

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS MECÂNICOS E MODELAGEM  
NUMÉRICA EM ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS  
DA INDÚSTRIA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES

**CRISTIANO PENA MILLER**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MARÇO DE 2008

**FICHA CATALOGRÁFICA**

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

**33/2008**

Miller, Cristiano Pena

Determinação de parâmetros mecânicos e modelagem numérica em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos da indústria de Campos dos Goytacazes / Cristiano Pena Miller. – Campos dos Goytacazes, 2008.

xxii, 161 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) --Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2008.

Orientador: Jonas Alexandre.

Co-orientador: Gustavo de Castro Xavier.

Área de concentração: Estruturas

Bibliografia: f. 144-150

1. Alvenaria estrutural 2. Módulo de elasticidade 3. Painel de

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS MECÂNICOS E MODELAGEM  
NUMÉRICA EM ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS  
DA INDÚSTRIA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES

**CRISTIANO PENA MILLER**

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

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

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
MARÇO DE 2008

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS MECÂNICOS E MODELAGEM  
NUMÉRICA EM ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS  
DA INDÚSTRIA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES

**CRISTIANO PENA MILLER**

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

Aprovada em 19 de março de 2008.

---

Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes (D. Sc.) – IME

---

Prof. Fernando Saboya Albuquerque Jr. (D. Sc.) – UENF

---

Prof. Guilherme Cordeiro Chagas (D. Sc.) – UENF

---

Prof. Gustavo de Castro Xavier (D. Sc.) – UENF (co-orientador)

---

Prof. Jonas Alexandre (D. Sc.) – UENF (orientador)

## DEDICATÓRIA

*Dedico mais essa etapa da minha vida a minha filha, que é minha inspiração e motivação constantes, a minha esposa, minha família e todos os amigos que acreditaram em mim e colaboraram para a concretização desse objetivo*

Cristiano Pena Miller

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me permitir transpor mais essa etapa da vida.

Agradeço à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF pela importante oportunidade oferecida a mim e tantos outros através de seus programas de pós-graduação.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelos recursos financeiros disponibilizados ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço ao orientador professor D. Sc. Jonas Alexandre por sua confiança, por sua paciência, pelos conhecimentos técnico-científicos transmitidos, lições de vida compartilhadas e pelos recursos financeiros cedidos para a realização deste trabalho.

Agradeço ao co-orientador professor D. Sc. Gustavo de Castro Xavier por sua presença centrada e regrada, por sua motivação e sua atitude sempre servil ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao professor D. Sc. Guilherme Cordeiro de Chagas por sua ajuda indispensável e norteadora ao longo da realização do programa experimental.

Agradeço ao professor D. Sc. Sergio Luis Gonzales Garcia pela disponibilização dos equipamentos necessários ao desenvolvimento do programa experimental.

Agradeço à indústria ceramista União pela doação dos materiais necessários a realização do programa experimental.

Agradeço aos técnicos: Rafael da Silva Santos Monteiro e Alan de Souza Horácio, do laboratório de estruturas da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, por seu empenho no desenvolvimento das mais diversas tarefas ao longo do desenvolvimento deste trabalho e por sua amizade.

Agradeço a ajuda, colaboração, apoio e desprendimento do amigo Leonardo Gonçalves Pedroti.

Agradeço à Carolina Braga Boynard e Polyana por sua imensa ajuda, sua infindável boa vontade e disponibilidade a cada vez que se tornou necessária ao longo da realização dos ensaios.

Agradeço ao técnico do Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Milton Pereira Soares Júnior, pelo apoio durante a realização dos ensaios.

Agradeço à Carlan Ribeiro Rodrigues, técnico da oficina do Laboratório de Engenharia dos Materiais da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, pela disponibilidade de equipamentos sempre que necessários, e por seu empenho pessoal.

Agradeço à minha filha Ingrid Azevedo Miller por fazer parte da minha vida, e por trazer a esta sentido e alegria.

Agradeço à minha esposa por seu apoio constante, pela paciência nos momentos difíceis vividos, e por me trazer a serenidade tão necessária.

Agradeço a ajuda sempre serena e de bem disposta do amigo Marcus Vinícius Pereira Sant'ana.

Agradeço a ajuda incondicional da amiga Paulyene Cabral Maia.

Agradeço à Valéria Ribeiro por sua ajuda e esforço incansáveis.

Agradeço à minha sobrinha Camila pela ajuda indispensável à conclusão deste trabalho.

Agradeço aos meus pais pelo apoio ao longo de mais uma etapa de minha vida.

Agradeço a toda minha família por me trazerem o alívio necessários 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

LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE FIGURAS .....	xv
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xix
RESUMO .....	xxi
ABSTRACT .....	xxii

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1.    Objetivos .....	4
1.1.1    Objetivos gerais .....	4
1.1.2    Objetivos específicos .....	5
1.2.    Motivação.....	6
1.3.    Organização da dissertação .....	7
CAPÍTULO 2 - ARGILA, MATERIAIS CERÂMICOS E ALVENARIA ESTRUTURAL	9
2.1.    Introdução .....	9
2.2.    Argila.....	9
2.2.1.    Formação dos depósitos de argila.....	10
2.2.2.    Depósitos de argila no município de Campos dos Goytacazes/RJ .....	11
2.3.    Materiais cerâmicos .....	12
2.3.1    Histórico resumido da cerâmica pelo mundo.....	12
2.3.2    Materiais cerâmicos vermelhos.....	13
2.3.3    Conformação hidrolástica .....	15
2.3.4    Secagem e Queima.....	16
2.3.5    Propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos.....	17
2.4.    Alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.....	19
2.5.    Histórico .....	20
2.5.1    Alvenaria Estrutural no Brasil .....	23
2.6.    Componentes da Alvenaria Estrutural .....	27

2.7.	Contribuição de alguns autores ao desenvolvimento da Alvenaria Estrutural.....	29
2.5.1	Desenvolvimento de pesquisas realizadas na UENF.....	37
CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL.....		39
3.1.	Introdução.....	39
3.2.	Materiais e Métodos.....	39
3.2.1	Amostras cilíndricas de cerâmica.....	40
3.2.2	Blocos estruturais cerâmicos.....	51
3.2.3	Prismas de blocos estruturais cerâmicos.....	57
3.2.4	Ensaio de Painéis de Parede.....	58
3.2.5	Eficiência.....	65
3.2.6	Tratamento estatístico dos dados.....	66
3.2.6.1	Hipótese estatística.....	67
3.2.6.2	Teste de comparação entre a variância de duas populações (Teste F).....	67
3.2.6.3	Teste T de Student para o caso de duas amostras independentes.....	69
3.2.6.4	O critério do Tamanho Mínimo do Lote (TML).....	71
3.2.6.5	Os Critérios de Chauvenet.....	73
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		76
4.1	Introdução.....	76
4.2	Argila.....	76
4.3	Amostras cilíndricas de cerâmica.....	84
4.3.1	Variações lineares.....	85
4.3.2	Porosidade Aparente e massa específica aparente.....	89
4.3.3	Propriedades Mecânicas.....	91
4.4	Blocos cerâmicos estruturais.....	104
4.4.1	Índice de absorção de água (AA).....	106
4.4.2	Resistência à compressão simples de blocos.....	107
4.4.3	Resistência a compressão de prismas.....	110
4.5	Paredes de blocos cerâmicos estruturais.....	113
CAPÍTULO 5 - MODELAGEM NUMÉRICA.....		119
5.1	Introdução.....	119
5.1	Modelagem dos corpos-de-prova cilíndricos.....	120
5.2	Modelagem dos blocos.....	125
5.3	Modelagem dos prismas.....	131

5.4	Modelagem do painel de parede.....	134
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....		137
6.1	Conclusões.....	137
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	141
Referências Bibliográficas.....		144
Apêndice A – Tabelas Referentes a Corpos-de-prova Cilíndricos de Cerâmica .....		151
Apêndice B – Tabelas Referentes a Blocos Cerâmicos Estruturais .....		156
Apêndice C – Tabelas Referentes a Prismas de Blocos Cerâmicos .....		159
Apêndice D – Tabelas Referentes a Painéis de Paredes.....		160
Apêndice E – Tabelas referentes a Modelagem Numérica .....		161

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Reações causadas pelo aumento da temperatura.....	17
Tabela 2.2 -	Alguns parâmetros que influenciam as propriedades mecânicas de materiais cerâmicos, fonte: Zanotto <i>et al.</i> (1991).....	18
Tabela 3.1 -	Quantidades de amostras para ensaios de compressão simples. .	40
Tabela 3.2 -	Tolerâncias dimensionais individuais relacionadas à dimensão efetiva (Fonte: NBR 15270–2).....	52
Tabela 3.3 -	Tolerâncias dimensionais individuais relacionadas às médias das dimensões efetivas.....	53
Tabela 3.4 -	Valores de $\emptyset$ em função da quantidade de blocos, fonte: NBR 15270–2 .....	57
Tabela 3.5 -	Valores da razão do desvio máximo aceitável DR0 em relação ao desvio padrão para vários valores de n. ....	74
Tabela 4.1 -	Resultados de ensaios realizados de caracterização de solo para a jazida Alegria, fonte: Pedroti (2005). ....	79
Tabela 4.2 -	Resultados técnica da fotoacústica para determinação de propriedades térmicas da fração argila, fonte: Alexandre (2000).....	81
Tabela 4.3 -	Resultados de caracterização química, fonte: Alexandre <i>et al</i> (2004). ....	81
Tabela 4.4 -	Dimensões anteriores e posteriores a queima das amostras à 700°C. ....	85
Tabela 4.5 -	Dimensões anteriores e posteriores a queima das amostras à 900°C. ....	85
Tabela 4.6 -	Tolerâncias dimensionais individuais relacionadas às médias das dimensões efetivas para amostras queimadas a 700°C.....	86
Tabela 4.7 -	Tolerâncias dimensionais individuais relacionadas às médias das dimensões efetivas para amostras queimadas a 900°C.....	86
Tabela 4.8 -	Comparações pelo teste t entre as médias das variações lineares de amostras com a mesma temperatura de queima. ....	86

Tabela 4.9 -	Comparações pelo teste t para as variações lineares entre amostras com temperatura de queimas diferentes.....	87
Tabela 4.10 -	Resultados da aplicação do Teste t para comparação da porosidade aparente das amostras. ....	90
Tabela 4.11 -	Massa específica aparente em g/cm <sup>3</sup> (MEA). ....	91
Tabela 4.12 -	Tensão de ruptura para amostras, calcinadas a 700°C. ....	92
Tabela 4.13 -	Tensão de ruptura para amostras queimadas a 900°C.....	92
Tabela 4.14 -	Teste do Tamanho Mínimo de Lote (TML) para dados sobre as resistências das amostras (MPa). ....	93
Tabela 4.15 -	Aplicação do Critério de Chauvenet (C. C.) para dados sobre a resistência das amostras (MPa). ....	94
Tabela 4.16 -	Segunda aplicação do Critério de Chauvenet (C. C.) para dados sobre a resistência das amostras (MPa). ....	94
Tabela 4.17 -	Propriedades mecânicas para amostras queimadas a 700°C. ....	100
Tabela 4.18 -	Propriedades mecânicas para amostras cozidas a 900°C. ....	101
Tabela 4.19 -	Dimensões (mm) dos blocos cerâmicos queimados a 700 °C. ....	105
Tabela 4.20 -	Dimensões (mm) dos blocos cerâmicos queimados a 900°C. ....	106
Tabela 4.21 -	Massa do bloco e índice de absorção de água. ....	106
Tabela 4.22 -	Dimensões, área, carga última e resistência a compressão de blocos queimados a 700°C. ....	109
Tabela 4.23 -	Dimensões, área, carga última e resistência a compressão de blocos queimados a 900°C. ....	109
Tabela 4.24 -	Resistência a compressão de prismas queimados a 700°C.....	110
Tabela 4.25 -	Resistência a compressão de prismas queimados a 900°C.....	110
Tabela 4.26 -	Eficiência e correlações entre resistências.....	111
Tabela 4.27 -	Resistência a compressão de corpos-de-prova de argamassa ....	112
Tabela 4.28 -	Carga última e resistência a compressão de paredes.....	115
Tabela 4.29 -	Eficiência para painéis, prisma e blocos queimados a 700°C .....	115
Tabela 4.30 -	Carga última e resistência à compressão corpos-de-prova de argamassa. ....	117
Tabela 5.1 -	Propriedades mecânicas utilizadas na modelagem dos blocos....	122
Tabela 5.2 -	Propriedades mecânicas utilizadas na modelagem dos prismas.	131

Tabela B.1. -	Dimensões em milímetros dos blocos queimados a 700 °C.....	156
Tabela B.2. -	Dimensões em milímetros dos blocos queimados a 900°C.....	157
Tabela B.3. -	Massa do bloco e índice de absorção de água. ....	157
Tabela B.4. -	Dimensões, área, carga última e resistência a compressão de blocos cerâmicos estruturais queimados a 700°C. ....	158
Tabela B.5. -	Dimensões, área, carga última e resistência a compressão de blocos cerâmicos estruturais queimados a 900°C. ....	158
Tabela C.1. -	Resistência a compressão de prismas queimados a 700°C.....	159
Tabela C.2. -	Resistência a compressão de prismas queimados a 900°C.....	159
Tabela C.3. -	Resistência a compressão de corpos-de-prova de argamassa. ....	159
Tabela D.1. -	Dimensões, área, carga última e resistência a compressão de paredes. ....	160
Tabela D.2. -	Carga última e resistência à compressão de prismas queimados à 900°C. ....	160
Tabela E.1. -	Modelagens de corpos-de-prova cilíndricos de cerâmica vermelha.	161

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Stonehenge construída a 3000 anos a.C., fonte: Silva (2003).....	20
Figura 2.2 -	Reprodução gráfica do templo de Ziggurat, fonte: Garcia (2000)...	21
Figura 2.3 -	Farol de Alexandria, fonte: Hollerweger (2004). .....	21
Figura 2.4 -	Coliseu de Roma, fonte: Silva (2003). .....	21
Figura 2.5 -	Edifício Monadnock, fonte: Hollerweger (2004). .....	22
Figura 2.6 -	Catedral de Reims, fonte: Hollerweger (2004). .....	23
Figura 2.7 -	Teatro Municipal de São Paulo, fonte: Silva (2003). .....	24
Figura 2.8 -	Conjunto Residencial da Lapa – Fonte: Silva (2003). .....	25
Figura 2.9 -	Conjunto Morada do Paraíso, construído pela Encol em alvenaria não armada – Fonte: Silva (2005). .....	26
Figura 2.10 -	Parede sendo ensaiada – Fonte: Garcia (2000). .....	32
Figura 2.11 -	Trajcetórias de tensões em painéis de alvenaria comprimidas uniaxialmente – Fonte: Holanda (2002). .....	33
Figura 2.12 -	Painel de alvenaria em escala reduzida ensaiado na prensa – Fonte: Holanda (2002). .....	33
Figura 2.13 -	Painel sendo transportado para a prensa – Fonte: Holanda (2002). .....	34
Figura 2.14 -	Prisma “H” – Fonte: Silva (2003). .....	34
Figura 2.15 -	Parede formato “H” – Fonte: Silva (2003). .....	35
Figura 2.16 -	Base formato “H” – Fonte: Silva (2003). .....	35
Figura 2.17 -	Painel com abertura de porta: (a) Distribuição das tensões normais, (b) cisalhantes (c) principais – Fonte: Correa (2003). .....	36
Figura 2.18 -	Painel com abertura de janela: (a) Distribuição das tensões normais, (b) cisalhantes (c) principais – Fonte: Correa (2003). .....	36
Figura 2.19 -	Transporte de painel até a prensa – Fonte: Correa (2003). .....	37
Figura 3.1 -	Variação da tensão de resistência a compressão com o diâmetro do corpo-de-prova, fonte: Concrete Manual U. S. Bureau of Reclamation (1975) apud Mehta and Monteiro (1994). .....	42
Figura 3.2 -	Máquina extrusora Verdés modelo BR 051. ....	43
Figura 3.3 -	Corpos de prova moldados por extrusão. ....	44
Figura 3.4 -	Corpo de prova cerâmico capeado com enxofre. ....	47

Figura 3.5 -	Corpos de prova cerâmicos após remoção do capeamento. ....	48
Figura 3.6 -	Prensa servo-hidráulica da marca EMIC. ....	48
Figura 3.7 -	Extensômetro tipo PA-06-1000BA-120L. ....	49
Figura 3.8 -	Sistema de aquisição de dados LINX. ....	49
Figura 3.9 -	Corpo-de-prova cerâmico (diâmetro de 6 cm) com extensômetros. ....	50
Figura 3.10 -	Corpo de prova cerâmico (diâmetro de 3 cm) com extensômetro. ....	50
Figura 3.11 -	Bloco sem defeitos aparentes escolhido para ensaio. ....	51
Figura 3.12 -	Forno da marca T. Milley Termotécnica Ltda, modelo MPA 55. ....	52
Figura 3.13 -	Blocos com capeamento de pasta de cimento (a) e prensa servo-hidráulica, tipo Versa-teste, ELE Internacional. ....	54
Figura 3.14 -	Sistema de leitura dos impulsos emitidos pelo LVDT. ....	55
Figura 3.15 -	Bloco com LVDT's fixados. ....	55
Figura 3.16 -	Bloco com LVDT's fixados. ....	56
Figura 3.17 -	Prensa com acionador servo-hidráulico duplo. ....	59
Figura 3.18 -	Prensa com acionador servo-hidráulico único. ....	59
Figura 3.19 -	Dimensões da viga de transporte da alvenaria. ....	60
Figura 3.20 -	Viga de transporte da alvenaria. ....	61
Figura 3.21 -	Plataforma metálica utilizada para transporte da alvenaria. ....	61
Figura 3.22 -	Alvenaria sobre viga de transporte com apoios nas extremidades. ....	62
Figura 3.23 -	Plataforma com alvenaria acomodada e contraventada. ....	63
Figura 3.24 -	Ponte móvel acoplada ao pórtico metálico da prensa. ....	64
Figura 3.25 -	Painel de parede erguido pela ponte móvel da prensa. ....	64
Figura 4.1 -	Curva de distribuição do tamanho das partículas da amostra de argila da jazida Alegria, fonte Pedroti (2007). ....	77
Figura 4.2 -	Frações granulométricas do solo (%). ....	78
Figura 4.3 -	Limites de Atterberg (%), determinadas por diferentes autores. ....	80
Figura 4.4 -	Espectros de Raios-X, fonte: Alexandre (2000). ....	82
Figura 4.5 -	Curva da análise termogravimétrica diferencial da massa cerâmica, fonte: Alexandre <i>et al</i> (2004). ....	83
Figura 4.6 -	Média da variação linear dos diâmetros para amostras de diferentes diâmetros nominais e temperaturas de queima de 700 e 900°C. ....	88
Figura 4.7 -	Média da variação linear das alturas para amostras de diferentes diâmetros nominais e temperaturas de queima de 700 e 900°C. ....	88

