de 110°C por período de 24 horas, até estabilizar o peso, definindo-se a massa seca (m_s), de acordo com o anexo B da norma ABNT NBR 15270-3 (2005).

Após resfriarem, os blocos foram imersos em água, à temperatura ambiente, por um período de 24 horas (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Blocos submersos

Depois de retirado o excesso de água procedeu-se à pesagem dos blocos em balança de precisão e determinou-se sua massa úmida (m_u).

O índice de absorção de água foi então determinado com a utilização da equação Eq.3.2:

$$AA = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

onde m_u e m_s estão em gramas.

3.3.2.2 – Massa Específica Aparente (MEA)

A massa específica aparente é uma propriedade importante no processo cerâmico, pois está relacionada com os valores de resistência à flexão das peças,

absorção de água e retração linear. Essa massa específica aparente dos blocos prensados e queimados foi determinada aplicando a equação Eq. 3.3:

$$MEA = \frac{M}{V} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Sendo M a massa da peça cerâmica (em gramas) e V o volume da peça cerâmica queimada ou seca (em cm³).

3.3.2.3 – Retração Linear (RL)

A retração linear pós queima dos cerâmicos, embora não seja um parâmetro normatizado, é um importante parâmetro industrial. Quando a cerâmica se apresenta porosa é caracterizada por baixa retração (BORLINI, 2002).

Calcula-se a retração linear pela MB-305 (ABNT, 1984) aplicando a equação Eq. 3.4:

$$RL = \left(\frac{L_0 - L_1}{L_0} \right) \cdot 100 \quad \text{(Eq. 3.4)}$$

em que L₀ é o comprimento úmido inicial do corpo-de-prova, L₁ é o comprimento do corpo-de-prova após secagem a 110°C.

3.3.2.4 – Porosidade Aparente (PA)

Seguindo a norma ASTM C373-14 (1977), determinou-se a porosidade aparente dos materiais cerâmicos, aplicando a equação Eq. 3.5:

$$PA = \left(\frac{m_u - m_s}{m_u - m_i} \right) \cdot 100 \quad \text{(Eq. 3.5)}$$

onde m_u é a massa queimada úmida do corpo-de-prova, m_s é a massa queimada seca do corpo-de-prova e m_i é a massa do corpo-de-prova imersa em água, em gramas.

3.3.3 – Resistência Característica à compressão de Bloco (f_{bk})

Esse é o principal parâmetro de uma unidade para uso como alvenaria estrutural. A resistência característica (f_{bk}) é estabelecida por meio de ensaios de resistência à compressão individual (f_b). A resistência característica f_{bk} foi determinada com relação à área bruta e o ensaio seguiu a ABNT NBR 15270-3 (2005), anexo C.

A ABNT NBR 15270-2 (2005) define que f_{bk} deve ser maior ou igual a 3,0 MPa. A norma ainda prescreve que sejam ensaiados no mínimo 13 blocos.

De acordo com a ABNT NBR 15812-1 (2010), a resistência característica à compressão simples (f_k) da alvenaria cerâmica deverá ser obtida pelo ensaio de paredes (ABNT NBR 8949, 1985) ou estimado como 70% da resistência característica à compressão simples de prismas (f_{pk}) ou como 85% resistência característica à compressão simples de pequena parede (f_{ppk}).

Os blocos foram rompidos à compressão simples uniaxial em prensa servo-hidráulica, com regulagem de velocidade de aplicação de carga e célula de aquisição de dados referentes à força aplicada ao longo do tempo. A prensa servo-hidráulica utilizada foi da marca EMIC e possui capacidade para 2000 KN, Figura 3.12.



Figura 3.12 – Prensa servo-hidráulica da marca EMIC.

O ensaio envolveu blocos cortados ao meio (conforme realizado para blocos de solo-cimento) e capeados com pasta de cimento, utilizando uma relação água/cimento de 0,3, para se obter regularização das faces, como mostrado na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Blocos com capeamento de pasta de cimento

Conforme a ABNT NBR 15270-3 (2005), a resistência característica (f_{bk}) deve ser determinada com relação à área bruta e estimada, segundo a ABNT NBR 15270-2 (2005), pela expressão:

$$f_{bk,est} = 2 \cdot \left[\frac{f_{b(1)} + f_{b(2)} + f_{b(3)} + \dots + f_{b(i-1)}}{i-1} \right] - f_{b(i)} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

sendo:

$f_{bk,est}$: a resistência característica estimada da amostra, em MPa;

$f_{b(1)}, f_{b(2)}, \dots, f_{b(i)}$: os valores de resistência à compressão individual dos corpos-de-prova da amostra, ordenado crescentemente, e:

$$i = \begin{cases} \frac{n}{2}, & \text{se } n \text{ for par} \\ \frac{n-1}{2}, & \text{se } n \text{ for ímpar} \end{cases};$$

n : a quantidade de blocos da amostra.

Após determinar o valor de $f_{bk,est}$, a ABNT NBR 15270-2 (2005) define que f_{bk} poderá ser definido após a seguinte análise:

- i. Se $f_{bk,est} \geq f_{bm}$, então $f_{bk} = f_{bm}$;
- ii. Se $f_{bk,est} < \emptyset \cdot f_{b(1)}$, então $f_{bk} = \emptyset \cdot f_{b(1)}$;
- iii. Se $\emptyset \cdot f_{b(1)} \leq f_{bk,est} \leq f_{bm}$, então $f_{bk} = f_{bk,est}$;

em que:

f_{bm} é a média das resistências à compressão de todos os corpos-de-prova da amostra, em MPa;

$f_{b(1)}$ é a menor resistência de todos os corpos-de-prova da amostra;

ϕ é um valor tabelado (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Valores de ϕ em função da quantidade de blocos

Nº de blocos	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	≥ 17
ϕ	0,80	0,84	0,87	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,04

Fonte: ABNT NBR 15270-2 (2005)

3.3.3 – Módulo de Deformação

As amostras foram ensaiadas de forma a determinar a resistência à compressão e definir o módulo de deformação e o coeficiente de Poisson dos BPQ.

Os módulos de deformação longitudinal e transversal foram obtidos dividindo a variação de tensão pela variação da deformação em relação aos dois pontos da curva secante a 5% e 30% da carga de ruptura (anexo A da ABNT NBR 15812-2, 2010), conforme a equação Eq. 3.7.

$$E_p = \frac{(f_{p30} - f_{p5})}{(\varepsilon_{30} - \varepsilon_5)} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

em que:

E_p é o módulo de deformação;

f_{p30} é a tensão de compressão individual, em relação à área bruta, referente a 30% da carga de ruptura, em MPa;

f_{p5} é a tensão de compressão individual, em relação à área bruta, referente a 5% da carga de ruptura, em MPa;

ε_{30} é a deformação longitudinal para 30% da carga de ruptura;

ε_5 é a deformação longitudinal para 5% da carga de ruptura.

Para aquisição dos dados referentes à deformação dos blocos, utilizaram-se sensores extensômetros do tipo PA-06-1000BA-120L (Figura 3.14) e LVDT ligados a um sistema de aquisição de dados do tipo LYNX. Este sistema envia sinais elétricos aos sensores que operam como resistências elétricas e convertem as variações dessas resistências em deformações. Essas deformações são captadas e interpretadas pelos softwares AqDados e AqDanalysis 7.0 instalados no computador ligado ao sistema LYNX (Figura 3.15).

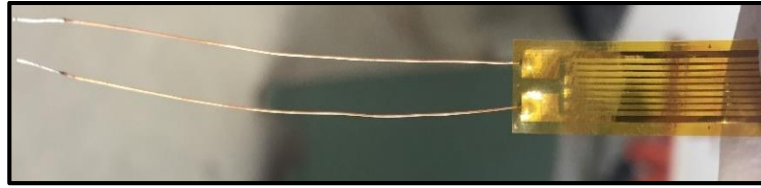


Figura 3.14 - Extensômetro tipo PA-06-1000BA-120L.

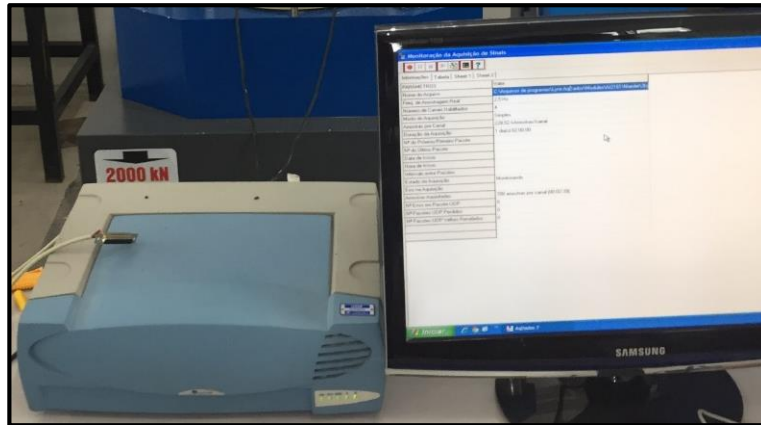


Figura 3.15 – Sistema de Aquisição de dados LYNX

Foram fixados dois extensômetros perpendiculares entre si nas amostras de BPQ, sendo um deles no sentido da altura e outro no sentido da largura com o objetivo de determinar o módulo de deformação e coeficiente de *Poisson*. Também foram fixados LVDTs para determinar o deslocamento total dos blocos.

Para fixação desses extensômetros nos BPQ, utilizou-se o adesivo *LOCTITE 496* após os blocos terem sido lixados para eliminar irregularidades das superfícies. Os fios foram soldados aos filamentos dos extensômetros.

Os deslocamentos verticais totais sofridos pelos BPQ foram também medidos por meio de LVDT's (transdutores de deslocamentos) acoplados ao mesmo equipamento para aquisição de dados dos extensômetros.

3.4 – PRISMAS

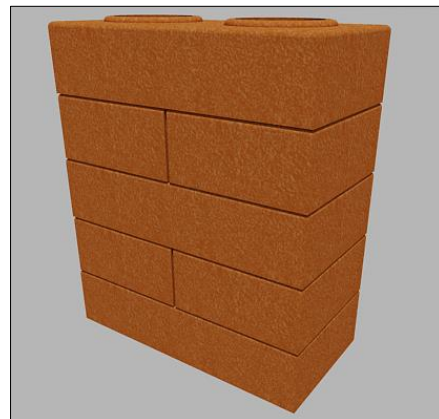
Para a consecução dos ensaios de resistência à compressão simples confeccionaram-se prismas com cinco (5) e com três (3) fiadas, com uso meio bloco (M) ou apenas blocos inteiros (I), com argamassa (CA) e sem uso de argamassa (SA) nas juntas. Para cada tipo de bloco foram confeccionados e ensaiados seis prismas. Na Tabela 3.3 apresenta-se um resumo dos tipos de prismas, que são representados nas Figuras 3.16 (a), (b), (c) e (d).

Tabela 3.3 - Tipos de prismas

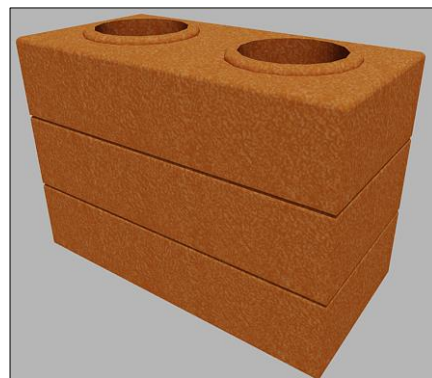
Altura	Tipo de junta	Tipos de blocos	Nome do prisma	Número de prismas
5 fiadas	SA	I	5ISA	6
		M	5MSA	6
	CA	I	5ICA	6
		M	5MCA	6
3 fiadas	SA	I	3ISA	6
		M	3MSA	6
	CA	I	3ICA	6
		M	3MCA	6



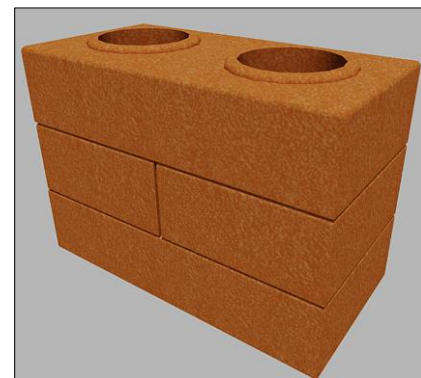
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.16 – Modelos dos Prismas: (a) 5I; (b) 5M; (c) 3I; (d) 3M

O capeamento dos prismas seguiu a mesma técnica aplicada para os blocos (Figura 3.17).



Figura 3.17 – Capeamento de prisma

3.4.1 – Resistência à Compressão de Prismas

O comportamento da alvenaria estrutural deve ser analisado não apenas pela qualidade dos blocos ou tijolos estruturais, mas também pela interação entre eles, na presença de argamassa, graute e eventuais armaduras construtivas. Sendo assim, a realização de ensaios de prismas é de fundamental importância no estudo da capacidade suporte dos novos materiais produzidos nesta pesquisa.

Os prismas com argamassa receberam juntas de aproximadamente cinco milímetros de espessura e passaram por período de cura de 28 dias realizada a umidade ambiente.

A determinação da resistência à compressão dos prismas (f_{pk}) realizou-se na prensa servo-hidráulica EMIC com capacidade para 2000 kN, empregada no ensaio de blocos (Figura 3.10, acima), em ensaios realizados aos 28 dias por causa dos prismas com argamassa.

Conforme a ABNT NBR 15812-2 (2010), a resistência característica estimada da amostra (f_{ek}), aplicável para prismas (f_{pk}) e pequenas paredes (f_{ppk}), deve ser determinada calculando:

$$f_{ek,est} = 2 \cdot \left[\frac{f_{e(1)} + f_{e(2)} + f_{e(3)} + \dots + f_{e(i-1)}}{i - 1} \right] - f_{e(i)} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

sendo:

$f_{ek,est}$: a resistência característica estimada da amostra, em MPa;

$f_{e(1)}, f_{e(2)}, \dots, f_{e(i)}$: os valores de resistência à compressão individual dos corpos-de-prova da amostra, ordenado crescentemente;

n : a quantidade de blocos da amostra;

$$i = \begin{cases} \frac{n}{2}, & \text{se } n \text{ for par} \\ \frac{n-1}{2}, & \text{se } n \text{ for ímpar} \end{cases} .$$

Após determinar o valor de $f_{ek,est}$, a ABNT NBR 15812-2 (2010) define que o valor de f_{ek} deve atender aos seguintes critérios:

- i. Se $f_{ek,est} > 0,85f_{em}$, então $f_{ek} = 0,85f_{em}$;
- ii. Se $f_{ek,est} < \emptyset \cdot f_{e(1)}$, então $f_{ek} = \emptyset \cdot f_{e(1)}$;
- iii. Se $\emptyset \cdot f_{e(1)} \leq f_{ek,est} \leq f_{em}$, então $f_{ek} = f_{ek,est}$.

em que:

f_{em} é a média das resistências à compressão de todos os corpos-de-prova da amostra, em MPa;

$f_{e(1)}$ é a menor resistência de todos os corpos-de-prova da amostra;

\emptyset é um valor tabelado (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Valores de \emptyset em função da quantidade de prismas

Nº de blocos	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16 e 17	18 e 19
\emptyset	0,80	0,84	0,87	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,04

Fonte: ABNT NBR 15812-2 (2010)

3.4.2 – Módulo de Deformação de Prismas

Realizou-se a determinação dos módulos de deformação e do coeficiente de *Poisson* para cada um dos 8 modelos de prismas. Utilizou-se de extensômetros e LVDT's para a aquisição de deformações específicas e deslocamentos lineares nos prismas. A fixação dos LVDT's foi feita por meio de hastes fixadas aos prismas com uso do adesivo *LOCTITE 496* e reforçadas com Cola Adesiva Epóxi Sikadur 32 (Figuras 3.18).

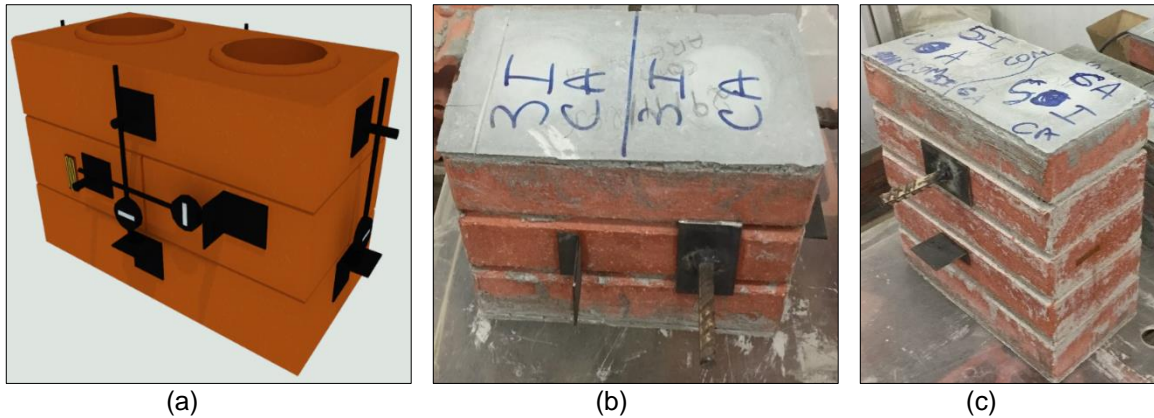


Figura 3.18 – Prismas com indicação de hastes para LVDT: (a) modelo; (b) prisma 3ICA; (c) Prisma 5ICA

Os módulos de deformação longitudinal e transversal foram obtidos pela Equação Eq. 3.7 (anexo A da ABNT NBR 15812-2, 2010).

Para cada modelo de prisma foram ensaiados quatro corpos-de-prova com instrumentação para medir deslocamentos e deformações.

3.5 – PEQUENAS PAREDES

Segundo o anexo B da norma ABNT NBR 15812-2 (2010), as pequenas paredes devem apresentar altura maior ou igual a no mínimo 5 vezes a espessura do bloco e o comprimento deve ser maior ou igual a dois blocos.

Nesse trabalho, foram confeccionadas pequenas paredes com dois blocos de comprimento e cinco de altura medindo aproximadamente $60 \times 15 \times 35 \text{ cm}^3$, contendo 8 blocos inteiros (I) e 4 meio bloco (M).

Optou-se por confeccionar e ensaiar 2 tipos de pequenas paredes com e sem uso de junta argamassada, denominadas PPSA e PPCA, conforme Figura 3.19.



Figura 3.19 – Construção das pequenas paredes (modelo PPCA)

As pequenas paredes foram capeadas seguindo a mesma técnica utilizada para blocos e prismas.

3.5.1 – Resistência à Compressão de Pequenas Paredes

A determinação da resistência à compressão em pequenas paredes (f_{ppk}) também foi realizada na prensa servo-hidráulica EMIC (Figura 3.10 acima), em ensaios realizados aos 28 dias, com quatro espécimes de cada modelo estudado.

Para determinação da resistência característica foi aplicada a mesma análise definida para prismas, conforme a ABNT NBR 15812-2 (2010).

3.5.2 – Módulo de Deformação

A determinação do módulo de deformação das pequenas paredes foi realizada em três dos corpos-de-prova ensaiados para compressão, para cada modelo de pequena parede, sendo utilizados LVDT's para a aquisição de deslocamentos lineares. Os procedimentos para colagem dos LVDS's foram os mesmos adotados para os prismas.

Os módulos de deformação longitudinal e transversal também foram obtidos pela equação Eq. 3.7, conforme anexo A da ABNT NBR 15812-2 (2010).

3.6 – ARGAMASSA

A argamassa empregada no presente trabalho, tanto para os prismas com argamassa (5ICA, 5MCA, 3ICA e 3MCA) como para as pequenas paredes com argamassa (PPCA) seguiu as normas da ABNT NBR 13276 (2016) para sua confecção.

Para a realização dos ensaios de absorção de água, tração na flexão e compressão e para a determinação do módulo de deformação longitudinal, a confecção dos corpos-de-prova prismáticos com 4 x 4 x 16 cm³, se pautou pela ABNT NBR 13279 (2005).

Na composição da argamassa utilizou-se cimento CPIII-40 RS, Super Cal CH III, areia média e cola PVA, na proporção 1:1:5:0,5, em peso, com fator água/cimento igual a 2,0. Esse traço de argamassa com adição de cola PVA foi

escolhido por se tratar de argamassa que vem sendo empregada por um grande número de construtores que trabalham com blocos de encaixe (solo-cimento) no norte e noroeste fluminense.

A consistência da argamassa determinada a partir da ABNT NBR 13276 (2016).

A Tabela 3.5 apresenta o total de corpos-de-prova utilizados em cada ensaio realizado para a determinação da qualidade do traço de argamassa proposto para a presente pesquisa.

Tabela 3.5 - Número de amostras de argamassa

Ensaio	Número de amostras
Absorção de água	6
Compressão	12
Tração na Flexão	12
Módulo de Deformação	12

3.6.1 – Índice de Absorção

O índice de absorção de água foi determinado de acordo com o procedimento da ABNT NBR 9778 (2009), sendo os corpos-de-prova prismáticos de argamassa secos em estufa por mais 24 h e pesados (m_s) e depois imersos em água por 24 h e pesados novamente (m_u), aplicando-se então a equação Eq. 3.2 para determinar o índice de absorção.

3.6.2 – Resistência à Compressão

A resistência à compressão axial foi determinada segundo a norma ABNT NBR 13279 (2005), tomando por corpos-de-prova as duas metades dos corpos-de-prova rompidos no ensaio de tração na flexão. O ensaio foi realizado numa prensa EMIC DL30 e seguiu a uma velocidade de aplicação de carga de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo-de-prova.

Para o cálculo da resistência à compressão (f_a , em MPa) utilizou-se a expressão:

$$f_a = \frac{F_c}{1600} \quad (Eq. 3.9)$$

em que:

F_c é a carga máxima de compressão aplicada, em N;

A ($= 1600 \text{ mm}^2$) é a área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga de 40 mm x 40 mm.

3.6.3 – Resistência à Tração na Flexão

Para a determinação da resistência a tração na flexão, aplicou-se o ensaio de flexão, segundo os parâmetros da ABNT NBR 13279 (2005), utilizando equipamento desenvolvido no LECIV-UENF e adaptado à prensa EMIC DL30, sob uma carga de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo-de-prova.

A resistência à tração na flexão (R_t , em MPa) obteve-se pela aplicação do seguinte cálculo:

$$R_t = \frac{1,5F_t L}{40^3} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

sendo:

F_t a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;

L a distância entre os suportes, em mm.

3.6.4 – Módulo de Deformação

Para a determinação do módulo de deformação da argamassa, foram utilizadas as informações de deslocamentos na direção de aplicação da forma (vertical) para doze corpos de prova, sendo determinado o módulo secante à 5% e 30% da tensão de ruptura.

Na Figura 3.20 (a), (b) e (c) são indicadas fotos com a prensa e os corpos de prova ensaiados.

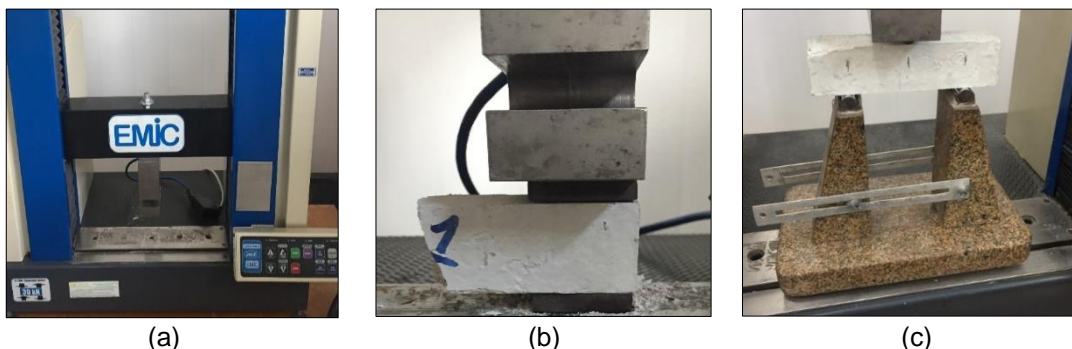


Figura 3.20 – Ensaio mecânicos em argamassa: (a) prensa EMIC DL-30; (b) ensaio de compressão; (c) equipamento para ensaio de tração na flexão.

3.7 – RESUMO DO NÚMERO DE AMOSTRAS DOS ENSAIOS

Na Tabela 3.6 apresentou-se um resumo do número de corpos de prova empregados nos diversos ensaios realizados para estudo dos blocos, argamassa, prismas e pequenas paredes.

Tabela 3.6 – Número de amostras por Ensaio

Elemento		Propriedade	C.P.
Bloco		Dimensões	13
		AA	13
		MEA	6
		RL	6
		PA	6
		Compressão	15
		Deformação	6
		Prisma	3ISA
3ICA			
3MSA			
3MCA			
5ISA	Deformação		4
5ICA			
5MSA			
5MCA			
Pequena Parede	PPSA	Compressão	4
	PPCA	Deformação	3
Argamassa		AA	6
		Compressão	12
		Tração	12
		Deformação	12

3.8 – TRATAMENTO DOS DADOS

3.8.1 – Parâmetros de Qualidade dos Blocos

Os parâmetros de qualidade dos blocos, como taxa de absorção de água, resistência característica dos blocos, porosidade, foram avaliados em comparação aos parâmetros normatizados pela ABNT.

3.8.2 – Parâmetros de Comportamento Mecânico

Os resultados obtidos para resistência de blocos, prismas e pequenas paredes foram analisados de forma a estabelecer parâmetros de comportamento dos blocos, avaliando rigidez, resistência mecânica e modo de ruptura.

3.8.3 – Tratamento Estatístico

Os resultados encontrados nos ensaios mecânicos foram tratados estatisticamente de forma a permitir extrapolações para a população através de verificações em uma quantidade limitada de amostras.

Foram determinados parâmetros estatísticos de medida de posição central (média) e de medida de dispersão (variância, desvio padrão, coeficiente de variação).

Dado o pequeno número de amostras, recorreu-se ainda à análise de variância (ANOVA), teste F e teste t para verificação das hipóteses e o critério de Chauvenet na eliminação de valores duvidosos.

Foi realizada a análise estatística pela distribuição de Weibull para avaliação da qualidade do produto cerâmico obtido.

3.8.3.1 - Tamanho Mínimo do Lote (TML)

De acordo com Xavier (2006), este critério é empregado para pesquisas que envolvem número limitado de amostras, ou seja, menores que 30 unidades, que é o caso da presente pesquisa. Nele, considera-se que, para um resultado obtido em procedimentos experimentais ser consistente, é necessário que a amostra possa representar, de forma satisfatória, o universo amostral, uma vez que o tamanho do lote é diretamente proporcional à consistência dos dados.

No critério do TML considera-se que a função de frequência acumulada deve ser distribuída em classes e os dados comportam-se como uma distribuição normal com grau de confiabilidade de 95%.

O procedimento de cálculo inclui a determinação do número inicial mínimo do lote (n_0) pela equação Eq. 3.11 que leva em consideração o desvio padrão e o valor tabelado de *t-Student* para $n - 1$ graus de liberdade do conjunto de dados (Anexo 1).

$$n_0 = \frac{t S_x}{r x_m} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

em que:

t é a variável aleatória da distribuição de *Student* para $n - 1$ graus de liberdade (Anexo 1);

r é o parâmetro relativo à incerteza aceita (acurácia);

x_m é a média do lote; e

S_x é o desvio padrão do lote.

Em seguida, calcula-se o tamanho mínimo do lote (n) pela expressão da equação Eq. 3.12.

$$n = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{n_0}{N}\right)} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

sendo

N : o número de dados do lote.

3.8.3.2 - Estimativa da Média Populacional

Para estimar de forma satisfatória o intervalo de confiança da média populacional ($I_{\bar{x}}$) para uma amostragem pequena ($n \leq 30$), desconhecido o desvio-padrão populacional, Rocha (2015) define a expressão:

$$I_{\bar{x}} = x_m \pm t \cdot \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

sendo:

t : variável aleatória da distribuição de *Student* para $n - 1$ graus de liberdade (Anexo 1);

n : número de amostras;

x_m : média do lote;

S_x : desvio padrão do lote.

Dentro desse intervalo de confiança, 95 % das observações têm distribuição normal e próximas à média.

3.8.3.3 - Critério de Chauvenet

Este é um método que se fundamenta na teoria da probabilidade, considerando a eliminação racional de dados fora da tendência dominante. Nesse sentido os dados são representados pela função de frequência da distribuição normal, sendo eliminados valores máximos ou mínimos quando surgem dúvidas quanto à variação das medidas realizadas.

A probabilidade de certo valor se desviar do valor da média esperada deverá ser menor que $1/n$, onde n é o número de medições de uma grandeza, que deve ser um valor grande. Os resultados medidos devem seguir uma distribuição gaussiana e permite quantificar um dado fora do padrão esperado para eliminá-lo do conjunto da pesquisa.

O Critério de Chauvenet estabelece que o valor medido pode ser rejeitado se a probabilidade m de obter o desvio em relação à média for menor que $1/2n$. A razão de desvio (DR) entre um determinado valor e a média pode ser calculado, segundo Xavier (2006) pela expressão:

$$DR = \frac{x - x_m}{S_x} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

em que:

DR é a razão de desvio entre o máximo desvio ($x - x_m$) e o desvio padrão S_x ;
 x é o valor medido;

x_m é o valor médio do lote calculado.

O *Critério de Chauvenet* na eliminação de valores duvidosos é comparado com valores tabelados de *desvio máximo aceitável* DR_0 (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 – Valores de DR_0 para diferentes valores de n

Número de leituras (n)	DR_0
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

Fonte: Xavier (2006)

As hipóteses utilizadas para o Critério de Chauvenet são:

- H_0 (hipótese inicial): $DR_{\text{máx}}$ (ou DR_{min}) $\leq DR_0 \rightarrow$ aceita-se o valor considerado;

- H_1 (hipótese alternativa): $DR_{\text{máx}}$ (ou DR_{min}) $> DR_0 \rightarrow$ rejeita-se o valor máximo (ou mínimo) e procede-se novamente aos cálculos, desconsiderando-se os pontos eliminados.

3.8.3.4 – Análise de Variância (ANOVA)

Na análise de Variância (ANOVA), primeiramente deve ser verificado o teste F onde as hipóteses são:

- $H_0: S_x^2 = S_y^2 \rightarrow$ não há diferença entre os tratamentos (verifica-se com $F_{CAL} \leq F_{Tab}$);
- $H_1: S_x^2 > S_y^2 \rightarrow$ rejeita-se a hipótese H_0 e procede-se à verificação do teste t.

O F_{Tab} é definido utilizando-se os dados da tabela do Anexo 2 com os dados de linha e coluna obtidos a partir dos graus de liberdade dos tratamentos x e y.

F_{CAL} é definido na expressão:

$$F_{CAL} = \frac{S_x^2}{S_y^2} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

sendo:

S_x^2 : o maior valor de variância entre os tratamentos;

S_y^2 : o menor valor de variância entre os tratamentos.

Para o teste t as hipóteses são:

- $H_0: \mu_x = \mu_y \rightarrow$ não há diferença entre os tratamentos (verifica-se com $t_{CAL} \leq t_{Tab}$);
- $H_1: \mu_x > \mu_y \rightarrow$ rejeita-se a hipótese H_0 , confirmando assim as diferenças estatística entre os tratamentos.