Figura 4.8 -	Porosidade aparente (PA) medida em porcentagem, para as amostras de DN 30, 40 e 50 mm, e temperaturas de queima de 700 e 900°C. ....	89
Figura 4.9 -	Curvas tensão versus deformação vertical para corpos-de-prova queimados a 700°C. ....	95
Figura 4.10 -	Curvas tensão versus deformação vertical para corpos-de-prova queimados a 900°C. ....	97
Figura 4.11 -	Curvas tensão versus deformação horizontal para corpos-de-prova queimados a 700°C. ....	98
Figura 4.12 -	Curvas tensão versus deformação horizontal para corpos-de-prova queimados a 900°C. ....	99
Figura 4.13 -	Ruptura de corpo-de-prova com diâmetro nominal de 60 mm. ....	100
Figura 4.14 -	Variação da resistência compressão simples dos lotes das amostras. ....	101
Figura 4.15 -	Variação do módulo de elasticidade tang. (E) dos lotes das amostras. ....	102
Figura 4.16 -	Variação do coeficiente de Poisson dos lotes de corpos-de-prova. ....	104
Figura 4.17 -	Dimensões em planta do bloco estrutural. ....	105
Figura 4.18 -	Forma geométrica dos blocos ensaiados. ....	108
Figura 4.19 -	Bloco pronto para ensaio a compressão simples. ....	108
Figura 4.20 -	Bloco em rompido à compressão simples. ....	110
Figura 4.21 -	Prismas de dois blocos. ....	111
Figura 4.22 -	Corpos-de-prova de argamassa. ....	112
Figura 4.23 -	Resistência de corpos-de-prova de argamassa. ....	113
Figura 4.24 -	Bloco em início de ensaio a compressão simples. ....	114
Figura 4.25 -	Parede fissurada. ....	116
Figura 4.26 -	Deslocamento vertical médio. ....	116
Figura 4.27 -	Deslocamento perpendicular (flambagem). ....	117
Figura 4.28 -	Curva tensão-deformação da argamassa. ....	118
Figura 5.1 -	Elemento SOLID 92, fonte: help ANSYS, versão 10.0. ....	121
Figura 5.2 -	Corpos-de-prova cilíndricos de cerâmica vermelha modelados em elementos finitos. ....	121
Figura 5.3 -	Comparação entre deslocamentos calculados e medidos. ....	122

Figura 5.4 -	Distribuição de tensões no corpo-de-prova com diâmetro de 50 mm e temperatura de queima de 700°C. ....	123
Figura 5.5 -	Corpo-de-prova com diâmetro de 50 mm e temperatura de queima de 700°C após a ruptura à compressão simples. ....	123
Figura 5.6 -	Distribuição para segunda modelagem do corpo-de-prova com diâmetro de 50 mm e queimado a 700°C. ....	124
Figura 5.7 -	Distribuição dos deslocamentos do corpo-de-prova com diâmetro de 50 mm e temperatura de queima de 700°C. ....	124
Figura 5.8 -	Distribuição das tensões cisalhantes do corpo-de-prova com diâmetro de 50 mm e temperatura de queima de 700°C. ....	125
Figura 5.9 -	Modelo do bloco com modelagem tridimensional no ANSYS .....	126
Figura 5.10 -	Modelagem bidimensional da distribuição de tensões em bloco queimado a 700°C (propriedades mecânicas de amostra de Ø de 50 mm).....	127
Figura 5.11 -	Modelagem tridimensional da distribuição de tensões em bloco queimado a 700°C (propriedades mecânicas de amostra de Ø de 50 mm).....	127
Figura 5.12 -	Bloco rompido à compressão simples.....	128
Figura 5.13 -	Modelagem bidimensional da distribuição de deslocamentos em bloco queimado a 700°C (propriedades mecânicas de amostra de Ø de 60 mm)...	129
Figura 5.14 -	Modelagem tridimensional da distribuição de deslocamentos em bloco queimado a 700°C (propriedades mecânicas de amostra de Ø de 60 mm)...	129
Figura 5.15 -	Comparação entre deslocamento médio dos blocos ensaiados e os deslocamentos obtidos pelas modelagens.....	130
Figura 5.16 -	Modelo tridimensional para o estudo comportamental do prisma.	131
Figura 5.17 -	Distribuição de tensões – 700°C. ....	132
Figura 5.18 -	Distribuição de deformações – 700°C. ....	132
Figura 5.19 -	Distribuição de tensões – 900°C. ....	133
Figura 5.20 -	Distribuição de deformações – 900°C. ....	133
Figura 5.21 -	Modelo bidimensional representativo do painel de parede.....	134
Figura 5.22 -	Modelo bidimensional representativo do painel de parede com blocos queimados a 700°C. ....	135
Figura 5.23 -	Modelo bidimensional representativo do painel de parede.....	136
Figura B.1 -	Dimensões em planta do bloco estrutural.....	156

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\Delta L$	Variação das dimensões lineares
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$\eta$	Fator de eficiência entre a resistência da parede e do bloco
$\nu$	Coeficiente de Poisson
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AA	Índice de absorção de água
$A_g$	Área bruta da seção transversal
$A_n$	Área líquida da seção transversal
ATD	Análise termogravimétrica diferencial
$C_c$	Índice de compressão
DRM	Departamento de Recursos Minerais
cm	Centímetro – unidade de medida equivalente a 0,1 metros
cm <sup>2</sup>	Centímetro quadrado – unidade de medida de área
cm <sup>3</sup>	Centímetro Cúbico – unidade de medida de volume
E	Módulo de elasticidade tangente
$E_{sec}$	Módulo de elasticidade secante
$E_b$	Módulo de elasticidade do bloco
$f_b$	Tensão de resistência à compressão do bloco
$f_{bk}$	Tensão de resistência característica à compressão do bloco
$f_{bk,est}$	Tensão de resistência característica à compressão estimada do bloco
$f_{bm}$	Média da resistência à compressão dos blocos do lote
$f_{par}$	Tensão de resistência à compressão da parede
$f_{pm}$	Tensão de resistência média à compressão dos blocos
$f_p$	Tensão de resistência à compressão do prisma
$f_{pm}$	Tensão de resistência média à compressão dos prismas
g	Grama – unidade de massa
$H_0$	Hipótese estatística de nulidade
$H_a$	Hipótese estatística alternativa

IP	Índice de plasticidade
$\Delta L$	Variação das dimensões lineares (%)
$L_0$	Comprimento inicial do corpo de prova, anterior a queima (mm)
$L_1$	Comprimento inicial do corpo de prova, posterior a queima (mm)
LVDT	Sensor de para medição de deslocamento linear (Linear Variable Differential Transformer)
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MEA	Massa específica aparente ( $\text{g/cm}^3$ )
MPa	Mega Pascal – unidade de medida de tensão
$m_s$	Massa seca do bloco
$m_u$	Massa úmida do bloco
n	Número de amostras
PA	Porosidade aparente do corpo de prova
$P_u$	Peso úmido do corpo de prova
$P_s$	Peso seco do corpo de prova
$P_i$	Peso do corpo de prova imerso
$V_a$	Volume aparente ( $\text{cm}^3$ )
$W_{\text{estr}}$	Umidade de extrusão

## RESUMO

As indústrias cerâmicas do município de Campos dos Goytacazes são grandes produtoras de peças de cerâmica vermelha que são utilizadas na construção civil do Brasil. Essa produção concentra-se principalmente na fabricação de elementos de vedação. A produção de elementos cerâmicos para alvenaria estrutural tem ainda baixa porcentagem e pequena aceitação pelo mercado local da construção civil. Esta baixa aceitação deve-se principalmente ao desconhecimento por parte dos projetistas das características mecânicas dos blocos necessárias ao dimensionamento racional da alvenaria, para a carga a que se destina. A determinação desses parâmetros implica em uma ação impulsionadora da produção deste tipo de bloco, de sua utilização e conseqüente aumento da produção da indústria ceramista, agregando maior valor ao seu produto. Desta forma este trabalho objetiva o estudo dos parâmetros mecânicos da alvenaria estrutural e seus componentes. Foram realizados ensaios de compressão uniaxial em blocos, que são normalmente comercializados na região, em corpos cilíndricos de cerâmica, prismas de dois blocos e painéis de paredes. Foi encontrado o valor de eficiência entre os componentes da alvenaria estruturais, e foram realizadas modelagens computacionais a fim de reproduzir o comportamento dos materiais ensaiados.

Palavras chaves: Alvenaria estrutural, Módulo de elasticidade, painel de parede.

## ABSTRACT

The ceramics industry of the Campos dos Goytacazes County are a great produced of red ceramic pieces used in the Brazilian civil engineering. This production focuses mainly windbreak elements manufacturing. The ceramic elements production for masonry structural still has low percentage and small acceptance by the civil engineering local market. Those parameters determination implies in a production propeller action of this block type, of its use and consequent increase of the industry ceramist's production, adding more value to its product. The objective of this work is the study of the mechanical parameters of the structural masonry and their component. Uniaxial compression tests were done on blocks commercialized in the region in ceramic cylindrical shapes, two blocks prisms and wall panels. Efficiency values among masonry structures components, and computer modeling were done in order to reproduce tested material comportment.

Keywords: Masonry structural, Elasticity Modulus, Wall Panel.

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

Um importante pólo da indústria cerâmica vermelha no Brasil é o Parque Cerâmico Fluminense, que segundo dados do Departamento de Recursos Minerais (DRM, 2003), é constituído por mais de 300 empresas (predominantemente micro e pequenas) espalhadas por todo o Estado, com destaque para os municípios de Itaboraí e Rio Bonito (região Metropolitana), passando por Três Rios e Paraíba do Sul (região do Médio Paraíba) e chegando até Campos dos Goytacazes (região Norte).

Segundo Xavier (2006), o principal pólo produtor está em Campos dos Goytacazes, com cerca de 120 cerâmicas e olarias, produzindo aproximadamente 90 milhões de peças/mês. Essa produção se distribui da seguinte forma: lajotas para laje, tijolos para vedação, telhas, placas para revestimento aparente, tijolos maciços, e em menor escala na fabricação de blocos estruturais.

O município de Campos dos Goytacazes localiza-se na região Norte do Estado do Rio de Janeiro e possui uma extensão territorial de 4.032 km<sup>2</sup>. De acordo com dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - contagem populacional de 2007) possui uma população de 426.124 habitantes. O município tem sua economia baseada na indústria álcool-açucareira, na produção petrolífera e na produção de artefatos de cerâmica vermelha.

Segundo Alexandre (2000), a indústria álcool-açucareira, de tradição centenária, passou no início da década por sérios problemas de produção, que afetaram tanto sua economia própria como a economia da região. O setor

petrolífero, bastante desenvolvido na região, é responsável por grande parte do atual desenvolvimento do município, empregando um número considerável de pessoas, entretanto é muito arriscado que a economia de uma região se torne dependente de apenas um setor.

A indústria da cerâmica vermelha também desempenha um papel relevante na economia campista, gerando cerca de cinco mil empregos diretos e 25 mil indiretos (Silvestre, 2001). As unidades fabris estão em sua maioria situadas à margem direita do rio Paraíba do Sul. Este nasce na serra da Bocaina em São Paulo e atravessa os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, onde corta o município de Campos dos Goytacazes e desemboca no município vizinho de São João da Barra.

O rio Paraíba do Sul possui importância em diversos setores da economia campista, contribui no abastecimento de água, na fertilidade do solo de suas margens para a agricultura, e no fornecimento de matérias primas para a indústria da construção civil, fornecendo areia para construção civil e argila para as indústrias cerâmicas.

A planície sedimentar campista se formou às margens do Paraíba do Sul, no período quaternário, originada pelas inundações deste nos períodos de cheia, e também pela deriva do rio de sul para o norte (Alexandre, 2000). Cabe ressaltar que as jazidas exploradas pela indústria ceramista se caracterizam de material sedimentado e constitui fonte não renovável, o que ressalta a importância de se agregar um maior valor ao produto final obtido.

A evolução do processo de fabricação de artefatos cerâmicos para construção civil, como tijolos, blocos e telhas, só teve avanço significativo no Brasil nos últimos 60 anos, resultante das pesquisas desenvolvidas nesse segmento (Xavier, 2006). No município de Campos dos Goytacazes/RJ, de modo geral, maiores mudanças foram notadas apenas nos últimos dez anos, advindas das contribuições das pesquisas desenvolvidas na UENF através dos laboratórios de Engenharia Civil (LECIV) e Engenharia de Materiais (LAMAV).

O produto final do setor ceramista campista, de forma geral, nunca teve alto valor agregado e apresentava desconformidade com os requisitos da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). O baixo nível de exigência do mercado consumidor e a concorrência local eram os grandes responsáveis por este cenário de desinteresse de melhoria na qualidade e certificação dos produtos.

Entretanto, o crescente avanço do setor imobiliário em Campos dos Goytacazes/RJ e aumento do número de construtoras causaram um maior nível de exigência por parte do mercado consumidor, obrigando a ocorrência de mudanças no setor ceramista. O quadro atual apresenta uma forte tendência ao melhor controle de produção, o que se mostra evidente na criação do Laboratório de Cerâmica da Universidade Federal Rural, que com o apoio dos laboratórios de pesquisa LECIV/LAMAV/UENF e as ações do SEBRAE-RJ, auxiliam os produtores tanto na aplicação de novas tecnologias como no controle de qualidade de seu produto final.

A crescente industrialização da construção civil que objetiva sempre reduzir os custos para ser competitiva e atingir maiores mercados, hoje focaliza também a qualidade e satisfação do cliente. Nesse sentido os processos artesanais tendem ser abolidos, lançando-se mão cada vez mais da evolução tecnológica para alcançar uma técnica de produção mais apurada e econômica. Outra vertente importante no setor tem sido a busca por redução de desperdícios, tanto por motivos econômicos quanto ambientais.

Inúmeros são os processos construtivos usados atualmente pelo setor da construção civil, cada qual, com suas particularidades, vantagens, desvantagens, e seus respectivos e inegáveis méritos na evolução da história da Engenharia Civil. Entretanto, a economia já reconhecidamente proporcionada pela utilização de blocos estruturais vem fazendo essa alternativa ganhar destaque.

O processo de construção empregando blocos estruturais permite um planejamento modular do empreendimento, de forma a reduzir significativamente o

desperdício de materiais. As etapas de planejamento necessárias a esse processo de modulação resultam também em uma redução no tempo despendido para execução de cada etapa da obra, tornando esse processo rápido e econômico, e acrescentando-lhe grande competitividade frente aos demais.

Todavia, muito ainda pode ser feito pelo avanço desse processo construtivo, tanto no sentido da redução dos materiais a serem utilizados, como no de obter maior conhecimento do seu comportamento estrutural, da forma como se distribuem os esforços, e na confirmação das vantagens e desvantagens do emprego de alguns detalhes construtivos.

Nesse sentido diversos centros de pesquisas do país, como: Coordenação de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de Santa Catarina, e a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, vem desenvolvendo pesquisas no campo da alvenaria estrutural, com o intuito de disseminar esse método construtivo aproveitando todas as suas potencialidades econômicas, e esse trabalho visa contribuir neste sentido.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1 Objetivos gerais**

O intuito deste trabalho é aumentar o conhecimento sobre o comportamento de blocos cerâmicos estruturais, e dos elementos estruturais compostos por estes, por meio de ensaios de compressão simples e modelagem computacional.

O maior conhecimento sobre um produto tende a difundir sua utilização, e esforços em enfatizar as vantagens da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos como processo construtivo eficiente e econômico, tende a aumentar a demanda e

provocar um estímulo adicional à produção deste tipo de bloco pela indústria ceramista da região.

A produção de blocos cerâmicos estruturais ainda representa um percentual pequeno das peças produzidas nas cerâmicas e olarias campistas. Ampliando o emprego da alvenaria estrutural e obtendo-se construções econômicas e de qualidade comprovada, impulsionaria o aumento da produção, desenvolvimento do setor ceramista local, e o surgimento de novos postos no mercado de trabalho.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Essa pesquisa objetiva estudar e modelar o comportamento mecânico de blocos cerâmicos estruturais da indústria ceramista de Campos dos Goytacazes, assim como prismas e painéis de parede compostos por este, de forma a se obter conhecimento sobre suas propriedades mecânicas, como: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e tensão de ruptura. Nesse sentido, foram realizados ensaios de compressão simples em blocos, prismas, painéis de parede, corpos-de-prova cilíndricos de cerâmica, e a modelagem computacional no software ANSYS versão 10.0.

A determinação do módulo de elasticidade em amostras com formas e dimensões diferentes faz com que os valores dessa propriedade sofram influência de outras variáveis, tais como esbeltez, forma da amostra ensaiada, e defeitos presentes. Este fato expõe a necessidade de um corpo-de-prova com dimensões padronizadas, para que todos os pesquisadores obtenham seus resultados sob as mesmas condições de ensaio.

## **1.2. Motivação**

A indústria da construção civil desempenha um papel muito importante em nossa sociedade, tanto no sentido de oferecer o suporte infra-estrutural, quanto no sentido social. Como suporte infra-estrutural, podemos citar a construção de estradas, instalações elétricas, hidrosanitárias, etc. No âmbito social pode-se focar sua importância tanto na redução do déficit habitacional, quanto na redução do índice de desemprego, cabe ainda comentar que este é um dos poucos setores que ainda absorvem a mão-de-obra sem grande qualificação.

Segundo Sabbatini (1989) o setor da construção civil possui um elevado desperdício de recursos, traduzidos por uma produtividade inferior aos demais segmentos industriais, e uma elevada percentagem de perda de materiais. Tal fato aponta para necessidade de processos mais racionais que busquem minimizar esse desperdício. É neste contexto que a alvenaria estrutural pode mostrar sua eficiência como processo construtivo.

A utilização de todo potencial da alvenaria estrutural só será possível através do conhecimento real das características dos seus componentes e, principalmente, da maneira correta de sua aplicação. O estudo dos parâmetros necessários ao dimensionamento de edifícios em alvenaria estrutural com base em preceitos científicos é uma valiosa ferramenta para derrubar as barreiras impostas pelos profissionais da área a esse processo construtivo.

A alvenaria estrutural com blocos de concreto é bastante utilizada, devido a suas propriedades mecânicas serem bem conhecidas. A disseminação do emprego de blocos estruturais cerâmicos representa economia para a construção civil e um grande estímulo ao crescimento da indústria ceramista, trazendo desenvolvimento para ao setor, que tem relevante contribuição na economia da região.

O município de Campos dos Goytacazes/RJ tem um grande potencial para a produção de blocos cerâmicos estruturais, a obtenção de unidades de qualidade

comprovada e a disponibilização de informações técnicas sobre suas propriedades mecânicas que possibilitem seu emprego de forma racional causará uma melhor aceitação pelo mercado e impulsionará a indústria.

### **1.3. Organização da dissertação**

Essa dissertação de mestrado é direcionada ao estudo do comportamento mecânico de blocos estruturais cerâmicos produzidos pela indústria ceramista do município de Campos dos Goytacazes, possui seis capítulos dispostos e organizados como descrito a seguir.

No primeiro capítulo, faz-se uma introdução sobre a questão do pólo ceramista da instalado no município de Campos dos Goytacazes/RJ e o emprego da alvenaria estrutural pela construção civil. São também expostos os objetivos gerais e específicos deste trabalho, e os fatos que o motivaram.

Procura-se mostrar no capítulo 2 a revisão bibliográfica realizada durante o período de estudo e realização desta dissertação, onde são apresentadas diferentes pesquisas feitas na área, caracterizando o desenvolvimento tecnológico atual na utilização de alvenaria cerâmica estrutural, assim como também um breve histórico sobre seu surgimento.

No capítulo 3 é descrito o programa experimental adotado para a realização dos ensaios nas amostras de cerâmicas cilíndricas, nos blocos, nos prismas e nos painéis de parede. Descrevem-se os equipamentos utilizados e a metodologia empregada de forma detalhada.

São apresentados ao longo do capítulo 4 os resultados da caracterização e dos ensaios de compressão simples realizados nas amostras cerâmicas cilíndricas, nos blocos cerâmicos estruturais, em prismas de dois blocos e em painéis de parede de blocos cerâmicos.

No decorrer do capítulo 5 mostra-se a modelagem do comportamento estrutural dos blocos, prismas e painéis de parede através da implementação discretizada por elementos finitos utilizando o software ANSYS versão 10.0, e são comparados os resultados obtidos com aqueles apresentados por autores que realizaram estudos semelhantes.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões, recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2 - ARGILA, MATERIAIS CERÂMICOS E ALVENARIA ESTRUTURAL**

### **2.1. Introdução**

Este capítulo apresenta algumas características das argilas, sua formação, e algumas peculiaridades da argila encontrada na baixada campista. São apresentadas também características da cerâmica vermelha e sua contextualização na economia brasileira e campista. São mostradas as peculiaridades do sistema construtivo em alvenaria estrutural e um breve histórico sobre seu desenvolvimento. E por fim, são comentadas de forma resumida as pesquisas realizadas pelos autores consultados ao longo da realização deste trabalho.

### **2.2. Argila**

Segundo Santos (1989), a argila pode ser definida como um material natural, de consistência terrosa, com granulometria fina, que adquire certa plasticidade em contato com água. As argilas são constituídas essencialmente por argilominerais, que são compostos por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, contendo ainda, geralmente, certo teor de elementos alcalinos e alcalinos terrosos.

A designação argila também é dada à fração do solo cujas dimensões sejam inferiores a 0,002 milímetros segundo a classificação da ABNT, ou seja, as

partículas coloidais presentes no solo. Existem também outras escalas de classificação dos solos pela granulometria como: International Society of Soil Science, US Department of Agriculture, Continental e Massachuset Institute, que considera argila as partículas com diâmetro inferior a 2  $\mu\text{m}$ .

A fração argila é composta por diferentes grupos de argilominerais (caolinita, esmectita, montmorilonita, illitas, etc.), óxidos, hidróxidos coloidais floculados, matéria orgânica nos mais diversos graus de alteração, materiais não cristalinos, ácidos, bases, sendo todos esses constituintes em proporções variadas (Callister,1998).

### **2.2.1. Formação dos depósitos de argila**

Os depósitos de argila, quanto a sua formação, podem ser agrupados em dois grandes grupos: as argilas residuais e as transportadas. As argilas residuais são aquelas que permanecem no local onde ocorreu o intemperismo da rocha que a originou. As argilas transportadas, também chamadas de secundárias, são aquelas que sofreram transporte do local de sua formação. Vários são os agentes transportadores das argilas, como: o vento, águas e geleiras. Os sedimentos são transportados em suspensão e sua deposição ocorre por sedimentação mecânica (Souza e Santos, 1989). De acordo com a deposição final as argilas podem se classificadas em:

- Argilas marinhas – são formadas pela deposição de suspensões aquosas que foram transportadas por correntes marinhas até certa distância da costa;
- Argilas de estuário – trata-se da deposição de argila em braços oceânicos rasos, possuem extensão limitada e camadas ou áreas de laminações arenosas;

- Argilas de pântano – são muito plásticas, puras e ricas em matéria orgânica;
- Argilas fluviais – consiste na argila resultante da deposição em áreas baixas de rios, e em planícies de inundação no período de cheia;
- Argilas lacustres – formadas por camadas alternadas de materiais, são argilas de formação recente e comuns em áreas onde houve inundação.

### **2.2.2. Depósitos de argila no município de Campos dos Goytacazes/RJ**

O município de Campos dos Goytacazes/RJ é situado em uma planície deltaica e aluvionar (a de maior porte da bacia do delta do Paraíba), constituída por sedimentos quaternários com abundância de materiais argilosos (Alexandre, 2000).

Os depósitos de argila encontrados no município de Campos dos Goytacazes são formados pela sedimentação de materiais transportados pelo rio Paraíba do Sul ao longo de seu curso. Essas deposições se fizeram nas planícies de inundação do rio, reguladas pelos períodos de cheia e seca e pelo micro relevo da região (Alexandre, 2000; Ramos, 2006).

Os sedimentos fluviais caracterizam-se pela presença de argilas e siltes, micáceos, de coloração acinzentada e areias quartzosas de coloração branco-amareladas. Os sedimentos de origem lacustre são depositados em ambientes de água doce e pouco salobra, formados pelos depósitos de lagos e lagoas (Souza e Santos, 2006).

Os depósitos de sedimentos moldaram-se de acordo com a topografia local, formando camadas e lentes, que se diferem verticalmente por sua composição e

período de deposição. Segundo Alexandre (2000), é de se supor que a deposição desses sedimentos em camadas permita a ocorrência de interações entre os sedimentos e as biomassas existentes.

As jazidas são compostas por uma camada inicial com profundidade de aproximadamente 20 cm, composta de material de cor escura com elevado teor de matéria orgânica. A camada seguinte trata-se de uma argila inorgânica de alta plasticidade, cujo argilomineral predominantemente encontrado é a caulinita (Alexandre, 1997).

### **2.3. Materiais cerâmicos**

A American Ceramic Society define materiais cerâmicos como todos os materiais de emprego em engenharia ou produtos químicos inorgânicos, utilizados perante tratamento térmicos elevados.

O termo “cerâmico” é derivado do grego *keramikos*, que significa “matéria prima queimada” ou “feito de terra” (Xavier, 2006). O processo de fabricação destes materiais consiste em uma secagem lenta, após a qual a peça é moldada e submetida a altas temperaturas que lhe atribuem rigidez e resistência mediante a fusão de certos componentes da massa.

A cerâmica pode ser uma atividade artística, em que são produzidos artefatos com valor estético, ou uma atividade industrial, através da qual são produzidos artefatos com valor utilitário.

#### **2.3.1 Histórico resumido da cerâmica pelo mundo**

Artefatos cerâmicos acompanham o homem desde a sua pré-história, Silva (2005) afirma que logo após abandonar as cavernas e se tornar agricultor, o homem

desenvolveu a necessidade de armazenar água, alimentos e sementes para a próxima safra, os recipientes destinados a essas tarefas deveriam ser resistentes, impermeáveis e de fácil fabricação. Essas características foram encontradas na modelagem em argila.

Os recipientes de barro evoluíram para peças cerâmicas e foram adotados pelas mais diversas culturas. A porcelana surgiu na China e tornaram conhecida sua utilização no norte da Europa após a renascença, e na Alemanha surgiram peças similares no início do século XVIII

Manifestações do emprego da cerâmica pelos Babilônicos e os assírios como ladrilhos esmaltados, e de persas na fabricação de objetos em argila cozida em alto brilho, misturando óxidos metálicos para obtenção das cores, são datadas do século VI a.C. A cerâmica recebeu contribuição dos mais diversos povos: gregos, romanos, chineses, ingleses, italianos, franceses, alemães e norte-americanos, até evoluir aos artefatos que conhecemos hoje.

Atualmente, o uso da cerâmica se difundiu pelas mais diversas áreas, desde a engenharia até a medicina. Tijolos comuns e refratários, blocos estruturais, revestimentos para moradias, aplicações aeroespaciais e de tecnologia de ponta, blindagem térmica de ônibus espaciais, produção de nanofilmes, sensores para detectar gases tóxicos, varistores de redes elétricas, são algumas das várias aplicações que se dá a esse abundante e promissor produto em nossa sociedade.

### **2.3.2 Materiais cerâmicos vermelhos**

Os materiais cerâmicos são compostos inorgânicos, não-metálicos, formados na grande maioria das vezes pela ligação iônica, com alguma natureza covalente, entre elementos metálicos e não-metálicos (Callister, 2000).

Em geral, os materiais cerâmicos são duros e frágeis, com pouca tenacidade e ductilidade. São bons isolantes térmicos e elétricos, devido à ausência de elétrons de condução. Tem temperaturas de fusão relativamente altas e grande estabilidade química em muitos ambientes hostis, devido as suas fortes ligações químicas (Smith, 1998).

Muitos materiais cerâmicos têm estruturas cristalinas tipo silicato, as quais consistem de átomos (íons) de silício e oxigênio, ligados entre si de várias formas. Muitos minerais como: argilominerais, feldspato, mica, também são silicatos. Muitos silicatos têm utilização como material de engenharia, devido a seu baixo custo, disponibilidade e propriedades especiais.

A ligação Si-O na estrutura  $\text{SiO}_4^{4-}$  é aproximadamente 50% covalente e 50 % iônica. Uma vez que o íon  $\text{Si}^{4+}$  é pequeno e bastante carregado eletricamente, resultando em altos valores de forças de ligação no interior dos tetraedros de  $\text{SiO}_4^{4-}$ , e conseqüentemente, ocorrem geralmente ligações entre vértices, e muito raramente entre arestas. Quando três vértices, no mesmo plano, se ligam aos vértices de outros três tetraedros formam-se estruturas de silicatos em camadas. A fórmula química desta estrutura é  $\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$ . Estas camadas podem ligar-se a outros tipos de camadas estruturais, porque em cada tetraedro existe ainda um oxigênio não ligado (Smith, 1998).

O argilomineral caulinita, um dos mais comumente encontrados, possui uma estrutura laminar relativamente simples, com duas camadas, onde a camada tetraédrica de sílica neutralizada eletricamente por uma camada adjacente de  $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$ , resultando na fórmula:  $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ . Um cristal de caulinita é composto por uma série dessas camadas ou lâminas duplas, empilhadas de forma paralela umas sobre as outras, as quais formam pequenas placas planas com diâmetros tipicamente inferiores a 1  $\mu\text{m}$  e praticamente hexagonais (Callister, 2000).

A argila produto da extração mineral das indústrias ceramistas precisa passar por um processo de beneficiamento antes de ser empregada na fabricação dos

artefatos cerâmicos, este processo prévio geralmente é caracterizado por: moagem ou trituração (para redução das partículas), seguido por um peneiramento. Para a produção dos artefatos a matéria-prima precisa ser moldada e sofrer um tratamento térmico, que geralmente é o cozimento.

### **2.3.3 Conformação hidroplástica**

Quando adicionada água ao material argiloso as moléculas de água se posicionam entre as camadas da estrutura cristalina formando uma película fina ao redor das partículas de argila. As partículas envoltas por essa película se tornam livres para se mover umas sobre as outras, o que resulta na plasticidade da mistura água-argila (Callister, 2000).

Devido a essa plasticidade os minerais de argila, quando misturados com água, podem ser moldados sem que ocorra o aparecimento de trincas, entretanto essa mistura apresenta um limite de escoamento muito baixo. Por esse motivo a saturação da massa argilosa deve produzir uma trabalhabilidade suficiente para que a peça seja moldada, mas com resistência suficiente para manter sua forma durante os processos de manuseio e secagem.

A técnica de conformação hidroplástica mais empregada na indústria ceramista é a extrusão. Esta pode ser definida como a passagem da massa argilosa plástica, mas com relativa rigidez, por um orifício molde de seção reta com a forma e dimensões finais desejadas para os artefatos cerâmicos, este é o processo utilizado para fabricação de tijolos, blocos, tubos, etc.

O equipamento mais usado para a execução da conformação hidroplástica é a máquina de extrusão (em vácuo), tipo fuso onde a massa argilosa plástica é forçada por movimento de fuso a passar por uma matriz de aço ou liga de elevada dureza (Smith, 1998).

Após o processo de conformação da peça é necessário se remover o líquido inserido no sistema para conferir plasticidade à massa argilosa, a fim de se obter uma maior resistência para o produto. Esse líquido é removido por um processo de secagem. O corpo conformado e seco é conhecido por cru, e para melhorar sua densidade e resistência mecânica, a peça precisa passar por um tratamento térmico. O tratamento térmico utilizado nas olarias e cerâmicas é o cozimento.

### **2.3.4 Secagem e Queima**

O processo de secagem pelo qual a peça passará deve ser muito criterioso, pois trincas e outros diversos defeitos podem surgir no produto final decorrentes de um procedimento mal executado. O controle da taxa da remoção da água é de imperativa importância, pois a secagem das regiões internas se dá por meio da difusão de moléculas de água para a superfície, ao passo, que nas superfícies externas se dará por evaporação.

Procedimentos que tornem a taxa de evaporação maior que a taxa de difusão causará a secagem da superfície externa, e conseqüente contração de volume, mais rapidamente que o interior, provocando a formação dos defeitos anteriormente comentados. O tamanho das partículas também influencia na contração do volume, sendo este efeito ampliado quanto menor forem as dimensões das partículas (Callister, 2000).

Um processo de secagem eficiente deve equilibrar as taxas de evaporação e difusão, tendo a primeira, valor no máximo igual à última. O controle da taxa de evaporação pode ser feito através do controle da temperatura, da umidade e pela taxa de escoamento do ar. Geralmente a secagem é realizada a uma temperatura de aproximadamente 100°C por um período de até 24 horas.

Após a secagem a peça perde plasticidade e ganha resistência, entretanto, o ganho de resistência ainda não é suficiente para a maioria das aplicações a que se

destinam os produtos cerâmicos, sendo necessário então se lançar mão de um tratamento térmico (cozimento) para o aumento da resistência.

Durante a operação do cozimento ocorre redução da porosidade, provocando aumento da densidade e uma considerável melhora na resistência mecânica. O aumento da temperatura fornece energia para as reações químicas que ocorrem no material, alterando sua estrutura cristalina. As mudanças ocorridas no material podem ser observadas na Tabela 2.1 elaborada a partir de dados dos ensaios de Alexandre (2000) e Xavier (2006).

Tabela 2.1 - Reações causadas pelo aumento da temperatura.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Reações Químicas</b>
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

### 2.3.5 Propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos são relativamente frágeis, duros, possuem uma baixa resistência ao impacto e não apresentam deformação plástica apreciável. Apesar dessas características, possui alta resistência à abrasão, inércia química e

resistência a altas temperaturas (refratariedade), o que possibilita uma enorme gama de aplicações para esses materiais na engenharia.

A falta de plasticidade está ligada as suas ligações químicas iônicas e covalentes. Nos cerâmicos ligados covalentemente, a ligação entre os átomos é específica e direcional, envolvendo troca de carga elétrica entre os pares de átomos. Desta forma, quando os cristais covalentes são suficientemente deformados, há ruptura frágil devido à separação de suas ligações atômicas, sem que haja subsequente restauração (Smith, 1998).

Os poros dos materiais cerâmicos são regiões de concentração de tensões, e ao atingir um valor crítico essas tensões provocam a abertura de fissuras que se propagam. Assim, uma vez criadas condições para o início da sua propagação, as fissuras continuam a crescer até causarem a ruptura. Os poros são também prejudiciais à resistência da peça cerâmica devido à redução da área da seção transversal útil que causam.

A resistência mecânica dos produtos cerâmicos está ligada a uma série de fatores que dizem respeito tanto às propriedades do material (que são variáveis com a região da jazida) quanto do ambiente no qual esta inserido. Zanotto *et al.* (1991) relaciona os fatores que influem na capacidade resistente de uma peça cerâmica, tais fatores são mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Alguns parâmetros que influenciam as propriedades mecânicas de materiais cerâmicos, fonte: Zanotto *et al.* (1991).

<b>Parâmetros do material</b>	<b>Meio ambiente</b>
Composição	Temperatura
Estrutura cristalina	Atmosfera
Microestrutura	Taxa de deformação
Defeitos/falhas	Fadiga estática ou cíclica
Condições superficiais	Estado de tensão, isto é, uniaxial ou
Tensões internas	multiaxial
Tamanho e geometria da amostra	

## **2.4. Alvenaria estrutural de blocos cerâmicos**

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo onde a parede possui duas funções básicas: servir com elemento de vedação e resistir aos esforços a que a estrutura está submetida, atuando como elemento da mesma. As paredes de alvenaria são resultado da união de diferentes materiais, e essa composição diversificada impõem certa dificuldade na análise de seu comportamento estrutural.

A construção em alvenaria estrutural cerâmica é um processo eficiente e econômico, possibilitando uma economia de até 30% na construção (dependendo da disposição arquitetônica), o que pode fazer a moradia acessível a classes sociais de menor poder aquisitivo (Ramalho & Correa, 2003).

Levando-se em consideração que a indústria ceramista brasileira é responsável por 1% do produto interno bruto (PIB) nacional, equivalente a cerca de 6 bilhões de dólares (ABC, 2003), a disseminação desse processo construtivo significa também um aquecimento no mercado consumidor deste setor.

O município de Campos dos Goytacazes/RJ se destaca entre os produtores do Parque Cerâmico Fluminense, apresentando um pólo industrial com cerca de 100 cerâmicas e Olarias, sendo 62 sindicalizadas, com uma produção aproximada de 90 milhões de peças/mês (Xavier, 2006). Tais indústrias, com auxílio das entidades de pesquisa regionais como os laboratórios de engenharia LECIV/LAMAV/UENF, buscam aprimorar seus processos produtivos na tentativa de agregar maior valor ao seu produto final.

A produção de blocos cerâmicos estruturais na região ainda é pequena, comparada aos demais artefatos produzidos. Entretanto, com um mercado imobiliário em crescente ascensão, esse produto pode ganhar mercado, desde que se produza e difunda conhecimento técnico satisfatório para seu emprego.

## 2.5. Histórico

Segundo Ramalho & Correa (2003), a alvenaria como material estrutural é um dos mais antigos métodos construtivos. A utilização de paredes de pedra e tijolos cerâmicos é conhecida desde a antiguidade, de onde se podem citar exemplos de sua utilização tais como: as pirâmides, o templo de Ziggurat, o Farol de Alexandria, pontes, castelos e catedrais da Idade Média.

Silva (2003) cita em seu trabalho que as construções mais antigas já feitas pelo homem tiveram como primeira matéria prima os blocos de pedra, quer foram utilizados por egípcios, gregos e romanos na construção de templos, fortalezas e pirâmides. E entre as construções com pedra de maior relevância cita Stonehenge (mostrada na Figura 2.1), no sul da Inglaterra a mais de 5000 anos, e a pirâmide de Queóps construída a mais de 4000 anos a.C.



Figura 2.1 - Stonehenge construída a 3000 anos a.C., fonte: Silva (2003).