O valor de t_{CAL} é determinado pela expressão da equação:

$$t_{CAL} = \frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\frac{S_x^2}{n_x} + \frac{S_y^2}{n_y}}} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

em que:

μ_x é o maior valor de média entre os tratamentos;

μ_y é o menor valor de média entre os tratamentos;
 S_x^2 é o maior valor de variância entre os tratamentos;
 S_y^2 é o menor valor de variância entre os tratamentos;
 n_x é o número de observações de um dos tratamentos;
 n_y é o número de observações do outro dos tratamentos.

Já o valor do t_{Tab} é obtido da tabela de *t-Student* (Anexo 1) com o valor de n^* determinado pela expressão:

$$n^* = \frac{\left(\frac{S_x^2}{n_x} + \frac{S_y^2}{n_y}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_x^2}{n_x}\right)^2}{n_x - 1} + \frac{\left(\frac{S_y^2}{n_y}\right)^2}{n_y - 1}} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

3.8.3.5 – Análise de Weibull

A resistência mecânica de cerâmicos é muito influenciada pela presença e forma dos defeitos em suas microestruturas, tais como grãos e poros. Assim, uma das análises que tem sido empregada para a avaliação da qualidade do produto cerâmico é a distribuição de Weibull, que considera a probabilidade de falha sobre certa tensão, uma vez que, matematicamente, o parâmetro de Weibull independe do tamanho da amostra (DODSON, 2006).

Wu e Zhou (2006), afirmam que módulo de Weibull tem sido empregado dada sua flexibilidade de adequação às diferentes distribuições de frequência acumuladas e ao controle de processos que envolvam falhas de materiais ou peças ao longo do tempo. A análise de Weibull relaciona a resistência mecânica de material à sua probabilidade acumulada de fratura, sendo um importante critério na determinação da confiabilidade de materiais cerâmicos.

De acordo com Rinne (2008), a probabilidade de o material falhar se submetido à tensão σ é dada pela função densidade de probabilidade de Weibull ($f(\sigma)$):

$$f(\sigma) = \frac{m}{\sigma_R} \cdot \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_R}\right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_R}\right)^m} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

em que:

σ_0 : tensão característica antes da qual o material não falhará (MPa);

σ_R : valor de referência de tensão que corresponde a 63,2% de probabilidade de falha do material (MPa);

m : constante adimensional (módulo de Weibull)

A distribuição acumulada de probabilidade $F(\sigma)$ é a probabilidade de ocorrer uma falha em tensões menores ou iguais a σ , sendo dada pela expressão:

$$F(\sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_R}\right)^m} \quad (\text{Eq. 3.19})$$

Para a determinação da probabilidade de falha (ruptura) para determinado valor de tensão, os valores medidos nos ensaios são colocados em ordem crescente e numerados por um índice i . Neste trabalho, foi empregado o estimador de probabilidade:

$$P_i = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

sendo

i : o índice da amostra;

N : o número total de amostras medidas (nesta pesquisa $N = 14$, que foi o número de corpos de prova não rejeitados pelo critério de *Chauvenet*).

3.8 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para a análise numérica, optou-se pelo uso do software Solidworks 16.0, utilizando a malha sólida, com refinamento máximo possível para a versão do software, com elemento tetraédrico (dez nós) com três graus de liberdade por nó (Figura 3. 21).

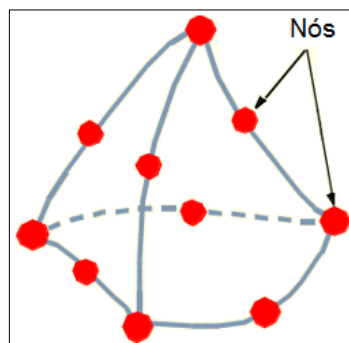


Figura 3.21 – Elemento tetraédrico utilizado no Solidworks
(Fonte: JST/JOF)

3.8.1 – Modelagem dos Elementos

Os blocos foram modelados em três dimensões ($30 \times 15 \times 7 \text{ cm}^3$), sendo os nós da base restringidos quanto aos deslocamentos nas direções x, y e z e os nós do topo quanto aos deslocamentos nas direções x e z, tendo livre o deslocamento vertical (direção y). O carregamento foi aplicado na face superior do modelo e a carga relativa a massa da amostra foi desprezada em virtude de seu valor ser muito inferior ao carregamento externo.

Na Figura 3.22 são apresentadas as representações para restrições e cargas aplicadas ao bloco. Nota-se que foi retirado o encaixe do bloco superior, à semelhança do que é feito no experimento em laboratório, para o capeamento da superfície, deixando ela assim plana para garantir que as placas estejam paralelas. Este procedimento também tem a função de evitar o acúmulo de tensões naquele local e foi aplicado em todos os casos aqui estudados.

Na Figura 3.22 também está representada a malha de elementos finitos gerada pelo Software Solidworks 16.0 para os blocos na simulação.

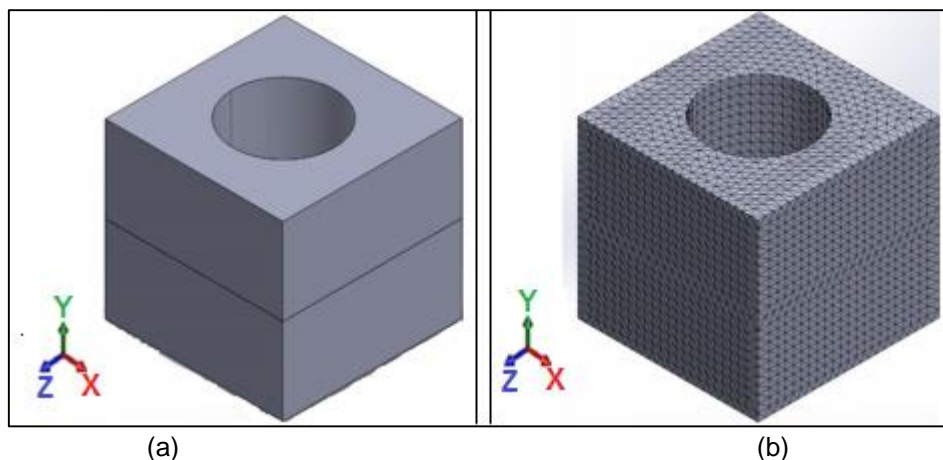


Figura 3.22 – Modelagem nos Blocos: (a) restrições e carregamento; (b) malha de elementos finitos

Optou-se por restringir também os encaixes do bloco na primeira fiada em todas as direções (deslocamentos) a fim de simular a ação da argamassa de assentamento da primeira fiada e se deformar menos que o bloco até a ruptura da peça (Pedroti, 2007).

Na modelagem dos prismas foram considerados os quatro casos: 3I, 3M, 5I e 5M, sendo aplicada o critério da micromodelagem (Figura 3.23).

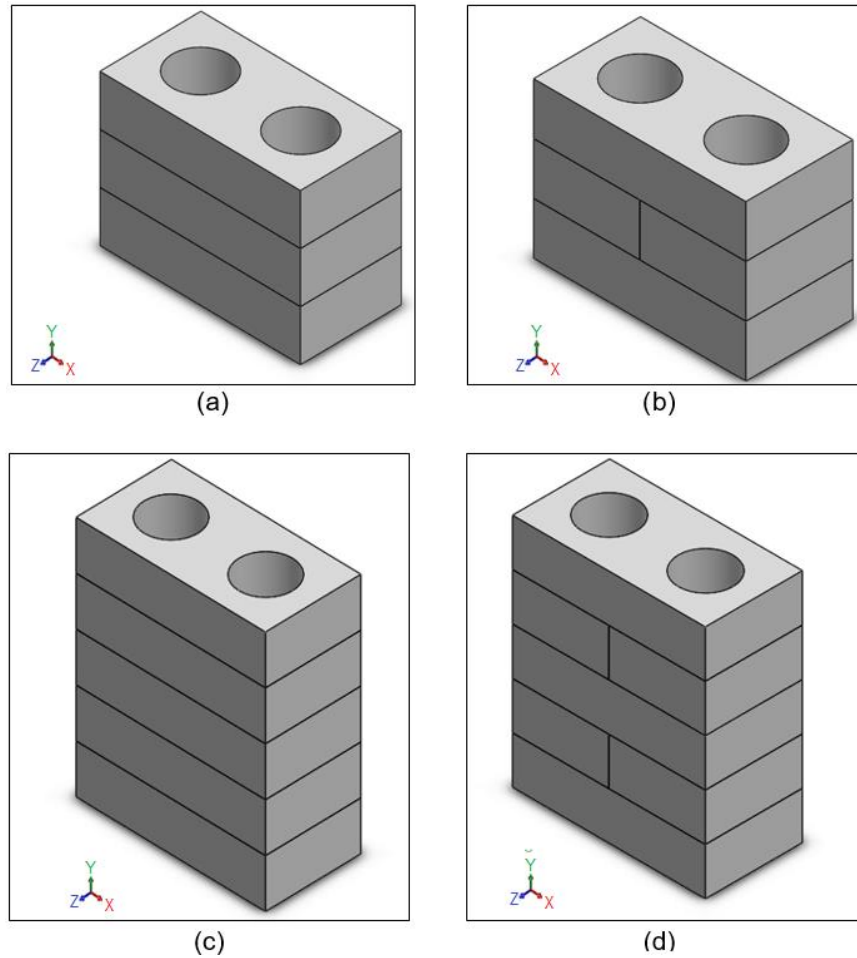


Figura 3.23 – Modelagem dos prismas: (a) 3I; (b) 3M; (c) 5I; (d) 5M

Os prismas de três fiadas foram modelados com dimensões $30 \times 15 \times 21 \text{ cm}^3$ e os prismas de cinco fiadas com dimensões $30 \times 15 \times 35 \text{ cm}^3$.

A pequena parede foi simulada de duas formas: micromodelagem e macromodelagem, com as dimensões iguais ao adotado para os painéis ensaiados, com medidas de $60 \times 15 \times 35 \text{ cm}^3$, conforme Figura 3.24.

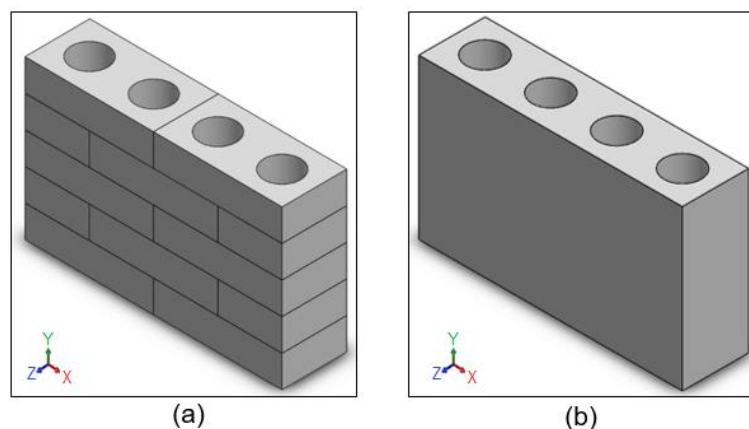


Figura 3.24 – Modelagem das pequenas paredes: (a) micromodelagem; (b) macromodelagem

Foi implementada por simulação numérica a análise de um modelo de parede com medidas de 230 x 15 x 280 cm³, considerando-se a hipótese de macromodelagem (Figura 3.25).

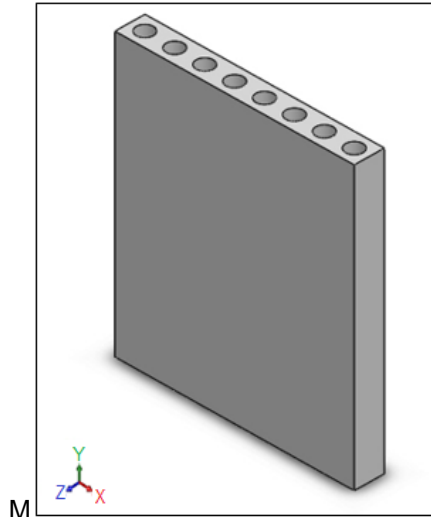


Figura 3.25 – Modelo de parede (macromodelagem)

As cargas utilizadas nas simulações dos blocos, prismas e pequenas paredes foram definidas a partir dos ensaios experimentais, sendo que optou-se por utilizar a tensão média de ruptura para verificar as concentrações de tensões do modelo.

Para a parede foi utilizada como parâmetro para definição de carga a tensão média de ruptura de alvenaria a partir da tensão de ruptura de pequenas paredes, com base na equação Eq. 2.8.

As restrições dos apoios para prismas, pequenas paredes e paredes seguiram os mesmos critérios definidos para análise de blocos, sendo que a interação entre blocos foi considerada sem restrição, tendo apenas as restrições de contato.

Os parâmetros físicos e mecânicos para a micromodelagem foram definidos a partir dos resultados encontrados para os blocos e os parâmetros para a macromodelagem determinados a partir do comportamento experimental das pequenas paredes (E_{pp} , G_{pp} , ν_{pp}).

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo traz os resultados obtidos para a caracterização da matéria-prima empregada na produção dos BPQ, objeto dos diversos ensaios e análises desta tese e dos ensaios realizados com blocos, prismas, pequenas paredes e argamassas, com o devido tratamento estatístico.

Para cada ensaio realizado nos blocos, prismas, pequenas paredes e argamassa, determinou-se o valor do TML e os resultados constam da Tabela A.1 do Apêndice A. Para todos os casos, verifica-se que o número de amostras estudadas atendeu, de maneira satisfatória ao mínimo exigido para uma inferência estatística consistente.

4.1 – MATÉRIA-PRIMA

Os ensaios realizados para caracterização física, química, mineralógica e térmica da massa argilosa empregada para confecção dos BPQ apresentaram os resultados listados a seguir.

A matéria-prima é uma massa argilosa empregada pela Arte Cerâmica Sardinha que é composta de argila e areia, na proporção 7:3.

4.1.1 – Caracterização Física

Os índices de consistência ou limites de Atterberg foram determinados a partir das normas ABNT NBR 6459 (2016) e ABNT NBR 7180 (2016). O limite de liquidez foi calculado a partir de 5 amostras e os resultados constam no gráfico da Figura 4.1.

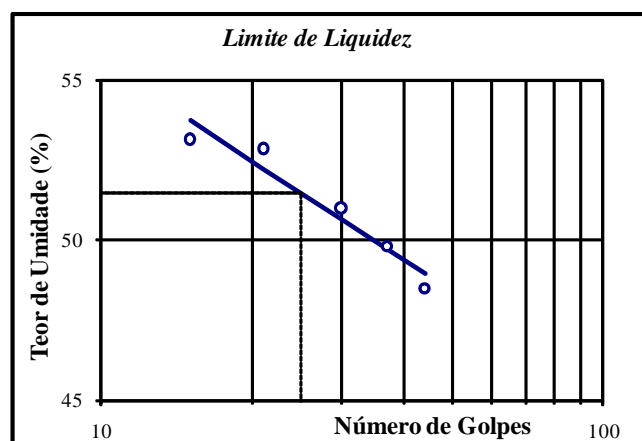


Figura 4.1 – Limite de Liquidez

O limite de plasticidade também foi determinado a partir de 5 amostras e os resultados figuram na Tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1 – Índices de Consistência

Índice	Valores obtidos
limite de liquidez – LL (%)	51,5
limite de plasticidade – LP (%)	30,3
índice de plasticidade – IP (%)	21,2

Os resultados encontrados para Densidade Real dos Grãos, Umidade Higroscópica e Atividade Coloidal foram de 2,59 g/cm³, 1,3% e 0,61, respectivamente (Anexo 3).

A curva de distribuição granulométrica da massa argilosa empregada na confecção dos BPQ consta na Figura 4.2, segundo a ABNT NBR 7181 (2016).

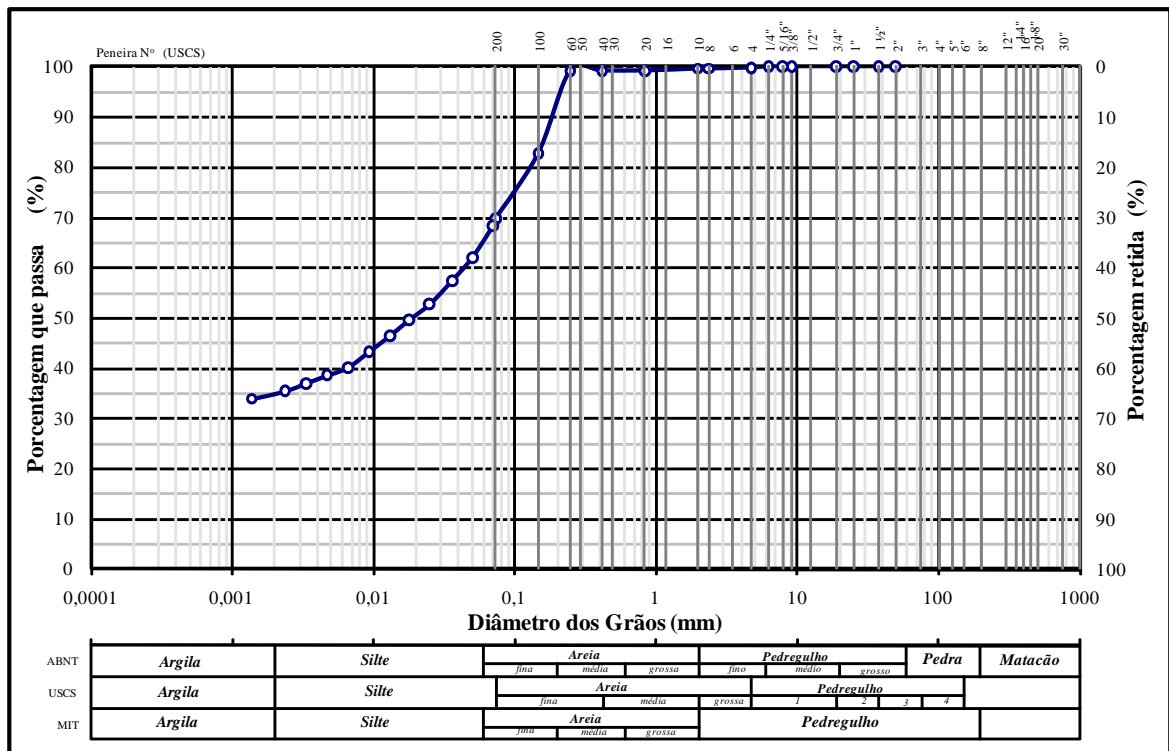


Figura 4.2 – Curva Granulométrica - massa argilosa

A amostra de solo apresenta 34,8% de argila, 30,1% de silte e 34,7% de areia em sua composição (Anexo 3). Sendo o Limite de Liquidez de 51,5%, o material pode ser classificado como Argila Pouco Plástica (CL) com presença de areia na massa pelo Sistema de Classificação Unificada dos Solos (S.U.C.S).

Comparando o resultado encontrado com o apresentado por Alexandre (2000) e Vieira (2001), conclui-se que, pelos parâmetros físicos, a massa argilosa

pode ser empregada na confecção de materiais cerâmicos, pois o percentual de argila encontra-se na faixa de 30% a 70% em massa de solo e a densidade real dos grãos no intervalo de 2,55 a 2,77 g/cm³.

A massa argilosa estudada foi escolhida a partir de matéria-prima empregada na cerâmica Sardinha, visto que uma das metas dessa pesquisa foi a de contribuir para viabilizar a produção dos BPQ em escala industrial.

4.1.2 – Umidade Ótima

Determinou-se a umidade ótima de prensagem da massa argilosa empregada na confecção dos BPQ por meio do ensaio de *Proctor Normal* (Anexo 4). O resultado obtivo vem especificado no gráfico da Figura 4.3 a seguir.

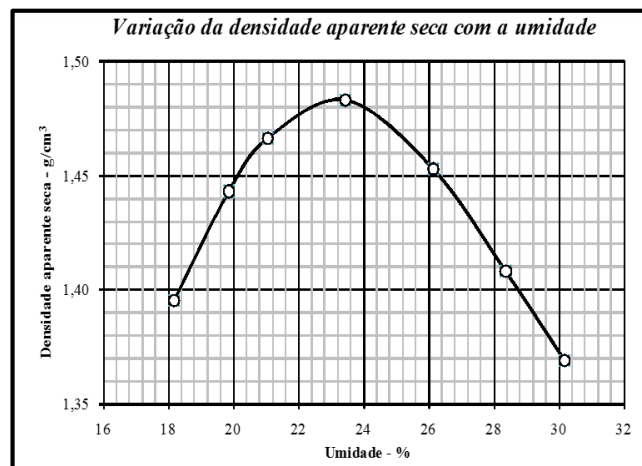


Figura 4.3 – Gráfico da Umidade ótima

Conforme pode ser observado no gráfico, a Umidade Ótima determinada foi de 23,2% para uma densidade aparente seca de 1,48 g/cm³. O valor da umidade ótima foi empregado como referência para a confecção dos BPQ.

4.1.3 – Análise Química

A Tabela 4.2, a seguir, apresenta a composição química da massa argilosa utilizada na confecção dos BPQ, conforme resultado obtido a partir da Análise Química.

Tabela 4.2 – Composição química da massa argilosa (% em peso)

Elemento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Outros	PF
Quantidade (%)	46,61	15,84	9,40	9,29	4,68	4,16	10,02

Como se verifica, a massa argilosa é predominantemente constituída de SiO_2 e Al_2O_3 , uma característica da região norte fluminense, que indica o caráter refratário da matéria-prima.

Conforme sublinhado por Xavier (2006), a quantidade de SiO_2 (46,61%) sugere a presença dos argilominerais caulinita e ilita, e de quartzo livre na amostra total e a quantidade de Al_2O_3 (15,84%) possivelmente da gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), o que foi confirmado pela análise mineralógica, enquanto a quantidade de óxido Fe_2O_3 (9,29%) assinala a presença de agente fundente e indica a cor vermelha pós calcinação do material.

A Perda ao Fogo (PF) em porcentagem na temperatura de 900°C medida foi de 10,02%. Conforme Santos (1992), a 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 indicam uma similaridade com resultados obtidos por outros pesquisadores da região como, Toledo (2003), Xavier (2006), Pedroti (2007) e Azeredo (2015), indicando a aplicabilidade da massa argilosa na indústria de cerâmica vermelha.

4.1.4 – Análise Mineralógica

O resultado da análise da composição mineralógica da massa argilosa consta na Figura 4.4.

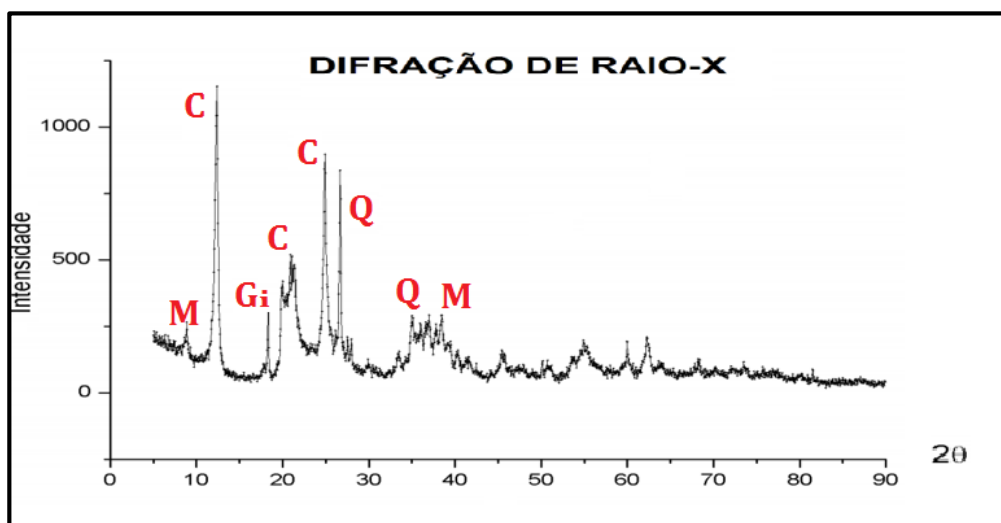


Figura 4.4 – Difratograma de raio-X (C= caulinita; Q = quartzo; M = mica muscovita e Gi = Gibsita).

A composição mineralógica mostra a presença de picos de caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quartzo (SiO_2), mica muscovita ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e gibsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Outros picos de menor intensidade podem ser observados na Figura 4.4.

A caulinita é um argilomineral presente em argilas utilizadas para fabricação de vários produtos cerâmicos destinados à construção civil, participando de forma decisiva na plasticidade do material, conforme observado do valor de 51,5% do LL, e de queima refratária.

O quartzo é uma impureza nas argilas, sendo um produto não plástico e inerte na queima.

A mica muscovita é um mineral lamelar muitas vezes associado a defeitos em peças cerâmicas, no entanto pode atuar como fundente devido à presença de óxidos alcalinos.

A presença de gibsita é importante, por ser esse um mineral que contribui para a perda ao fogo e a característica refratária (Monteiro *et al.*, 2004).

4.1.5 – Análise Térmica

As curvas ATD e TG da massa argilosa são trazidas na Figura 4.5.

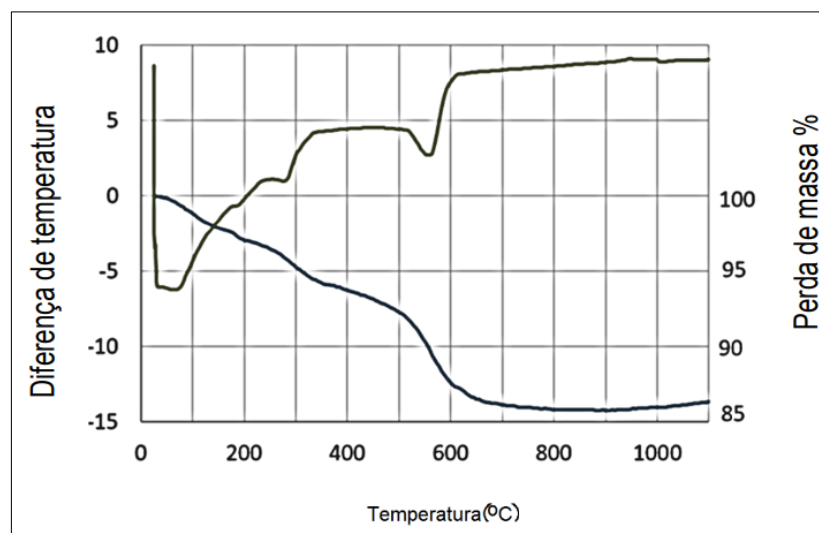


Figura 4.5 – Curvas de ATD/TG da massa argilosa

Da Figura 4.5, pode-se observar perda de massa nas temperaturas iniciais de aquecimento que se atribui à eliminação de água de umidade. Outra mudança que chama a atenção é a reação endotérmica que ocorre entre as temperaturas de

260 e 280°C devida à eliminação de água de hidróxidos. No entanto, a maior perda de massa, cerca de 7%, pode ser observada entre 520 e 570°C, fato associado à desidroxilação da caulinita.

Como também pode ser notado das curvas da Figura 4.5, na temperatura de patamar de queima registrada no termostato do forno, 890°C, não são identificadas presenças de picos de transformações térmicas.

4.2 – PRODUÇÃO DOS BPQ

Para a produção dos blocos a massa argilosa foi mantida entre 21,2% (Índice de Plasticidade) e 23,2% (umidade ótima de compactação), tendo sido produzidos aproximadamente 1000 blocos para a consecução dos vários ensaios com os BPQ.

Os blocos foram produzidos em Prensa Eco Master 7000 Turbo II e queimados em fornos do tipo Caieira, conforme definido no Capítulo 3.

4.3 – CARACTERIZAÇÃO DOS CERÂMICOS

4.3.1 – Características Dimensionais dos Blocos

Foram realizadas medições em 30 amostras de BPQ para verificação das características dimensionais e os resultados constam da Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Medições nos blocos

Características	Elemento	Permitido	Verificado
Tolerâncias dimensionais individuais (mm)	Largura	±5	5,0
	Altura		2,6
	Comprimento		4,1
Tolerâncias dimensionais médias (mm)	Largura	±3	3,0
	Altura		2,1
	Comprimento		2,9
Desvio em relação ao esquadro (mm)	-	±3	1,2
Planeza das faces (mm)	-	±3	1,0

Como pode ser observado da Tabela 4.3, os BPQ atenderam às variações máximas de medidas tanto na análise individual como na análise da média para a ABNT NBR 15270-3: 2005.

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores médios de altura, comprimento e largura, apresentados os valores médios obtidos e validados pela análise

estatística em nível de 95% de confiabilidade. Os demais resultados apresentados no Apêndice B (Tabela B.1).

Tabela 4.4 – Características Geométricas

Dimensão (cm)	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação
Largura	14,48	0,13	0,88
Altura	6,98	0,28	4,00
Comprimento	28,74	0,13	0,45

Como pode ser observado da Tabela 4.4, a variabilidade da altura dos blocos apresenta valores maiores, sendo um dos problemas encontrados na produção dos BPQ a padronização na medida da altura dos blocos. Uma alta variação nas alturas dos blocos pode gerar problemas de nivelamento das paredes.

4.3.2 – Propriedades Tecnológicas dos Blocos

Os blocos foram analisados quanto a Absorção de Água (AA), Massa Específica Aparente (MEA), Retração Linear (RL) e Porosidade Aparente (PA), sendo os resultados encontrados, após tratamento estatístico, resumidos na Tabela 4.5.

No Apêndice B são apresentadas as tabelas com os resultados encontrados para cada ensaio realizado com blocos, separadamente, contendo os valores obtidos para cada corpo-de-prova.

No Apêndice F constam análises realizadas para verificação dos resultados encontrados pela leitura de cada ensaio pelo critério de Chauvenet. Nos casos de absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA), houve rejeição da hipótese H_0 , sendo os cálculos refeitos sem os corpos-de-prova rejeitados. Já para as demais propriedades, a hipótese H_0 foi verificada, não havendo, portanto, rejeição de valores.

Tabela 4.5 – Resumo das propriedades tecnológicas dos BPQ

Propriedade	Média	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Limite Inferior	Limite Superior
AA (%)	20,49	1,45	7,08	20,32	21,36
MEA (g/cm ³)	1,21	0,03	2,48	1,19	1,23
RL (%)	4,05	0,33	8,15	3,78	4,32
PA (%)	35,41	0,75	2,12	34,70	36,13

O alto CV da retração linear deve-se à alta plasticidade da massa argilosa utilizada na confecção dos blocos.

O resultado indica que os BPQ apresentam uma taxa de absorção suficiente para aplicação como alvenaria de vedação e estrutural, pois a norma indica que estejam no intervalo de 8 a 22%. Apenas um valor individual de 22 % foi verificado. No entanto, quando comparado com a norma de solo-cimento, os BPQ apresentam-se acima do limite da absorção, que é de 20%.