Seguindo a evolução da alvenaria surgiram na antiguidade grandes obras utilizando alvenaria cerâmica que se destacam por suas dimensões e imponência. O templo de Ziggurat (Figura 2.2) foi construído com tijolos de barro há 2200 anos aC. O farol de Alexandria (Figura 2.3) foi construído no ano 280 aC., com aproximadamente 165 metros de altura, e tinha por objetivo auxiliar a navegação dos barcos que chegavam à ilha de Faros no Egito. O Coliseu de Roma (Figura 2.4), também conhecido como anfiteatro de Flavian, construído em 82 dC., possui diâmetro de 527 metros e 50 metros de altura, e persiste até os dias de hoje (Garcia, 2000).

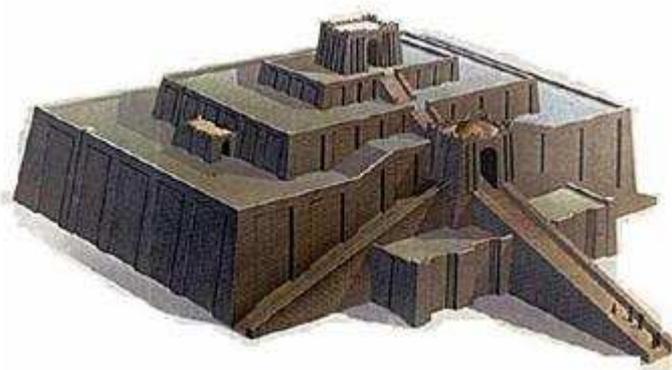


Figura 2.2 - Reprodução gráfica do templo de Ziggurat, fonte: Garcia (2000).

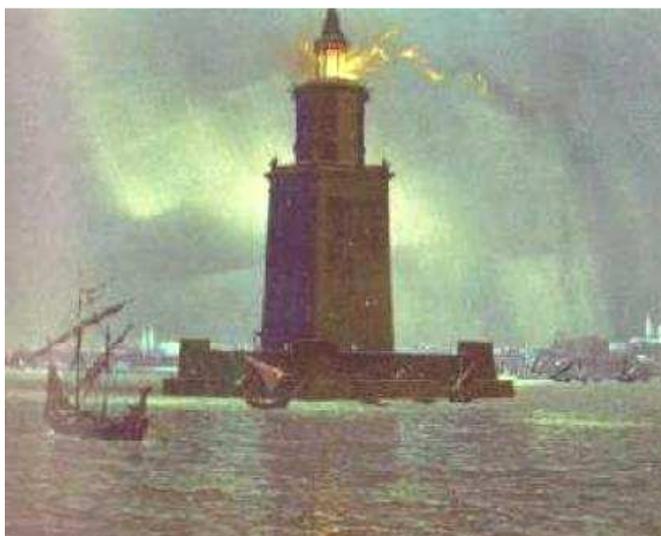


Figura 2.3 - Farol de Alexandria, fonte: Hollerweger (2004).



Figura 2.4 - Coliseu de Roma, fonte: Silva (2003).

Esse procedimento construtivo na antiguidade era caracterizado pela utilização de paredes muito espessas, em torno de 2 a 2,5 metros. Já na Idade Moderna, ocorreu uma tendência de melhor aproveitamento dos materiais, e em 1890 foi construído em Chicago o Edifício Monadnock de 16 andares com paredes de 1,83 m (Calçada, 1998), mostrado na Figura 2.5.



Figura 2.5 - Edifício Monadnock, fonte: Hollerweger (2004).

Com a industrialização, e a utilização do aço como material de construção, e o surgimento do concreto armado em grande escala, a alvenaria foi deixando de ser o principal material. A versatilidade, esbelteza, possibilidade de maiores vãos e liberdade arquitetônica oferecidas pelos novos materiais provocaram o relativo abandono da alvenaria como elemento.

Por volta dos anos 50 se notou na Europa o ressurgimento da alvenaria estrutural, utilizando agora novos materiais e explorando todas as suas possibilidades, por tratar-se tanto de uma estrutura de suporte como de fechamento, e as conseqüentes reduções de custo final da obra (Mendes, 1998).

Silva (2005) relata a construção de magníficas obras entre os séculos XII e XVII, utilizando a alvenaria estrutural. Entre elas as grandes catedrais européias que

conservam sua imponência até os dias atuais. A Figura 2.6 mostra a Catedral de Reims, construída entre 1211 e 1300 d.C.



Figura 2.6 - Catedral de Reims, fonte: Hollerweger (2004).

### 2.5.1 Alvenaria Estrutural no Brasil

Basicamente duas vertentes da alvenaria estrutural desenvolveram-se: a alvenaria não armada na Europa e a alvenaria armada nos Estados Unidos (decorrente da presença de abalos sísmicos). Desta época o exemplo mais característico foi um prédio de 13 andares na Basileia (Suíça) com paredes internas de 15 cm e externas de 37,5 cm. Foram construídos nesta época vários edifícios de até 18 andares com paredes de 15 cm em toda a Europa, sempre com a alvenaria não armada. Até hoje os edifícios de alvenaria tanto na Europa como nos Estados Unidos variam de 12 a 22 pavimentos (Silva, 2003).

Segundo Sabbatini (1984) apud Silva (2003), a alvenaria estrutural no Brasil teve sua fase inicial, dimensionada empiricamente, sobre forte influência americana,

pois não possuía pesquisas nacionais que orientassem os profissionais para as necessidades e características dos materiais existentes no país. Um marco do pioneirismo na utilização da alvenaria estrutural no Brasil foi a construção do Teatro Municipal de São Paulo, mostrado na Figura 2.7.

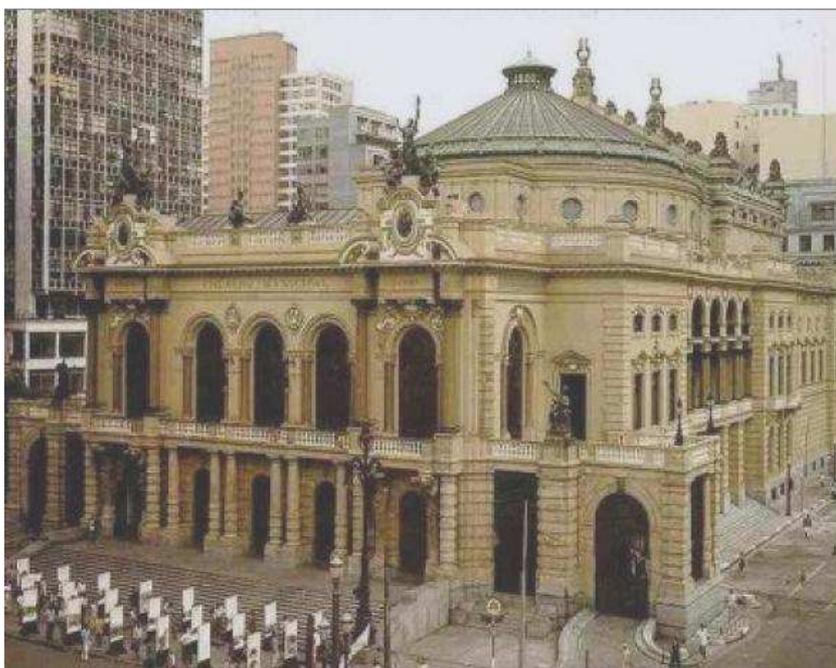


Figura 2.7 - Teatro Municipal de São Paulo, fonte: Silva (2003).

No Brasil Colônia foram muito utilizadas paredes de taipa, uma mistura de argila e fibras vegetais, com larga espessura. O desenvolvimento da alvenaria com blocos de concreto ocorreu a partir da década de 70. A primeira grande obra de alvenaria estrutural no Brasil é o Central Parque Lapa com 4 prédios de 12 andares, com cálculo norte-americano, mostrado na Figura 2.8. Toda a tecnologia destes primeiros empreendimentos foi trazida dos Estados Unidos, que utilizava blocos de concreto e bastante armadura devido aos efeitos sísmicos (Calçada, 1998).



Figura 2.8 - Conjunto Residencial da Lapa – Fonte: Silva (2003).

Como toda tecnologia foi importada, o processo de adaptação à realidade de nossos materiais, mão de obra e clima apresentou uma série de patologias que fez a utilização da alvenaria estrutural decair por volta de 1986 depois de um grande número de construções até bastante arrojadas.

Junto com os blocos de concreto, foram também neste período introduzidos os blocos sílico-calcáreos e blocos cerâmicos especiais para estrutura. Junto a isto começaram os esforços para o desenvolvimento das Normas Técnicas da ABNT, que ainda estão em vigor desde a sua primeira publicação.

A partir de 1990 houve uma crescente conscientização da necessidade de se aperfeiçoar a alvenaria estrutural no sentido de minimizar as suas patologias, aperfeiçoar as técnicas construtivas e o cálculo estrutural, objetivando um melhor resultado final para a obra sem abrir mão da tradicional redução de custos que este sistema alcança.

Foram realizadas várias pesquisas no sentido de unir a tecnologia de blocos de concreto (americana) com a filosofia da alvenaria não armada (européia). O

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Construção Civil da Escola Politécnica da USP, na época coordenado pelo Prof. Dr. Fernando Henrique Sabbatini, que realizou pesquisas para várias empresas, como Tebas, Lix da Cunha e Encol. O trabalho com a Encol, com as consultorias da Tecsof (São Carlos) e Wendler Projetos (Campinas) na área de estruturas, resultou um método construtivo em alvenaria não armada para até 8 pavimentos, depois estendido até 10 pavimentos (Silva, 2005). Um dos primeiros empreendimentos resultantes desses estudos foi o Conjunto Morada do Paraíso em São José dos Campos (Figura 2.9).



Figura 2.9 - Conjunto Morada do Paraíso, construído pela Encol em alvenaria não armada – Fonte: Silva (2005).

Segundo Ramalho & Correa (2003), atualmente no Brasil o sistema construtivo em alvenaria estrutural tem ganhado um grande impulso. Devido à estabilização da economia, a concorrência tem feito com que um número crescente de empresas passe a se preocupar mais com os custos, acelerando a pesquisa de utilização de novos materiais.

## 2.6. Componentes da Alvenaria Estrutural

A NBR 10837 (1989) estabelece dois conceitos importantes a serem definidos: componente e elemento. Segundo esta norma, um componente caracteriza-se por algo que compõe os elementos, que por sua vez irão compor a estrutura. Os componentes principais da alvenaria estrutural são os blocos (unidades), a argamassa, graute e armadura. Os elementos por sua vez, são uma parte mais elaborada da estrutura, sendo formado pela união dos componentes, dentre estes se podem citar: paredes, pilares, cintas, vergas, etc.

A produção dos blocos pela indústria cerâmica apresenta como principais desafios: a obtenção de peças uniformes, a necessidade de grandes espaços tanto para estocagem como para secagem, e a obtenção de temperaturas de queima adequadas à resistência necessária a peça. O processo de estocagem e secagem proporciona um elevado índice de acidentes com as peças elevando o número de perdas.

O objetivo da queima em cerâmica é transformar um material friável num produto resistente através da ação do calor. Durante a queima, após se alcançar elevadas temperaturas, o material sinteriza. As partículas em contato mecânico criam continuidade da matéria na região do contato, isto é, as partículas se unem umas as outras a nível atômico. Os contatos formados crescem em função do transporte dos átomos ou íons para esta região.

Ao longo da queima ocorre uma série de transformações químicas e físicas no material: perda de massa associada às transformações químicas, densificação e vitrificação associada a transformações físicas (Souza e Santos, 1989).

As principais características mecânicas dos blocos são a tensão de resistência à compressão ( $f_b$ ), o módulo de elasticidade ( $E_b$ ), tensão de resistência à tração e coeficiente de Poisson. A tensão de resistência à compressão ( $f_b$ ) pode ser relativa à área bruta ( $A_g$ ) ou área líquida ( $A_n$ ), entretanto, geralmente se emprega no

Brasil tensão de resistência à compressão relacionada com a área bruta, consideração adotada nesse trabalho (NBR 15270-2, 2005).

A argamassa é o elo da alvenaria e tem como funções principais solidarizar as unidades e uniformizar as tensões entre as unidades de alvenaria, absorver pequenas deformações e prevenir a entrada de água e de vento nas edificações. Usualmente composta de cimento e areia, a argamassa deve possuir boas características de trabalhabilidade, resistência e durabilidade para o desempenho de suas funções.

O graute é um concreto relativamente fluido, no qual são utilizados agregados de pequenas dimensões, e tem por função o preenchimento dos vazios dos blocos em alguns pontos específicos da alvenaria. As principais funções do graute são: aumentar a área da seção transversal do bloco, promover a aderência do bloco a eventuais armaduras colocadas em seus vazios e proporcionar amarração entre as fiadas de blocos.

Segundo a NBR 10837 (1989) o graute deve possuir uma resistência característica a compressão maior ou igual a duas vezes a resistência característica a compressão do bloco. Essa recomendação deve-se ao fato da resistência característica a compressão do bloco estar referida a área bruta, e este possuir um índice de vazios geralmente em torno de 50%.

O aço utilizado para armar determinados pontos da alvenaria estrutural é o mesmo empregue nas armaduras dos elementos de concreto armado. Estas armaduras devem sempre ser envolvidas por graute, para garantir um trabalho conjunto com o restante dos elementos da alvenaria. Uma exceção é feita para as armaduras colocadas nas juntas das argamassas de assentamento, caso este, em que o diâmetro da barra de aço não deve ultrapassar metade da espessura da junta.

## **2.7. Contribuição de alguns autores ao desenvolvimento da Alvenaria Estrutural**

O estudo dos mecanismos de ruptura na alvenaria foi primeiramente realizado por Hisldorf (1969) que afirma em seu trabalho que a ruptura da alvenaria seria governada pela interação entre argamassa e bloco e ocorreria no momento em que atingisse a resistência da argamassa. Seus preceitos são baseados em critérios de similaridade entre o comportamento dos materiais.

Gomes (1974) foi um dos primeiros pesquisadores brasileiros a descrever dois principais modelos que tentam explicar os modos de ruptura das paredes em alvenaria, e seu estudo experimental teve como objetivo caracterizar mecanicamente os materiais, e por consequência verificar o mesmo em paredes e prismas. O autor desenvolveu um estudo caracterizando as alvenarias cerâmicas armadas e não armadas, verificando também a deformação lenta em paredes.

Khoo e Hendry (1975) explicaram a ruptura na alvenaria usando um critério de deformação máxima para as unidades como limitante para a ruptura. Estes autores relacionaram à deformação lateral da unidade às condições de tensões triaxiais da argamassa de assentamento considerando uma compatibilidade entre deformações dos materiais.

Hamid e Drysdale (1979) desenvolveram um modelo relacionando a resistência da alvenaria com algumas propriedades obtidas através de testes dos elementos individuais. Os autores partiram da premissa de haver uma compatibilidade entre as deformações na direção paralela à aplicação da carga, considerando o critério de ruptura dos blocos sob um estado biaxial de tensões e a argamassa e o graute sob um estado triaxial de compressão. O estudo realizado por estes autores pode ser aplicado tanto para alvenaria armada, quanto para a não armada.

Bout (1979) realizou diversos testes em prismas (resistência à compressão) variando a relação altura/espessura, avaliando a influência desta relação na resistência. Também através de resultados das propriedades mecânicas dos materiais, avaliou-se diferentes combinações entre estes, numa tentativa de otimizar os resultados.

Atkinson *et al.* (1985) estudaram o comportamento de prismas de tijolos, através da interação tijolo-argamassa sob um estado de tensões multiaxiais. Estes autores determinaram o comportamento isolado de tijolos sob o estado de tensões biaxial e da argamassa sob um estado de tensões triaxial. Com os resultados, os autores formularam um modelo para prever a ruptura de prismas confeccionados com unidades sólidas, além de verificar as variações do Módulo de Elasticidade e do Coeficiente Poisson com o aumento das tensões de confinamento.

Os autores verificaram que a não linearidade da curva tensão deformação dos prismas se deve ao confinamento da argamassa, pois, nos ensaios triaxiais em argamassas, as deformações não lineares foram mais acentuadas na medida em que se aumentaram as tensões de confinamento.

Cheema e Klingner (1986) descreveram um modelo que relaciona o tipo de ruptura com a proporção de rigidez dos materiais, sendo esta uma das primeiras pesquisas a associar o módulo de elasticidade dos materiais ao tipo de ruptura ocorrido na alvenaria. Em seus estudos eles ensaiaram prismas confeccionados com um determinado tipo de bloco e de argamassa, sendo que as demais proporções foram obtidas com a utilização de um método numérico aproximado (Elementos Finitos), conseguindo-se independentemente do tipo de material prever a resistência última da alvenaria. As não linearidades foram consideradas no modelo através da utilização do módulo de elasticidade secante de todos os materiais empregados.

Mendes (1998) avaliou a resistência à compressão em blocos cerâmicos estruturais e sua resistência à tração através de ensaio indireto, e determinou o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para as argamassas e grautes utilizados. Em seus estudos o autor estabeleceu relações entre resistência e módulo de elasticidade para os grautes, e relações entre a resistência da argamassa e o módulo de elasticidade do prisma.

Mohamad (1998) estudou o comportamento mecânico de prismas de blocos de concreto. Realizando ensaios triaxiais para determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson da argamassa, para os blocos foram realizados ensaios de tração indireta do bloco, compressão e ensaios a compressão em prismas. Foi verificada a variação do módulo de elasticidade da argamassa com a tensão de confinamento. Para os prismas foi demonstrada a influência da espessura da junta e do traço de argamassa na resistência final.

GARCIA (2000) buscando obter parâmetros físicos para alvenaria estrutural ensaiou paredes, blocos, prismas e corpos de prova cilíndricos de argamassa. As paredes ensaiadas foram construídas no seu local final de ensaio, evitando qualquer problema posterior com o transporte (Figura 2.10).

Em seus ensaios foram usados dois acionadores hidráulicos e as paredes foram pintadas com cal para melhor visualização das fissuras. A autora estabelece 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 foi aproximadamente igual à resistência das paredes não armadas.

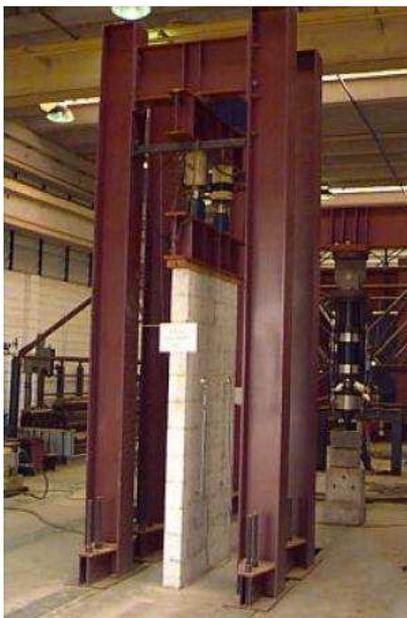


Figura 2.10 - Parede sendo ensaiada – Fonte: Garcia (2000).