Pedroti *et al.*(2011), em seus estudos com blocos prensados e queimados verificou uma taxa de absorção acima dos limites, que ficaram em torno de 31,85%, com desvio padrão de 0,68. Comparando esse valor ao que foi determinado na presente pesquisa, verifica-se uma taxa de absorção quase 40% menor. Esses valores sugerem que a massa argilosa com maior percentual de agentes fundentes e o uso de prensa com maior capacidade de compactação na presente pesquisa permitiram tal resultado.

Alexandre e Silva (2012) encontraram taxa de 21%, que ficou dentro do limite da ABNT. As diferenças de valores apresentadas nas diversas pesquisas podem ser associadas a questões da matéria prima e do processo produtivo dos BPQ.

Com relação à MEA, o resultado aponta um valor que é menor que o valor indicado pela ABNT NBR 6120 (1980) para tijolo cerâmico furado que é de 1,3 g/cm³, porém está dentro da faixa de 1,1 a 1,4 g/cm³ definida para esse tipo de material (PEDROTI, 2007).

A retração linear aferida foi a total, ou seja, a retração de secagem somada a retração de queima, sendo medida em todas as direções, o que pode explicar o CV de 8,15%. O valor de 4% para a RL se assemelha ao encontrado na literatura para blocos cerâmicos.

4.3.3 – Resistência Característica à Compressão dos Blocos

Foi determinada a área líquida dos blocos, sendo esta equivalente a 78% da área bruta.

Na Tabela 4.6, estão os valores da resistência média à compressão (f_{bm}) considerando a área bruta e a área líquida dos blocos, após tratamento estatístico.

Todos os valores obtidos para a resistência à compressão são apresentados no Apêndice B.

Aplicando o Critério de Chauvenet, observou-se a rejeição da hipótese H_0 , havendo descarte dos resultados de dois corpos de prova, conforme pode ser observado no Apêndice F.

Tabela 4.6 – Resistência à compressão média dos blocos

	Área Bruta	Área Líquida
Resistência Média (MPa)	4,13	5,28
Desvio Padrão (MPa)	0,32	0,41
Coef. de Variação (%)	7,68	

O valor médio obtido de resistência (f_{bm}) à compressão, tomado com relação à área bruta, é de 4,13 MPa, com um desvio padrão de 0,32, não apresentando nenhum valor inferior a 3,0 MPa, mínimo para ser alvenaria estrutural.

Para os valores não rejeitados, tem-se que $\phi f_{b(1)} = 3,62$ e $f_{bk,est} = 3,52$ (Tabela B.9 do Apêndice B). Assim, da expressão definida pela norma ABNT NBR 15270-2 (2005) para definição da resistência característica à compressão de bloco (f_{bk}), tem-se que $f_{bk,est} < \phi f_{b(1)}$, então $f_{bk} = \phi f_{b(1)}$. Dessa forma, a resistência característica à compressão de bloco deve ser de **3,62 MPa**, que é 12,3% menor que o valor médio obtido.

Pedroti (2007), analisando os resultados de sua pesquisa apresentou como resistência à compressão o valor médio de 3,10 MPa, com desvio padrão de 0,41. Comparando esse valor ao que foi encontrado para f_{bm} , verifica-se na presente pesquisa uma resistência maior em 33,2% com um desvio padrão menor. Essa resistência maior pode ser explicada pelo uso de uma prensa com maior capacidade de compactação e o uso de uma matéria-prima com maior taxa de agentes fundentes.

4.3.4 – Análise Estatística de Weibull

A Figura 4.6 apresenta o diagrama de Weibull para os BPQ não rejeitados. O parâmetro de Weibull (m) foi determinado a partir da análise de regressão linear das tensões de rupturas dos blocos.

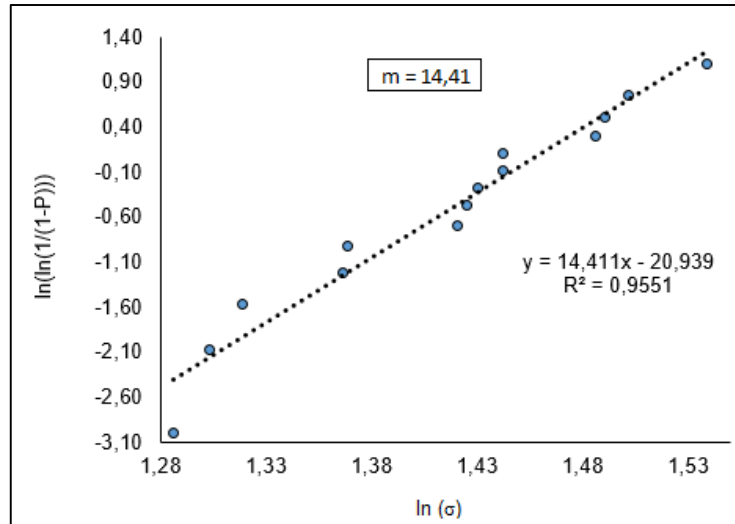


Figura 4.6 – Diagrama de Weibull (BPQ)

Conforme pode ser observada da figura 4.6, a distribuição de Weibull é unimodal, com uma linearização com R^2 de 0,955 indicando que os dados experimentais podem ser ajustados conforme a teoria de Weibull (PINHEIRO *et al.*, 2010).

O valor do parâmetro de Weibull (m) é 14,41, que fica dentro da faixa de aceitação para materiais cerâmicos ($3 < m < 15$), sendo que quanto mais próximo do limite superior, menor a dispersão amostral, conforme Zanotto *et al* (1991).

Foi determinada a tensão característica de Weibull (σ_R), parâmetro que indica uma probabilidade de falha do bloco de 63,2%, a partir da distribuição de probabilidade de ruptura (Figura 4.7).

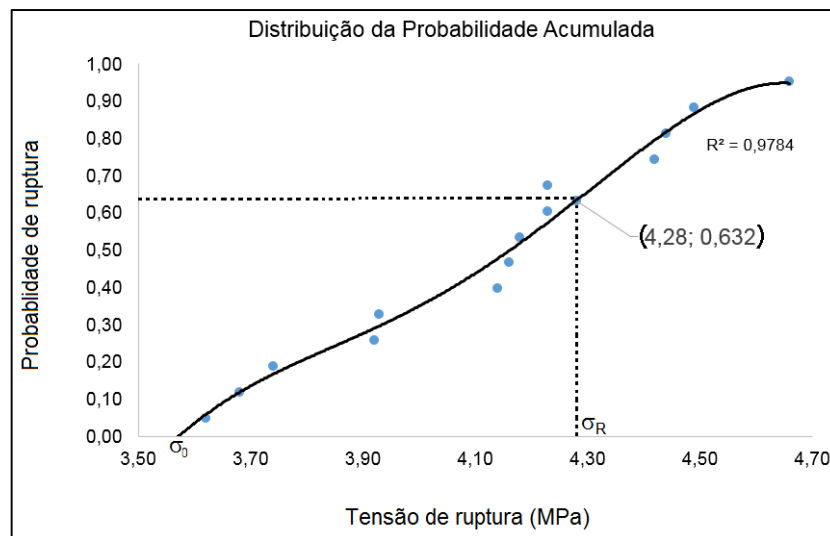


Figura 4.7 – Distribuição de Probabilidade Acumulada (BPQ)

O valor determinado foi de 4,28 MPa, conforme indicado no gráfico da Figura 4.7, que é um valor apenas 3,6% maior que o da resistência média, ou seja, estatisticamente iguais, e 18,2% maior que o valor calculado para resistência característica, conforme norma brasileira (ABNT NBR 15270-2, 2005).

4.3.5 – Parâmetros de Elasticidade dos Blocos

As Figuras 4.8 apresentam as curvas tensão versus deformação longitudinal medidas pela instrumentação dos BPQ. Conforme pode ser observado, o comportamento elástico dos blocos é não-linear.

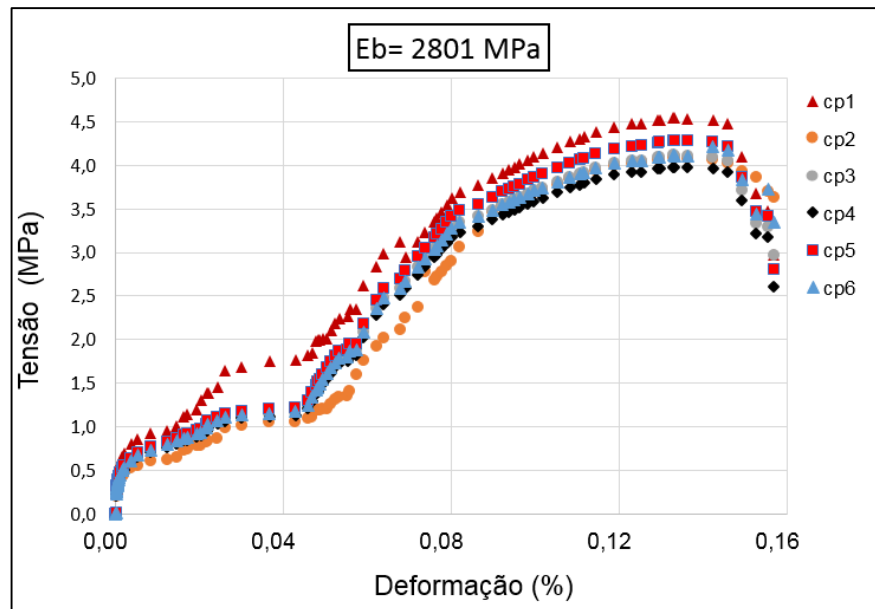


Figura 4.8 – Curvas Tensão-Deformação longitudinal - blocos

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores médios obtidos para os módulos de elasticidade para o sentido da compressão (longitudinal) e o sentido do comprimento dos blocos (transversal) e na Tabela C.10 (Apêndice C) são apresentados todos os valores obtidos.

Tabela 4.7 – Módulos de Deformabilidade dos Blocos – Área Bruta

	Longitudinal (E_b)	Transversal (G_b)	Coefficiente de Poisson (ν)
Módulo (GPa)	2,801	1,185	0,182
Desvio Padrão (GPa)	0,09	0,02	0,03
Coef. de Variação (%)	3,20	1,41	14,61

Tomando por base a resistência característica à compressão dos blocos de 3,62 MPa, tem-se que $E_b = 776f_{bk}$.

4.4 – PRISMAS

4.4.1 – Resistência à Compressão de Prismas (f_{pk})

No Apêndice C estão representados todos os resultados encontrados para resistência à compressão para cada tipo de prisma em separado. Esses resultados foram verificados pelo Critério de Chauvenet, sendo que apenas para os prismas do tipo 3ISA a hipótese H_0 foi rejeitada (Apêndice F).

Nas Figuras 4.9 e 4.10 são apresentados os valores obtidos para resistência à compressão característica (f_{pk}) e resistência à compressão média (f_{pm}) dos prismas estudados nessa pesquisa, indicando a faixa de variação para cada caso.

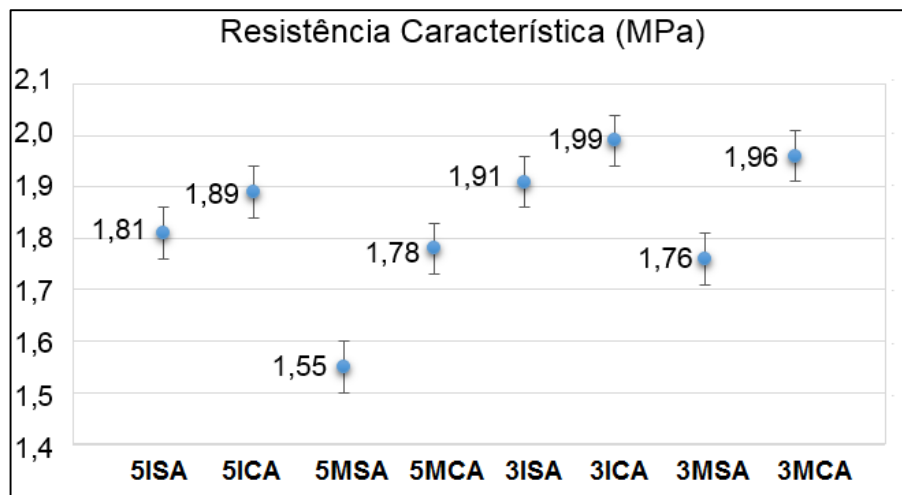


Figura 4.9 – Resistências à compressão característica - prismas

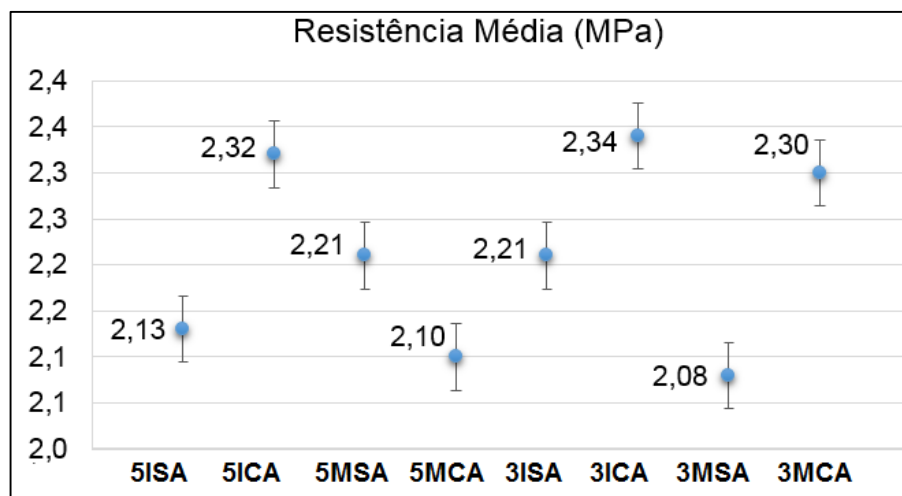


Figura 4.10 – Resistências média à compressão – prismas

Pedroti (2007), determinou, para resistência média à compressão de prismas de 3 blocos sem uso de argamassa, um valor de 2,19 MPa, que é estatisticamente igual aos valores encontrados na presente pesquisa.

4.4.2 – Parâmetros de Elasticidade - Prismas

Foram ensaiados quatro prismas de cada modelo com instrumentação para determinar o módulo de deformação, sendo utilizados LVDTs e Extensômetros para a aquisição dos dados. As Figuras 4.11 a 4.18 mostram as curvas tensão-deformação medidas para os diversos prismas estudados nesse trabalho.

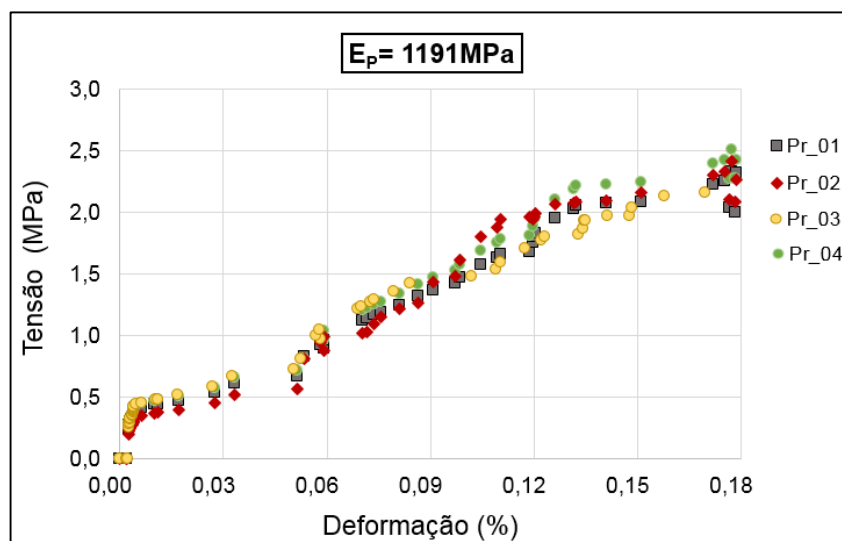


Figura 4.11 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 5ISA

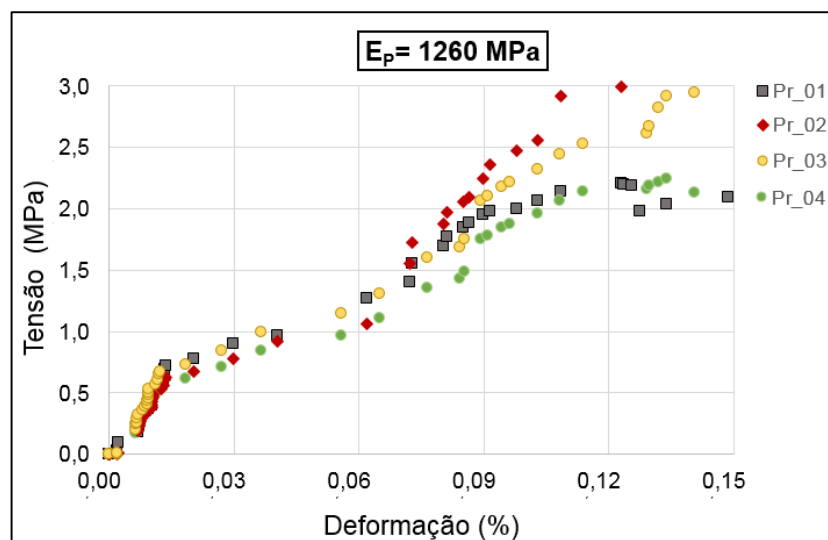


Figura 4.12 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 5ICA

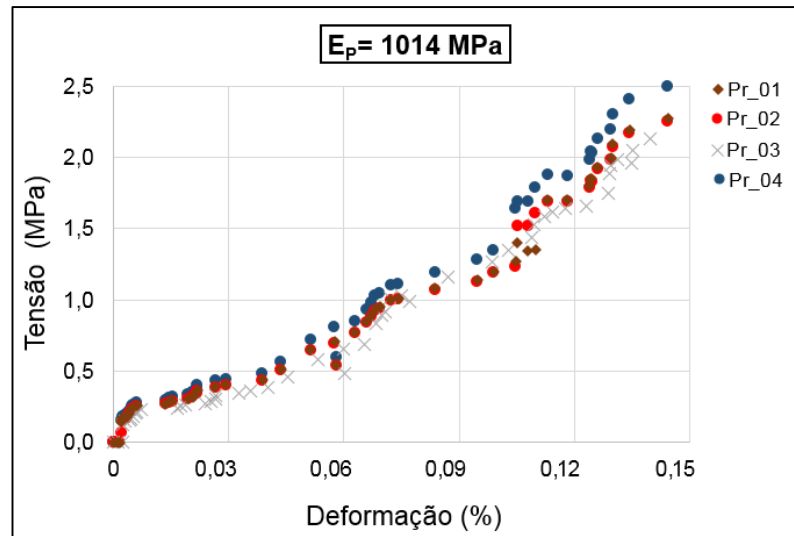


Figura 4.13 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 5MSA

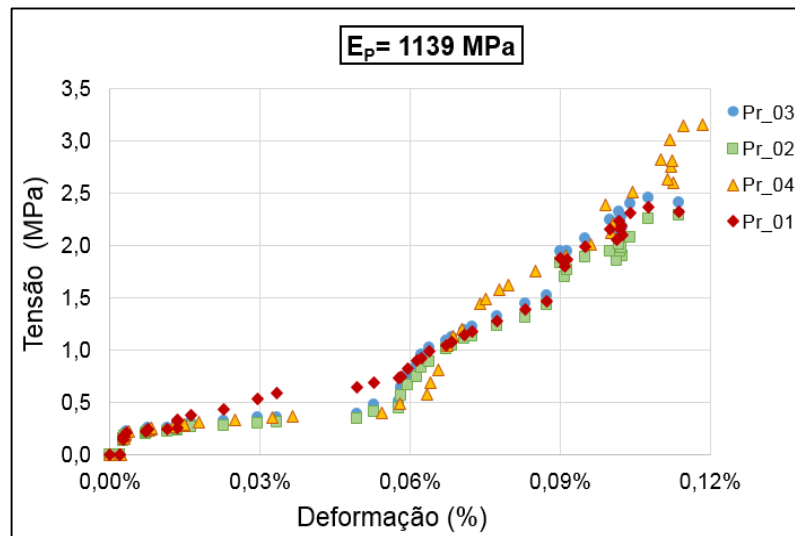


Figura 4.14 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 5MCA

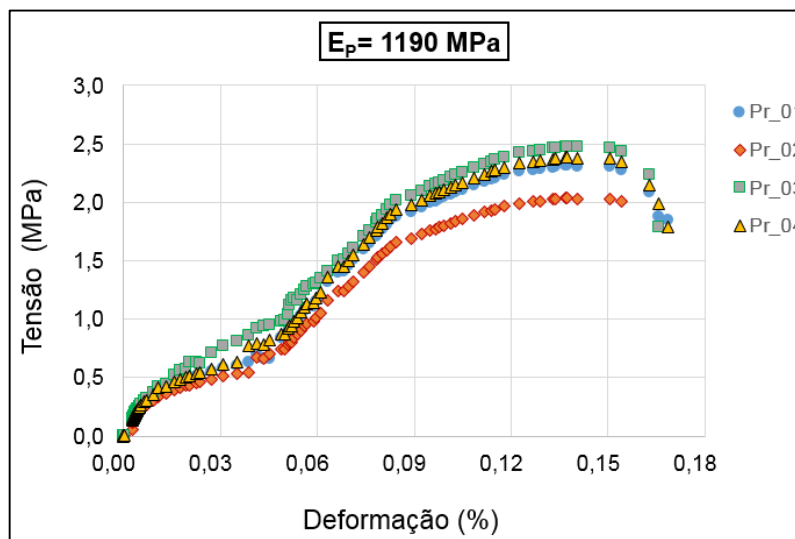


Figura 4.15 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 3ISA

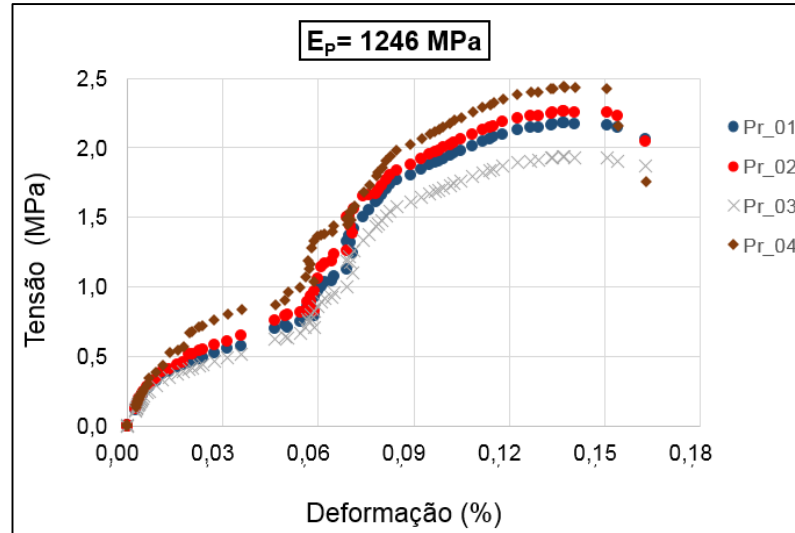


Figura 4.16 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 3ICA

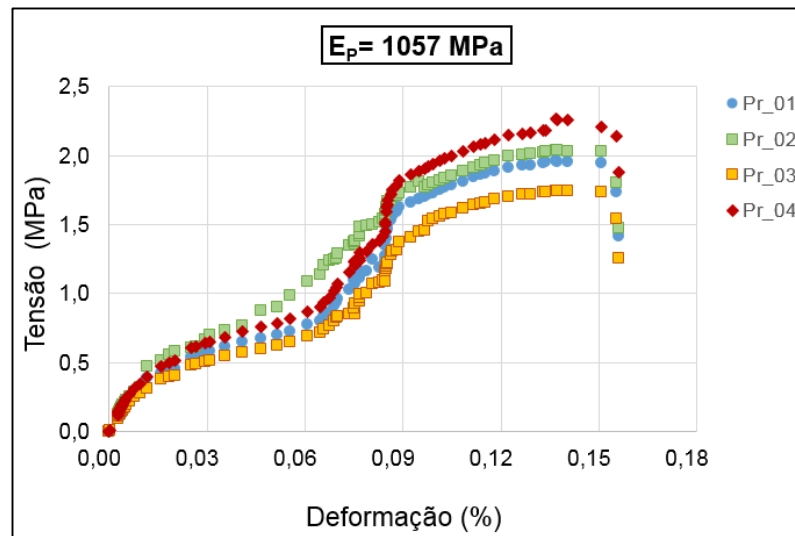


Figura 4.17 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 3MSA

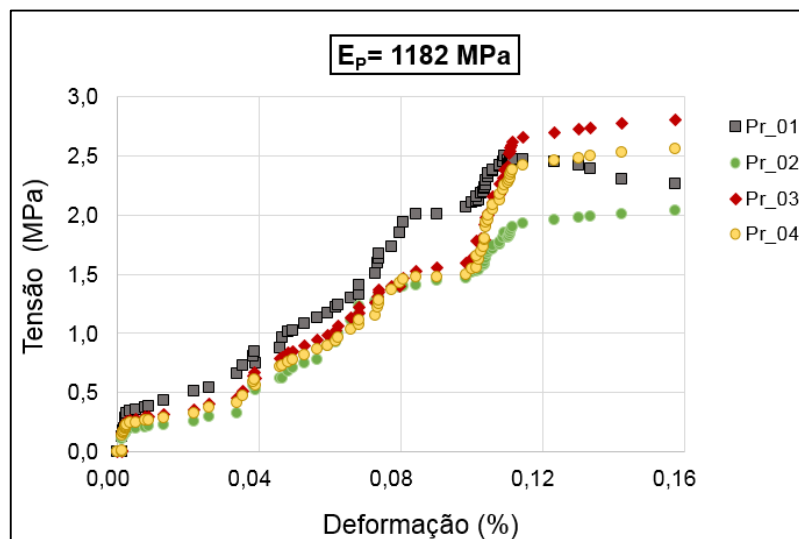


Figura 4.18 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - Prisma 3MCA

Tomando como módulo de deformação a tangente do ângulo formado pela reta secante aos Curvas nos pontos de 5% e 30% da tensão de ruptura, determinam-se os módulos de elasticidade longitudinal e transversal para os diversos prismas. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Valores do módulo de deformação - prismas

Modelo	Módulo Elasticidade	Média (GPa)	Desv. Padrão (GPa)	Coef. Variação (%)
5ISA	E	1,216	0,143	11,80
	G	0,522	0,671	12,85
5ICA	E	1,260	0,040	3,16
	G	0,540	0,032	5,87
5MSA	E	1,001	0,004	0,48
	G	0,429	0,020	4,73
5MCA	E	1,132	0,080	7,01
	G	0,486	0,031	6,44
3ISA	E	1,190	0,098	8,24
	G	0,514	0,054	10,42
3ICA	E	1,246	0,108	8,66
	G	0,540	0,060	11,06
3MSA	E	1,054	0,004	0,41
	G	0,458	0,020	4,33
3MCA	E	1,182	0,038	3,23
	G	0,506	0,015	2,92

Para comparação com valores encontrados na literatura e as referências das normas brasileira (ABNT NBR 15812-1, 2010), americanas (ACI 530/TMS 402/ASCE 5, 1999) e australiana (AS 3700, 2011), na Tabela 4.9 figuram os valores da relação entre a resistência característica à compressão e o módulo de deformação ($E = k \cdot f_{pk}$) dos prismas da presente pesquisa.

Tabela 4.9 – Relação entre módulo de deformação e resistência características - prismas

Modelo	E (MPa)	f_{pk} (MPa)	$k = \frac{E}{f_{pk}}$
5ISA	1216	1,81	672
5ICA	1260	1,89	667
5MSA	1001	1,55	646
5MCA	1132	1,78	636
3ISA	1190	1,91	623
3ICA	1246	1,99	626
3MSA	1054	1,76	599
3MCA	1182	1,96	603

Analisando todos os valores apresentados na Tabela 4.10, pode-se perceber que a razão (k) entre o módulo de deformação e resistência característica à compressão, para cada caso, resultaram valores entre 600, que é o valor definido

pela ABNT NBR 15812-1 (2010) e 700, valores definidos pelas normas ACI 530/TMS 402/ASCE 5 (1999) e AS 3700 (2011). Apenas o modelo de prisma 3MSA apresentou relação $k = 599$.

A partir dos dados da Tabela 4.10, determinaram-se os valores para coeficientes de Poisson dos prismas apresentados na Tabela 5.8, a seguir.

Tabela 4.10 – Valores do coeficiente de *Poisson* – prismas

Prisma	Média	Desv. Padrão	Coefficiente de Variação (%)
5ISA	0,166	0,021	12,78
5ICA	0,169	0,035	21,34
5MSA	0,168	0,050	29,76
5MCA	0,172	0,045	26,22
3ISA	0,161	0,043	26,49
3ICA	0,157	0,038	24,16
3MSA	0,151	0,047	31,24
3MCA	0,169	0,047	27,91

Evidencia-se que os valores obtidos são maiores que 0,15, valor definido na ABNT NBR 15812-1 (2010) para prismas de blocos cerâmicos. Outra observação que deve ser feita é quanto o coeficiente de variação que foi medido entre 12 e 31%, valor que indica alta variabilidade. No entanto, como pode ser encontrado em diversas pesquisas na literatura (Parsekian, 2002; Santos, 2008), a variabilidade de resultados para os BPQ apresenta-se menor que a taxa verificada para os blocos cerâmicos extrudados tradicionais.

4.4.3 – Fator de Eficiência - Prismas (η_p)

As Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam os valores dos fatores de eficiência prisma/bloco para cada modelo de prisma estudado nessa pesquisa.

Tabela 4.11 – Fator de Eficiência – Prisma/Bloco – resistência média

Elemento	f_{pm} (MPa)	f_{bm} (MPa)	Fator de Eficiência (η)
5ISA	2,13	4,13	0,52
5ICA	2,32		0,56
5ISA	2,21		0,54
5ICA	2,10		0,51
3ISA	2,21		0,54
3ICA	2,34		0,57
3MSA	2,08		0,50
3MCA	2,30		0,57

Tabela 4.12 – Fator de Eficiência – Prisma/Bloco – resistência característica

Elemento	f_{pk} (MPa)	f_{bk} (MPa)	Fator de Eficiência (η)
5ISA	1,81	3,62	0,50
5ICA	1,89		0,52
5MSA	1,55		0,43
5MCA	1,78		0,49
3ISA	1,91		0,53
3ICA	1,99		0,55
3MSA	1,76		0,49
3MCA	1,96		0,54

Para materiais cerâmicos, a eficiência prisma/bloco varia entre 0,30 e 0,60 (PARSEKIAN, 2012; SANTOS, 2008). Como apresentado nas Tabelas 4.12 e 4.13, todos os valores encontrados na presente pesquisa estão compatíveis com esse parâmetro, tanto para a resistência média quanto para a resistência característica.

Pedroti (2007) encontrou em sua pesquisa um valor de 0,71 para a eficiência dos seus blocos, com relação a resistência característica, tendo trabalhado com blocos de três fiadas inteiros, sem uso de argamassa, sendo que, na presente pesquisa, o valor encontrado foi de 0,53.

De acordo com Parsekian (2002), a menor resistência de um bloco implica, usualmente, numa correlação maior do que em blocos de maior resistência, conforme pode ser observado também para os BQP, comparando os resultados da presente pesquisa para os resultados de Pedroti (2007).

4.5 – PEQUENAS PAREDES

4.5.1 – Resistência à Compressão - Pequenas paredes (f_{ppk})

No Apêndice D registraram-se os resultados encontrados para resistência à compressão para cada tipo de pequena parede em separado. Esses resultados foram analisados pelo Critério de Chauvenet, sendo verificada a hipótese H_0 para ambos os casos (Apêndice F).

Nas Figura 5.17 (a) e (b) estão todos os valores obtidos para resistência à compressão característica (f_{ppk}) e resistência à compressão média (f_{ppm}) das pequenas paredes estudadas nessa pesquisa, indicando as variações a partir do erro padrão.

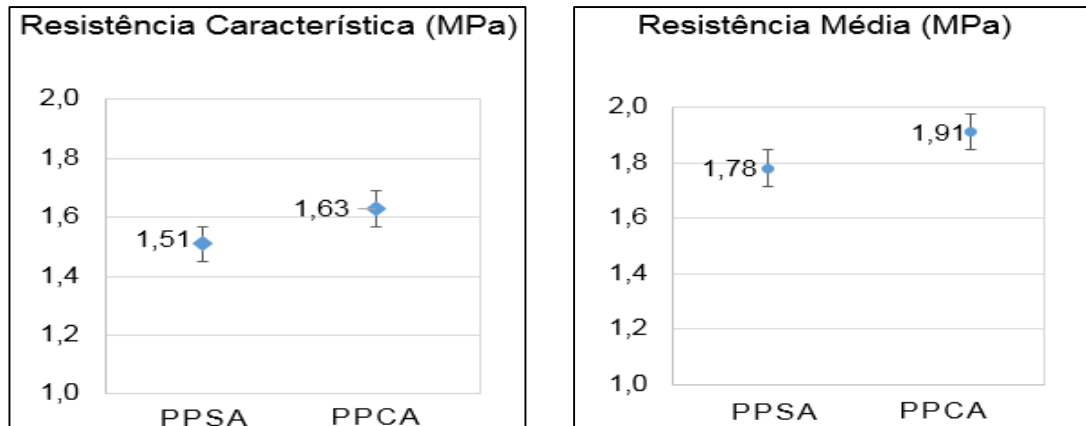


Figura 4.19 – Resistência à compressão - pequenas paredes

Conforme pode ser verificado na Figura 4.19, as pequenas paredes com argamassa apresentam melhor desempenho, sendo a resistência característica à compressão 7,95% maior que a resistência encontrada para as pequenas paredes sem argamassa.

4.5.2 – Módulo de Deformação - Pequenas Paredes (E_{pp})

Nas figuras 4.20 e 4.21 são apresentadas as curvas tensão-deformação longitudinais dos dois modelos de pequenas paredes utilizados nesse trabalho.

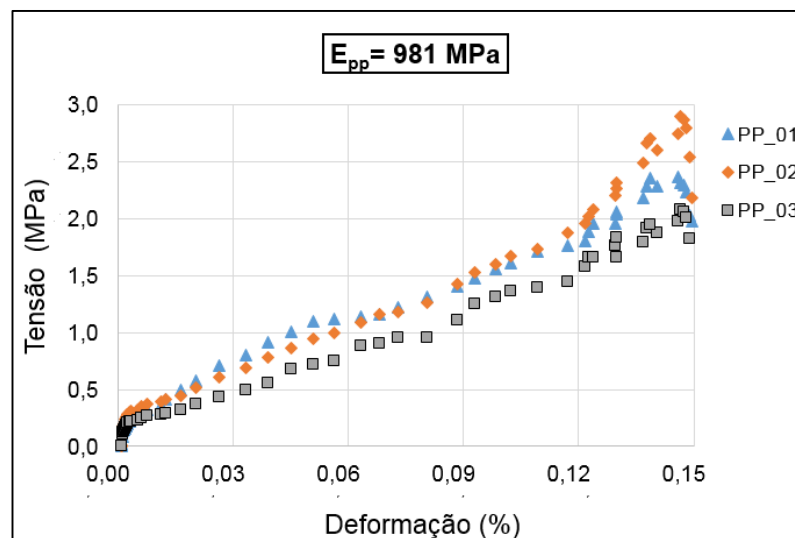


Figura 4.20 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - PPSA

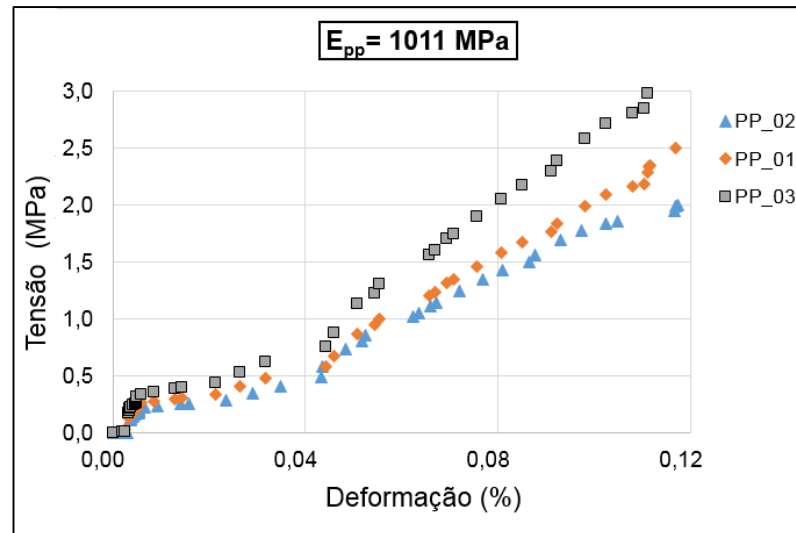


Figura 4.21 – Curva Tensão-Deformação Longitudinal - PPCA

Na Tabela 4.13 são apresentados os valores obtidos na determinação dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal das pequenas paredes.

Tabela 4.13 – Módulos das pequenas paredes

CP	Módulos	Média	Desv. Padrão	Coef. Variação (%)
PPSA	E (GPa)	0,981	0,086	8,71
	G (GPa)	0,420	0,033	7,84
	ν	0,167	0,044	26,29
PPCA	E (GPa)	1,119	0,164	13,76
	G (GPa)	0,512	0,078	15,20
	ν	0,165	0,030	15,92

Os valores obtidos para o coeficiente de *Poisson* são maiores que 0,15, valor definido na ABNT NBR 15812-1 (2010) para prismas de blocos cerâmicos, com coeficiente de variação em torno de 26% para o modelo PPSA, que é verificado em outras pesquisas envolvendo pequenas paredes.

Na Tabela 4.14 são apresentadas as correlações entre o módulo de deformação e a resistência característica à compressão encontrados para as pequenas paredes ($E = k \cdot f_{pk}$).

Tabela 4.14 – Relação entre módulo de deformação e resistência característica - Prismas

Modelo	E (MPa)	f_{ppk} (MPa)	$k = \frac{E}{f_{ppk}}$
PPSA	981	1,51	650
PPCA	1019	1,63	625

Deste modo, verificou-se que também para as pequenas paredes, essa relação entre o módulo de deformação longitudinal e a resistência característica à compressão se encontra no intervalo de 600 a 700.

4.5.3 – Fator de Eficiência – Pequenas Paredes - blocos

Os resultados para o fator de eficiência das pequenas paredes com relação aos blocos estão apresentados nas Tabelas 4.15 e 4.16.

Tabela 4.15 – Fator de eficiência pequenas paredes/blocos – Resistência média

CP	f_{ppm} (MPa)	f_{bm} (MPa)	Fator de Eficiência (η)
PPSA	1,78	4,13	0,43
PPCA	1,91		0,46

Tabela 4.16 – Fator de eficiência pequenas paredes/blocos – Resistência característica

CP	f_{ppk} (MPa)	f_{bk} (MPa)	Fator de Eficiência (η)
PPSA	1,51	3,62	0,42
PPCA	1,63		0,45

Conforme explicitado, os valores encontrados estão dentro do intervalo de 0,40 e 0,50, intervalo de variação indicado por outras pesquisas (Parsekian, 2012; Santos, 2008).

4.5.4 – Fator de Eficiência – Pequenas Paredes com relação aos Prismas

Os resultados para o fator de eficiência das pequenas paredes estão apresentados nas Tabelas 4.17 e 4.18.

Tabela 4.17 – Fator de Eficiência – Pequenas Paredes/Prismas – resistência média

Pequena Parede	f_{ppm} (MPa)	Prisma	f_{pm} (MPa)	Fator de eficiência (ν)
PPSA	1,51	5ISA	2,13	0,84
		5MSA	2,21	0,81
		3ISA	2,21	0,81
		3MSA	2,08	0,86
PPCA	1,63	5ICA	2,32	0,82
		5MCA	2,10	0,91
		3ICA	2,34	0,82
		3MCA	2,30	0,83

Tabela 4.18 – Fator de Eficiência – Pequenas Paredes/Prismas – resistência característica

Pequena Parede	f_{ppk} (MPa)	Prisma	f_{pk} (MPa)	Fator de eficiência (v)
PPSA	1,51	5ISA	1,81	0,83
		5MSA	1,55	0,97
		3ISA	1,91	0,79
		3MSA	1,76	0,86
PPCA	1,63	5ICA	1,89	0,86
		5MCA	1,78	0,91
		3ICA	1,99	0,82
		3MCA	1,96	0,83

Os valores encontrados para ambas as situações se situam no intervalo de 0,80 e 1,00, o que significa que há grande semelhança de comportamento entre os prismas estudados, em particular os que utilizaram meio bloco e as pequenas paredes modeladas para a presente pesquisa. Essa similaridade pode ser explicada pela escolha das pequenas paredes de cinco fiadas, que foi limitada por questões de disponibilidade de equipamentos para ensaios no LECIV – UENF.

4.6 – RESISTÊNCIA DA ALVENARIA

Conforme já mencionado, a ABNT NBR 15812-1 (2010) propõe que a resistência característica à compressão simples da alvenaria (f_k) deve ser determinada com base no ensaio de paredes (ABNT NBR 8949, 1985) ou ser estimada como 70% da resistência característica de compressão simples de prismas (f_{pk}), ou 85% da pequena parede (f_{ppk}).

Considerando o exposto pela referida norma e fazendo uso dos resultados obtidos em todos os corpos-de-prova, apresentam-se na Tabela 4.19 os valores estimados para a resistência da alvenaria de BPQ à compressão.

Tabela 4.19 – Resistência característica da alvenaria

Elemento	f_{ek} (MPa)	f_k (MPa)
5ISA	1,81	1,27
5ICA	1,89	1,32
5MSA	1,55	1,09
5MCA	1,78	1,25
3ISA	1,91	1,34
3ICA	1,99	1,39
3MSA	1,76	1,23
3MCA	1,96	1,37
PPSA	1,51	1,28
PPCA	1,63	1,39

Conforme pode ser observado dos resultados da Tabela 4.19, os prismas 5ISA são os que apresentam resultados que mais se aproximam dos obtidos para as pequenas paredes sem argamassa e os resultados em prismas 3MCA são exatamente iguais aos obtidos para as pequenas paredes com argamassa.

4.7 – ARGAMASSAS

A Tabela 4.20 contém as médias dos valores de absorção de água, resistência à tração na flexão e resistência à compressão para a argamassa empregada na pesquisa. Os resultados completos estão apresentados no Apêndice E.

Tabela 4.20 – Resultados para ensaios das argamassas

Ensaio	Média	Desv. Padrão	Coef. Variação (%)
Absorção (%)	18,76	1,71	9,12
Resistência à Tração na Flexão (MPa)	1,18	0,30	25,42
Resistência à Compressão - f_c (MPa)	2,82	0,46	16,19

Conforme pode ser observado, a resistência à tração medida foi de 41,8% da resistência à compressão, valor este pouco maior do que o encontrado em outras pesquisas, conforme indicado Santos (2008), que fica na faixa entre 30% e 40%.

A absorção de água apresentou valor aceitável para argamassa de assentamento, uma vez que espera-se que não ultrapasse o limite de 22%. Devido aos valores encontrados para a resistência à tração na flexão e para a resistência à compressão, segundo classificação da ABNT NBR 13281 (2005), a argamassa pode ser definida como do tipo R1 - P1.

Foram ensaiados 12 corpos-de-prova de argamassa para determinar o módulo de deformação longitudinal, sendo rejeitados os valores de 3 amostras pelo critério de Chauvenet (Apêndice F). No gráfico da Figura 4.22, são representadas as curvas tensão deformação para os nove corpos de prova não rejeitados, sendo os resultados apresentados no Apêndice E.

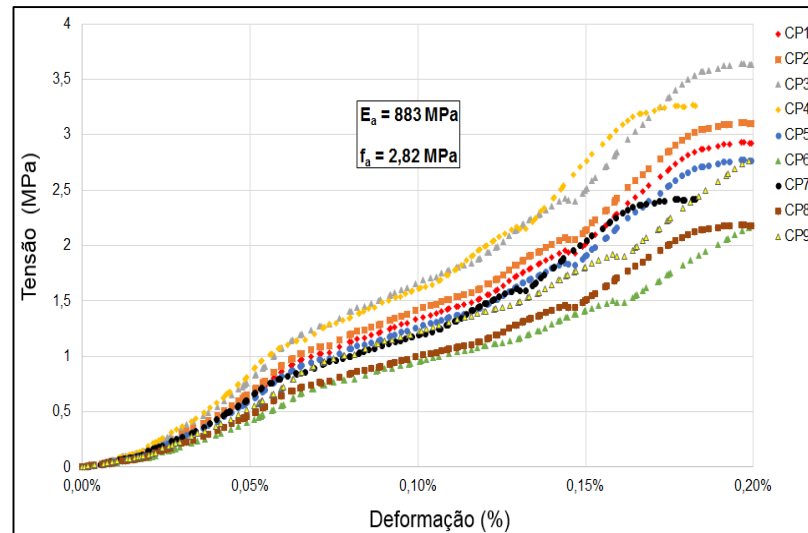


Figura 4.22 – Curvas Tensão-Deformação – Argamassa

Na Tabela 4.21 são apresentados os valores da média, desvio padrão e coeficiente de variação medidos na análise de módulo de deformação longitudinal da argamassa.

Tabela 4.21 – Módulo de deformação longitudinal - Argamassas

Módulo de Deformação	Média	Desv. Padrão	Coef. Variação (%)
E_a (MPa)	882,90	17,32	1,96

Verificou-se que a relação resistência média à compressão e módulo de deformação longitudinal médio, tem-se que $E_a = 313f_a$, sendo um pouco maior que o valor verificado por Santos (2008) em sua pesquisa, que situou-se em torno de 200. Isso se dá, possivelmente, pela maior capacidade elástica conferida pela adição de cola PVA à amostra, e a menor resistência mecânica que ela também confere à argamassa.

4.8 – MODOS DE RUPTURA

Foi realizada a análise do comportamento de blocos, prismas e pequenas paredes de BPQ quando submetidos a cargas de compressão, quanto ao modelo de ruptura. Para tanto, são apresentadas algumas figuras com a devida descrição da ruptura desses elementos.

De forma geral, observa-se que não há grande diferença entre as formas de ruptura dos prismas e pequenas paredes com e sem argamassa. Isto pode estar

associado ao fato de a argamassa ser fraca em termos de resistência (aproximadamente 30% da resistência de bloco para área líquida), não gerando maiores dificuldades na distribuição das tensões dentro dos elementos.

Na Figura 4.23 são apresentadas fotos mostrando a sequência de ruptura de um bloco.

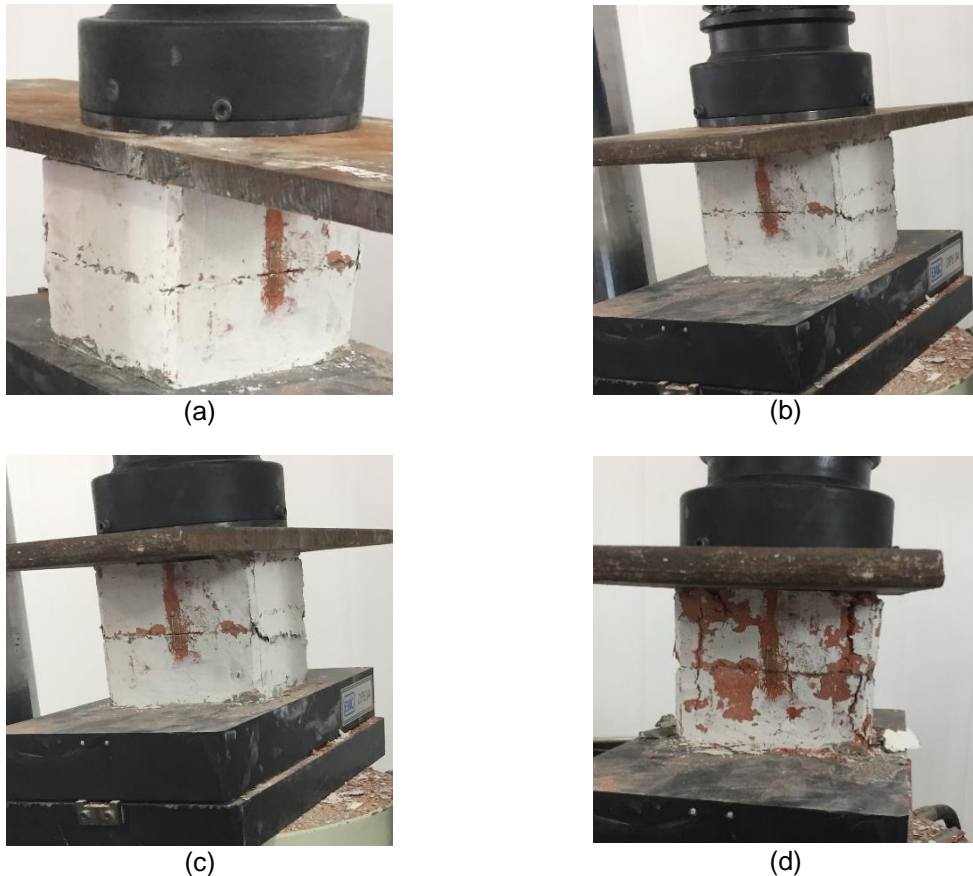


Figura 4.23 – Ruptura de bloco

As rupturas dos blocos cerâmicos demonstraram-se frágeis, caracterizando-se por estilhaços na forma de pequenas placas.

Conforme pode ser observado na evolução das Figuras 4.23 (a), (b), (c) e (d), a ruptura dos blocos se iniciou por fissurações nas bordas. Pode-se concluir dessas imagens que a ruptura se deu por tração horizontal com a formação de fissuras nas laterais. No Apêndice G são apresentadas outras imagens ilustrando a ruptura de blocos nos ensaios realizados, onde são indicados, principalmente, essa fissuração lateral e a formação de um tronco de cone após a ruptura

Constam das 4.24 (a), (b), (c) e (d) as imagens que demonstram a sequência de ruptura de um prisma de três fiadas.

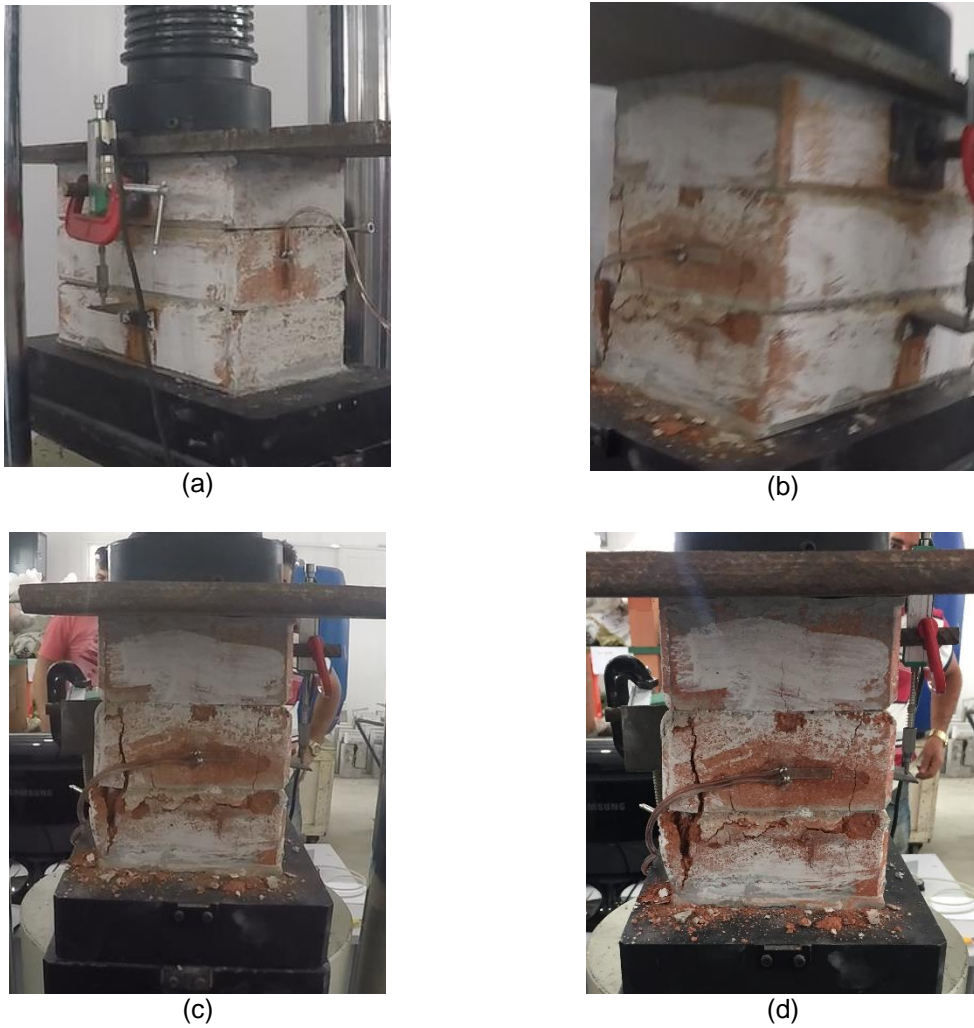


Figura 4.24 – Ruptura de prisma de 3 fiadas (3ICA)

O modelo escolhido para ilustrar a forma de ruptura foi de um prisma de três fiadas inteiro com uso de argamassa nas juntas horizontais, porém isso nada diferiu do que ocorreu para os prismas inteiros sem argamassa.

Assim como ocorreu nos blocos, a fissuração começou pelas laterais, conforme pode ser observado na Figura 4.24(b), e a ruptura dos prismas se deu por tração horizontal com a formação de fissuras nas laterais e esmagamento do bloco inferior conforme Figuras 4.24(c) e (d). Outras fotos ilustrando os modos de ruptura são apresentados no Apêndice G.

Nas Figuras 4.25 (a) a (d), apresenta-se a sequência de ruptura de um prisma de cinco fiadas sem argamassa.

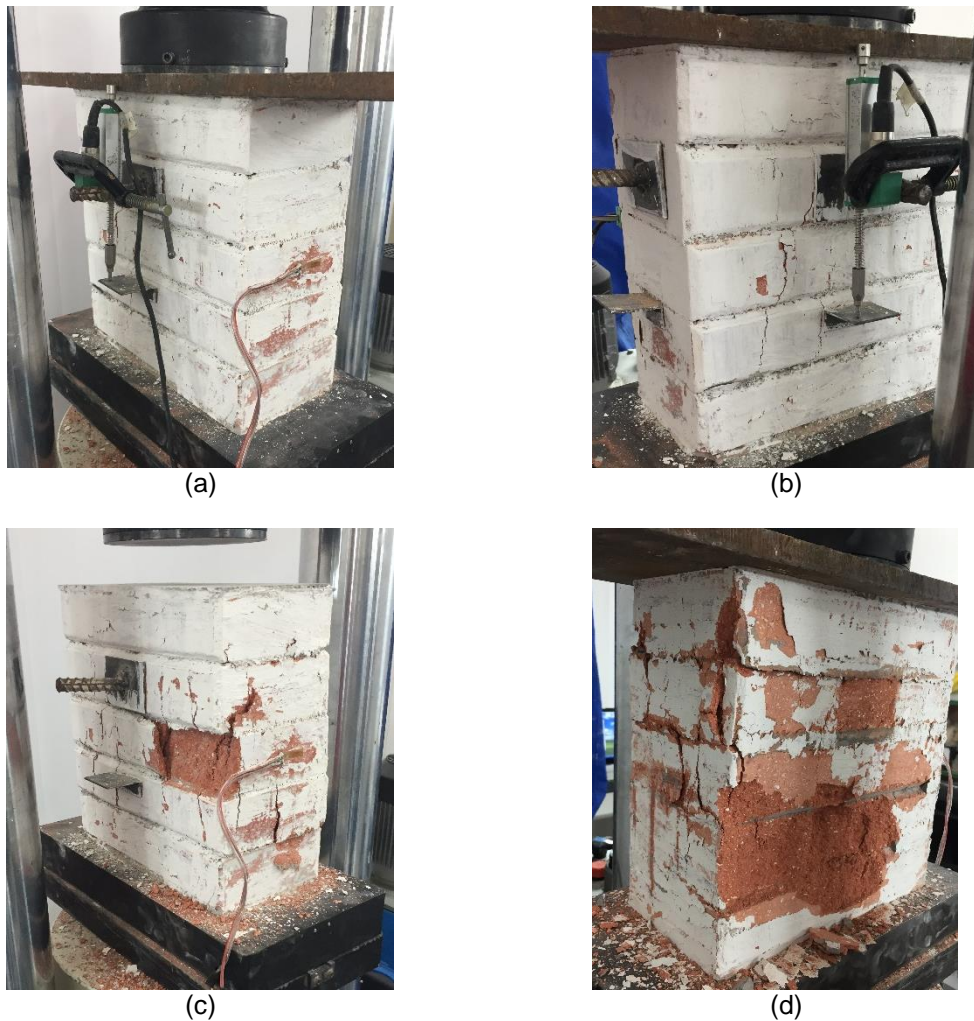


Figura 4.25 – Ruptura de Prisma de 5 fiadas (5ISA)

Da Figura 4.25(b) pode-se verificar que os blocos mais centrais do prisma (2ª e 3ª fiada) começaram a fissurar, indicando uma tendência a ruptura dos blocos, porém, sem evoluir para um total esmagamento, apenas ocorrendo uma fissuração na superfície dos blocos (inclusive com descolamento de alguns instrumentos de medição de deslocamento e deformação).

Pode-se verificar ainda nas imagens (c) e (d) da Figura 4.25 que a ruptura do prisma de 5 fiadas também se deu por tração horizontal nos blocos com a formação de fissuras nas laterais e esmagamento dos blocos centrais.

O tipo de pequena parede estudado na presente pesquisa indicou uma forma de ruptura muito similar ao observado para prismas de 5 fiadas. Para ratificar essa afirmativa, na Figura 4.26 é apresentada uma foto da vista lateral de uma pequena parede com sua ruptura.



Figura 4.26 – Ruptura de pequena parede (PPSA)

As pequenas paredes também apresentaram fissurações laterais, porém conforme pode ser observado na Figura 4.26, a ruptura se deu tanto por tração horizontal com a formação de fissura nas laterais, como por esmagamento dos blocos centrais. Observou-se também que algumas fissuras se deram na parte central do bloco, culminando na separação deste ao meio.

4.9 – COMPARAÇÕES DE VALORES ENTRE BLOCOS E ARGAMASSA

Na Figura 4.27, são demonstrados os valores dos módulos de elasticidade e das resistências à compressão de blocos (área líquida e área bruta) e da argamassa.

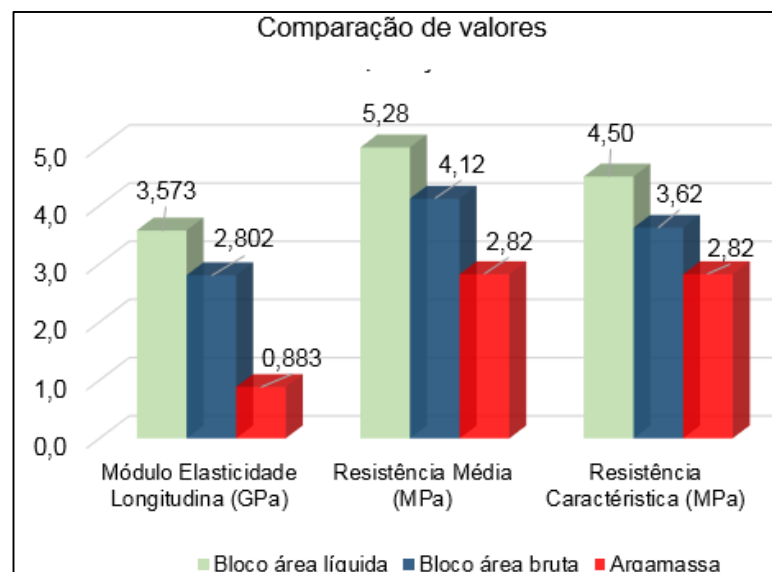


Figura 4.27 – Comparação entre blocos e argamassa

O Módulo de deformação da argamassa tem valor igual a 24,7% do módulo com relação à área líquida dos blocos, o que está muito abaixo do valor de 70% recomendado pelas normas de alvenaria estrutural.

Quanto à resistência à compressão, a resistência das argamassas é de 53,4% da resistência característica dos blocos com relação à área líquida, e de 68,3% com relação à área bruta, que também mostra-se inferior ao prescrito pelas normas brasileiras de alvenaria estrutural.

4.10 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

4.10.1 – Comparação de Prismas e Pequenas Paredes com e sem Argamassa

Nas Figuras 4.28 e 4.29, apresentam-se as relações entre os valores dos módulos de elasticidade longitudinal e entre os valores de resistência característica de prismas e pequenas paredes com relação ao emprego de argamassa nas juntas.

Como pode ser percebido tanto para os prismas como para as pequenas paredes verifica-se um pequeno aumento dos módulos de deformação e das resistências características para os casos com argamassa em comparação aos casos em que se considerou apenas o encaixe (junta seca).