HOLANDA (2002) avaliou os efeitos causados por recalque nas alvenarias de edifícios, mostrando suas principais patologias. Em seus estudos foram feitas modelagens em estado plano de tensões representando o comportamento da parede e da viga. Foram modeladas paredes de 2,60 metros de altura e 4 de comprimento dispostas em três apoios utilizando 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.

Foram estudados quatro tipos de painéis, com e sem aberturas, a figura 5 mostra as trajetórias de tensões obtidas de suas análises. Os modelos numéricos foram comparados com os resultados obtidos de ensaios de paredes em escala reduzida, medindo 1,80 de comprimento e 86,7 cm de altura, como mostrado na Figura 2.11, os modelos reduzidos eram levados através de uma ponte rolante até a prensa para ser ensaiados (Figuras 2.12 e 2.13). Foram medidas as deformações e recalques e comparados com os resultados fornecidos pelo programa numérico, obtendo curvas muito próximas.

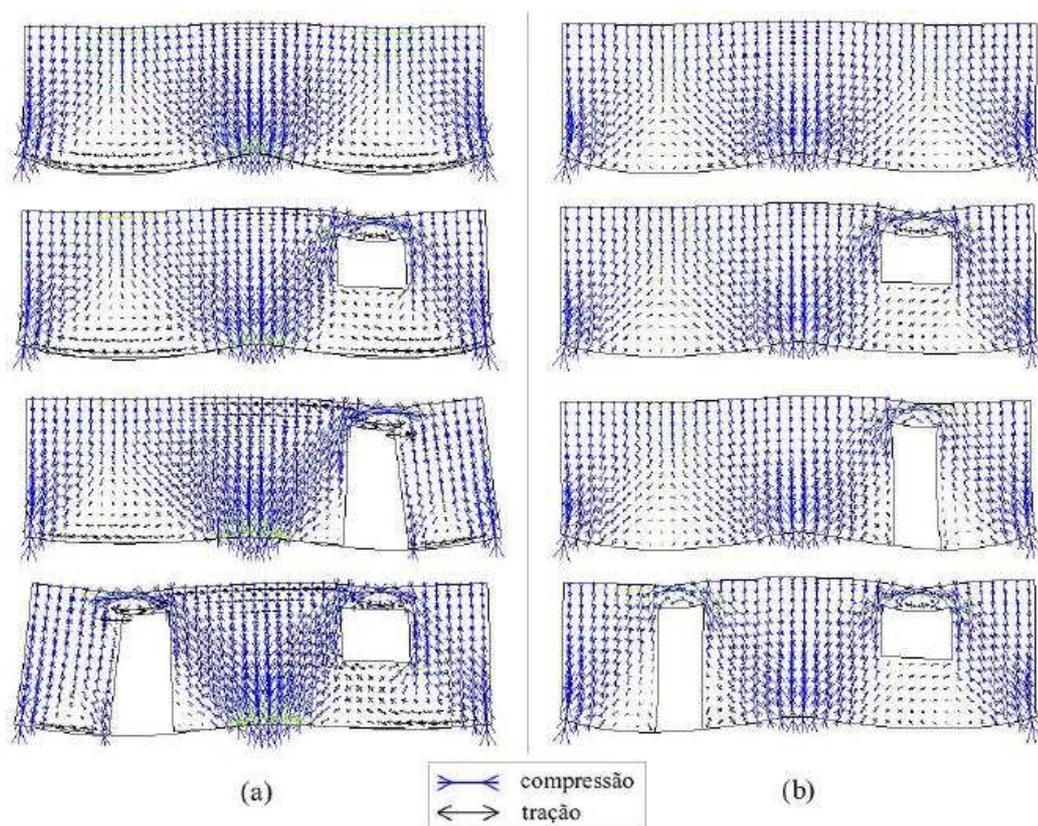


Figura 2.11 - Trajetórias de tensões em painéis de alvenaria comprimidas uniaxialmente – Fonte: Holanda (2002).



Figura 2.12 - Painel de alvenaria em escala reduzida ensaiado na prensa – Fonte: Holanda (2002).



Figura 2.13 - Painel sendo transportado para a prensa – Fonte: Holanda (2002).

SILVA (2003) buscou determinar a influência da amarração das paredes, usando em seu estudo ensaios em blocos, prismas e paredes. O autor também ensaiou um tipo especial de prisma chamado por ele de “H”, que possui uma configuração distinta, composto por dois blocos inteiros e seis meio blocos como mostrado na Figura 2.14. O objetivo da utilização desses prismas é determinar a amarração proporcionada por grampos metálicos colocado pelo autor nas juntas a prumo.

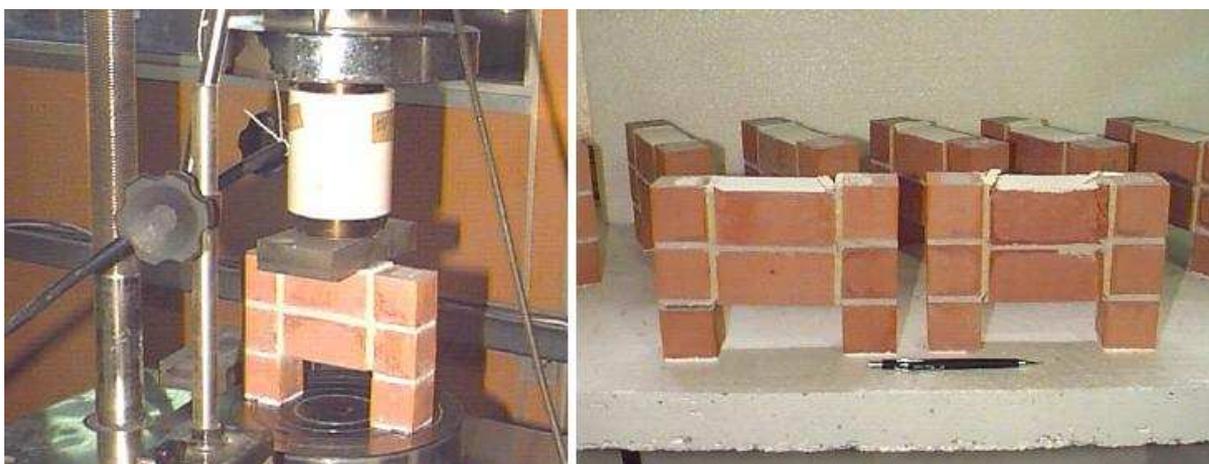


Figura 2.14 - Prisma “H” – Fonte: Silva (2003).

Em seu trabalho também foram realizados ensaios em paredes, com o objetivo de determinar a interação entre paredes, foram utilizados corpos de prova de paredes com formato H como mostrado na Figura 2.15. As paredes eram levadas até a prensa por uma ponte rolante. A figura 2.16 mostra a base em formato H.



Figura 2.15 - Paredes formato "H" – Fonte: Silva (2003).



Figura 2.16 - Base formato "H" – Fonte: Silva (2003).

CORREA (2003) modelou de forma numérica em análise plana linear utilizando 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, painéis de alvenaria com vãos, buscando determinar a alteração na distribuição de tensões (Figuras 2.17 e 2.18). Foram realizados ensaios em corpos de prova com escala reduzida para validação dos modelos, a prensa e o transporte dos corpos-de-prova feito por ponte rolante até ela é mostrado na figura 2.19.

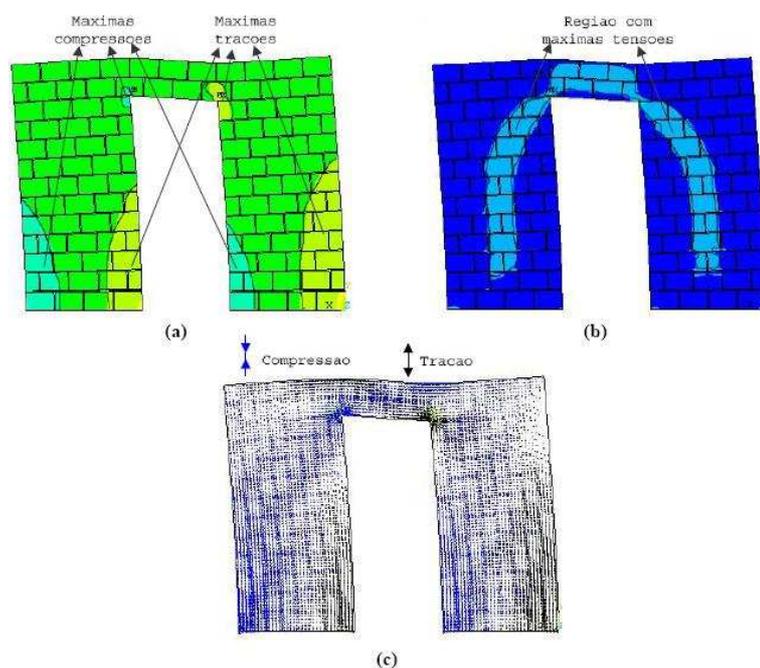


Figura 2.17 - Painel com abertura de porta: (a) Distribuição das tensões normais, (b) cisalhantes (c) principais – Fonte: Correa (2003).

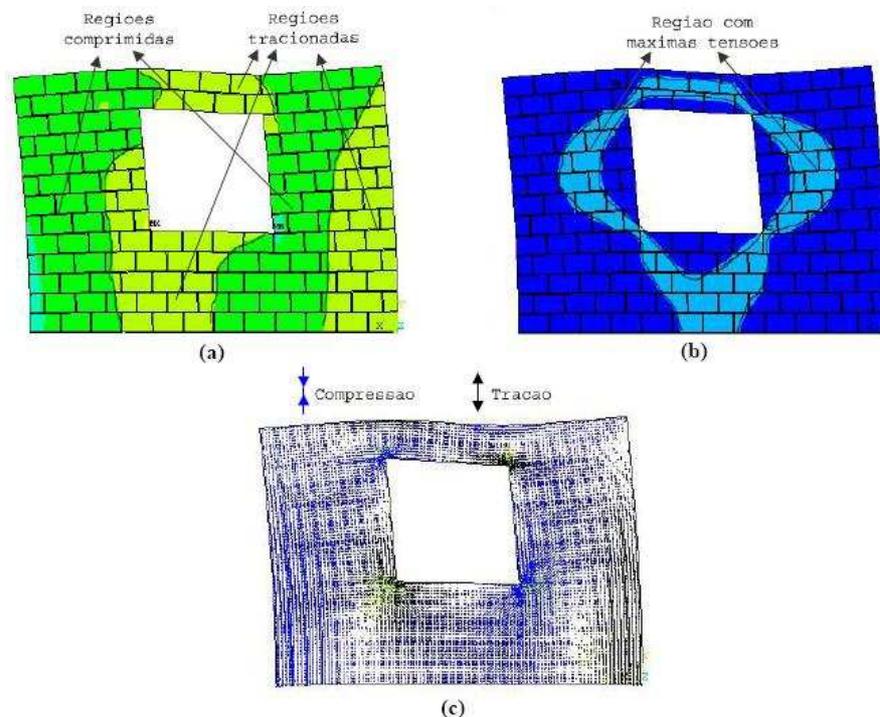


Figura 2.18 - Painel com abertura de janela: (a) Distribuição das tensões normais, (b) cisalhantes (c) principais – Fonte: Correa (2003).

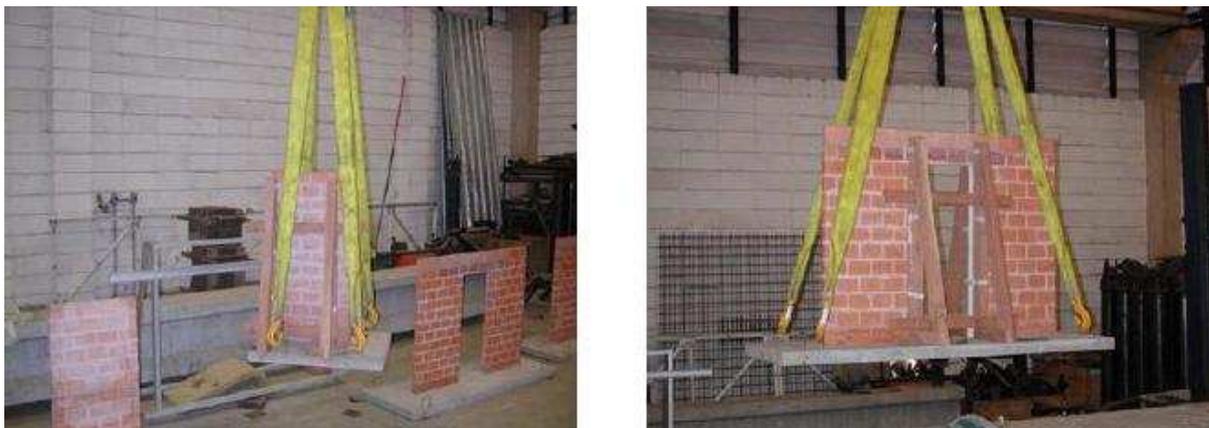


Figura 2.19 - Transporte de painel até a prensa – Fonte: Correa (2003).

### 2.5.1 Desenvolvimento de pesquisas realizadas na UENF

Alexandre (1997 e 2000) focou seus estudos na caracterização da matéria-prima utilizada pela indústria ceramista de Campos dos Goytacazes/RJ. Em sua pesquisa, ele coletou amostras de várias jazidas promovendo sua caracterização física e química, empregando recursos como Difração de Raios X, microscopia de varredura e a técnica fotoacústica.

Xavier (2001 e 2006) concentrou seus estudos nos resultados da adição de resíduo de granito na massa argilosa, contudo, ao longo do desenvolvimento do seu trabalho promoveu a caracterização física e química de argila coletada em jazidas no município de Campos dos Goytacazes/RJ, realizando ensaios de difração de raios X e análises termogravimétricas.

Silva (2005) desenvolveu uma nova proposta de morfologia para blocos cerâmicos furados para alvenaria estrutural. Sua morfologia é composta de oito peças diferentes com funções distintas, sendo algumas destinadas aos cantos das paredes, outras a parte superior, etc. Seus blocos eram conformados por extrusão, queimados, e seu assentamento era executado com argamassa. Durante seus estudos, foram realizados ensaios em blocos, prismas de dois blocos e paredes.

Ramos (2006) deu uma abordagem mais geológica ao seu trabalho, caracterizando amostras de diversas jazidas Campos dos Goytacazes/RJ, efetuando sua caracterização física, e utilizando a Geoestatística para relacionar resultados de sondagens. Seus resultados concordaram com os de mapas geológicos existentes da região.

Lima (2006) dedicou seu trabalho ao estudo de traços ideais para produção de blocos de solo-cimento utilizando como matéria-prima amostras de solo de áreas carentes de município de Campos dos Goytacazes/RJ. Seus blocos eram conformados por processo de prensagem e seu assentamento efetuado pela técnica de encaixe. Em seu programa experimental foi realizada a caracterização das amostras de solo, e ensaios de compressão simples em blocos e prismas.

Pedroti (2007) propõe a fabricação de blocos estruturais através do processo de prensagem e cozimento. A matéria-prima utilizada no processo de fabricação foi coletada da jazida Alegria utilizada pela Cerâmica União. A morfologia de seus blocos permite a utilização da técnica de encaixe. Durante o desenvolvimento de seu trabalho foram realizados ensaios de caracterização e compressão simples em blocos e prisma. Foi também realizada a modelagem do comportamento de blocos e prismas utilizando elementos finitos, através do software ANSYS versão 9.0. O elemento empregado em sua modelagem foi o solid 92 que possui dez nós e três graus de liberdade por nó.

## **CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **3.1. Introdução**

Encontram-se aqui descritos os procedimentos utilizados na execução dos ensaios realizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho. O objetivo da realização do programa experimental foi à determinação das propriedades mecânicas do material cerâmico vermelho. O conhecimento das propriedades dos componentes isolados, como blocos, e do comportamento destes quando fazem parte de prismas ou paredes, é a base para o uso seguro e racional da alvenaria estrutural. Foram executados testes em amostras cilíndricas de cerâmica, blocos cerâmicos, prismas e paredes construídos com blocos cerâmicos.

### **3.2. Materiais e Métodos**

Foram ensaiados 15 corpos-de-prova cilíndricos de material cerâmico vermelho, confeccionados por processo de extrusão, em quatro diâmetros diferentes (3, 4, 5 e 6 cm), e queimadas nas temperaturas de 700°C e 900°C, com a relação entre altura e diâmetro mantida constante e igual a dois. Também foram ensaiados 26 blocos medindo 39x19x11,5 cm, 8 prismas constituídos por dois blocos assentes com argamassas de cimento, cal e areia, e quatro painéis de parede medindo 120x260x11,5 cm.

Os blocos utilizados para ruptura à compressão simples e para confecção de prismas foram queimados a duas temperaturas diferentes (700°C e 900°C). Aqueles que compõem os painéis de parede foram queimados a temperatura de 700°C. Um resumo das quantidades de amostras utilizadas nos ensaios encontra-se na Tabela 3.1. Os resultados obtidos destes ensaios foram utilizados na modelagem computacional em elementos finitos, empregando o software ANSYS 10.0.

Tabela 3.1 - Quantidades de amostras para ensaios de compressão simples.

<b>Especificação</b>	<b>Dimensões</b>	<b>Temp. de Queima</b>	<b>Quantidade</b>
Amostra Cerâmica	Cilindro (3x6 cm)	700°C	15
Amostra Cerâmica	Cilindro (3x6 cm)	900°C	15
Amostra Cerâmica	Cilindro (4x8 cm)	700°C	15
Amostra Cerâmica	Cilindro (4x8 cm)	900°C	15
Amostra Cerâmica	Cilindro (5x10 cm)	700°C	15
Amostra Cerâmica	Cilindro (5x10 cm)	900°C	15
Amostra Cerâmica	Cilindro (6x12 cm)	700°C	15
Amostra Cerâmica	Cilindro (6x12 cm)	900°C	15
Bloco Estrutural Cerâmico	39x19x11,5 cm	700°C	13
Bloco Estrutural Cerâmico	39x19x11,5 cm	900°C	13
Prisma de dois Blocos	39x39x11,5 cm	700°C	4
Prisma de dois Blocos	39x39x11,5 cm	900°C	4
CP's Argamassa Prisma	Cilindro (10x20 cm)	-	18
Painéis de Parede	120x260x11,5 cm	700°C	4
CP's Argamassa Paredes	Cilindro (10x20 cm)	-	24

A metodologia utilizada na realização dos ensaios com os diferentes tipos de amostras buscou empregar os procedimentos recomendados pelas normas específicas, afim de que os resultados obtidos pudessem ser comparados a trabalhos da mesma área encontrados na literatura.

### **3.2.1 Amostras cilíndricas de cerâmica**

Muitos autores como: Mendes (1998), Garcia (2000) e Neto (2003), determinaram o módulo de Elasticidade para utilização em suas modelagens a partir de blocos, prismas ou painéis de alvenaria. Entretanto, propriedades como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson são propriedades intrínsecas aos materiais, motivo pelo qual não devem ter seus valores atrelados à forma da amostra.

Avaliarem-se tais propriedades utilizando blocos, prismas ou painéis como corpos-de-prova para alvenaria estrutural seria o equivalente, fazendo uma analogia com o concreto, a determiná-las em vigas ou pilares, ao invés do corpo-de-prova cilíndrico clássico, ou seja, utilizando peças que sofrem influência de uma série de fatores, como: forma, rigidez, esbeltez, defeitos de execução, etc.

Levando em consideração os fatores mencionados supõe-se que é necessário padronizar as formas e dimensões da amostra para que os resultados obtidos por diferentes pesquisadores tenham o mesmo significado físico, ou seja, que os valores não sejam influenciados pela forma da amostra ensaiada.

Ensaio para determinação das propriedades mecânicas do concreto são realizados em corpos-de-prova cilíndricos, cujas dimensões (diâmetro de 15 cm e altura de 30 cm) são fixadas por normas específicas. Para a cerâmica não se dispõe ainda de normas especificando as dimensões das amostras a serem ensaiadas. Neste trabalho foram realizados ensaios em amostras com diferentes dimensões, buscando determinar a mais adequada na representação das propriedades do material cerâmico, a forma cilíndrica foi mantida em todos os corpos-de-prova pela sua praticidade comprovada em outros materiais, e pela maior facilidade de extrusão.

Mehta e Monteiro (1994) mostram em seu trabalho que se mantendo a razão altura/diâmetro igual a dois para corpos-de-prova em concreto, e realizando-se ensaios em amostras com diâmetros variados, os valores da tensão de resistência a compressão sofrem variação. Essa variação, como mostrado na Figura 3.1, revela uma tendência de decréscimo dos valores da tensão de resistência a compressão com o aumento do diâmetro dos corpos-de-prova ensaiados.



Figura 3.1 - Variação da tensão de resistência a compressão com o diâmetro do corpo-de-prova, fonte: Concrete Manual U. S. Bureau of Reclamation (1975) apud Mehta and Monteiro (1994).

Nota-se, pela Figura 3.8, cuja ordenada representa uma relação entre a resistência do corpo-de-prova padrão (15 cm de diâmetro de 30 cm de largura) e das amostras com outras dimensões, sendo para as dimensões de 5 x 10 cm e 7,5 x 15 cm (diâmetro e altura respectivamente) esta relação foi de 106 e 108% respectivamente. Acima do diâmetro de 45 cm a curva tende a se tornar assintótica. Os autores justificam as variações das resistências com as dimensões através do crescente grau de homogeneidade estatística na distribuição de defeitos dos corpos-de-prova maiores.

Com o intuito de se avaliar a variação da resistência em relação ao diâmetro dos corpos-de-prova, foram moldados cilindros de material cerâmico vermelho nos diâmetros de 3, 4, 5 e 6 cm para definir uma curva que represente as relações expressas na Figura 3.6, afim de determinar as dimensões mais adequadas para os ensaios.

A escolha dos diâmetros foi baseada em diâmetros próximos ao utilizado em corpos-de-prova de argamassa (5 cm de diâmetro e 10 de altura), não se utilizou as dimensões padronizadas para ensaios em concreto (15 x 30 cm) devido a impossibilidade de se moldar esse diâmetro na extrusora utilizada, e por tais dimensões provavelmente apresentarem uma elevada gama de defeitos advindos dos processos de secagem e queima.

Para a moldagem das amostras de cerâmica foi utilizada argila proveniente da Jazida alegria, de onde a Cerâmica União extrai matéria-prima para confecção de seus artefatos cerâmicos. A argila foi destorroada, moída e deixada secar à temperatura ambiente por período de aproximadamente uma semana. O processo de moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos utilizado foi à conformação hidroplástica por extrusão.

A umidade da argila utilizada no processo de extrusão foi determinada segundo a proposta de Alexandre (1997) que recomenda para argila de Campos dos Goytacazes a determinação da umidade de conformação através da equação 3.1. Foi obtido pela equação o valor de 30%, usado na preparação da massa argilosa.

$$W_{estr} = \left(\frac{LL}{2}\right) + 2\% \quad (3.1.)$$

Foi utilizada para realizara a conformação hidroplástica uma extrusora da marca Verdés modelo BR 051, mostrada na Figura 3.2. Foram acopladas à extrusora boquilhas de diferentes diâmetros (3, 4, 5 e 6 cm) para obtenção de corpos-de-prova com dimensões diferentes, mas utilizando a massa de argila com mesmo grau de umidade.



Figura 3.2 - Máquina extrusora Verdés modelo BR 051.

Foram confeccionados 240 corpos-de-prova de formato cilíndrico com relação entre altura e diâmetro igual a dois. As amostras foram agrupadas de acordo com suas dimensões e temperatura de queima em oito classes de 15 unidades. As dimensões utilizadas (diâmetro e altura respectivamente) foram 3x6, 4x8, 5x10 e 6x12 cm. As temperaturas de queima adotadas foram 700°C e 900°C, e as justificativas para a escolha desses valores se encontram no Capítulo 4.

Após a conformação hidroplástica os corpos-de-prova foram deixados repousando em temperatura ambiente por um período de 72 horas, pois anteriormente a esse período ainda se verificava alterações de massa em pesagens consecutivas. O objetivo desse primeiro procedimento foi reduzir gradualmente a umidade e proporcionar uma retração lenta reduzindo a formação de fissuras, a Figura 3.3 mostra amostras de diferentes diâmetros deixadas para equilibrarem sua umidade com a umidade ambiente.



Figura 3.3 - Corpos de prova moldados por extrusão.

Após a secagem em temperatura ambiente as amostras foram levadas à estufa de temperatura controlada, onde as amostras permaneceram por um período de 24 horas, a temperatura constante de 110°C.

Depois de retirar os corpos-de-prova da estufa, a etapa seguinte consistiu em deixá-los resfriar até a temperatura ambiente, para que a seguir fossem pesados e medidos utilizando paquímetros com precisão de 0,05 mm. Foram agrupados em

lotes de acordo com o diâmetro e a temperatura de queima e numerados seqüencialmente em cada lote.

Para o processo de queima foi utilizado forno eletrônico programável da Brasimet. A queima teve início a partir da temperatura ambiente, sofrendo acréscimos constantes de 5 °C/min, até atingir a temperatura estabelecida como patamar de queima (700°C ou 900°C). Após a temperatura no forno atingir o patamar de queima ela é mantida constante por um período de três horas, a fim de promover um cozimento homogêneo do corpo-de-prova, garantindo que essa temperatura não seja atingida apenas em suas faces externas.

Após a queima os corpos-de-prova foram deixados para resfriar, e a seguir foram novamente medidos e pesados para a determinação das seguintes propriedades: variação das dimensões lineares, porosidade aparente e massa específica aparente.

As variações das dimensões lineares foram calculadas pela equação:

$$\Delta L(\%) = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100(\%) \quad (3.2.)$$

Onde:

$\Delta L$  – Variação das dimensões lineares (%);

$L_0$  – comprimento inicial do corpo de prova, anterior a queima (mm);

$L_1$  – comprimento final do corpo de prova, posterior a queima (mm).

O próximo passo foi à determinação da porosidade aparente, que foi calculada através da seguinte equação:

$$PA(\%) = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100(\%) \quad (3.3.)$$

Onde:

PA – porosidade aparente (%);

$M_u$  – massa do corpo-de-prova úmido, anterior a queima (g);

$M_s$  – massa do corpo-de-prova seco, posterior a queima (g);

$M_i$  – massa do corpo-de-prova imerso em água, posterior a queima (g).

A massa do corpo-de-prova úmido é determinada após a moldagem, ou seja, com a umidade utilizada na moldagem. Esta umidade é eliminada no processo de secagem, após o qual se obtém seu peso seco.

O valor da massa da amostra imersa em água é obtida após a queima, deixando-a imersa em água com temperatura de 100°C, por um período de duas horas, para que ocorra sua total saturação, a seguir ele é pesado em balança com cesto metálico imerso em água.

A propriedade seguinte a ser determinada foi a massa específica aparente, calculada através da seguinte equação:

$$MEA(g/cm^3) = \frac{P_s}{V_a} \quad (3.4.)$$

Onde:

MEA – Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>);

$M_s$  – Massa seca do corpo-de-prova (g);

$V_a$  – Volume aparente do corpo de prova (cm<sup>3</sup>).

Finalizado o processo de queima, as amostras foram capeadas utilizando como material de capeamento o enxofre. Entretanto ensaios preliminares realizados no laboratório da COOPE – UFRJ (Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia), demonstraram que os defeitos da peça, principalmente a falta de paralelismo entre as faces, juntamente com a utilização do capeamento de enxofre com espessura elevada, provocou um comportamento irregular no início da curva tensão-deformação das amostras ensaiadas. A Figura 3.4 mostra um corpo de prova capeado.



Figura 3.4 - Corpo de prova cerâmico capeado com enxofre.

Para se obter melhores resultados foi removido o capeamento e regularizou as faces das peças por meio de um processo de usinagem. Para tal, utilizou-se serra circular com disco adiantado, promovendo corte próximo a face da amostra, de forma que este seja o mais perpendicular possível em relação ao eixo da amostra.

Entretanto para garantir a ortogonalidade do corte das faces, e segurança no manuseio da serra, foram fabricadas bases metálicas para fixação das amostras durante o corte. O paralelismo das faces foi verificado através de relógio comparador. O resultado desse processo de usinagem é mostrado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Corpos de prova cerâmicos após remoção do capeamento.

Os corpos-de-prova de cerâmica 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 é da marca EMIC e possui capacidade para 2000 KN, Figura 3.6.



Figura 3.6 - Prensa servo-hidráulica da marca EMIC.

Para aquisição dos dados referentes à deformação foram utilizados sensores extensômetros do tipo PA-06-1000BA-120L (Figura 3.7), ligados a um sistema de aquisição de dados do tipo LINX que envia sinais elétricos aos sensores que operam

como resistências elétricas e converte as variações dessas resistências em deformações. Essas deformações são captadas e interpretadas pelos softwares Aqdados e Aqdanalises instalados no computador ligado ao sistema LINX, Figura 3.8.

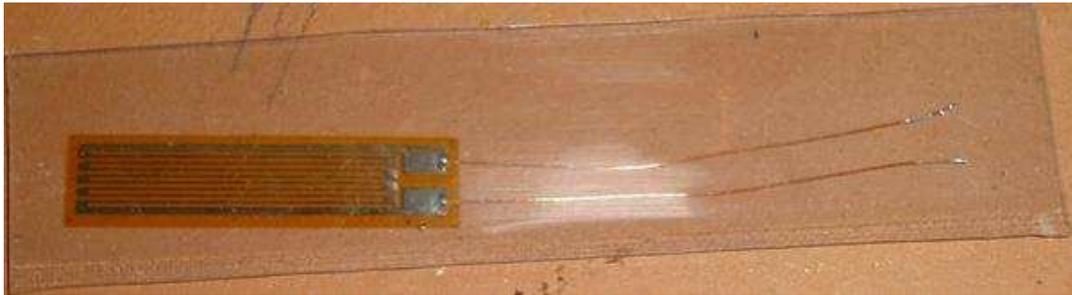


Figura 3.7 - Extensômetro tipo PA-06-1000BA-120L.



Figura 3.8 - Sistema de aquisição de dados LINX.

Foram fixados dois extensômetros perpendiculares entre si nas amostras com diâmetros de 6, 5 e 4 cm, sendo um deles no sentido da altura (Figura 3.9), o objetivo desta disposição é determinar o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Para os corpos-de-prova com diâmetro de 3 cm foi fixado apenas um extensômetro no sentido da altura (Figura 3.10), esta atitude foi tomada em virtude do comprimento de seu perímetro não comportar a colagem de outro extensômetro.



Figura 3.9 - Corpo-de-prova cerâmico (diâmetro de 6 cm) com extensômetros.

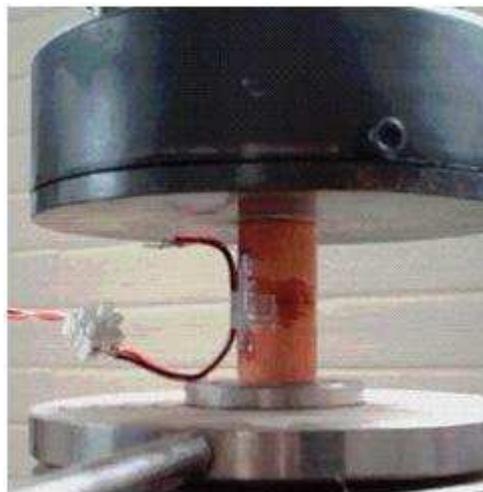


Figura 3.10 - Corpo de prova cerâmico (diâmetro de 3 cm) com extensômetro.

Para fixação dos extensômetros, os corpos-de-prova foram lixados até eliminar completamente as irregularidades de sua superfície lateral, a seguir se removeu o pó aderido a superfície, e utilizou-se para fixação o adesivo LOCTITE 496, os fios foram soldados aos filamentos dos extensômetros.

### 3.2.2 Blocos estruturais cerâmicos

Foram utilizados neste trabalho blocos cerâmicos estruturais com dimensões nominais de 39x19x11,5 cm (comprimento, altura e espessura), doados pela Cerâmica União na forma de um lote de 900 unidades. Desta forma, as propriedades dos materiais obtidos correspondem as dos encontrados atualmente no mercado, que é objetivo deste trabalho.

Após inspeção visual verificou-se que algumas unidades precisavam ser descartadas do lote devido a alguns defeitos, como a presença de trincas em septos e quinas quebradas, que poderiam vir a reduzir a resistência da peça. Para execução dos ensaios foram escolhidos blocos sem nenhum defeito aparente (Figura 3.11).



Figura 3.11 - Bloco sem defeitos aparentes escolhido para ensaio.

A Figura 3.11 mostra um bloco isento de defeitos aparentes, que foi o critério de escolha para as amostras ensaiadas. Apesar da presença de algumas peças defeituosas no lote, este foi aceito devido ao número reduzido delas, se comparado com o número de peças sem defeitos.

Foram utilizadas duas temperaturas de queima para o estudo dos blocos (700 e 900°C), a exemplo do realizado para as amostras cilíndricas. Os blocos queimados a 700°C foram recolhidos do estoque da Cerâmica União, entretanto os blocos queimados a 900°C tiveram sua queima efetuada no laboratório.

A queima dos blocos a 900°C foi realizada em forno de temperatura controlável, da marca T. Milley Termotécnica Ltda, modelo MPA 55, mostrado na Figura 3.12. A queima teve início a partir da temperatura ambiente, sendo acrescida de uma taxa constante de 3°C/min, até atingir a temperatura de 900°C, que foi mantida constante por um período de três horas. A variação da temperatura de queima foi periodicamente verificada através da utilização de termopar.



Figura 3.12 - Forno da marca T. Milley Termotécnica Ltda, modelo MPA 55.

A NBR 15270-2 (2005) regulamenta os requisitos dimensionais, físicos e mecânicos a serem exigidos no recebimento de blocos estruturais para utilização em obras de alvenaria estrutural. A aceitação de um lote de blocos, segundo esta norma, só deve ser realizada se a variação dimensional máxima de suas peças for inferior aos limites por ela estabelecidos.

Tabela 3.2 - Tolerâncias dimensionais individuais relacionadas à dimensão efetiva (Fonte: NBR 15270–2).

Grandezas controladas	Tolerância (mm)
Largura (L)	±5
Altura (H)	
Comprimento (C)	

Tabela 3.3 - Tolerâncias dimensionais individuais relacionadas às médias das dimensões efetivas.

Grandezas controladas	Tolerância (mm)
Largura (L)	±5
Altura (H)	
Comprimento (C)	

Foram verificadas as dimensões de 13 blocos queimados a 700 graus e 13 blocos queimados a 900°C, para averiguar a aceitação do lote. As medições foram realizadas utilizando paquímetro com precisão de 0,05mm.

A determinação da massa seca e do índice de absorção de água dos blocos foi realizada de acordo com os requisitos da NBR 15270-3 (2005). Para obter a massa seca dos blocos, estes foram secos a uma temperatura de 110 °C em estufa com temperatura controlada, por um período superior a 24 horas, até que pesagens consecutivas não demonstrassem variação da massa, e depois pesados.

Para a determinação do índice de absorção de água, foram escolhidas 13 amostras de blocos, para sofrerem secagem em estufa de temperatura controlada, a uma temperatura de 110°C por período de 24 horas, onde pesagens consecutivas não apresentaram variação de massa. Após resfriarem até a temperatura ambiente, os blocos foram pesados, e posteriormente, imersos em água, à temperatura ambiente, por um período de 24 horas, depois foi realizada a pesagem dos blocos em balança de precisão e determinada sua massa úmida, o índice de absorção de água foi então determinado com a utilização da equação:

$$AA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.5.)$$

Onde:

AA – Índice de absorção de água (%);

$m_u$  – Massa úmida do bloco (g);

$m_s$  – Massa seca do bloco (b).

Os blocos foram 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 (a). Para realizar os ensaios a compressão simples foi utilizada uma prensa servo-hidráulica tipo Versa-tester da marca ELE Internacional, com capacidade máxima de 250 kN, mostrada na Figura 3.13 (b).



(a)



(b)

Figura 3.13 - Blocos com capeamento de pasta de cimento (a) e prensa servo-hidráulica, tipo Versa-teste, ELE Internacional.

Foram medidos os deslocamentos dos blocos através de sistema de aquisição de dados composto por LVDT's (transdutores de deslocamentos) acoplados a um computador com hardware e software capazes de interpretar os impulsos elétricos advindos dos LVDT's e convertê-los em deslocamentos. O software capta um ponto a cada segundo, o que fornece dados suficientes para a montagem de uma curva de deslocamento ao longo do tempo. A Figura 3.14 mostra o sistema de aquisição de dados com LVDT's.



Figura 3.14 - Sistema de leitura dos impulsos emitidos pelo LVDT.

Todos os blocos ensaiados à compressão simples tiveram seus deslocamentos medidos por esse processo. Foram utilizados LVDT's para medir os deslocamentos ao longo do comprimento, da altura e da espessura do bloco. Inicialmente os LVDT's foram fixados aos blocos utilizando o adesivo a base de Epóxi de alta aderência (60 MPa). Porém esse processo não foi muito eficiente, devido ao fato de algumas vezes durante o processo de preparação do bloco para o ensaio, se desprenderem os LVDT's juntamente com placas advindas dos blocos.

A forma de fixação utilizada então para manter os LVDT's aderidos aos blocos durante os ensaios foi o emprego de parafusos. Para fixar os LVDT's aos blocos foram utilizados suportes de metalon presos aos blocos através de parafusos, como mostra as Figuras 3.15 e 3.16.