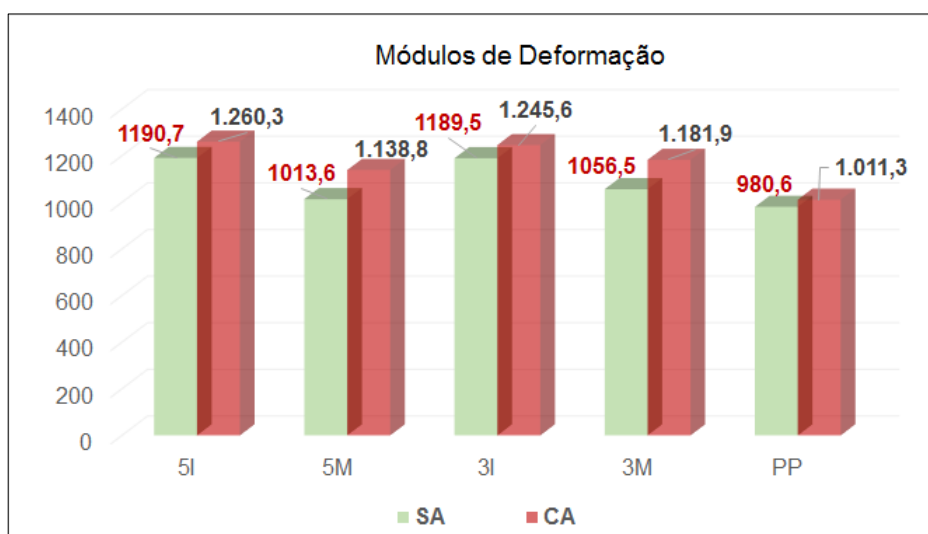


Figura 4.28 – Comparação entre módulos de deformação longitudinal de prismas e pequenas paredes – com e sem uso de argamassa

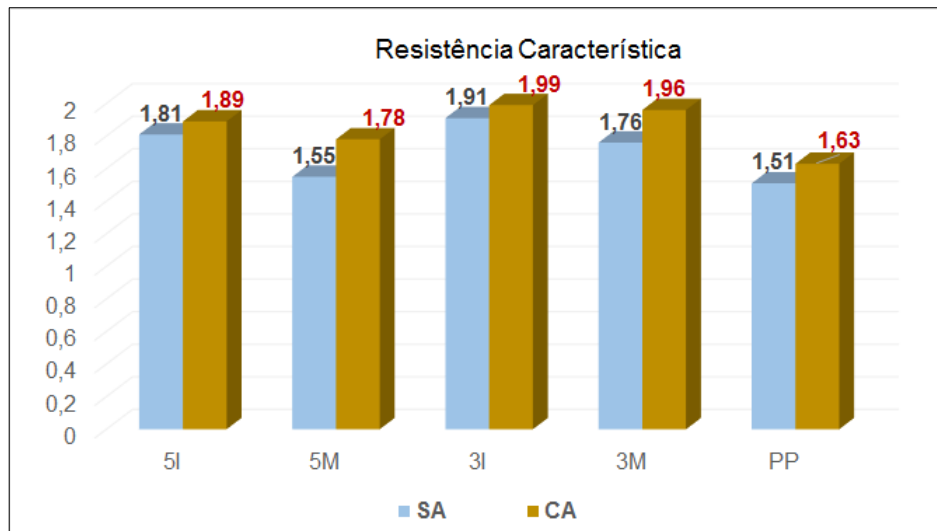


Figura 4.29 – Comparação entre as resistências características de prismas e pequenas paredes – com e sem uso de argamassa

Objetivando avaliar a existência de diferenças significativas entre os prismas e pequenas paredes com argamassa e sem argamassas, utilizou-se o teste F para análise das variâncias entre as amostras e, com o resultado, aplicou-se o teste t para verificar se as médias diferiram ou não.

No teste F foi considerada como hipótese nula a afirmativa de que as variâncias entre as amostras não diferem. No Teste t , a hipótese nula considerou que as médias entre as amostras não diferem. Em todas as análises foi adotado um nível de significância de 5%.

Para os prismas de cinco fiadas formados apenas com blocos inteiros, denominados 5I, os resultados encontrados para o teste F estão apresentados na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 – Resultados teste F - prismas 5I

Tratamento	Observações						Média	Variância	n	F_{CAL}	$F_{5\%}(5,5)$
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6					
AS	2,01	2,28	2,01	2,05	2,13	2,33	2,14	0,02	6	6,67	5,05
C.A	2,15	2,23	2,91	2,08	1,96	2,60	2,32	0,13	6		

Como pode ser facilmente observado, F_{CAL} é maior que $F_{5\%}(5,5)$, portanto rejeita-se a hipótese H_0 . Em seguida, foi realizado o teste t , sendo obtidos os valores de $t_{CAL} = 1,182$ e $t_{5\%}(7) = 1,895$, portanto a hipótese H_0 não é rejeitada.

Desta forma, embora haja dispersão nas amostras, caso comum em estudo com alvenaria, o ganho de resistência para os prismas 5I utilizando argamassa

pode ser considerado desprezível estatisticamente a um nível de 5% com relação ao uso da junta seca.

Para os prismas de três fiadas formados apenas com blocos inteiros, denominados 5I, os resultados encontrados para o teste F estão apresentados na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Resultados teste F - prismas 3I

Tratamento	Observações						Média	Variância	n	F _{CAL}	F _{5%} (4,5)
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6					
AS	2,27	2,22	2,18	2,18	2,21	-	2,21	0,00	5	6,64	6,26
CA	2,46	2,44	2,34	2,30	2,18	2,30	2,34	0,01	6		

Como pode ser facilmente observado, F_{CAL} é maior que F_{5%}(4,5), portanto rejeita-se a hipótese H₀. Para o teste t, obtendo-se t_{CAL} = 2,78 e t_{5%}(7) = 1,895, portanto a hipótese H₀ é rejeitada. Assim, pode-se dizer que há um certo ganho de resistência para os prismas 3I utilizando argamassa a um nível de 5% com relação ao uso da junta seca.

Para os prismas de cinco fiadas formados com bloco inteiro e meio bloco, denominados 5M, os resultados encontrados para o teste F estão apresentados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Resultados teste F - prismas 5M

Tratamento	Observações						Média	Variância	n	F _{CAL}	F _{5%} (5,5)
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6					
AS	2,49	2,33	1,78	1,74	2,46	2,44	2,21	0,12	6	9,79	5,05
CA	2,26	2,01	2,10	2,13	1,94	2,15	2,10	0,01	6		

F_{CAL} é maior que F_{5%}(5,5) para os prismas 5M, portanto rejeita-se a hipótese H₀ do Teste F.

Na aplicação do teste t obteve-se t_{CAL} = 0,721 e t_{5%}(6) = 1,943, portanto a hipótese H₀ não é rejeitada. Assim sendo, o ganho de resistência para os prismas 5M utilizando argamassa é desprezível estatisticamente a um nível de 5% com relação ao uso apenas de encaixe.

Para os prismas de três fiadas formados com bloco inteiro e meio bloco, denominados 3M, os resultados encontrados para o teste F estão apresentados na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Resultados teste F - prismas 3M

Tratamento	Observações						Média	Variância	n	F _{CAL}	F _{5%} (5,5)
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6					
SA	2,27	2,02	1,95	2,01	2,18	2,02	2,08	0,015	6	4,01	5,05
CA	2,34	2,22	2,26	2,38	2,28	2,36	2,30	0,004	6		

F_{CAL} é menor que F_{5%}(5,5) para os prismas 5M, portanto a hipótese H₀ do teste F não é rejeitada.

Também foi realizada a análise de variância pelo teste F para pequenas paredes, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Resultados teste F - pequenas paredes

Tratamento	Observações				Média	Variância	n	F _{CAL}	F _{5%} (3,3)
	CP1	CP2	CP3	CP4					
SA	1,88	1,79	1,61	1,83	1,78	0,01	4	2,65	9,28
CA	1,63	1,96	2,02	2,04	1,91	0,04	4		

Como F_{CAL} é menor que F_{5%}(5,5) não se rejeita a hipótese H₀ do Teste F para as pequenas paredes.

Na aplicação do teste *t* obteve-se $t_{CAL} = 1,202$ e $t_{5\%}(5) = 2,015$, portanto a hipótese H₀ não é rejeitada. Desta forma, para as pequenas paredes não foi encontrado ganho estatístico a um nível de 5% de resistência do modelo com junta argamassada para o modelo com apenas junta seca.

Esse não ganho de resistência verificado nos casos 5I, 5M, 3M e PP pode estar associado ao uso de um mínimo possível de argamassa, devido ao tipo de encaixe dos blocos, para não inviabilizar essa característica vantajosa dos mesmos, ou ainda pela baixa resistência da argamassa empregada, de cerca de 30% da resistência média dos blocos com relação a área líquida. Apenas o caso 3I apresentou um certo ganho, que pode estar associado a variabilidade dos ensaios com cerâmicos ou a algum erro de ensaio.

Drysdale *et al.* (1994) ensaiaram prismas de blocos cerâmicos e concluíram que a correlação entre baixa resistência à compressão de argamassa e baixa resistência à compressão de prismas fica melhor evidenciada em casos onde são empregados blocos com resistência elevada.

A norma britânica BSI 5628-1 (1992), define que não há significativa modificação na resistência de painéis de parede com blocos de resistência em torno

de 10 MPa variando-se o traço da argamassa. Contudo, para valores de resistência de bloco em torno de 20 MPa essa influência já é bastante significativa.

Destarte, os resultados dos ensaios da presente pesquisa mostraram que pela baixa resistência dos blocos ($f_{bk} = 3,62 \text{ MPa}$), a colaboração da argamassa será menor, podendo assim ser desconsiderada a necessidade de testar outros traços, uma vez que há tendência de que as falhas na alvenaria se deem nos blocos e não nas juntas.

4.10.2 – Comparação de Prismas com e sem Meio Bloco

As comparações entre os valores dos módulos de deformação longitudinal e dos valores das resistências características dos prismas formados apenas com blocos inteiros (I) e os formados com uso de meio bloco (M) estão apresentadas nas figuras 4.30 e 4.31.

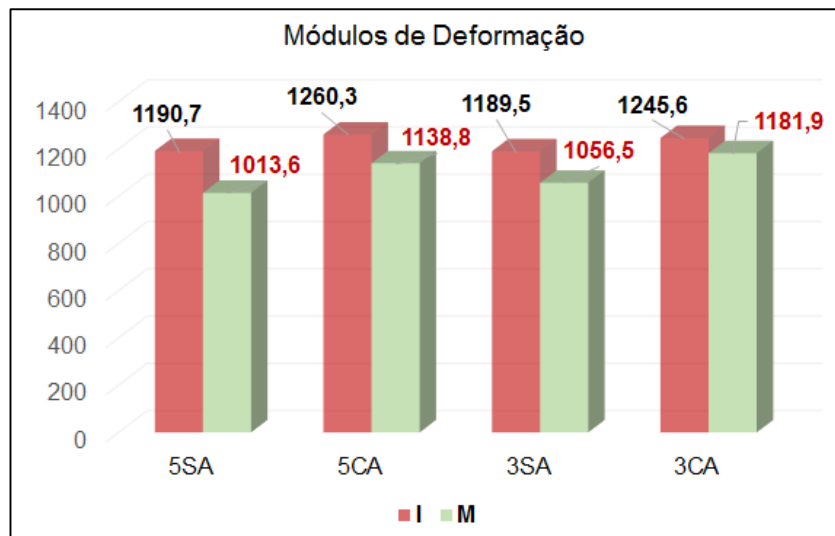


Figura 4.30 – Comparação entre módulos de deformação longitudinal de prismas sem uso de meio bloco (I) ou com emprego de meio bloco (M)

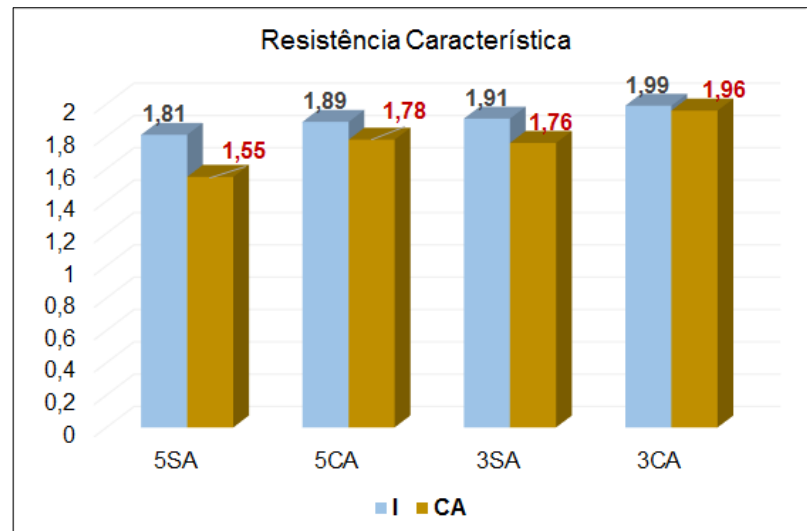


Figura 4.31 – Comparação entre resistências características de prismas sem meio bloco (I) e com meio bloco (M)

Como pode ser percebido para todos os casos o emprego apenas de blocos inteiros, formato empregado na maioria das pesquisas e que é indicado nas normas de ensaio, implica num valor pouco superior aos que usam blocos de meio, ou meio bloco, tanto para os módulos de deformação quanto para as resistências características. Essa diferença entre os valores também foi avaliada por meio de análise de variância (ANOVA).

Para os prismas de cinco fiadas sem argamassa, denominados 5SA, os resultados encontrados para o teste F estão apresentados na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 – Resultados teste F - prismas 5SA

Tratamento	Observações						Média	Variância	n	F_{CAL}	$F_{5\%}(5,5)$
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6					
I	2,01	2,28	2,01	2,05	2,13	2,33	2,14	0,02	6	6,29	5,05
M	2,49	2,33	1,78	1,74	2,46	2,44	2,21	0,12	6		

F_{CAL} é maior que $F_{5\%}(5,5)$, assim rejeita-se a hipótese H_0 . Para o teste t , obteve-se $t_{CAL} = 0,465$ e $t_{5\%}(7) = 1,895$, portanto a hipótese H_0 não é rejeitada, sendo consideradas as resistências estatisticamente iguais para os casos sem e com uso de meio bloco.

Desta forma, embora haja dispersão nas amostras, caso comum em estudo com alvenaria, a diferença de resistência para os prismas 5SA utilizando apenas blocos inteiros e meio bloco é desprezível estatisticamente a um nível de 5%.

Para os prismas de cinco fiadas com argamassa 5CA, os resultados encontrados para o teste F estão apresentados na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 – Resultados teste F - prismas 5CA

Tratamento	Observações						Média	Variância	n	F _{CAL}	F5% (4,5)
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6					
I	2,15	2,23	2,91	2,08	1,96	2,60	2,32	0,13	5	10,38	6,26
M	2,26	2,01	2,10	2,13	1,94	2,15	2,10	0,01	6		

Como pode ser observado, F_{CAL} é maior que $F_{5\%}(4,5)$, portanto rejeita-se a hipótese H_0 . Para o teste t , obtendo-se $t_{CAL} = 1,448$ e $t_{5\%}(6) = 1,943$, portanto a hipótese H_0 não é rejeitada, sendo consideradas as resistências estatisticamente iguais.

Para os prismas de três fiadas sem argamassa, denominados 3SA, os resultados encontrados para o teste F estão apresentados na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Resultados Teste F - prismas 3SA

Tratamento	Observações						Média	Variância	n	F _{CAL}	F5% (5,5)
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6					
I	2,27	2,22	2,18	2,18	2,21	-	2,21	0,0016	6	9,63	5,05
M	2,27	2,02	1,95	2,01	2,18	2,02	2,08	0,0151	6		

Como F_{CAL} é maior que $F_{5\%}(5,5)$, rejeita-se a hipótese H_0 do teste F.

No teste t obteve-se $t_{CAL} = 2,534$ e $t_{5\%}(7) = 1,895$, portanto a hipótese H_0 é rejeitada, podendo-se afirmar que para prismas com três fiadas sem argamassa há diferença estatística a nível de 95% de confiabilidade entre prismas com uso de meio bloco para prismas sem uso de meio bloco.

No caso dos modelos de prismas com três fiadas e com emprego de argamassa nas juntas, denominados 3CA, os resultados para o Teste F encontram-se na Tabela 4.30.

Tabela 4.30 – Resultados teste F - prismas 3CA

Tratamento	Observações						Média	Variância	n	F _{CAL}	F5% (5,5)
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6					
I	2,46	2,44	2,34	2,30	2,18	2,30	2,34	0,010	6	4,01	5,05
M	2,34	2,22	2,26	2,38	2,28	2,36	2,30	0,004	6		

F_{CAL} é menor que $F_{5\%}(5,5)$, portanto a hipótese H_0 do Teste F não é rejeitada para o modelo de prisma 3CA. Sendo assim, não há diferença estatística entre os resultados verificados na presente pesquisa para tais prismas.

Sendo assim, foram escolhidos apenas prismas com blocos inteiros e sem uso de argamassa nas juntas para a simulação apresentada no capítulo 5.

5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Neste capítulo, são mostradas as hipóteses básicas, as simplificações e os resultados do programa computacional SOLIDWORKS (versão 16.0) para a simulação numérica do ensaio de compressão de blocos, prismas, pequenas paredes e paredes.

A partir dos resultados experimentais apresentados no Capítulo 4, efetuou-se o modelamento dos ensaios de compressão conforme valores resumidos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas utilizadas na micromodelagem.

Elemento	Resistência (MPa)	Módulo de Deformação (GPa)	Coefficiente de <i>Poison</i>	Massa específica (g/cm ³)
Bloco	3,62	2,801	0,182	1,21

Na Tabela 5.2 são indicados, de forma resumida, os carregamentos e as restrições empregadas na simulação numérica utilizando o software Solidworks 16.0.

Tabela 5.2 – Resumo de restrições e carregamentos

Tipo	Restrição	Carga utilizada (topo)
Blocos	Topo – x e z Base – x, y e z	80 kN
Primas 3 Fiadas		99 kN
Primas 5 Fiadas		95 kN
Pequenas Paredes		140 kN
Parede		280 kN

Conforme definido no Capítulo 3, foi simulada uma parede de 2,30 m de comprimento e 2,80 m de altura para a definição verificação do modelo estudado para pequenas paredes e proposição de um modelo de simulação de paredes de alvenaria estrutural em BPQ com uso do software Solidworks.

5.1 – HIPÓTESES BÁSICAS E LIMITAÇÕES DO MODELO

Um modelo matemático é uma representação simplificada de um fenômeno físico complexo, escolhido de forma a representar este da forma mais confiável possível, fornecendo assim resultados dentro de uma precisão considerada aceitável.

A primeira e principal hipótese que se faz é que o modelo adotado nesta tese é determinístico, ou seja, as propriedades mecânicas dos materiais adotadas foram as propriedades médias medidas nos ensaios, sem levar em conta sua variabilidade real.

A segunda hipótese é de pequenos deslocamentos e deformações, que fornece resultados satisfatórios para os tipos de materiais e de condições de cargas deste trabalho. Considerou-se o material e a estrutura como apresentando comportamento linear elástico, uma vez que o modelo apresentou resultados satisfatórios.

A hipótese de ruptura utilizada na simulação foi a teoria da Tensão Normal Máxima de 0,13 MPa (3,0% da resistência à compressão), denominado critério de Rankine, que considera que um elemento frágil falha quanto à tensão principal máxima no material atinge a tensão normal máxima suportante.

Em todos os casos foi determinado o Fator de Segurança (FS) para avaliar a segurança do projeto simulado com base no critério de falha de Rankine. A norma brasileira utiliza como fator de segurança para alvenaria o valor 2,0 (ABNT NBR 15812-1, 2010).

5.2 – CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA SOLIDWORKS 16.0

O programa computacional SolidWorks, na versão 16.0, foi empregado na modelagem e simulação desta pesquisa.

A etapa de geração de malha é essencial para garantir resultados que simulem de forma mais perfeita a situação real. A qualidade da malha exerce um papel importante na precisão dos resultados. Na presente pesquisa, optou-se por utilizar malhas sólidas de alta qualidade geradas automaticamente pelo solver que cria elementos sólidos tetraédricos 3D para todos os componentes sólidos das peças.

SolidWorks Simulation apresenta quatro tipos de solvers: Auto, FFEPlus, Direct Sparse e Large Problem Direct Sparse. No presente trabalho optou-se por utilizar o FFEPlus, que é um solver que usa o método de integração implícita. Cada iteração da solução é assumida, os erros são avaliados e a iteração continua até que os erros sejam pequenos o suficiente.

O software permite a simulação considerando análise linear ou não linear, estática ou dinâmica, de fadiga, térmica, etc. No presente trabalho, foi realizado o estudo considerando o comportamento linear, uma vez que a simplificação do problema para esse tipo de análise gerou resultados com cerca de 90% de semelhança ao verificado na análise experimental.

5.3 - BLOCOS

Na modelagem dos blocos o gerador automático do solver empregou 84.113 nós e 56.128 elementos, sendo a malha de 4 pontos Jacobianos, com elementos de tamanho de 6,46 mm.

Os resultados obtidos para deslocamento, deformações e distribuição de tensões na direção y (vertical) e tensão principal 3 para a simulação de blocos cortados ao meio, à semelhança do que foi realizado em laboratório, são apresentados nas Figuras 5.1 (a) a (d).

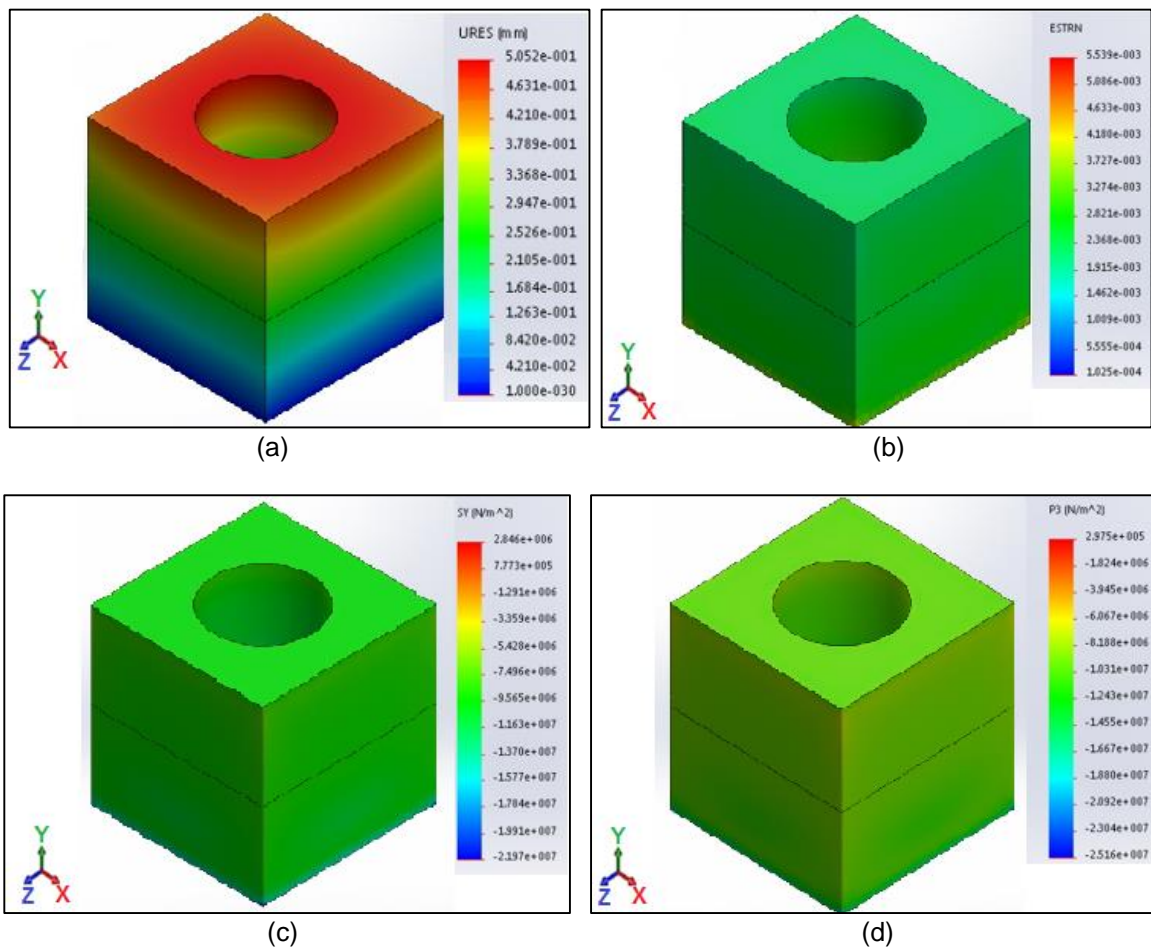


Figura 5.1 – Simulação de blocos: (a) deslocamentos; (b) deformações; (c) tensões em Y; (d) tensão principal

O fator de segurança verificado na simulação foi de 1,88. Sendo assim, esse valor indica um valor inferior ao requerido pela norma brasileira.

Na Figura 5.1 (a) tem-se que na parte inferior do bloco, o deslocamento é nulo, já que o plano da base foi restringido para deformação em y . Na parte superior, o deslocamento é máximo, sendo equivalente a 91% do valor médio verificado em laboratório.

Na Figura 5.1 (b), são apresentados os resultados para a deformação na direção y , cujo valor máximo obtido na simulação é de 0,0015 mm/mm, que é cerca de 6% menor que o valor médio verificado nos ensaios em laboratório.

Nas Figura 5.1 (c) e (d) as distribuições de tensões na direção Y e principal são apresentadas. Verifica-se que as quinas são as regiões mais solicitadas, estando isso de acordo com o que se verificou nos ensaios experimentais. Conforme pode-se observar, a ruptura dos blocos à compressão simples se inicia pelo lasqueamento das laterais dos blocos. A tensão de ruptura foi de aproximadamente 3,70 MPa, que é cerca de 90% da tensão média encontrada nos ensaios.

Embora na modelagem tenha sido adotado um critério de comportamento linear para os blocos, verifica-se uma adequação do modelo, com diferenças em torno de 10% apenas do verificado nos ensaios. Com isso, tem-se uma indicação de que o modelo atende a uma análise real de problemas de alvenaria estrutural com BPQ.

5.4 - PRISMAS COM TRÊS FIADAS

Foram simulados prismas com três fiadas sem argamassa, tanto utilizado blocos inteiros quanto os prismas com uso de meio bloco. Para ambos os casos foi empregada a micromodelagem dos prismas.

Os prismas 3ISA foram modelados no Solidworks e o gerador automático do solver empregou malha de 90.094 nós e 58.433 elementos, sendo a malha de 4 pontos Jacobianos, com elementos de tamanho de 9,33 mm (Figura 5.2 a).

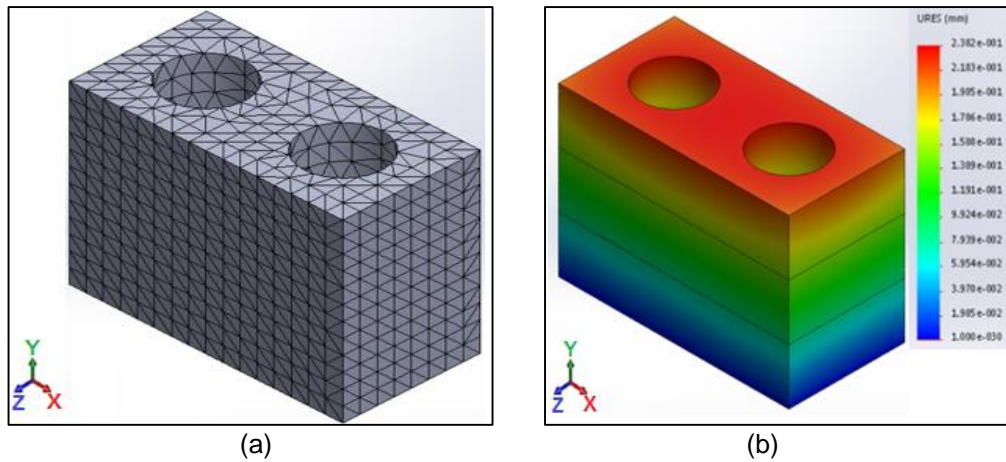


Figura 5.2 – Prisma 3ISA: (a) malha de Elementos Finitos; (b) deslocamentos verticais (direção Y)

Por se tratar de uma simulação de prismas com blocos inteiros e “empilhados”, os prismas de blocos inteiros apresentaram comportamento muito semelhante aos blocos. Na Figura 5.2 (b) verifica-se a deformação que tende a zero na base que foi restringida para deformação em y e no topo acontece a maior deformação, que vai diminuindo com relação à altura. O Fator de Segurança na região de ruptura verificado é de 1,89.

Nas Figura 5.3 (a) e (b) e Figura 5.4 (a) e (b) são apresentadas as distribuições de deformações e de tensões nos prismas de três fiadas.

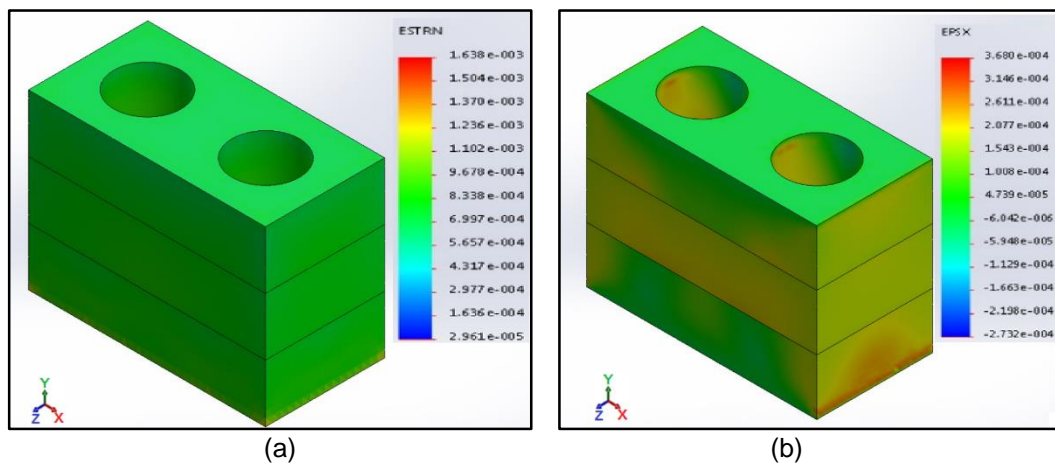


Figura 5.3 – Distribuição de deformações em prisma 3ISA: (a) direção em Y; (b) deformações em X

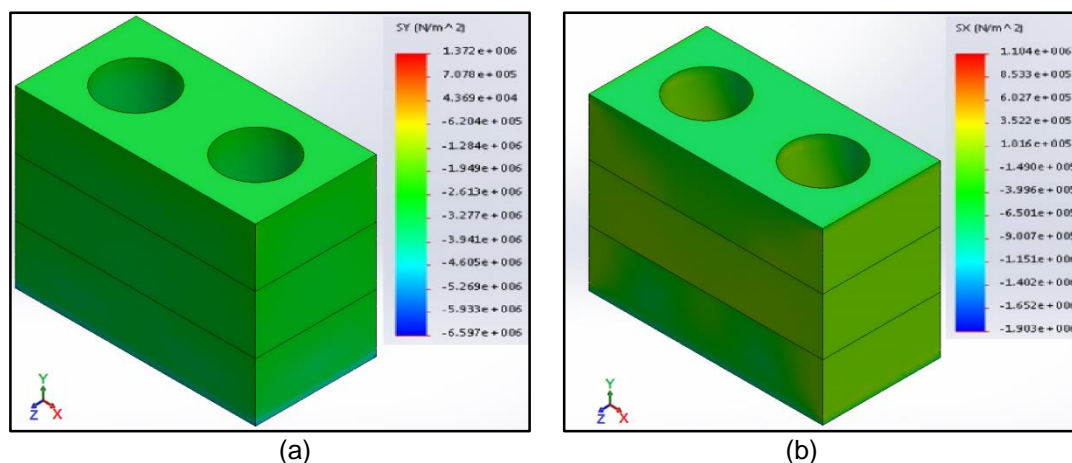


Figura 5.4 - Distribuição de tensões em prisma 3ISA: (a) direção vertical (Y); (b) direção X.

Conforme pode ser observado nas Figuras 5.3 e 5.4, os prismas tendem a ter as quinas como as regiões mais solicitadas, o que geram as fissuras e a desagregação do material nessas áreas dos blocos à compressão simples, comprovado pela análise experimental.

Na simulação de prismas 3IMA verificou-se um fator de segurança aproximado de 1,3 resultando em resistência à compressão de 2,18 MPa, que é cerca de 94% do valor médio obtido em laboratório.

Desta forma, pode-se afirmar que para a análise dos prismas de três fiadas a simulação gerou resultados com precisão entre 90 a 94% quando comparados aos resultados experimentais.

5.5 - PRISMAS COM CINCO FIADAS

Também foram simulados prismas com cinco fiadas sem argamassa dos tipos 5ISA e 5MSA, ambos modelados utilizando-se do princípio da micromodelagem.

Os prismas 5MSA foram modelados no Solidworks e o gerador automático do solver empregou malha de 86.906 nós e 58.595 elementos, sendo a malha de 4 pontos Jacobianos, com elementos de tamanho de 11,07 mm. Com um Fator de Segurança de 0,85 identificou-se uma tensão de ruptura de 2,11 MPa, cerca de 96% da encontrada em análise experimental, conforme resultados apresentados no capítulo 4. Deformação e deslocamentos também apresentaram valores com aproximação de 94 a 96% do obtido nos experimentos.

Para os prismas 5ISA o gerador automático de malha usou 87.242 nós e 58.895 elementos, sendo a malha de 4 pontos Jacobianos, com elementos de tamanho de 11,07 mm. O Fator de Segurança da simulação foi de 1,82 e a tensão de ruptura determinada foi de 2,01 MPa, cerca de 94% da verificada para a análise experimental. Também os valores de deformação e deslocamentos apresentaram-se entre 92 e 94% do obtido nos experimentos.

5.6 - PEQUENAS PAREDES

As pequenas paredes foram modeladas empregando-se a micro e a macromodelagem. Em ambos os casos, foram consideradas apenas as pequenas paredes sem argamassa (PPSA).

Para o caso da micromodelagem, considerando cada bloco em separado com suas características (Tabela 5.1), sendo apresentado na Figura 5.5 (a). O gerador de malhas determinou malha de 99.443 nós e 59.947 elementos (Figura 5.5 b).

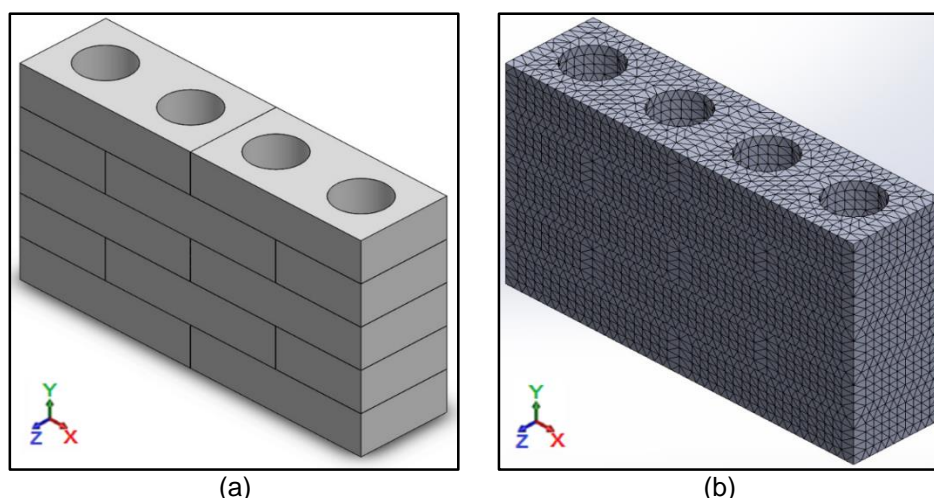


Figura 5.5 – Micromodelagem de pequena parede: (a) modelo; (b) malha de Elementos Finitos

O Fator de Segurança definido para a micromodelagem foi de 1,79, sendo encontrada uma resistência de ruptura à compressão de 1,67 MPa, que equivale a 96% do valor médio de resistência verificado para PPSA, conforme apresentado no capítulo 4. As deformações e os deslocamentos equivalem a 94% dos valores medidos na análise experimental, o que valida o modelo utilizado na simulação.

Também foi empregada a macromodelagem das pequenas paredes (Figura 5.6 a) para a definição de um modelo que pudesse também ser empregado em

paredes. Nessa modelagem toda estrutura foi considerada uma única peça, sendo os dados de entrada apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Propriedades mecânicas utilizadas na modelagem de Pequenas Paredes.

Elemento	Resistência (MPa)	Módulo de Deformação (MPa)	Coefficiente de <i>Poison</i>	Massa específica (g/cm ³)
Peça	1,78	981	0,172	1,21

O gerador de malhas determinou malha de 82.718 nós e 54.345 elementos (Figura 5.6 b).

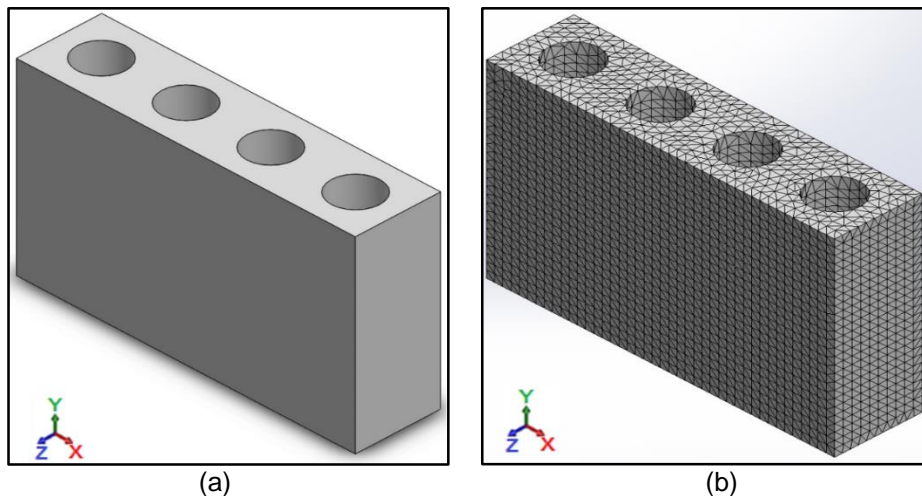


Figura 5.6 – Macromodelagem de pequena parede: (a) modelo; (b) malha de Elementos Finitos

O Fator de Segurança determinado na macromodelagem foi de 1,84, sendo encontrada uma resistência de ruptura à compressão de 1,60 MPa, 90% do valor médio de resistência para PPSA. As deformações e os deslocamentos equivalem a 89 a 91% dos valores medidos na análise experimental, o que também valida o modelo utilizado na simulação.

Os resultados encontrados nas simulações de blocos, prismas e pequenas paredes indicam um bom comportamento dos modelos escolhidos para representação da situação real, sendo extrapolado no próximo item para paredes que não foram objeto das análises experimentais.

5.7 - MODELAGEM DAS PAREDES

Para a modelagem das paredes foram considerados como parâmetros de entrada no software as mesmas propriedades utilizadas para a macromodelagem das pequenas paredes (Tabela 5.3). Na simulação dessas paredes no Solidworks,

o software gerou automaticamente uma malha contendo 96.615 nós e 55.141 elementos com 50,67 mm (Figura 5.7).

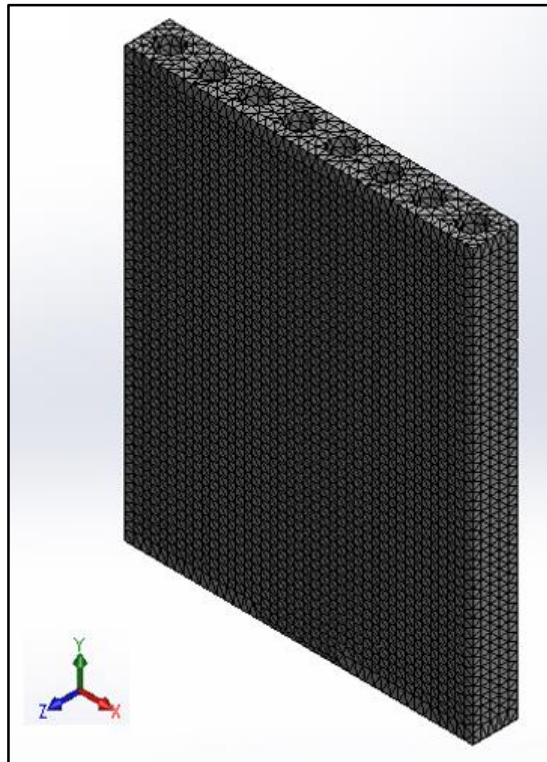


Figura 5.7 – Malha de Elementos Finitos – Parede

O Fator de Segurança determinado foi de 1,90, sendo encontrada uma resistência de ruptura à compressão de 1,05 MPa, um deslocamento vertical máximo de 2,9 mm no topo da parede e uma deformação máxima na direção y de 0,12%.

Considerando que os valores encontrados nas simulações da presente pesquisa para tensão, deslocamento e deformação variaram com relação aos valores médios da análise experimental entre 89 e 96% dos valores medidos na análise experimental, pode-se dizer que a tensão de ruptura média esperada para paredes em BPQ varia entre 1,10 e 1,18 MPa o que significa uma eficiência em torno de 0,28, valor este que foi encontrado por diversos autores (GOMES, 1983; SANTOS, 2008).

6. CONCLUSÕES

Neste capítulo, constam as principais conclusões a que se pode chegar com os experimentos e simulações deste trabalho. O capítulo está dividido por itens, conforme a definição dos objetivos específicos, sendo ao final sugerido temas para futuras pesquisas dando continuidade aos assuntos dessa tese.

6.1 – MATÉRIA-PRIMA

Devido à larga variabilidade das propriedades das matérias-primas argilosas naturais e suas composições, fez-se necessária a caracterização da massa argilosa empregada para a fabricação dos blocos prensados e queimados objetos dos estudos da presente pesquisa.

A amostra ensaiada apresentou características semelhantes ao encontrado no polo cerâmico de Campos dos Goytacazes, sendo classificada como *argila pouco plástica com presença de areia* pela definição do SUCS, com presença de 35% de argila, Limite de Liquidez de 51,5% e Densidade Real dos Grãos de 2,59 g/cm³.

A umidade ótima de compactação da massa argilosa encontrada por ensaio de Proctor Normal foi de 23,2%, sendo esta a umidade do solo utilizada como referência para a confecção dos BPQ.

A análise da composição química da massa argilosa identificou a predominância de Sílica e Alumina na massa, com 62,45%. A cor avermelhada do bloco após a queima é devida ao teor de 9,29% de hematita. O teor cal de 9,40% e de álcalis (K₂O) de 4,68%, reduzindo a porosidade do material na queima, por serem agentes fundentes o que pode ser percebido na melhoria das taxas de porosidade aparente (PA) e absorção de água quando comparados ao resultado apresentado por Pedroti *et al.* (2011). A Perda ao Fogo foi 10,15%.

Os argilominerais e minerais identificados por meio da técnica de difração de raios X (DRX), apresentam-se com a predominância de picos de difração característicos da Caulinita, além da presença do quartzo livre, da Mica Muscovita e da gibsita. Há ainda outros picos, de menor intensidade, indicando a presença de outros argilominerais.

As análises térmicas, ATD e ATG, confirmaram que temperatura de queima dos BPQ, de 890°C, está dentro de um intervalo onde não há presenças de picos de transformações endotérmicas nem exotérmicas.

6.2 –PRODUÇÃO

A fabricação dos blocos na Cerâmica, com o objetivo de viabilizar a produção em escala industrial, foi uma etapa complicada do presente trabalho.

As fases de trituração e peneiramento da massa argilosa são complexas devido à umidade natural da massa, sendo exigidas várias paradas na produção para limpeza do maquinário.

Outra fase complexa e fundamental é a da homogeneização da massa, para garantir uma umidade uniforme de prensagem, realizada nesse trabalho com uso de betoneira, mas que carece de melhoria para a realização de futuras pesquisas, bem como para a viabilização da produção em escala industrial dos BPQ.

6.3 – PARÂMETROS TECNOLÓGICOS

Os blocos queimados na temperatura de 890°C apresentaram médias dimensionais, médias dos desvios do esquadro e da planeza das faces compatíveis com as exigências estabelecidas pela ABNT NBR 15270-2 (2005).

A taxa de absorção de água de 20,5%, é um valor dentro da faixa indicada para alvenaria (ABNT NBR 15270-2, 2005), mas precisa ser objeto de controle, pois a variabilidade de resultado ainda é alta, em torno de 5%.

A massa específica de 1,21 g/cm³ do BPQ está dentro da faixa para cerâmicos, não implicando em cargas excessivas sobre estruturas de fundação, o que corrobora ainda mais para o seu emprego em projetos de alvenaria estrutural.

6.4 – COMPORTAMENTO MECÂNICO

Os blocos atenderam aos valores requisitos de resistência mecânica para emprego como alvenaria estrutural (ABNT NBR 15270-1, 2005), tendo apresentado resistência característica de 3,62 MPa.

Na análise de tensão de ruptura por Weibull, foi possível encontrar um valor de 4,23 MPA que é um valor 3,2% maior que o da resistência média e 20,2% maior que a resistência característica. Como a variabilidade de valores medidos para a resistência à compressão foi alto, tendo gerado até mesmo a rejeição de valor pelo critério do Chauvenet, conclui-se que é mais indicado utilizar o valor da resistência característica nos cálculos estruturais com BPQ, uma vez que esse valor é mais ficando assim a favor da segurança.

Os parâmetros de resistência dos prismas e das pequenas paredes apresentam-se compatíveis com o que se encontra na vasta literatura disponível para blocos cerâmicos, sendo verificada a eficiência prisma/bloco no intervalo 0,4 a 0,6 e a eficiência pequena parede/bloco no intervalo de 0,4 a 0,5.

Quanto aos módulos de deformação os resultados encontrados para as análises de prismas atestam que é possível empregar a hipótese geral da Tabela 1 da ABNT NBR 15812-1 (2010) que define um valor de $E = 600 f_{pk}$ na falta de informação da curva tensão-deformação. Para os parâmetros de outras normas, conforme visto no capítulo 2, há uma certa restrição ao uso do BPQ.

Quanto ao modo de ruptura, os BPQ apresentaram ruptura frágil, com tendência a falha no bloco. Foi observado que as primeiras trincas se deram quando a tensão aplicada atingiu cerca de 60% do valor da tensão última.

6.5 – SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A modelagem levou como parâmetro para critério de Ruptura a Teoria de Tensão Máxima de Rankine, para uma análise Elástica Linear. O bloco foi considerado como um material isotrópico linear elástico, sendo implementada a micromodelagem de prismas e pequenas paredes e a macromodelagem para pequenas paredes e paredes, para simulação utilizando o Solidworks 16.0.

Na simulação observou-se comportamento similar ao verificado em laboratório, a um nível aproximado de 90% de semelhança, tendo sido considerados válidos os modelos adotados para a modelagem dos BPQ.

O resultado da análise de paredes identificou uma resistência estimada em 1,10 a 1,8 MPa, o que corrobora para a conclusão de que os BPQ podem ser

empregados em obras de pequeno e médio porte, com até três pavimentos e arquitetura simples.

6.6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

Como sugestão para continuidade e aprofundamento dessa linha de pesquisa após os resultados dessa tese, sugere-se:

- Estudar novas massas cerâmicas disponíveis na região para propor uma composição com melhores propriedades;
- Propor um modelo reduzido de blocos que viabilize o estudo de paredes e verificações futuras de comportamento sob as diferentes condições de degradação do material, cargas de vento, cargas térmicas e cargas dinâmicas;
- Estudar o comportamento estrutural das paredes de BPQ, propondo um modelo de microanálise na interface bloco/bloco sem uso de argamassa;
- Estudar o comportamento de paredes de BPQ com relação a situação de incêndio;
- Estudar o comportamento de paredes de BPQ com relação ao efeito do cisalhamento e da flexão;
- Melhoria nos processos industriais de fabricação dos BPQ, principalmente nas etapas de trituração e homogeneização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULA, K.F.; CUNNINGHAM, L. S.; GILLIE, M. Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. *Engineering Structures* 151 (2017) 349–365.

ALBERO, J.L.A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial Parte I: O preenchimento da cavidade do Molde. *Cerâmica Industrial*, 5 (5) Set/Out, p.23-28, 2000.

ALEXANDRE, J. Caracterização das Argilas do Município de Campos dos Goytacazes para Utilização em Cerâmica Vermelha. Dissertação de Mestrado em Ciências de Engenharia – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 1997.

ALEXANDRE, J. Análise de Matéria-Prima e Composições de Massa Utilizada em Cerâmicas Vermelhas. Tese de Doutorado em Ciências de Engenharia – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2000.

ALEXANDRE, J.; ALVES, M.G.; LIMA, T.V. Estudo da estabilização de um solo argiloso com adição de cimento. *VÉRTICES*. Publicação Científica do CEFET CAMPOS, v. 8, n. 1/3, jan./dez. 2006. p 7-22.

ALEXANDRE, J.; SILVA, C.L.A.P. Caracterização da argila para confecção de blocos prensados e queimados. *Anais do 56º Congresso Brasileiro de Cerâmica. 1º Congresso Latino-Americano de Cerâmica. IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials. 03 a 06 de junho de 2012, Curitiba-PR, Brasil.*

ARYA, S.; HEGEMIER, G. On non-linear response prediction of concrete masonry assemblies. In: *North masonry conference Boulder. Colorado: Masonry Society; 1978.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Dosagem das Misturas de Solo-Cimento: Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio. Publicações ABCP, São Paulo, 1980.*

_____. *Fabricação de Tijolos de Solo-Cimento com a Utilização de Prensas Manuais. Publicações ABCP, São Paulo, 1985.*

_____. Fabricação de Tijolos de Solo-Cimento com a Utilização de Prensas Manuais: Prática Recomendada. Publicações. ABCP, São Paulo, 1988,

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) MB-305 – Retração por Secagem. Rio de Janeiro, 1984.

_____ NBR 6120 – Cargas para o Cálculo de Cargas em Edificações. Rio de Janeiro, 1980.

_____ NBR 6457 – Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____ NBR 6459 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

_____ NBR 6508 – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____ NBR 7180 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____ NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

_____ NBR 7182 – Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____ NBR 8798 - Execução e Controle de Obras em Alvenaria Estrutural de Blocos Vazados Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 1985.

_____ NBR 8491 – Tijolos maciços de solo-cimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____ NBR 8492 – Tijolo de solo-cimento – Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água. Rio de Janeiro, 2012.

_____ NBR 8949 – Paredes de alvenaria estrutural – Ensaio à compressão simples. Rio de Janeiro, 1985.

_____ NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____ NBR 10832 – Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual. Rio de Janeiro, 1989. 3p.

_____ NBR 10833 – Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica. Rio de Janeiro, 1989. 3p.

_____ NBR 10834 - Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural. Rio de Janeiro, 2012.

_____ NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto – Determinação do Índice de Consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____ NBR 13279 – Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____ NBR 13281 – Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____ NBR 15270-1 – Componentes cerâmicos - parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____ NBR 15270-2 – Componentes cerâmicos - parte 2: Blocos Cerâmicos para Alvenaria Estrutural - Tipologia. Rio de Janeiro, 2005.

_____ NBR 15270-3 – Componentes cerâmicos - parte 3 - Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

_____ NBR 15812-1 – Alvenaria estrutural. Blocos cerâmicos - parte 1: Projetos. Rio de Janeiro, 2010.

_____ NBR 15812-2 – Alvenaria estrutural. Blocos cerâmicos - parte 2: Execução e controle de obras. Rio de Janeiro, 2010.

American Society for Testing and Materials – ASTM. ASTM C 373-14, 1977a. Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired White ware Products, Ceramic Tiles and Glass Tiles. 3 p.

AUSTRALIAN STANDARD AS 3700. Masonry Structures. Australia, 2011.

ATKINSON, R.H., NOLAND, J.L., ABRANS, D.P. (1985). A Deformation Failure Theory for Stack-bond Brick Masonry Prism in Compression – Proceedings. 7 th International Brick Masonry Conference. Melbourne: V – 1, pp. 577 – 592.

ATKINSON, R.H.; NOLAND, J.L. Investigation into the failure theory for brick masonry in compression. Canadian Masonry Symposium, 3. 1985, Edmonton Canada. Proceedings. 1985. P. 5.1 – 5.17.

AZEREDO, N.G. avaliação das propriedades físicas e mecânicas em blocos cerâmicos estruturais através do método de ultrassom na região de Campos dos Goytacazes – RJ. Tese de Doutorado. Engenharia Civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Campos dos Goytacazes, 2015.

BARRETO, A.S.P. Análise numérica de painéis de alvenaria estrutural utilizando técnica de homogeneização. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE: 2002. 148f.

BERNAT, E.; GIL, L.; ROCA, P.; ESCRIG, C. Experimental and analytical study of TRM strengthened brickwork walls under eccentric compressive loading. Construction and Building Materials 44 (2013) 35–47.

BORLINI, M.C. Cerâmicas preparadas a partir de argila sedimentar com adição de cinzas da matéria orgânica do lixo e celulignina do processo de pré hidrólise de biomassas: propriedades mecânicas e inertização de metais pesados. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Materiais. Faculdade de Engenharia Química de Lorena. São Paulo, 2002.

BRITISH STANDARD INSTITUTE. BSI 5628: Structural use of unreinforced masonry. London, Part. 1, 1978.

BRITISH STANDARD INSTITUTE. BSI 5628: Structural use of unreinforced masonry. London, Part. 1, 1992.

CALLISTER, W.D.J. Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução. São Paulo: LTC, 2012. 8ª edição.

CAMACHO, J.S. Alvenaria Estrutural. Universidade Estadual Paulista: Apostila de Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural. Ilha Solteira - SP, 2006.

CAPUTO, H.P. Mecânica dos solos e suas aplicações - Fundamentos. 6ª ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1988.

CARDOSO, H., MATEUS, R., VASCONCELOS, G. Análise do Contributo dos Sistemas Construtivos em Alvenaria Estrutural para a Sustentabilidade dos Edifícios, II Workshop Construção e Reabilitação Sustentáveis, pp. 1-8, 2014

CASAGRANDE, M.N. Efeito da Adição de Chamote Semi-gresificado no Comportamento Físico de Massa argilosa para Pavimento. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002, UFSC.

CHEEMA, T.S., KLINGNER, R.E. (1986). Compressive Strength of Concrete Masonry Prism. ACI Journal – January – February.

CHEN, Da-chuan; SHANG, Shou-ping; ZHANG Cheng-qiang. Effect of vertical load difference on cracking behaviors in multistory masonry buildings and numerical simulation. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(6): 1014–1021.

CHIH-HUANG, W.; DENG-FONG, L.; PEN-CHI, C. Utilization of sludge as brick materials. Advances in environmental research, 2003. p.679-685

DAMASCENO, J.C.C.; NETO, J.A.N. Investigação experimental da resistência à compressão simples de prismas de blocos estruturais. Publica, Rio Grande do Norte, vol. 4, nº1, p. 0108, 2008.

DODSON, B. The Weibull Analysis Handbook. 2ª ed. ASQ Quality Press, 2006.

DHANASEKAR, M. (1985). Performance of brick masonry under Biaxial Loading. Tese de Doutorado. University of Newcastle, Australia.

DRM – RJ. Panorama Mineral do Estado do Rio de Janeiro 2012. Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro: RJ, 2012. 259f.

DRYSDALE, R.G.; HAMID, A.A.; BAKER L.R. Masonry structures: Behavior and design. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

EUROCODE 6. EN 1996-1-1. European standard - Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium; 2005.

FRANZONI, E.; GENTILINI, C.; GRAZIANI, G.; BANDINI, B. Compressive behaviour of brick masonry triplets in wet and dry Conditions. *Construction and Building Materials* 82 (2015) 45–52.

FREIRE, W.J. Tratamento prévio do solo com aditivos químicos e seu efeito sobre a qualidade do solo-cimento. Piracicaba: Universidade de São Paulo - ESALQ, 1976. 142p. Tese Doutorado.

FIQUEROLA, V. Alvenaria de Solo-Cimento. *Revista Técnica* n.85, abril de 2004. Disponível em <http://www.piniweb.com.br/construcao/noticias/alvenaria-de-solo-cimento-79781-1.asp>. Acessado em 26 de Novembro de 2016.

GARCIA, P.D. Contribuições ao Estudo da Resistência à Compressão de Paredes de Alvenaria de Blocos Cerâmicos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Escola de Engenharia de São Carlos (USP – São Carlos). São Carlos – SP, 2000.

GOMES, N.S. A Resistência das Paredes de Alvenaria. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – São Paulo – SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 1983. 224 p.

GONÇALVES, J.S. Contribuição para a Normalização da Alvenaria Estrutural com uso de Tijolos de Terra Crua para Construções Urbanas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2005a. 147p.

HAMID, A.A.; DRYSDALE, R.G. Behavior of concrete block masonry under axial compression. *American Concrete Institute Journal*, vol. 76, no. 6, pp. 707-721, 1979.

HENDRY, A.W. Engineered design of masonry buildings: fifty years development in Europe. *Prog. Struct. Eng. Mater.* 2002; 4:291–300. University of Edinburgh, Scotland.

HILSDORF, H.K. “Investigation into de Failure Mechanisms of Brick Masonry Loaded in Axial Compression”, *Designing, Engineering and Construction with Masonry Products*, Gulf Publishing CO. Houston, pp. 34 – 41. (1969).

HOLANDA, O.G.J. Influência de Recalques em Edifícios de Alvenaria Estrutural. Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas – São Carlos – SP. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2002. 224 p.

ILLAMPAS, R.; LOANNOU, I.; CHARMPIS, D.C. Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress–strain equation. *Construction and Building Materials* 53 (2014) 83–90

IZQUIERDO, O.S. Estudo da Interface Bloco/Graute em Elementos de Alvenaria Estrutural. 290f. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

JUSTE, A.E. Estudo da Resistência e da Deformabilidade da Alvenaria de Blocos de Concreto Submetida a Esforços de Compressão. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

KALIL, S.B.; LEGGERINI, M.R. Estruturas Mistas – Concreto Armado X Alvenaria Estrutural. Curso de Graduação. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

KIEFER T.; KARIEM, H.; LUKACEVIC, M.; FÜSSL, F. The compressive strength of vertically perforated clay block masonry predicted by means of a unit-cell type numerical simulation tool taking discrete cracking into account. *Construction and Building Materials* 150 (2017) 24–34.

KUMAR, N.; AMIRTHAM, R.; PANDEY, M. Plasticity based approach for failure modelling of unreinforced masonry. *Engineering Structures* 80 (2014) 40–52.

LAMEGO, A.R., (1974). O homem e o brejo. 2. ed. Rio de Janeiro: Lidador, 250p.

LA MENDOLA, L.; ACCARDI, M.; CUCCHIARA, C.; LICATA, V. Nonlinear FE analysis of out-of-plane behaviour of masonry walls with and without CFRP reinforcement. *Construction and Building Materials* 54 (2014) 190–196.

LA ROVERE, H.L., SOLIZ, V.H.V. Efeito da altura na resistência de prismas de alvenaria de blocos cerâmicos vazados. In: Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estrcutral, 1995, Argentina. Anais.

LIMA, S.A.; VARUM, H.; SALES, A.; NETO, V.F. Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials* 35 (2012) 829–837.

LIMA, T.V. Estudo da produção de blocos de solo-cimento com matérias-primas do núcleo urbano da cidade de Campos dos Goytacazes – RJ. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 2006.

LINDNER, G. Uso de modelo reduzido para pesquisa e desenvolvimento de blocos cerâmicos estruturais. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis - SC, 2001, 95 p.

LYNX. Testing am Measurement Sytems. Disponível em: <http://www.lynxtec.com.br/>.

LOURENÇO, P.B. (1996). Computational Strategies for Masonry Structures. Delft University Press: The Netherlads. 210p.

LOURENÇO, P.; ROTS, J. (1997). Multisurface Interface Model for Analysis of Masonry Structures. J. Eng. Mech., 123 (7), 660-668.

LOURENÇO, P.B.; ROTS, J.G. Multisurface interface model for analysis of masonry structures. J Eng Mech 123:7 (1997) 660–668.

LOTFI, H.R.; SHING, P.B. Interface model applied to fracture of masonry structures. Engineering Structures 120:1 (1994) 63–80.

MA, R.; JIANG, L.; HE, M.; FANG, C; LIAN, F. Experimental investigations on masonry structures using external prestressing techniques for improving seismic performance. Engineering Structures 42 (2012) 297–307.

MANGUEIRA, F.B.; OLIVEIRA NETO, L.; AZAMBUJA, M.A. Determination of the numerical parameters of a continuous damage model for the structural analysis of clay brick masonry. Materials Research. 2012; 15(6):1013-1021.

MANTOVAN, A.H.; CALDEIRA, A.C.V. GONÇALVES, L.H.F.; SERRADILHA, V.H.; RODRIGUES, P.S.H. Influência da Velocidade de Aplicação de Carga no Ensaio de Resistência à Compressão de Blocos de Concreto Estrutural. Revista Engenharia em Ação UniToledo, Araçatuba, SP, v. 01, n. 01, p. 89-100, out./dez. 2016.

MARTINEZ, P.H. Influência da Geometria de Blocos Cerâmicos no Comportamento de Vigas Paredes de Alvenaria Estrutural. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia da UNESP. Ilha Solteira: (s.n), 2017.

MASONRY STANDARDS JOINT COMMITTEE. Building code requirements for masonry structures (ACI 530/TMS 402/ASCE 5). 1999.

MENDES, R.J.K. Resistência à Compressão de Alvenarias de Blocos Cerâmicos Estruturais. Dissertação de Mestrado do Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, pp. 185, 1998.

MICCOLI, L.; MÜLLER, U.; FONTANA, P. Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials* 61 (2014) 327–339.

MIGLIETTA, P.C.; BENTZ, E.C.; GRASSELLI, G. Finite/discrete element modelling of reversed cyclic tests on unreinforced masonry structures. *Engineering Structures* 38 (2017)159–169.

MIGUEL, P.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; MOURA-BUENO, J.M. Variáveis mineralógicas preditoras de fontes de produção de sedimentos, em uma bacia hidrográfica do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38: 783-796, 2014. ISSN 0100-0683

MILLER, D.; NOLAND, J.; FENG, C.C. Factors Influencing the Compressive Strength of Hollow Clay Unit Prisms. In: Proc. 5 th Int. Brick Masonry Conf. (VIBMaC) held in Washington, DC, 5-10 Oct., 1979. Edited by J. A. Wintz and A. H. Yorkdale. McLean, Virginia. 1982. p. 122.

MILLER, C.P. Determinação de parâmetros mecânicos e modelagem numérica em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos da indústria de Campos dos Goytacazes. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2008. 161p.

MIRANDA, L.A. Estudo do efeito do não preenchimento das juntas verticais e eficiência do graute na resistência da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em

Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

MIRANDA, L.A.; CORRÊA, M.R.S. Estudo do efeito do não preenchimento das juntas verticais e eficiência do graute na resistência da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, v. 14, n. 63, p. 33-48, 2012. ISSN: 1809-5860.