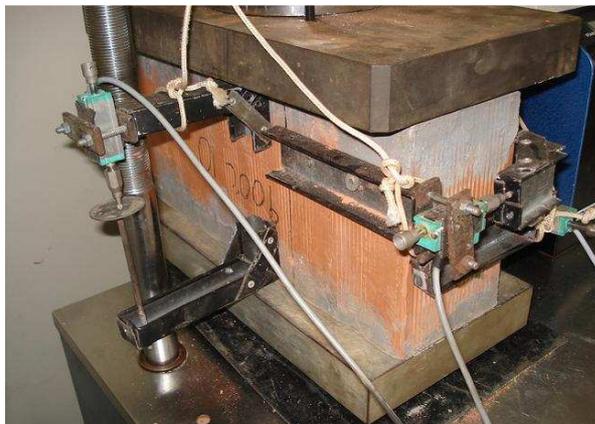


Figura 3.15 - Bloco com LVDT's fixados.



Figura 3.16 - Bloco com LVDT's fixados.

A interferência desse método de fixação nos resultados foi avaliada através de alguns testes realizados em blocos nos quais foram colados extensômetros e tiveram suas deformações medidas pelo sistema LINX.

Foram ensaiados 13 blocos queimados à temperatura de 700°C e 13 blocos queimados à temperatura de 900°C, em todos os ensaios foram obtidos os deslocamentos. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do LECIV/CCT/UENF.

A NBR 15270-2 estabelece que a resistência característica a compressão mínima ( $f_{bk}$ ) para que um bloco seja classificado como estrutural é de 3,0 MPa, e  $f_{bk}$  deve ser calculado utilizando a expressão (3.6).

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

$f_{bk,est}$  – resistência característica estimada da amostra (MPa);

$f_{(b1)}, f_{(b2)}, \dots, f_{(bi)}$  – valores de resistência à compressão individual dos corpos-de-prova (MPa);

$i$  – definido como  $n/2$  se  $n$  for par, e  $(n-1)/2$  se  $n$  for ímpar;

n – número de amostras.

Se o valor do  $f_{bk,est} \geq f_{bm}$  (média da resistência à compressão de todos os corpos-de-prova da amostra), adota-se  $f_{bm}$  como a resistência característica do lote ( $f_{bk}$ ). Caso contrário, se o valor do  $f_{bk,est} < \emptyset f_{(b1)}$  (menor valor da resistência à compressão de todos os corpos-de-prova da amostra), adota-se o valor de  $f_{bk}$  igual a  $\emptyset f_{(b1)}$ , estando os valores de  $\emptyset$  indicados na Tabela 3.4. Caso o valor calculado de  $f_{bk,est}$  esteja entre os limites mencionados acima ( $\emptyset f_{(b1)}$  e  $f_{bm}$ ), adota-se este valor como a resistência característica à compressão ( $f_{bk}$ ).

Tabela 3.4 - Valores de  $\emptyset$  em função da quantidade de blocos, fonte: NBR 15270–2

Quant. de Blocos	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	≥18
	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,04

### 3.2.3 Prismas de blocos estruturais cerâmicos

Os prismas foram ensaiados conforme a NBR 5215 (1983). Foram confeccionados prismas compostos por dois blocos unidos por uma junta de argamassa de aproximadamente um centímetro e meio de espessura.

Os blocos utilizados para confecção dos prismas foram medidos com paquímetro com precisão de 0,05 mm. O capeamento foi efetuado com pasta de cimento, executado em uma face de cada bloco. A argamassa utilizada para assentamento do bloco possui o seguinte traço em peso: 1:1:10,5 (cimento, cal e areia respectivamente), com fator água cimento de 0,65 e com uma consistência determinada pelo ensaio de consistência padrão de 26,5 milímetros. Os prismas passaram por período de cura de 28 dias, e tiveram seu processo de cura realizado a umidade ambiente.

Os dados de deslocamento dos prismas foram adquiridos através do sistema de LVDT's, e sua fixação foi feita através de parafusos, de forma análoga a dos blocos.

Foram ensaiados quatro prismas compostos de blocos com temperatura de queima de 700°C, e quatro prismas com temperatura de queima de 900°C. Também foram ensaiados 18 corpos de prova da argamassa utilizada para assentamento de blocos para confecção dos prismas.

Os corpos de prova de argamassa foram rompidos com idades de 3, 7 e 28 dias, utilizando para sua ruptura a mesma prensa servo-hidráulica utilizada na ruptura dos blocos.

### **3.2.4 Ensaio de Painéis de Parede**

Os Painéis de parede foram ensaiados conforme a NBR 8949 (1985). Os painéis de parede foram construídos com as seguintes dimensões: comprimento de 1,20 metros, altura de 2,60 metros e espessura de 0,115 metros. Foram construídos com blocos com temperatura de queima a 700 °C, e argamassa de assentamento com traço em peso de: 1:2:9 e um fator água/cimento de 0,65, traço escolhido para se obter uma resistência da argamassa menor que a do bloco.

Inicialmente se planejou aplicar o carregamento de forma distribuída na parede através de pórtico metálico com dois acionadores servo-hidráulicos, como capacidade de 100 toneladas cada da marca Farex, acionados em conjunto por sistema hidráulico também fornecido pela Farex. O sistema montado para ensaio de compressão é mostrado na Figura 3.17.



Figura 3.17 - Prensa com acionador servo-hidráulico duplo.

Entretanto, anteriormente ao início dos ensaios foi detectado problema com um dos acionadores hidráulicos, que não estava respondendo aos comandos do sistema hidráulico, fazendo com que apenas um lado do perfil utilizado para comprimir o painel de parede se deslocasse, o que comprometeria os resultados dos ensaios.

O fato de um dos acionadores não funcionar como programado trouxe a necessidade de promover adaptações no sistema, de forma que a prensa passou a trabalhar com apenas um acionador hidráulico, deslocado para o meio do perfil móvel, como mostra a Figura 3.18.



Figura 3.18 - Prensa com acionador servo-hidráulico único.

A grande dificuldade no ensaio de paredes está em se levar a parede até a prensa. Garcia (2000) executou a parede no local de ensaio, outros autores como Holanda (2002), Silva (2003) e Correa (2003) moveram suas paredes até a prensa através de ponte móvel.

O tipo de pórtico utilizado para os ensaios e o tempo disponível para a execução deste trabalho não permitiu que todos os painéis de parede fossem construídos no local de ensaio. O espaço físico disponível e a falta de recursos não permitiram a instalação de ponte móvel.

Diante dessa realidade foram adotadas as seguintes medidas para solução do problema de transporte da parede até a prensa e sua acomodação: o primeiro painel de parede foi construído no local de ensaio, os demais painéis de parede foram construídos sobre vigas para futuramente serem transportados até a prensa.

A viga de concreto utilizada para transportar o painel de parede foi dimensionada para possuir uma flecha final máxima de 2,3 mm, considerando a viga como biapoiada a flecha admissível para esse vão é de 4,3 mm. Levando-se em consideração ainda que a viga passe apenas 28 dias se comportando como viga biapoiada, conclui-se que a flecha final será menor que a calculada, e pequena o suficiente para não interferir no comportamento da parede. As Figuras 3.19 e 3.20 mostram as dimensões da viga, e a viga depois de sua concretagem.

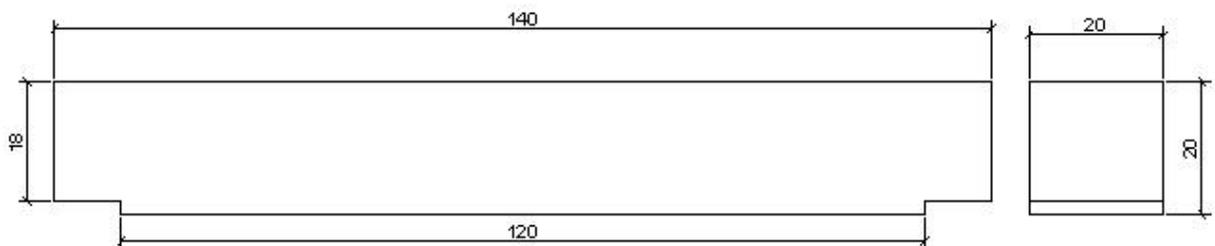


Figura 3.19 - Dimensões da viga de transporte da alvenaria.



Figura 3.20 - Viga de transporte da alvenaria.

Para transportar o painel de parede com a viga até a prensa foi montada uma plataforma metálica com quatro rodas giratórias, com 360 ° de ângulo de giro, para facilitar o deslocamento e a acomodação em frente à prensa. Essa plataforma pode ser vista na Figura 3.21.



Figura 3.21 - Plataforma metálica utilizada para transporte da alvenaria.

Os painéis de parede foram construídos sobre as vigas de transporte que eram apoiadas nas extremidades sobre três blocos de encaixe, como é mostrado na Figura 3.22.



Figura 3.22 - Alvenaria sobre viga de transporte com apoios nas extremidades.

Colocou-se a plataforma metálica abaixo da viga de transporte, foi feito o travamento do painel com uma estrutura metálica de contraventamento, cujo objetivo era impedir o tombamento. Após esses procedimentos iniciais, os macacos hidráulicos com acionamento manual foram posicionados nas extremidades da viga de transporte e ela foi ligeiramente levantada, neste momento se pode fazer a remoção dos blocos de apoio. A seguir se procedeu a acomodação do painel sobre a plataforma metálica.

Esse procedimento pode ser mais bem entendido através da visualização da Figura 3.23, que mostra o painel de alvenaria já acomodado sobre a plataforma metálica, devidamente contraventado, e os macacos hidráulicos nas extremidades da viga prontos para serem removidos.



Figura 3.23 - Plataforma com alvenaria acomodada e contraventada.

Com o painel acomodado na plataforma metálica e devidamente contraventado, se fez o deslocamento até as proximidades da prensa, o painel foi levado até uma distância em que a ponte móvel acoplada ao pórtico da prensa possui capacidade para levantar a viga de transporte.

A ponte móvel é composta de perfil metálico acoplado ao pórtico metálico da prensa por parafusos e cabos de aço, formando uma mão francesa. E sobre esta desliza um suporte com rodízios que é utilizado como apoio para uma talha manual. A parede é então erguida por esse aparato e conduzida até a posição onde será rompida na prensa. A Figura 3.24 mostra a ponte móvel acoplada à prensa, e a 3.25 demonstra a parede sendo erguida e conduzida até a base de reação da prensa.



Figura 3.24 - Ponte móvel acoplada ao pórtico metálico da prensa.



Figura 3.25 - Painel de parede erguido pela ponte móvel da prensa.

Foram ensaiados quatro painéis de parede, construídos sobre as vigas de transporte, o nível e o prumo foram conferidos constantemente durante sua construção. Na última fiada do painel foram assentados blocos com uma face capeada com pasta de cimento. Os painéis tiveram período de cura de 28 dias.

Para medição dos deslocamentos foi utilizado o sistema composto pelos LVDT's, com seus pontos de fixação atendendo ao recomendado pela NBR-8949 (1985), ou seja, um em cada lateral, e foi instalado um no terço médio superior do

painel, para medição das flechas. Utilizou-se também um relógio comparador para medir o deslocamento da viga da prensa responsável pela aplicação da carga.

Os painéis receberam uma segunda camada de capeamento em gesso, e sua ruptura se deu através da aplicação de passos de carga, com uma taxa de aplicação de carga de 0,25 t/s. Cada passo de carga teve período de duração de aproximadamente 10 segundos, seguidos de um intervalo de mesma duração para observação das acomodações sofridas pela alvenaria.

Para cada painel de parede construído, assim como recomenda a NBR-8949 (1985), foram confeccionados seis corpos de prova cilíndricos de dimensões de 10x20 cm (diâmetro e altura respectivamente), compostos pela argamassa utilizada para o assentamento dos blocos.

Apesar da interferência detectada para o material cerâmico, os corpos-de-prova de argamassa, em um total de 18 unidades, receberam capeamento em enxofre, pelo fato desse procedimento ser tradicionalmente adotado por diversos autores e devido às dificuldades de usar o mesmo processo de usinagem utilizado para as amostras cerâmicas.

A ruptura dos corpos-de-prova de argamassa se deu através da utilização de prensa servo-hidráulica da marca EMIC com capacidade de carga de 2000 kN. As deformações foram medidas através de extensômetros, cujos dados foram captados pelo sistema LINX.

### **3.2.5 Eficiência**

Dentre os fatores que exercem influência na resistência à compressão dos painéis de parede, a resistência dos blocos tem caráter predominante. Em geral o valor da resistência da alvenaria é diretamente proporcional à resistência do bloco.

Segundo Ramalho e Corrêa (2003), existe um conceito muito importante quando se trata da influência da resistência dos blocos na dos prismas ou paredes. A eficiência é definida como a relação entre a resistência da parede e do bloco que a compõe, ou entre bloco e prisma, ou ainda, entre prisma e parede. A relação parede-bloco é mostrada na expressão (3.8).

$$\eta = \frac{f_{par}}{f_b} \quad (3.7.)$$

Onde:

$\eta$  – fator de eficiência parede/bloco;

$F_{par}$  – resistência à compressão da parede (MPa);

$f_b$  – resistência à compressão do bloco (MPa).

A eficiência pode variar bastante, dependendo da morfologia, resistência do bloco, da argamassa, etc. Normalmente, quanto mais resistente o bloco menor será o valor da eficiência, e vice-versa. Nos casos mais comuns para paredes executadas com blocos cerâmicos, não grauteados e com argamassas usuais, pode-se estimar a eficiência bloco-parede variando dentro dos limites de 0,20 a 0,50.

### 3.2.6 Tratamento estatístico dos dados

Neste item são descritos os conceitos dos métodos estatísticos utilizados na análise dos resultados experimentais. Os tratamentos são: Teste F, Teste t, Tamanho Mínimo de Lote, Critério de Chauvenet.

### 3.2.6.1 Hipótese estatística

Hipótese estatística é uma suposição quanto ao valor de um parâmetro populacional que será verificada por um teste paramétrico, ou uma afirmação quanto à natureza da população, que será verificada por um teste de aderência.

A hipótese de nulidade ( $H_0$ ) é formulada com o propósito de ser rejeitada, e os testes são construídos sob a pressuposição de  $H_0$  ser verdadeira. Já a hipótese alternativa ( $H_a$ ) é formulada com base no problema estudado.

### 3.2.6.2 Teste de comparação entre a variância de duas populações (Teste F)

O teste de comparação entre a variância de duas amostras (Teste F) é um teste de homogeneidade. Ele busca verificar, dentre várias amostras retiradas cada uma de uma população diferente, a hipótese de que a variável em estudo se distribui de forma homogênea nas várias populações (Gomes, 1987).

Sejam  $U$  e  $V$  variáveis aleatórias independentes, com distribuição Qui-quadrado com  $n_1$  e  $n_2$  graus de liberdade respectivamente. Denomina-se  $F$  a variável aleatória definida pela expressão:

$$F = \frac{U/n_1}{V/n_2} \quad (3.8.)$$

Onde:

$F$  – variável aleatória do teste de comparação das variâncias;

$U$  e  $V$  – variáveis aleatórias com distribuição Qui-quadrado;

$n_1$  – graus de liberdade da variável U;

$n_2$  – graus de liberdade da variável V.

Considerando duas amostras de tamanhos  $n_x$  e  $n_y$  das variáveis aleatórias normais X e Y, respectivamente, pode-se mostrar que:

$$U = \frac{(n_x - 1)S_x^2}{\sigma_x^2} \quad (3.9.)$$

$$V = \frac{(n_y - 1)S_y^2}{\sigma_y^2} \quad (3.10.)$$

Então considerando como hipótese de nulidade  $H_0: \sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$ , temos:

$$F = \frac{\frac{U}{n_1}}{\frac{V}{n_2}} = \frac{\frac{(n_x - 1)S_x^2}{(n_x - 1)\sigma_x^2}}{\frac{(n_y - 1)S_y^2}{(n_y - 1)\sigma_y^2}} = \frac{S_x^2}{S_y^2} \quad (3.11.)$$

$$F_{calc} = \frac{S_x^2}{S_y^2} \quad (3.12.)$$

Onde:

$F_{calc}$  – variável aleatória da distribuição F obtida por cálculo das variâncias;

$\sigma^2$  – variância populacional;

$S^2$  – variância amostral.

Deve-se então verificar se a variável possui distribuição F, de Fisher-Snedecor, utilizando as hipóteses e condições mostradas a seguir:

$$H_0: \sigma_x^2 == \sigma_y^2 \quad (3.13.)$$

$$H_a: \sigma_x^2 > \sigma_y^2 \quad (3.14.)$$

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

$$F_{tab} = F_\alpha(n_y - 1; n_x - 1) \quad (3.16.)$$

Decisão: Se  $F_{calc} \geq F_{tab} \rightarrow$  Rejeita-se  $H_0$

### 3.2.6.3 Teste T de Student para o caso de duas amostras independentes

Muitas vezes se possui dados sobre médias de populações diferentes e deseja-se verificar sua igualdade ou desigualdade, como será apresentado neste trabalho, pode-se tomar, por exemplo, as comparações entre resistência de corpos-de-prova de cerâmica vermelha com diferentes diâmetros e temperaturas de queima. Pode-se traduzir esse tipo de problema na avaliação das hipóteses a seguir:

$$H_0: \mu_x = \mu_y, \text{ contra} \quad (3.17.)$$

$$H_a: \begin{cases} \mu_x > \mu_y, \text{OU} \\ \mu_x < \mu_y, \text{OU} \\ \mu_x \neq \mu_y \end{cases} \quad (3.18.)$$

Entretanto, anteriormente a aplicação do Teste T é necessário se fazer uso prévio do Teste F, verificando-se as seguintes hipóteses:

$$H'_0: \sigma_x^2 = \sigma_y^2, \text{ contra} \quad (3.19.)$$

$$H'_a: \begin{cases} \sigma_x^2 > \sigma_y^2, \text{ou} \\ \sigma_x^2 < \sigma_y^2, \text{ou} \\ \sigma_x^2 \neq \sigma_y^2 \end{cases} \quad (3.20.)$$

Após a aplicação do Teste F existem duas possibilidades: a hipótese de nulidade pode ser aceita ou rejeitada. A seguir serão descritos os procedimentos a serem tomados nos dois casos.