MOHAMAD, G. Comportamento mecânico na ruptura de prismas de blocos de concreto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, SC, 1998.

MOHAMAD, G.; RIZZATTI, E. e ROMAN, H.R. Modo de ruptura, deformabilidade e resistência de pequenas paredes estruturais. *Ambiente Construído (Online)*. vol.11 no.3 Porto Alegre July/Sept. 2011.

MONK, C.B.Jr. (1967). A historical survey and analyses of the compressive strength of masonry. Research report No. 12, Structural Clay Products Research Foundation, Geneva, Ill.

MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F. Characterization of clays from Campos dos Goytacazes, North Rio de Janeiro State. *Tile & Brick Int.*, v. 18, n. 3, pp. 152-157, jun. 2002.

MONTEIRO, S.N.; PEÇANHA, L.A.; VIEIRA, C.M.F. Reformulation of roofing tiles body with addition of granite waste from sawing operation. Vol. 24. Pág. 2349-2356, 2004.

MORTON, J. Basic facts about brickwork 1 — Structural brickwork. *Structural Survey*, Vol. 2 Iss 1 pp. 17–27, 1984.

NASCIMENTO, M.R. O Uso de Argamassa de Assentamento como Preenchimento de Alvenaria Estrutural Cerâmica. Tese de doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2015.

NESSRALLA, M.A. Resistência à compressão de paredes de alvenaria estrutural: bloco cerâmico de 44cm. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.

NONI Jr, A. Modelagem Matemática Aplicada ao Controle Dimensional de Placas Cerâmicas de Monoqueima Processadas por Via Úmida. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

OLIVEIRA, D.V.; LOURENÇO, P.B. Implementation and validation of a constitutive model for the cyclic behaviour of interface elements. *Comput Struct* 82:17 (2004) 1451–1461.

OLIVEIRA, R.A.; SILVA F.A.N.; PIRES SOBRINHO, C.W.A; AZEVEDO; A.A.C. Masonry Buildings in the Metropolitan Region of Recife. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 175-199, abr./jun. 2017.

OLIVEIRA, R.P. de; Estudo Experimental da Influência da Argamassa de Assentamento na Resistência à Compressão da Alvenaria Estrutural Cerâmica. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Campos dos Goytacazes: 2015.

PAGE, A.W. Finite element model for masonry. *Journal Structure Div* 104: 8 (1978) 1267–1285.

PARTENE, E.; FEKETE-NAGY, L; STOIAN, V. Evaluation of Shear Capacity for Brick Masonry Walls. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 5:18 (2015) 69-74.

PARSEKIAN, G.A. Tecnologia de Produção de Alvenaria Estrutural Protendida. Tese de doutorado em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

PARSEKIAN, G.A.; DEANA, D.F.; BARBOSA, K.C.; INFORSATO, T.B. Retração em Alvenaria Estrutural. *Téchne, Revista de Tecnologia da Construção* São Paulo, n. 119. fev. 2007.

PARSEKIAN, G.A.; CORRÊA, M.R.S.; LOPES, G.M.; CAVICHIOLLI, I. Theoretical and experimental study of slender structural masonry walls. *Ambiente Construído* 16: 4 (2016) 197-213.

PARSEKIAN, G.A. Comportamento e Dimensionamento de Alvenaria Estrutural. São Paulo: EDUFSCAR, 2012.

PASQUALI, I. Influência do Tipo de Argamassamento na Resistência à Compressão de Pequenas Paredes de Alvenaria Estrutural Cerâmica. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2007.

PASSOS, M.E.M.; SANTOS, F.A.; CARVALHO, M.C.R. (2002). Avaliação experimental do comportamento e da resistência à compressão de paredes com juntas verticais não preenchidas. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 7, Belo Horizonte. Proceeding. Belo Horizonte: [s.n.]. p.163-167.

PEDROTI, L.G. Estudo de Conformidades em Relação à ABNT de Blocos Cerâmicos Prensados e Queimados. / Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2007.

PEDROTI, L.G.; ALEXANDRE, J. XAVIER, G.C.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F.; BAHIENSE, A.V. MAIA, P.C.A. Desenvolvimento de Massa argilosa para Blocos Prensados e Queimados. 25. Cerâmica Industrial, 16(1). jan./fev., 2011.

PEDROTI, L.G. Desenvolvimento de massa argilosa com uso de resíduo de granito para obtenção de blocos cerâmicos prensados de encaixe de matriz argilosa. Tese de Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2011.

PEDROTI, L.G.; ALEXANDRE, J. XAVIER, G.C.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F.; BAHIENSE, A.V. MAIA, P.C.A. Simplex Network Modeling for Press-Molded Ceramic Bodies Incorporated with Granite Waste. Materials Science Forum Vols. 727-728 (2012) pp 619-624.

PELETEIRO, S.C. (2002). Contribuições à modelagem numérica de alvenaria estrutural. 143 p. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2002.

PINHEIRO, B.C.A; HOLANDA, J.N.F. Efeito da Temperatura de Queima em Algumas Propriedades Mecânicas de Cerâmica Vermelha. Cerâmica 56 (2010). 237-243.

RAMALHO, M.A.; CORRÊA, M.R.S. Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural. São Paulo. PINI, 2003.

RAMOS, I.S; ALVES, M.G.; ALEXANDRE, J. Diagnóstico do Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes – RJ. Cerâmica Industrial, 11 (1) Janeiro/Fevereiro, 2006. Pp. 28 – 32.

REED, J.S. Principles of Ceramics Processing, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York (1992) p. 418-442.

RINNE, H. The Weibull Distribution – A Handbook. New York, EUA: CRC Press, 2008.

RIZZATTI, E.; ROMAN, H.R.; MOHAMAD, G. E NAKANISHI, E.Y. Tipologia de blocos cerâmicos estruturais: influência da geometria dos blocos no comportamento mecânico da alvenaria. Matéria (Rio J.) [online]. 2011, vol.16, n.2, pp. 730-746. ISSN 1517-7076.

ROCHA, S. Estatísticas geral e aplicada para cursos de engenharia. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2015.

ROMAN, H.R.; MUTTI, C.N.; ARAÚJO, H.N. de. Construindo em Alvenaria Estrutural. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1999.

ROSS, P.J. (1991) Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade. 4ª ed. McGraw-Hill, São Paulo.

SÁNCHEZ, E. Nova Normalização Brasileira para a Alvenaria Estrutural. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2013.

SANDOVAL, C.; ARNAU, O. Experimental characterization and detailed micro-modeling of multi-perforated clay brick masonry structural response. Material and Structures (2017). 50: 34.

SANTOS, C.F.R. Avaliação numérica da interação de paredes de alvenaria estrutural submetidas às ações verticais. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, MG, 2016. 187f.

SANTOS, M.J.F. Análise da resistência de prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica para diferentes tipos de argamassas. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS): Santa Maria, RS, 2008. 135f.

SANTOS, C.F.R.; ALVARENGA, R.C.S.S.; RIBEIRO, J.C.L.; CASTRO, L.O.; SILVA, R.M.; SANTOS, A.A.R.; e NALON, G.H. Numerical and Experimental Evaluation of Masonry Prisms by Finite Element Method. *IBRACON Structures and Materials Journal*. Volume 10, Number 2 (April 2017) p. 477–508.

SANTOS, P.S. (1992). *Ciência e Tecnologia das Argilas*. v.01. 2 ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

SANTOS, P.S. *Tecnologia de Argilas aplicada às argilas brasileiras*. Vol. 1: Fundamentos. São Paulo: Edgard Blücher, 1975.

SHING, P.; CAO, L. Analysis of partially grouted masonry shear walls. US Department of Commerce, Gaithersburg, MD20899. NIST GCR; 1997. p. 97–710.

SILVA, L.C.; LOURENÇO, P.B.; MILANI, G. Nonlinear Discrete Homogenized Model for Out-of-Plane Loaded Masonry Walls. *Journal of Structural Engineering*, Volume 143, Issue 9. 2017

SILVA, W.J. *Estudo Experimental de Ligações entre Paredes de Alvenaria Estrutural de Blocos Cerâmicos Sujeitas a Ações Verticais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual de Paulista. Ilha Solteira, SP, 2003. 119p.

SILVA, W.J. *Análise Experimental e Numérica da Distribuição das Ações Verticais Entre Paredes de Alvenaria Estrutural com a Utilização de Modelo Físico Reduzido na Escala 1:5*. Tese de Doutorado – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, S.P., 2014. 331p.

HELP DO SOLIDWORKS. Disponível em: <http://help.solidworks.com/>

SOUZA, V.C. de; RIPPER, T. *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. São Paulo: PINI, 1998.

SUKSIRIPATTANAPONG, C.; HORPIBULSUK, S. CHANPRASERT, P.; SUKMAK, P.; ARULRAJAH, A. Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. *Construction and Building Materials* 82 (2015) 20–30.

SUTCLIFFE, D.J.; YU, H.S.; PAGE, A.W. Lower Bound Limit Analysis of Unreinforced Masonry Shear Walls. *Computers and Structures* 79 (2001) 1295-1312.

THEODOSSOPOULOS, D.; SINHA, B. A review of analytical methods in the current design processes and assessment of performance of masonry structures. *Construction and Building Materials* 41 (2013) 990–1001.

VELASCO, P.M.; ORTIZ, M.P.M.; GIRÓ, M.A.; MELIA, D.M.; REHBEIN, J.H. Development of sustainable fired clay bricks by adding kindling from vine shoot: Study of thermal and mechanical properties. *Applied Clay Science* 107 (2015) 156–164.

VIEIRA, C.M.F. 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. 2001.

VIEIRA, C.M.F.; SOARES, T.M.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S.N. (2004). Incorporation of granite in red ceramic. *Materials Science and Engineering: A*. Volume 373, Issues 1–2, 25 May 2004, Pages 115–121.

VIEIRA, C.M.F.; MONTEIRO, S.N. (2009). Incorporation of solid waste in red ceramics – na updated review. *Revista Matéria*, v.14, n°3, p.881-905. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11097>.

VILATÓ R.R. (2004). Influência do preenchimento das juntas verticais entre componentes no comportamento da alvenaria estrutural. 165p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

Wu, D., Zhou, J. (2006) Unbiased Estimation of Weibull Parameters with Linear Regression Method. *Journal of the European Ceramic Society*- 26 (7): 1099-1105.

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

XAVIER, G.C. Resistência, Alterabilidade e Durabilidade de Peças Cerâmicas Vermelhas Incorporadas com Resíduo de Granito. Tese de Doutorado

em Engenharia Civil – Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF. Campos dos Goytacazes, 2006.

ZANOTTO, E.D.; MIGLIORI JR., A.R. Propriedades Mecânicas de Materiais Cerâmicos. Cerâmica 31 (1991). 7-16.

APÊNDICE A

TAMANHO MÍNIMO DO LOTE (TML)

Todos os ensaios realizados nesta pesquisa consideram que as amostras apresentam Distribuição Normal, confiabilidade de 95% ($\alpha=0,05$) e utilizaram a Distribuição de Student (Anexo 1).

Na Tabela A.1 constam os resultados para o TML para os ensaios em blocos, prismas, pequenas paredes e argamassas.

Tabela A.1 - TML

Elemento		Número de CP (N)	t-Student (n-1)	Média	Desvio Padrão (s)	n ₀	n
Blocos	AA	13	1,782	20,14	1,84	4	4
	MEA	6	2,015	1,21	0,03	1	1
	RL	6		4,05	0,33	4	3
	PA	6		35,86	1,21	2	2
	Compressão	15	1,761	4,05	0,44	4	4
Prisma	3ISA	6	2,015	2,13	0,14	3	2
	3ICA	6		2,32	0,36	7	4
	3MSA	6		2,21	0,35	7	4
	3MCA	6		2,10	0,11	3	2
	5ISA	6		2,24	0,08	2	2
	5ICA	6		2,34	0,10	2	2
	5MSA	6		2,08	0,12	3	2
	5MCA	6		2,30	0,06	2	2
Pequena Parede	PPSA	4	2,353	1,94	0,32	8	3
	PPCA	4		1,97	0,44	11	3
Argamassa	AA	6	2,015	18,76	1,71	4	3
	Tração	12	1,796	1,18	0,30	10	6
	Compressão	12		1,43	0,47	12	6

APÊNDICE B

BLOCOS

B.1 – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS BLOCOS

Tabela B.1 – Medidas dos Blocos

CP	L (cm)	H (cm)	C (cm)	D (cm)	M (cm)	S ₁ (cm)	S ₂ (cm)
1	14,41	6,98	28,66	8,18	6,30	2,89	3,11
2	14,30	7,04	28,67	8,04	6,40	2,93	3,27
3	14,51	7,10	28,74	8,26	6,35	2,78	3,10
4	14,60	7,20	28,88	8,16	6,40	3,05	3,11
5	14,75	7,04	28,67	8,24	6,38	2,89	2,93
6	14,39	6,99	28,74	8,20	6,30	3,03	3,01
7	14,56	6,13	28,88	8,29	6,43	2,86	3,02
8	14,50	7,10	28,89	8,16	6,42	3,16	3,00
9	14,35	7,14	28,67	8,15	6,36	2,98	3,03
10	14,41	6,99	28,53	8,06	6,30	2,98	3,13
11	14,60	6,93	28,98	8,28	6,39	2,89	3,14
12	14,55	7,12	28,79	8,23	6,37	2,88	3,09
13	14,36	6,92	28,55	8,09	6,36	2,91	3,11
Média	14,48	6,98	28,74	8,18	6,37	2,94	3,08
Desv. Pad	0,13	0,28	0,13	0,08	0,05	0,10	0,09
CV(%)	0,88	4,00	0,45	0,97	0,73	3,47	2,84

B.2 – ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS BLOCOS

Tabela B.2 – Índice de Absorção de água dos Blocos (13 Corpos-de-prova)

CP	M _u (g)	M _s (g)	AA (%)
1	3600,3	3007,8	19,70
2	3650,8	2991,6	22,04
3	3569,3	2977,2	19,89
4	3600,0	3000,4	19,98
5	3650,8	2999,9	21,70
6	3900,5	3207,9	21,59
7	3500,6	2880,2	21,54
8	3480,3	3000,4	15,99*
9	3500,0	3001,2	16,62
10	3658,8	2999,9	21,96
11	3609,5	3001,2	20,27
12	3590,9	2998,5	19,76
13	3623,0	2998,6	20,82
Média			20,14
Desvio Padrão			1,84

* Aplicando o *Crítério de Chauvenet* (Apêndice G), rejeita-se o valor obtido para o CP8 (Tabela D.1).

Tabela B.3 – Índice de Absorção de água dos Blocos (12 Corpos-de-prova)

CP	M _u (g)	M _s (g)	AA (%)
1	3600,3	3007,8	19,70
2	3650,8	2991,6	22,04
3	3569,3	2977,2	19,89
4	3600,0	3000,4	19,98
5	3650,8	2999,9	21,70
6	3900,5	3207,9	21,59
7	3500,6	2880,2	21,54
9	3500,0	3001,2	16,62
10	3658,8	2999,9	21,96
11	3609,5	3001,2	20,27
12	3590,9	2998,5	19,76
13	3623,0	2998,6	20,82
Média			20,49
Desvio Padrão			1,45

B.3 – MASSA ESPECÍFICA APARENTE DOS BLOCOS

Tabela B.4 – Valores obtidos para MEA dos Blocos

CP	M _s (g)	Vol. Líquido Blocos (cm ³)	MEA (g/cm ³)
1	2571,7	2149,04	1,197
2	2652,9	2172,61	1,221
3	2692,1	2154,77	1,249
4	2637,1	2204,28	1,196
5	2628,2	2233,87	1,177
6	2641,9	2156,75	1,225
Média			1,21
Desvio Padrão			0,03

B.4 – RETRAÇÃO LINEAR DOS BLOCOS

Tabela B.5 – Valores obtidos para Retração Linear dos Blocos

CP	L ₀ (mm)	L _f (mm)	RL (%)
1	299,50	286,60	4,307
2	299,40	286,70	4,242
3	299,64	289,00	3,551
4	299,24	286,00	4,425
5	299,46	287,89	3,864
6	299,50	287,74	3,927
Média			4,05
Desvio Padrão			0,33

B.5 – POROSIDADE APARENTE DOS BLOCOS

Tabela B.6 – Valores obtidos para Porosidade Aparente (PA) dos Blocos

CP	M _u (g)	M _s (g)	M _i (g)	PA (%)
1	3600,3	3007,8	1985,0	36,68
2	3650,8	2991,6	1920,0	38,09
3	3569,3	2977,2	1910,0	35,68
4	3600,0	3000,4	1890,0	35,06
5	3650,8	2999,9	1760,0	34,42
6	3623,0	2998,6	1850,0	35,22
Média				35,86
Desvio Padrão				1,21

* Aplicando o *Critério de Chauvenet* (Apêndice F), rejeita-se o valor obtido para o CP2 (Tabela C.6).

Tabela B.7 – Valores obtidos para Porosidade Aparente (PA) dos Blocos (5 amostras)

CP	M _u (g)	M _s (g)	M _i (g)	PA (%)
1	3600,3	3007,8	1985,0	36,68
3	3569,3	2977,2	1910,0	35,68
4	3600,0	3000,4	1890,0	35,06
5	3650,8	2999,9	1760,0	34,42
6	3623,0	2998,6	1850,0	35,22
Média				35,41
Desvio Padrão				0,75

B.6 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BLOCOS

Tabela B.8 – Valores obtidos para Resistência à Compressão (15 amostras)

CP	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	91199,2	20649,53	4,42
2	95922,1	20570,73	4,66
3	88005,0	20822,45	4,23
4	80521,0	20506,20	3,93
5	82090,0	20952,50	3,92
6	88756,6	20980,20	4,23
7	92321,0	20808,04	4,44
8	86940,0	20981,50	4,14
9	79657,0	21285,60	3,74
10	87870,0	21112,00	4,16
11	77778,0	21140,35	3,68
12	93333,0	20793,15	4,49
13	59999,0	20678,08	2,90*
14	74639,0	20591,89	3,62
15	86890,0	20764,77	4,18
Desvio Padrão			0,44
Média			4,05
fbk,est			3,35
$\phi \cdot f_{b(1)}$			2,93

* A resistência do CP13 é menor que 3,0 MPa (mínimo da norma)

Tabela B.9 – Valores obtidos para Resistência à Compressão (14 amostras)

CP	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	91199,2	20649,53	4,42
2	95922,1	20570,73	4,66
3	88005,0	20822,45	4,23
4	80521,0	20506,20	3,93
5	82090,0	20952,50	3,92
6	88756,6	20980,20	4,23
7	92321,0	20808,04	4,44
8	86940,0	20981,50	4,14
9	79657,0	21285,60	3,74
10	87870,0	21112,00	4,16
11	77778,0	21140,35	3,68
12	93333,0	20793,15	4,49
14	74639,0	20591,89	3,62
15	86890,0	20764,77	4,18
Desvio Padrão			0,32
Média			4,13
fbk,est			3,52
$\bar{\sigma} \cdot f_{h(1)}$			3,62

B.7 – MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DOS BLOCOS

Tabela B.10 – Módulos de Elasticidade de Blocos

CP	Módulo Elasticidade		Coeficiente de Poisson (ν)
	Módulo de Young (GPa)	Módulo Transversal (GPa)	
1	2,856	1,195	0,195
2	2,854	1,175	0,214
3	2,686	1,168	0,150
4	2,803	1,185	0,183
5	2,701	1,174	0,150
6	2,907	1,213	0,198
Média	2,801	1,185	0,182
Desv. Padrão	0,09	0,02	0,03
Coef. Variação (%)	3,20	1,41	14,61

APÊNDICE C

PRISMAS

C.1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PRISMAS

Tabela C.1 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 5ISA

CP	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	83132,8	41299,06	2,01
2	93790,2	41141,45	2,28
3	83520,0	41644,90	2,01
4	83907,2	41012,40	2,05
5	89086,2	41890,50	2,13
6	97569,1	41960,40	2,33
Desvio Padrão			0,14
Média			2,13
0,85 f _{em}			1,81
f _{ek,est}			1,97
φ f _{e(1)}			1,78

Tabela C.2 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 5ICA

CP	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	89696,6	41644,48	2,15
2	92483,0	41471,50	2,23
3	121440,0	41717,16	2,91
4	85936,1	41284,91	2,08
5	81767,3	41659,13	1,96
6	107525,0	41413,44	2,60
Desvio Padrão			0,36
Média			2,32
0,85 f _{em}			1,97
f _{ek,est}			1,89
φ f _{e(1)}			1,75

Tabela C.3 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 5MSA

CP	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	102950,0	41264,85	2,49
2	96504,0	41428,45	2,33
3	73685,3	41356,56	1,78
4	71639,1	41198,84	1,74
5	102026,6	41457,50	2,46
6	100609,6	41270,24	2,44
Desvio Padrão			0,35
Média			2,21
0,85 f _{em}			1,88
f _{ek,est}			1,08
φ f _{e(1)}			1,55

Tabela C.4 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 5MCA

CP	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	92725,0	40977,25	2,26
2	82555,2	40995,40	2,01
3	86233,6	41069,76	2,10
4	88364,8	41485,74	2,13
5	80148,2	41342,44	1,94
6	88584,0	41212,60	2,15
Desvio Padrão			0,11
Média			2,10
0,85 f_{em}			1,78
$f_{ek,est}$			1,85
$\phi f_{e(1)}$			1,73

Tabela C.5 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 3ISA (6 amostras)

CP	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	93863,0	41264,85	2,27
2	91890,0	41428,45	2,22
3	89999,0	41313,69	2,18
4	90134,2	41385,60	2,18
5	91000,1	41241,92	2,21
6	98732,0	41270,24	2,39
Desvio Padrão			0,08
Média			2,24
0,85 f_{em}			1,91
$f_{ek,est}$			2,15
$\phi f_{e(1)}$			1,94

Tabela C.6 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 3ISA (5 amostras)

CP	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	93863,0	41264,85	2,27
2	91890,0	41428,45	2,22
3	89999,0	41313,69	2,18
4	90134,2	41385,60	2,18
5	91000,1	41241,92	2,21
Desvio Padrão			0,04
Média			2,21
0,85 f_{em}			1,88
$f_{ek,est}$			2,15
$\phi f_{e(1)}$			1,94

Tabela C.7 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 3ICA

CP	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	100831,5	40977,25	2,46
2	99832,4	40995,40	2,44
3	97897,5	41760,50	2,34
4	95559,8	41572,71	2,30
5	90234,5	41385,64	2,18
6	94949,3	41212,60	2,30
Desvio Padrão			0,10
Média			2,34
0,85 f_{em}			1,99
$f_{ek,est}$			2,13
$\phi f_{e(1)}$			1,74

Tabela C.8 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 3MSA

Bloco	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	93600,0	41212,60	2,27
2	83132,8	41184,50	2,02
3	80123,0	41040,00	1,95
4	79998,0	39762,00	2,01
5	88374,4	40469,00	2,18
6	83744,0	41464,00	2,02
Desvio Padrão			0,12
Média			2,08
0,85 f_{em}			1,76
$f_{ek,est}$			1,94
$\phi f_{e(1)}$			1,74

Tabela C.9 – Valores da Resistência à compressão em Prismas 3MCA

CP	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	96375,0	41268,00	2,34
2	91755,0	41327,00	2,22
3	92134,0	40797,68	2,26
4	96578,0	40653,90	2,38
5	92550,0	40596,35	2,28
6	98252,3	41644,80	2,36
Desvio Padrão			0,06
Média			2,30
0,85 f_{em}			1,96
$f_{ek,est}$			2,20
$\phi f_{e(1)}$			1,98

C.2 – MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DOS PRISMAS

Tabela C.10 – Módulos de Elasticidade de Prismas 5ISA

CP	E (MPa)	G (MPa)	Poisson
1	1001,0	423,0	0,183
2	1290,0	557,0	0,158
3	1294,0	568,0	0,139
4	1279,0	541,0	0,182
Média	1216,00	522,3	0,166
Desv. Padrão	143,47	67,09	0,021
Coef. Variação	11,80	12,85	12,78

Tabela C.11 – Módulos de Elasticidade de Prismas 5ICA

CP	E (MPa)	G (MPa)	Poisson
1	1203,8	499,6	0,205
2	1295,2	564,8	0,147
3	1279,0	565,3	0,131
4	1262,0	529,0	0,193
Média	1260,0	539,7	0,169
Desv. Padrão	39,84	31,66	0,035
Coef. Variação	3,16	5,87	21,00

Tabela C.12 – Módulos de Elasticidade de Prismas 5MSA

CP	E (MPa)	G (MPa)	Poisson
1	1001,9	441,0	0,136
2	994,9	408,0	0,219
3	1000,7	416,1	0,202
4	1006,7	451,0	0,116
Média	1001,0	429,0	0,168
Desv. Padrão	4,85	20,29	0,050
Coef. Variação	0,48	4,73	29,76

Tabela C.13 – Módulos de Elasticidade de Prismas 5MCA

CP	E (MPa)	G (MPa)	Poisson
1	1029,9	458,3	0,124
2	1186,2	513,9	0,154
3	1209,4	512,9	0,179
4	1131,9	460,1	0,230
Média	1139,4	486,3	0,172
Desv. Padrão	79,87	31,30	0,045
Coef. Variação	7,01	6,44	26,22

Tabela C.14 – Módulos de Elasticidade de Prismas 3ISA

CP	E (MPa)	G (MPa)	Poisson
1	1051,0	450,0	0,168
2	1244,0	527,0	0,180
3	1194,0	499,0	0,196
4	1271,0	578,0	0,099
Média	1190,0	513,5	0,161
Desv. Padrão	98,0	53,5	0,043
Coef. Variação	8,24	10,42	26,49

Tabela C.15 – Módulos de Elasticidade de Prismas 3ICA

CP	E (MPa)	G (MPa)	Poisson
1	1090,0	451,1	0,208
2	1291,8	561,4	0,151
3	1266,0	566,7	0,117
4	1336,0	580,4	0,151
Média	1246,0	539,9	0,157
Desv. Padrão	107,91	59,74	0,038
Coef. Variação	8,66	11,06	24,16

Tabela C.16 – Módulos de Elasticidade de Prismas 3MSA

CP	E (MPa)	G (MPa)	Poisson
1	1052,0	432,7	0,216
2	1054,4	459,8	0,147
3	1050,1	459,8	0,142
4	1060,0	481,1	0,102
Média	1054,1	458,4	0,151
Desv. Padrão	4,29	19,83	0,047
Coef. Variação	0,41	4,33	31,24

Tabela C.17 – Módulos de Elasticidade de Prismas 3MCA

CP	E (MPa)	G (MPa)	Poisson
1	1128,7	499,4	0,130
2	1206,3	524,5	0,150
3	1212,8	489,9	0,238
4	1180,9	509,2	0,160
Média	1182,2	505,8	0,169
Desv. Padrão	38,21	14,78	0,047
Coef. Variação	3,23	2,92	27,91

APÊNDICE D

PEQUENAS PAREDES

D.1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PEQUENAS PAREDES

Tabela D.1 – Resistência à Compressão de Pequena Parede sem Argamassa - PPSA

CP	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	155345,0	82529,70	1,88
2	153000,1	85310,85	1,79
3	136000,1	84293,20	1,61
4	157090,1	85815,90	1,83
Desvio Padrão			0,12
Média			1,78
0,85 f_{em}			1,51
$f_{ek,est}$			1,61
$\phi f_{e(1)}$			1,40

Tabela D.2 – Resistência à Compressão de Pequena Parede com Argamassa - PPCA

CP	Força Resistente (N)	Área Bruta (mm ²)	Resistencia (MPa)
1	136345,0	83595,94	1,63
2	168000,1	85496,32	1,96
3	171750,1	84844,25	2,02
4	175000,1	85842,33	2,04
Desvio Padrão			0,19
Média			1,91
0,85 f_{em}			1,63
$f_{ek,est}$			1,71
$f f_{e(1)}$			1,42

D.2 – FATOR DE EFICIÊNCIA DAS PEQUENAS PAREDES

Tabela D.3 – Eficiência de Pequenas Paredes

CP	f_{ppk} (MPa)	f_{bk} (MPa)	Fator de Eficiência (η)
PPSA	1,51	3,52	0,43
PPCA	1,63		0,46

D.3 – MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DAS PEQUENAS PAREDES

Tabela D.4 – Módulos de Elasticidade de Pequenas Paredes Sem Argamassa - PPSA

CP	E (MPa)	G (MPa)	Poisson
1	1071,8	458,4	0,169
2	970,5	400,9	0,210
3	901,8	401,7	0,122
Média	981,4	420,3	0,167
Desv. Padrão	85,5	32,97	0,044
Coef. Variação	8,71	7,84	26,29

Tabela D.5 – Módulos de Elasticidade de Pequenas Paredes Com Argamassa - PPCA

CP	E (MPa)	G (MPa)	Poisson
1	1001,0	422,3	0,185
2	1290,0	549,7	0,173
3	1279,0	563,4	0,135
Média	1190,0	511,8	0,165
Desv. Padrão	163,8	77,8	0,03
Coef. Variação	13,76	15,20	15,92

APÊNDICE E

ARGAMASSA

Tabela E.1 – Taxa de Absorção para Argamassa

Bloco	M _u - Massa úmida (g)	M _s - Massa seca (g)	Taxa Absorção (%)
1	466,7	384,8	21,28
2	460,8	381,0	20,94
3	459,8	389,6	18,02
4	457,5	388,4	17,79
5	489,1	415,8	17,63
6	486,4	416,2	16,87
Média			18,76
Desvio Padrão			1,71
Coef. Variação (%)			9,12

Tabela E.2 – Resistência à Tração na Flexão de Argamassas

CP	Força (N)	Resistência (MPa)
1	455,97	1,07
2	445,53	1,04
3	447,27	1,05
4	436,50	1,02
5	589,98	1,38
6	577,79	1,35
7	315,00	0,74
8	750,09	1,76
9	696,14	1,63
10	396,66	0,93
11	438,76	1,03
12	501,23	1,17
Média		1,18
Desvio Padrão		0,30
Coef. Variação (%)		25,42

Tabela E.3 – Resistência à Compressão de Argamassas (12 amostras)

CP	Força Resistente (N)	Resistencia à Compressão (MPa)
1	4632,43	2,90
2	4912,08	3,07
3	1011,38	0,63
4	5768,00	3,61
5	5141,61	3,21
6	2162,30	1,35
7	4366,78	2,73
8	3548,13	2,22
9	3825,50	2,39
10	3456,78	2,16
11	4563,65	2,85
12	4830,88	3,02
Média		2,51
Desvio Padrão		0,84
Coef. Variação (%)		33,25

Tabela E.4 – Resistência à Compressão de Argamassas (11 amostras)

CP	Força Resistente (N)	Resistencia à Compressão (MPa)
1	4632,43	2,90
2	4912,08	3,07
4	5768,00	3,61
5	5141,61	3,21
6	2162,30	1,35
7	4366,78	2,73
8	3548,13	2,22
9	3825,50	2,39
10	3456,78	2,16
11	4563,65	2,85
12	4830,88	3,02
Média		2,68
Desvio Padrão		0,62
Coef. Variação (%)		23,04

Tabela E.5 – Resistência à Compressão de Argamassas (10 amostras)

CP	Força Resistente (N)	Resistencia à Compressão (MPa)
1	4632,43	2,90
2	4912,08	3,07
4	5768,00	3,61
5	5141,61	3,21
7	4366,78	2,73
8	3548,13	2,22
9	3825,50	2,39
10	3456,78	2,16
11	4563,65	2,85
12	4830,88	3,02
Média		2,82
Desvio Padrão		0,46
Coef. Variação (%)		16,19

Tabela E.6 – Módulo de deformação longitudinal – Argamassas (12 amostras)

CP	Módulo (MPa)	
1	907,28	
2	799,31	
3	859,52	
4	872,17	
5	897,69	
6	769,78	
7	883,87	
8	889,14	
9	901,53	
10	821,48	
11	861,94	
12	872,97	
Média		861,39
Des. Padrão		43,07
Coef. Variação (%)		5,00

Tabela E.7 – Módulo de deformação longitudinal - Argamassas (11 amostras)

CP	Módulo (MPa)	
1	907,28	
2	799,31	
3	859,52	
4	872,17	
5	897,69	
7	883,87	
8	889,14	
9	901,53	
10	821,48	
11	861,94	
12	872,97	
Média		869,72
Des. Padrão		33,54
Coef. Variação (%)		3,86

Tabela E.8 – Módulo de deformação longitudinal - Argamassas (10 amostras)

CP	Módulo (MPa)
1	907,28
3	859,52
4	872,17
5	897,69
7	883,87
8	889,14
9	901,53
10	821,48
11	861,94
12	872,97
Média	876,76
Des. Padrão	25,38
Coef. Variação (%)	2,89

Tabela E.9: Módulo de deformação longitudinal - Argamassas (9 amostras)

CP	Módulo (MPa)
1	907,28
3	859,52
4	872,17
5	897,69
7	883,87
8	889,14
9	901,53
11	861,94
12	872,97
Média	882,90
Des. Padrão	17,32
Coef. Variação (%)	1,96

APÊNDICE F

CRITÉRIO DE CHAUVENET

Verificando a rejeição de algum valor medido pelo *Critério de Chauvenet*, foram determinados os valores de razão de desvio (DR), para cada corpo-de-prova pela expressão da equação Eq. 3.14.

Nas Tabelas F.1 a F.9 são apresentados os resultados para as diversas propriedades avaliadas para os blocos. Nas Tabelas F.10 a F.18 são apresentados os resultados obtidos para avaliação da resistência à compressão de prismas. Os resultados para as pequenas paredes são apresentados nas Tabelas FG.19 e F.20 e os resultados para a argamassa nas Tabelas F.21 a F.25.

Tabela F.1 – DR – Absorção de Água de Blocos (13 CP)

CP	Taxa Absorção (%)	DR	DR ₀ *
1	19,70	-0,24	±2,06
2	22,04	1,03	
3	19,89	-0,14	
4	19,98	-0,09	
5	21,70	0,85	
6	21,59	0,79	
7	21,54	0,76	
8	15,99*	-2,26**	
9	16,62	-1,92	
10	21,96	0,99	
11	20,27	0,07	
12	19,76	-0,21	
13	20,82	0,37	

* Da Tabela 3.5, por interpolação para 13 corpos-de-prova.

** Valor rejeitado – Cálculo refeito e apresentado na Tabela F.2

Tabela F.2 – DR – Absorção de Água de Blocos (12 CP)

CP	Taxa Absorção (%)	DR	DR ₀ *
1	19,70	-0,79	±2,03
2	22,04	1,55	
3	19,89	-0,60	
4	19,98	-0,50	
5	21,70	1,21	
6	21,59	1,10	
7	21,54	1,05	
9	16,62	-3,87**	
10	21,96	1,48	
11	20,27	-0,22	
12	19,76	-0,73	
13	20,82	0,33	

* Da Tabela 3.5, por interpolação para 12 corpos-de-prova.

** Valor rejeitado – Cálculo refeito e apresentado na Tabela F.3

Tabela F.3 – DR – Absorção de Água de Blocos (11 CP)

CP	Taxa Absorção (%)	DR	DR ₀ *
1	19,70	-1,14	±1,99
2	22,04	1,19	
3	19,89	-0,95	
4	19,98	-0,86	
5	21,70	0,86	
6	21,59	0,75	
7	21,54	0,70	
10	21,96	1,12	
11	20,27	-0,57	
12	19,76	-1,08	
13	20,82	-0,02	

* Da Tabela 3.5, por interpolação para 11 corpos-de-prova.

Tabela F.4 – DR – MEA dos Blocos

CP	MEA (g/cm ³)	DR	DR ₀
1	1,197	-0,54	±1,73
2	1,221	0,39	
3	1,249	1,48	
4	1,196	-0,56	
5	1,177	-1,32	
6	1,225	0,54	

Tabela F.5 – DR – RL dos Blocos

CP	RL (%)	DR	DR ₀
1	4,307	0,78	±1,73
2	4,242	0,58	
3	3,551	-1,51	
4	4,425	1,14	
5	3,864	-0,56	
6	3,927	-0,37	

Tabela F.6 – DR – PA dos Blocos (6 amostras)

CP	PA (%)	DR	DR ₀
1	36,68	0,68	±1,73
2	38,09*	1,84*	
3	35,68	-0,15	
4	35,06	-0,66	
5	34,42	-1,19	
6	35,22	-0,53	

* Valor rejeitado – Cálculo refeito e apresentado na Tabela F.7

Tabela F.7 – DR – PA dos Blocos (5 amostras)

CP	PA (%)	DR	DR ₀
1	36,68	1,69	±1,73
3	35,68	0,36	
4	35,06	-0,47	
5	34,42	-1,32	
6	35,22	-0,26	

Tabela F.8 – DR – Resistência à Compressão dos Blocos (15 amostras)

CP	Resistência (MPa)	DR	DR ₀
1	4,42	0,66	±2,13
2	4,66	1,23	
3	4,23	0,22	
4	3,93	-0,48	
5	3,92	-0,50	
6	4,23	0,23	
7	4,44	0,71	
8	4,14	0,03	
9	3,74	-0,90	
10	4,16	0,07	
11	3,68	-1,05	
12	4,49	0,83	
13	2,95	-2,73*	
14	3,62	-1,18	
15	4,18	0,12	

Tabela F.9 – DR – Resistência à Compressão dos Blocos (14 amostras)

CP	Resistência (MPa)	DR	DR ₀
1	4,42	0,66	±2,10
2	4,66	1,23	
3	4,23	0,22	
4	3,93	-0,48	
5	3,92	-0,50	
6	4,23	0,23	
7	4,44	0,71	
8	4,14	0,03	
9	3,74	-0,90	
10	4,16	0,07	
11	3,68	-1,05	
12	4,49	0,83	
14	3,62	-1,18	
15	4,18	0,12	

Tabela F.10 – DR – Resistência à compressão de prismas 5ISA

CP	Resistencia (MPa)	DR	DR ₀
1	2,01	-0,86	±1,73
2	2,28	1,06	
3	2,01	-0,91	
4	2,05	-0,62	
5	2,13	-0,04	
6	2,33	1,38	

Tabela F.11 – DR - Resistência à compressão de prismas 5ICA

CP	Resistencia (MPa)	DR	DR ₀
1	2,15	-0,47	±1,73
2	2,23	-0,26	
3	2,91	1,64	
4	2,08	-0,67	
5	1,96	-1,00	
6	2,60	0,76	

Tabela F.12 – DR - Resistência à compressão de prismas 5MSA

CP	Resistencia (MPa)	DR	DR ₀
1	2,49	0,82	±1,73
2	2,33	0,35	
3	1,78	-1,21	
4	1,74	-1,33	
5	2,46	0,72	
6	2,44	0,66	

Tabela F.13 – DR - Resistência à compressão de prismas 5MCA

CP	Resistencia (MPa)	DR	DR ₀
1	2,26	1,46	±1,73
2	2,01	-0,76	
3	2,10	0,01	
4	2,13	0,27	
5	1,94	-1,43	
6	2,15	0,45	

Tabela F.14 – DR - Resistência à compressão de prismas 3ISA (6 amostras)

CP	Resistencia (MPa)	DR	DR ₀
1	2,27	0,42	±1,73
2	2,22	-0,28	
3	2,18	-0,77	
4	2,18	-0,77	
5	2,21	-0,42	
6	2,39	1,84*	

* Valor rejeitado – Cálculo refeito e apresentado na Tabela F.15

Tabela F.15 – DR - Resistência à compressão de prismas 3ISA (5 amostras)

CP	Resistencia (MPa)	DR	DR ₀
1	2,27	1,60	±1,65
2	2,22	0,18	
3	2,18	-0,82	
4	2,18	-0,84	
5	2,21	-0,12	

Tabela F.16 – DR - Resistência à compressão de prismas 3ICA

CP	Resistencia (MPa)	DR	DR ₀
1	2,46	1,21	±1,73
2	2,44	0,96	
3	2,34	0,07	
4	2,30	-0,38	
5	2,18	-1,54	
6	2,30	-0,33	

Tabela F.17 – DR - Resistência à compressão de prismas 3MSA

CP	Resistencia (MPa)	DR	DR ₀
1	2,27	1,59	±1,73
2	2,02	-0,47	
3	1,95	-1,01	
4	2,01	-0,52	
5	2,18	0,87	
6	2,02	-0,46	

Tabela F.18 – DR - Resistência à compressão de prismas 3MCA

CP	E (MPa)	DR	DR ₀
1	2,34	0,50	±1,73
2	2,22	-1,38	
3	2,26	-0,76	
4	2,38	1,15	
5	2,28	-0,41	
6	2,36	0,89	

Tabela F.19 – DR – Módulo de deformação de prismas 5ISA

CP	E (MPa)	DR	DR ₀
1	1051,0	-1,42	±1,54
2	1244,0	0,55	
3	1194,0	0,04	
4	1271,0	0,83	

Tabela F.20 – DR – Módulo de deformação de prismas 5ICA

CP	E (MPa)	DR	DR ₀
1	1203,8	-0,09	±1,54
2	1295,2	0,55	
3	1279,0	0,44	
4	1262,0	0,32	

Tabela F.21 – DR – Módulo de deformação de prismas 5MSA

CP	E (MPa)	DR	DR ₀
1	1001,9	-1,49	±1,54
2	994,9	-1,54	
3	1000,7	-1,50	
4	1006,7	-1,46	

Tabela F.22 – DR – Módulo de deformação de prismas 5MCA

CP	E (MPa)	DR	DR ₀
1	1029,9	-1,30	±1,54
2	1186,2	-0,21	
3	1209,4	-0,05	
4	1131,9	-0,59	

Tabela F.23 – DR – Módulo de deformação de prismas 3ISA

CP	E (MPa)	DR	DR ₀
1	1051,0	-1,42	±1,54
2	1244,0	0,55	
3	1194,0	0,04	
4	1271,0	0,83	

Tabela F.24 – DR – Módulo de deformação de prismas 3ICA

CP	E (MPa)	DR	DR ₀
1	1090,0	-1,02	±1,54
2	1291,8	1,04	
3	1266,0	0,78	
4	1336,0	1,49	

Tabela F.25 – DR – Módulo de deformação de prismas 3MSA

CP	E (MPa)	DR	DR ₀
1	1052,0	-1,41	±1,54
2	1054,4	-1,38	
3	1050,1	-1,43	
4	1060,0	-1,33	

Tabela F.26 – DR – Módulo de deformação de prismas 3MCA

CP	E (MPa)	DR	DR ₀
1	1128,7	-0,63	±1,54
2	1206,3	0,17	
3	1212,8	0,23	
4	1180,9	-0,09	

Tabela F.27 – DR – Resistência à compressão de PPSA

CP	Resistencia (MPa)	DR	DR ₀
1	1,88	0,88	±1,54
2	1,79	0,12	
3	1,61	-1,43	
4	1,83	0,43	

Tabela F.28 – DR – Resistência à compressão de PPCA

CP	Resistencia (MPa)	DR	DR ₀
1	1,63	-1,48	±1,54
2	1,96	0,26	
3	2,02	0,57	
4	2,04	0,65	

Tabela F.29 – DR – Módulo de deformação - PPSA

CP	E (MPa)	DR	DR ₀
1	1071,8	1,06	±1,54
2	970,5	-0,13	
3	901,8	-0,93	

Tabela F.30– DR – Módulo de deformação - PPCA

CP	E (MPa)	DR	DR ₀
1	1001,0	-1,15	±1,54
2	1290,0	0,61	
3	1279,0	0,54	

Tabela F.31 – DR – Absorção de água para argamassa

CP	Taxa Absorção (%)	DR	DR ₀
1	21,28	1,48	±1,73
2	20,94	1,28	
3	18,02	-0,43	
4	17,79	-0,56	
5	17,63	-0,66	
6	16,87	-1,11	

Tabela F.32 – DR - Resistência à tração na flexão de Argamassa

CP	Res. Tração na Flexão (MPa)	DR	DR ₀
1	1,07	-0,38	±2,03
2	1,04	-0,47	
3	1,05	-0,45	
4	1,02	-0,54	
5	1,38	0,68	
6	1,35	0,58	
7	0,74	-1,50	
8	1,76	1,95	
9	1,63	1,52	
10	0,93	-0,85	
11	1,03	-0,52	
12	1,17	-0,02	

Tabela F.33 – DR - Resistência à compressão de argamassa (12 amostras)

CP	Res. Compressão (MPa)	DR	DR ₀
1	2,90	0,18	±2,03
2	3,07	0,56	
3	0,63	-2,26	
4	3,61	1,73	
5	3,21	0,87	
6	1,35	-1,38	
7	2,73	-0,19	
8	2,22	-1,31	
9	2,39	-0,93	
10	2,16	-1,44	
11	2,85	0,08	
12	3,02	0,45	

** Valor rejeitado – Cálculo refeito e apresentado na Tabela F.34

Tabela F.34 – DR - Resistência à compressão de argamassa (11 amostras)

CP	Resistencia à Compressão (MPa)	DR	DR ₀
1	2,90	0,37	±1,99
2	3,07	0,66	
4	3,61	1,49	
5	3,21	0,86	
6	1,35	-2,16**	
7	2,73	0,08	
8	2,22	-0,72	
9	2,39	-0,46	
10	2,16	-0,84	
11	2,85	0,14	
12	3,02	0,60	

* Da Tabela 3.5, por interpolação para 11 corpos-de-prova.

** Valor rejeitado – Cálculo refeito e apresentado na Tabela F.25

Tabela F.34 – DR - Resistência à compressão de argamassa (10 amostras)

CP	Resistencia à Compressão (MPa)	DR	DR ₀
1	2,90	0,21	±1,96
2	3,07	0,60	
4	3,61	1,73	
5	3,21	0,87	
7	2,73	-0,18	
8	2,22	-1,28	
9	2,39	-0,93	
10	2,16	-1,43	
11	2,85	-0,11	
12	3,02	0,52	

Tabela F.35 – DR – Módulo de deformação - Argamassa (12 amostras)

CP	Módulo de deformação (MPa)	DR	DR ₀
1	907,28	1,07	±2,03
2	799,31	-1,44	
3	859,52	-0,04	
4	872,17	0,25	
5	897,69	0,84	
6	769,78	-2,13**	
7	883,87	0,52	
8	889,14	0,64	
9	901,53	0,93	
10	821,48	-0,93	
11	861,94	0,01	
12	872,97	0,27	

** Valor rejeitado – Cálculo refeito e apresentado na Tabela F.37

Tabela F.37 – DR – Módulo de deformação - Argamassa (11 amostras)

CP	Resistencia à Compressão (MPa)	DR	DR0
1	907,28	1,12	±1,99*
2	799,31	-2,10**	
3	859,52	-0,30	
4	872,17	0,07	
5	897,69	0,83	
7	883,87	0,42	
8	889,14	0,58	
9	901,53	0,95	
10	821,48	-1,44	
11	861,94	-0,23	
12	872,97	0,10	

* Da Tabela 3.5, por interpolação para 11 corpos-de-prova.

** Valor rejeitado – Cálculo refeito e apresentado na Tabela F.38

Tabela F.38 – DR – Módulo de deformação - Argamassa (10 amostras)

CP	Resistencia à Compressão (MPa)	DR	DR0
1	907,28	1,20	±1,96
2	859,52	-0,68	
4	872,17	-0,18	
5	897,69	0,83	
7	883,87	0,28	
8	889,14	0,49	
9	901,53	0,98	
10	821,48	-2,18**	
11	861,94	-0,58	
12	872,97	-0,15	

** Valor rejeitado – Cálculo refeito e apresentado na Tabela F.39

Tabela F.39 – DR – Módulo de deformação - Argamassa (9 amostras)

CP	Resistencia à Compressão (MPa)	DR	DR0
1	907,28	1,41	±1,91
2	859,52	-1,35	
4	872,17	-0,62	
5	897,69	0,85	
7	883,87	0,06	
8	889,14	0,36	
9	901,53	1,08	
11	861,94	-1,21	
12	872,97	-0,57	

APÊNDICE G

ILUSTRAÇÕES DE RUPTURAS DE ELEMENTOS ENSAIADOS

G.1 – RUPTURA DE BLOCOS

Nas figuras G.1 a G.6, a seguir, são apresentadas algumas ilustrações complementares dos resultados obtidos com a ruptura de blocos por compressão simples realizado na oficina de Prensas do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).



Figura G.1 - Bloco 1 rompido



Figura G.2 – Bloco 2 rompido



Figura G.3 – Bloco 3 rompido



Figura G.4 – Bloco 4 rompido



Figura G.5 – Bloco 5 rompido



Figura G.6 – Bloco 6 rompido

G.2 – RUPTURA DE PRIMAS DE 3 FIADAS

Nas figuras G.7 a G.12, algumas outras ilustrações são apresentadas para os casos de ruptura de prismas de três fiadas por compressão simples, obtidos através ensaios de realizados na oficina de Prensas do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).



Figura G.7 – Prisma 3ICA 1 rompido



Figura G.8 – Prisma 3ISA 1 rompido



Figura G.9 – Prisma 3ICA 2 rompido



Figura G.10 – Prisma 3ISA 2 rompido



Figura G.11 – Prisma 3ISA 3 rompido



Figura G.12 – Prisma 3ICA 3 rompido

G.3 – RUPTURA DE PRIMAS DE 5 FIADAS

Nas figuras G.13 a G.14, são ilustrados os casos de ruptura de prismas de cinco fiadas por compressão simples, obtidos através ensaios de realizados na oficina de Prensas do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).



Figura G.13 – Prisma 5ICA 1 rompido



Figura G.14 – Prisma 5ISA 1 rompido



Figura G.15 – Prisma 5ICA 2 rompido



Figura G.16 – Prisma 5ISA 2 rompido

ANEXO 1

Distribuição de Student: coeficiente t

g.l.	0,25	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
1	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	318,309
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,327
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,215
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,610
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,307
60	0,679	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232
120	0,677	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,160
∞	0,674	1,282	1,645	1,96	2,326	2,576	3,09

Fonte: http://renatoaulasparticulares.com.br/Interv_conf.htm

ANEXO 2

DISTRIBUIÇÃO F

p	Degrees of freedom in numerator (df1)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	12	24	1000	
1	0.100	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	60.71	62.00	63.30
	0.050	181.4	199.5	215.7	224.8	230.2	234.0	238.8	238.9	243.9	249.1	254.2
	0.025	647.8	799.5	864.2	899.6	921.8	937.1	948.2	956.6	976.7	997.3	1017.8
	0.010	4052	4999	5404	5624	5764	5859	5928	5981	6107	6234	6363
	0.001	405312	499725	540257	562668	576496	586033	593185	597954	610352	623703	638101
2	0.100	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.36	9.37	9.41	9.45	9.49
	0.050	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.41	19.45	19.49
	0.025	38.51	39.00	39.17	39.25	39.30	39.33	39.36	39.37	39.41	39.46	39.50
	0.010	98.50	99.00	99.16	99.25	99.30	99.33	99.36	99.38	99.42	99.46	99.50
	0.001	998.38	998.84	999.31	999.31	999.31	999.31	999.31	999.31	999.31	999.31	999.31
3	0.100	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.22	5.18	5.13
	0.050	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.74	8.64	8.53
	0.025	17.44	16.04	15.44	15.10	14.88	14.73	14.62	14.54	14.34	14.12	13.91
	0.010	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.05	26.60	26.14
	0.001	167.06	148.49	141.10	137.08	134.68	132.83	131.61	130.62	128.32	125.93	123.52
4	0.100	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.90	3.83	3.76
	0.050	7.71	6.94	6.59	6.39	6.28	6.16	6.09	6.04	5.91	5.77	5.63
	0.025	12.22	10.65	9.98	9.60	9.38	9.20	9.07	8.98	8.75	8.51	8.26
	0.010	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.37	13.93	13.47
	0.001	74.13	61.25	56.17	53.43	51.72	50.52	49.65	49.00	47.41	45.77	44.09
5	0.100	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.27	3.19	3.11
	0.050	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.68	4.53	4.37
	0.025	10.01	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.86	6.78	6.52	6.28	6.02
	0.010	18.28	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	9.89	9.47	9.03
	0.001	47.18	37.12	33.20	31.08	29.75	28.83	28.17	27.65	26.42	25.13	23.62
6	0.100	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.90	2.82	2.72
	0.050	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.00	3.84	3.67
	0.025	8.81	7.26	6.60	6.23	5.99	5.82	5.70	5.60	5.37	5.12	4.86
	0.010	13.75	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.72	7.31	6.99
	0.001	35.51	27.00	23.71	21.92	20.80	20.03	19.46	19.03	17.99	16.90	15.77
7	0.100	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.67	2.58	2.47
	0.050	5.59	4.74	4.36	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.57	3.41	3.23
	0.025	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.90	4.67	4.41	4.15
	0.010	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.47	6.07	5.66
	0.001	29.25	21.69	18.77	17.20	16.21	15.52	15.02	14.63	13.71	12.73	11.72
8	0.100	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.50	2.40	2.30
	0.050	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.28	3.12	2.93
	0.025	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.20	3.95	3.68
	0.010	11.28	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.67	5.28	4.87
	0.001	25.41	18.49	15.93	14.39	13.48	12.86	12.40	12.05	11.19	10.30	9.36
9	0.100	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.38	2.28	2.18
	0.050	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.07	2.90	2.71
	0.025	7.21	5.71	5.08	4.72	4.48	4.32	4.20	4.10	3.87	3.61	3.34
	0.010	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.11	4.73	4.32
	0.001	22.86	16.39	13.90	12.56	11.71	11.13	10.70	10.37	9.57	8.72	7.84

ANEXO 3



UENF

Universidade estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Laboratório de Engenharia Civil

LECIV/ CCT

Resultados de Ensaio de Caracterização Completa

Interessado: Niander
Obra: Estruturas
Ponto de Coleta: Cerâmica Sardinha

Data: 15/4/16
Profundidade: -
Amostra: Argila Amarela

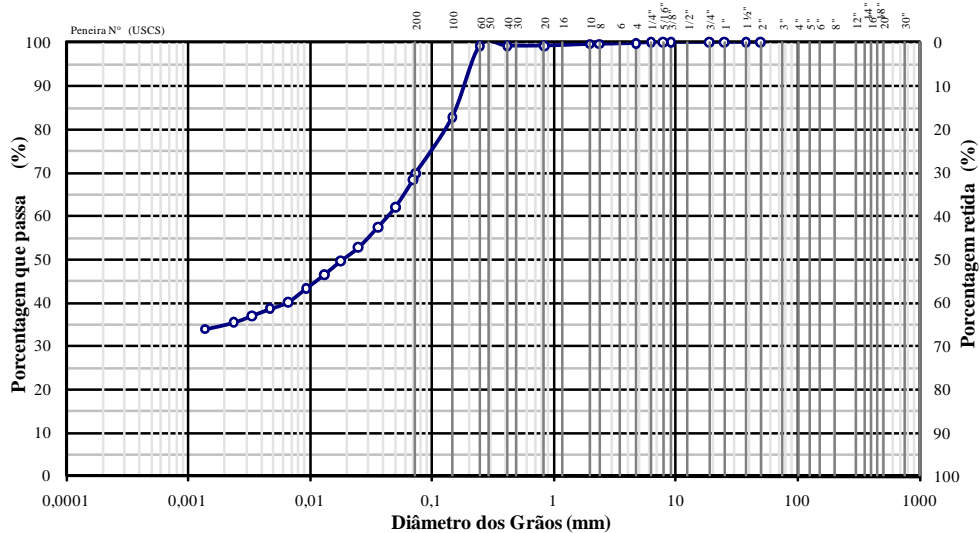
Características Granulométricas

Frações Granulométricas e Classificação Unificada

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina			
-	-	0,4	0,4	8,1	26,2	30,1	34,8	CL

Diâmetros Característicos e Coeficientes de Curvatura e Uniformidade

D ₁₀	D ₁₅	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₈₅	C _c	C _u
0,0004	0,0006	0,0012	0,0191	0,0446	0,1626	109,0	0,1



ABNT	Argila	Silte	Areia (fina, média, grossa)			Pedregulho (fino, médio, grosso)			Pedra	Matacão
USCS	Argila	Silte	Areia (fina, média, grossa)			Pedregulho (1, 2, 3, 4)				
MIT	Argila	Silte	Areia (fina, média, grossa)			Pedregulho				

Propriedades Físicas

Densidade:

Densidade Real dos Grãos = 2,59 g/cm³

Umidades:

Umidade Natural = - %
 Umidade Higroscópica = 1,3 %

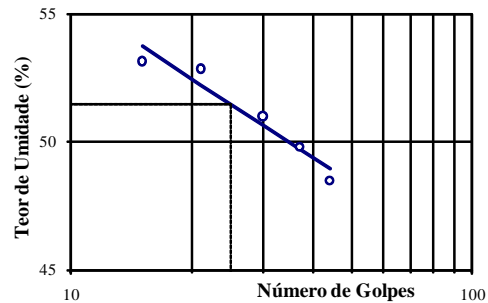
Índices de Atterberg:

Límite de Liquidez = 51,5 %
 Limite de Plasticidade = 30,3 %
 Índice de Plasticidade = 21,2 %
 Índice de Consistência = - %


Atividade Skempton:

Atividade Coloidal = 0,61 (inativa)

Límite de Liquidez



Análise Granulométrica Conjunta

	Interessado: Niander	Data: 15/4/16
	Local: Estruturas	Profundidade: -
	Ponto de Coleta: Cerâmica Sardinha	
	Amostra: Argila Amarela	

Umidade Hidroscópica

Peso caps.+solo+água-g	57,81	60,05
Peso cap.+solo-g	57,24	59,48
Peso água-g	0,57	0,57
Tara-g	13,97	14,95
Peso solo-g	43,27	44,53
Umidade-%	1,32	1,28
Umidade média-%	1,30	
Fator de correção =	0,9872	

Resumo da Granulometria

Pedregulho Grosso=	0	%
Pedregulho Médio=	0	%
Pedregulho Fino=	0	%
Areia Grossa =	0	%
Areia Média =	8	%
Areia Fina =	26	%
Silte =	30	%
Argila =	35	%

Amostra Total Seca

Peso da amostra seca ao ar =	336,27	g
Peso da amostra total seca na estufa =	331,96	g

Peneiramento Grosso

Peneira		Material retido			% da Am. total que passa
Abertura da malha		Peso do solo (g)	% da Am. Total	% Acumul.	
#	mm				
2	50	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4	19,10	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,25	0,00	0,00	0,00	100,00
5/16	7,93	0,00	0,00	0,00	100,00
1/4	6,35	0,00	0,00	0,00	100,00
4	4,76	0,84	0,25	0,25	99,75
8	2,38	0,66	0,20	0,45	99,55
10	2,00	0,07	0,02	0,47	99,53

Peneiramento Fino

Peso da amostra seca ao ar =	52,25	g
Peso da amostra total seca na estufa =	51,58	g

Peneira				% da Am. total que passa
Abertura da malha		Peso do solo (g)	% da Am. Parcial	
#	mm		% Acumul.	
20	0,84	0,19	0,37	99,16
40	0,42	0,01	0,02	99,14
60	0,250	0,00	0,00	99,14
100	0,149	8,47	16,42	82,80
200	0,074	6,77	13,13	69,73

Sedimentação

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Leit.do dens.	Leit. cor-rígida	% da Am. Parcial	% da Am. total	Altura de queda (cm)	Diâmetro
0,25	24,0	26,0	23,792	74,941	74,587	13,81	0,0990
0,5	24,0	24,0	21,792	68,641	68,317	14,23	0,0710
1	24,0	22,0	19,792	62,342	62,047	14,64	0,0510
2	24,0	20,5	18,292	57,617	57,345	14,95	0,0364
4	24,0	19,0	16,792	52,892	52,642	14,32	0,0252
8	24,0	18,0	15,792	49,743	49,507	14,53	0,0179
15	24,0	17,0	14,792	46,593	46,372	14,73	0,0132
30	24,0	16,0	13,792	43,443	43,238	14,94	0,0094
60	24,0	15,0	12,792	40,293	40,103	15,15	0,0067
120	24,0	14,5	12,292	38,718	38,535	15,25	0,0047
240	24,0	14,0	11,792	37,143	36,968	15,36	0,0034
480	24,0	13,5	11,292	35,569	35,400	15,46	0,0024
1440	24,0	13,0	10,792	33,994	33,833	15,56	0,0014

ANEXO 4

Resultados de Ensaio de Compactação

Cliente: Niander

Data: 26/4/16

Obra: -

Furo: -

Prof.: Jonas

Amostra: Cerâmica Sardinha

Características do ensaio

Tipo: Proctor Normal
 Cilindro: Grande Soquete: Grande Número de camadas: 5
 Número de golpes por camada: 12

Parâmetros de Ensaio

Número do cilindro	1	1	1	1	1	1	1
Água adicionada (g)	360	410	470	540	600	660	720
Solo húmido compactado + molde (g)	4020	4100	4145	4200	4202	4177	4152
Molde (g)	2387	2387	2387	2387	2387	2387	2387
Solo húmido compactado (g)	1633	1713	1758	1813	1815	1790	1765
Volume do molde (cm ³)	990,27	990,27	990,27	990,27	990,27	990,27	990,27
Densidade aparente úmida (g/cm ³)	1,649	1,730	1,775	1,831	1,833	1,808	1,782
Número da Cápsula	25	39	59	117	103	102	328
Solo úmido+cápsula (g)	54,94	51,60	65,10	46,35	51,70	56,79	44,59
Solo seco+cápsula (g)	48,79	45,33	57,06	40,14	43,90	47,34	37,34
Cápsula (g)	14,94	13,75	18,87	13,65	14,05	14,03	13,32
Água (g)	6,15	6,27	8,04	6,21	7,8	9,45	7,25
Solo seco (g)	33,85	31,58	38,19	26,49	29,85	33,31	24,02
Umidade (%)	18,17	19,85	21,05	23,44	26,13	28,37	30,18
Densidade aparente seca (g/cm ³)	1,396	1,443	1,467	1,483	1,453	1,408	1,369

QUADRO DE RESULTADOS DOS ENSAIOS

Densidade aparente seca máxima = 1,483 g/cm³ Umidade ótima = 23,2 %
 Densidade real dos grãos = 2,59 CBR = 2 % Expansão = 1,36 %

Variação da densidade aparente seca com a umidade