Caso  $H'_0$  não seja rejeitada podemos admitir que as variâncias são iguais e que os valores de  $S_x^2$  e  $S_y^2$  são estimativas de um mesmo valor  $\sigma^2$  que é a variância comum as duas populações. De forma, que se pode combinar  $S_x^2$  e  $S_y^2$  a fim de se obter um estimador para  $\sigma^2$ , que é definido na expressão (3.22), a variável calculada para a distribuição t encontra-se na expressão (3.23).

$$S^2 = \frac{(n_x - 1)S_x^2 + (n_y - 1)S_y^2}{n_x + n_y - 2} \quad (3.21.)$$

$$t = \frac{\bar{X} + \bar{Y}}{\sqrt{S^2 \left( \frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y} \right)}} \quad (3.22.)$$

Caso  $H'_0$  seja rejeitada pode-se admitir que as variâncias não são iguais, portanto não faz sentido combinar  $S_x^2$  e  $S_y^2$ . De forma que a variável aleatória que segue aproximadamente a distribuição t de Student toma a forma da expressão (3.24).

$$t = \frac{\bar{X} + \bar{Y}}{\sqrt{\left( \frac{S_x^2}{n_x} + \frac{S_y^2}{n_y} \right)}} \quad (3.23.)$$

Deve-se então verificar agora a validade das hipóteses e proceder os testes mostrados nas expressões (3.25) a (3.27).

$$\text{Teste bilateral: Se } |t| \geq t_{tab} \rightarrow \text{Rejeita-se } H_0 \quad (3.24.)$$

$$\text{Teste unilateral à direita: Se } t \geq t_{tab} \rightarrow \text{Rejeita-se } H_0 \quad (3.25.)$$

$$\text{Teste unilateral à esquerda: Se } t \geq -t_{tab} \rightarrow \text{Rejeita-se } H_0 \quad (3.26.)$$

### 3.2.6.4 O critério do Tamanho Mínimo do Lote (TML)

O critério do Tamanho Mínimo de Lote (TML) é utilizado para lotes com número de amostras menor que 30 unidades. Para que o valor obtido através de procedimentos experimentais seja consistente, é preciso que tenha representatividade do universo amostral, considerando que o tamanho do lote é diretamente proporcional a 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. O grau de confiança utilizado para os intervalos foi de 5% (0,05).

A primeira etapa é calcular o número inicial mínimo do lote, levando-se em consideração o desvio padrão e o valor tabelado de t de Student para (n-1) graus de liberdade do conjunto de dados. Em seguida, calcula-se o tamanho mínimo do lote (Gomes, 1987). Tais procedimentos são mostrados nas expressões que se seguem.

$$n_0 = \left( \frac{tS_x}{rx_m} \right) \quad (3.27.)$$

Onde:

$n_0$  – número inicial mínimo do lote;

t – variável aleatória da distribuição de Student para (n-1) graus de liberdade;

$r$  – parâmetro relativo à incerteza aceita;

$x_m$  – média do lote, é dada pela expressão (3.30);

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} \quad (3.28.)$$

$S_x$  é o desvio padrão do lote dado pela expressão (3.31);

$$S_x = \frac{\sum (x - x_m)^2}{n - 1} \quad (3.29.)$$

$x$ - valor do dado considerado;

$n$  – número de dados do lote;

$(n-1)$  é o número de graus de liberdade;

$x_m$  – valor da média.

Depois do cálculo do número inicial mínimo do lote, procede-se o cálculo do tamanho mínimo do lote (TML) dado pela expressão (3.31), mostrada a seguir:

$$n = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{n_0}{N}\right)} \quad (3.30.)$$

onde o  $N$  é o número de dados do lote.

A ocorrência de dispersão dos resultados deve-se associar as incertezas nas medidas. Estas incertezas são resultados de possíveis erros ocorridos durante o experimento, referentes às parcelas surgidas de repetidas medições em condições idênticas, que ocorrem variações de forma imprevisível. Essa dispersão provocada por erros aleatórios é tratada estatisticamente pelo Critério de Chauvenet (Chauvenet apud Ross, 2003).

### 3.2.6.5 Os Critérios de Chauvenet

O Critério de Chauvenet é um rigoroso método baseado na teoria de probabilidade da eliminação racional de dados fora da tendência dominante. Considera-se que os dados são representados pela função de frequência da distribuição normal e quando surgem dúvidas quanto à variação das medidas realizadas, resultantes do desvio de certo valor da média esperada, pode-se eliminar valores máximos ou mínimos e refazer os cálculos.

Sejam  $n$  medições de uma grandeza ( $n$  grande), de modo que os resultados seguem uma distribuição Gaussiana. Esta distribuição fornece a probabilidade de que um dado valor medido esteja desviado de certo valor da média esperada. O valor mínimo esperado para essa probabilidade é  $1/n$ .

Assim, se a probabilidade de certo valor se desviar é menor que  $1/n$ , pode-se qualificá-lo para ser eliminado do conjunto de dados. O Critério de Chauvenet estabelece então que valor medido pode ser rejeitado se a probabilidade  $m$  de obter o desvio em relação à média é menor que  $1/2n$ .

A razão de desvio entre um determinado valor e a média é calculada através da expressão (3.32) (Xavier, 2006).

$$DR = \frac{x - x_m}{S_x} \quad (3.31.)$$

Onde:

DR – razão desvio entre o máximo desvio ( $x-x_m$ ) e o desvio padrão;

$x$  – valor medido;

$x_m$  – valor médio do lote calculado;

$S_x$  – desvio padrão.

Para aplicar o critério de Chauvenet na eliminação de valores duvidosos, em primeiro lugar calcula-se o desvio médio e o desvio padrão do conjunto de dados medidos. A seguir, calcula-se a razão de desvio DR para cada um dos pontos comparado com a razão de desvio máximo aceitável  $DR_0$ , conforme os valores da Tabela 3.10.

Tabela 3.5 - Valores da razão do desvio máximo aceitável  $DR_0$  em relação ao desvio padrão para vários 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

As hipóteses utilizadas para o Critério de Chauvenet são:

H0 (hipótese inicial): se  $DR_{máx}$  ou  $DR_{mín}$  calculado  $\leq DR_0$  (tabelado), aceita-se o valor considerado.

H1 (hipótese alternativa): se  $DR_{máx}$  ou  $DR_{mín}$  calculado  $> DR_0$  (tabelado), rejeita-se ou exclui-se o valor máximo ou mínimo e refaz-se os cálculos.

Após esse processo, com os dados finais obtidos, calcula-se um novo valor médio e um novo desvio padrão, sem incluir os pontos eliminados. O critério poderia até ser repetido mais uma vez, para a eliminação de mais pontos, entretanto o

procedimento não é recomendável (Ross, 2003), pois se diversos pontos extrapolarem o critério-limite estabelecido é provável que o sistema de instrumentação seja inadequado ou que o processo seja extremamente variável.

## **CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Introdução**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pelo programa experimental, onde foram ensaiadas amostras cilíndricas de cerâmica, blocos estruturais cerâmicos, prismas e painéis de parede. Os resultados são apresentados, analisados e comparados com estudos de outros autores. Como resultados são apresentados resistências últimas, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para o material cerâmico, e correlações entre resistências de blocos, prismas e paredes.

### **4.2 Argila**

A indústria cerâmica que forneceu material para realização dos ensaios extrai sua matéria-prima de uma jazida denominada Alegria, que já foi objeto de estudo de caracterização de solo de diversos pesquisadores. Pelo exposto, neste trabalho não foram realizados ensaios de caracterização do solo, entretanto, foram apresentados alguns resultados divulgados por autores que os efetuaram.

Pedroti (2007) realizou ensaios de caracterização da matéria-prima da jazida Alegria no laboratório de solos do curso de engenharia civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (LECIV/CCT/UENF) utilizando

amostras da jazida Alegria. A figura 4.1 mostra a curva de distribuição do tamanho das partículas obtida por Pedroti (2007).

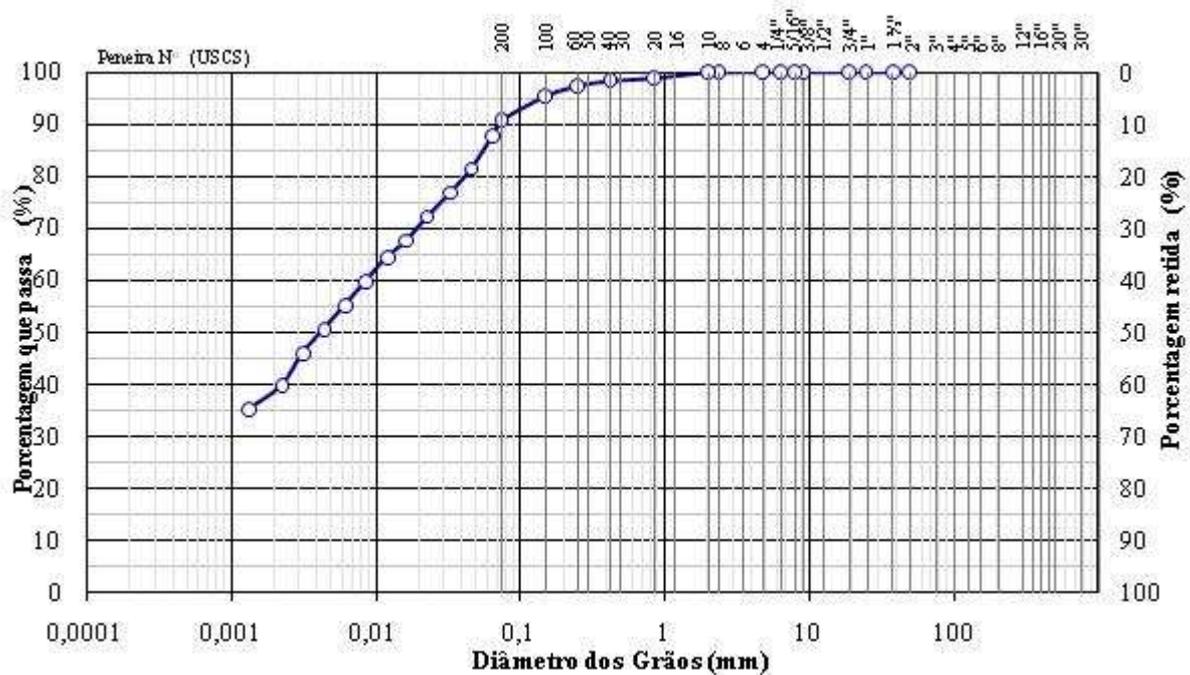


Figura 4.1 - Curva de distribuição do tamanho das partículas da amostra de argila da jazida Alegria, fonte Pedroti (2007).

Na figura 4.1 a distribuição do tamanho das partículas da amostra de argila, permite classificar a amostra como silte argiloso pouco arenoso, e as frações do solo encontram-se distribuídas da seguinte forma: 1,4% de areia grossa, 2,2% de areia média, 10,2% de areia fina, 47,5% de silte e 38,7% de argila.

Ensaio de caracterização em amostras de solo realizados por Xavier (2006) utilizando solo de outra jazida localizada no município de Campos dos Goytacazes/RJ, classificam o material como argila siltosa pouco arenosa, encontrando os seguintes valores para suas frações: 53% de argila, 31% de silte, 8% de areia fina, 5% de areia média e 3% de areia grossa.

Alexandre (2000) em seu estudo das matérias-primas das indústrias ceramistas de Campos dos Goytacazes/RJ caracterizou 27 amostras de diversas jazidas da região, inclusive a jazida Alegria. Em sua análise granulométrica foi

detectado em suas amostras uma porcentagem da fração argila variando de 35% a 60%.

De acordo com os vários ensaios realizados com argilas do município de Campos dos Goytacazes/RJ, e considerando sua formação geológica, pode-se ter uma idéia aproximada da formação mineralógica e conseqüentemente do comportamento físico e mecânico das argilas de Campos dos Goytacazes.

A Figura 4.2 apresenta uma comparação entre os resultados da distribuição do tamanho das partículas encontrado pelos autores mencionados para argilas do município de Campos dos Goytacazes/RJ, mostrando que apesar de alguma variação, os resultados apresentam proximidade, e cabe ainda lembrar que os valores apresentados por Alexandre (2000) e Xavier (2006) representam a média dos resultados das amostras por eles ensaiadas.

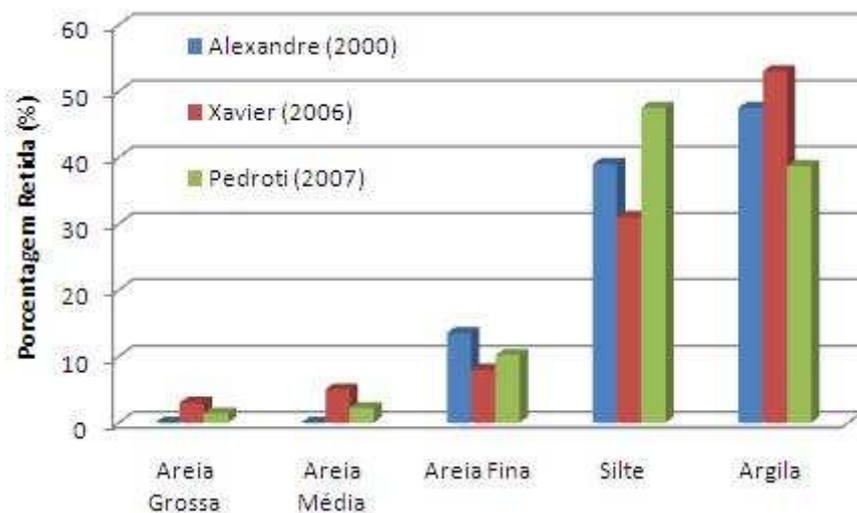


Figura 4.2 - Frações granulométricas do solo (%).

Os autores também realizaram testes para determinação dos limites de liquidez e plasticidade, índice de plasticidade, índice de compressibilidade, atividade coloidal e massa específica real dos grãos.

O limite de liquidez (LL) é definido como o teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o líquido, sendo obtido com a utilização do aparelho

de Casagrande. O limite de plasticidade (LP) é determinado pela percentagem de umidade onde o solo começa a se fraturar quando se tenta moldar com ele um cilindro de 3 mm de diâmetro e aproximadamente 10 cm de comprimento. O índice de plasticidade (IP) é a diferença entre os limites de liquidez e plasticidade. O índice de compressão ( $C_c$ ), que representa o quanto um solo é susceptível a compressão (sujeito a recalque), é expresso pela seguinte correlação:

$$C_c = 0,009(LL - 10) \quad (4.1.)$$

A atividade coloidal mede a atividade de fração argila no comportamento do solo, ele é definido pela relação entre o índice de plasticidade e a fração argila, ou seja, a porcentagem menor que 0,002 mm. A massa específica real dos grãos é determinada pelo método clássico do picnômetro.

Os resultados dos ensaios realizados por Pedroti (2007) são apresentados resumidamente na Tabela 4.1. O limite de liquidez e o limite de plasticidade indicam uma argila altamente plástica, enquanto que a atividade coloidal pode ser classificada como normal.

Tabela 4.1 - Resultados de ensaios realizados de caracterização de solo para a jazida Alegria, fonte: Pedroti (2005).

<b>Especificação</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Massa específica real dos grãos	2,81	g/cm <sup>3</sup>
Limite de liquidez	59,50	%
Limite de plasticidade	30,20	%
Índice de plasticidade	29,30	%
Índice de compressibilidade	0,45	-
Atividade coloidal	0,76	-

O valor encontrado para os limites de Atterberg por Xavier (2006) utilizando amostras de jazidas de Campos dos Goytacazes/RJ tiveram os seguintes valores em percentagem: 59% para o limite de liquidez, 29% para o limite de plasticidade, e 30% para o índice de plasticidade. A massa específica real dos grãos foi de 2,66 g/cm<sup>3</sup>, e sua superfície específica foi de 22,2 m<sup>2</sup>/g.

Em seu trabalho, Alexandre (2000) classificou amostras da jazida Alegria como argila inorgânica de alta plasticidade, encontrando para os limites de Atterberg os valores de: 59 a 61% para o limite de liquidez, 23 a 24% para o limite de plasticidade, e 35 a 38 para o índice de plasticidade. Os valores encontrados para a massa específica real dos grãos, entre 2,65 e 2,85 g/cm. O pH determinado para a jazida em questão foi ácido, com seu valor oscilando entre 6,3 e 6,4.

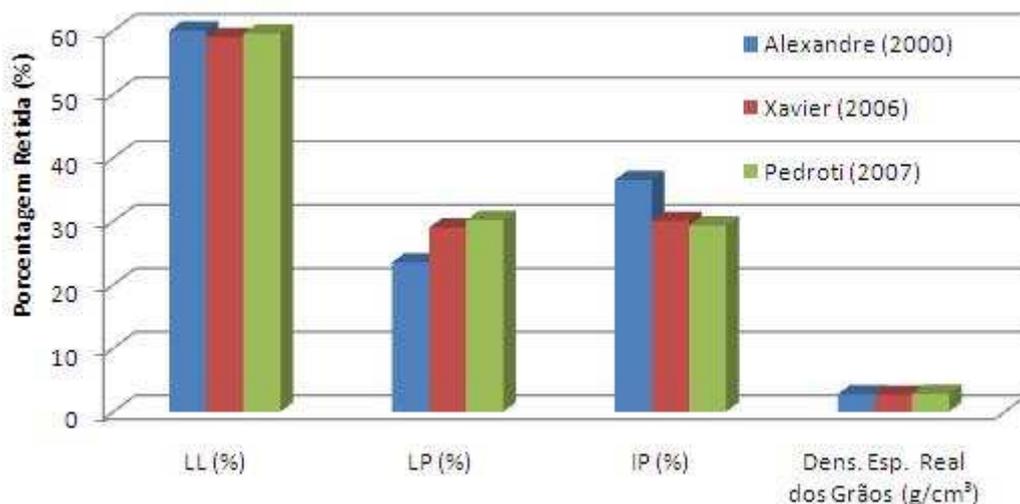


Figura 4.3 - Limites de Atterberg (%), determinadas por diferentes autores.

A Figura 4.3 mostra que os resultados obtidos pelos autores divergem pouco, possuindo propriedades semelhantes, de forma que os ensaios realizados por Pedroti (2007), Xavier (2006) e Alexandre (2001), foram utilizados para caracterizar a argila utilizada neste trabalho.

Alexandre (2000) realizou ensaios de difração de raios-X para identificação dos argilominerais. Seus resultados revelavam a preponderância do argilomineral caulinita. Ainda em seu trabalho foram analisadas as propriedades térmicas da fração argila por meio da técnica fotoacústica, os resultados deste experimento se encontram na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Resultados técnica da fotoacústica para determinação de propriedades térmicas da fração argila, fonte: Alexandre (2000).

Temperatura (°C)	Porosidade (%)	Massa esp. (g/cm <sup>3</sup> )	Cristalinidade (%)
300	50	1,152	31,00
500	69	1,220	2,80
600	74	1,247	-
700	70	1,303	-
800	65	1,311	0,41
900	58	1,332	2,52
950	49	1,381	2,74
980	-	-	6,86

Os resultados da Tabela 4.2 mostram o crescimento da massa específica e da cristalinidade com a temperatura, enquanto a porosidade decresce. Nota-se que, com a elevação da temperatura de 700 para a de 900°C o crescimento da cristalinidade é iniciado, e a metacaulinita com sua estrutura amorfa começa ser convertida para estrutura cristalina de espinélio e mulita.

Os resultados da caracterização química feita por Alexandre *et al* (2004) são mostrados na Tabela 4.3, apresentam a predominância de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que juntos são responsáveis por 78,79% da composição química da amostra.

Tabela 4.3 - Resultados de caracterização química, fonte: Alexandre *et al* (2004).

P.F.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Eq.Alc.
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
11,88	56,40	22,39	6,38	0,51	-	1,32	0,33	1,20	1,19

A Figura 4.4 apresenta espectros de raios-X, obtidos em seu trabalho, para várias temperaturas de queima, onde são mostradas as transformações de cristalinidade que ocorrem nos argilominerais caulinita e gibsita (Alexandre, 2000).

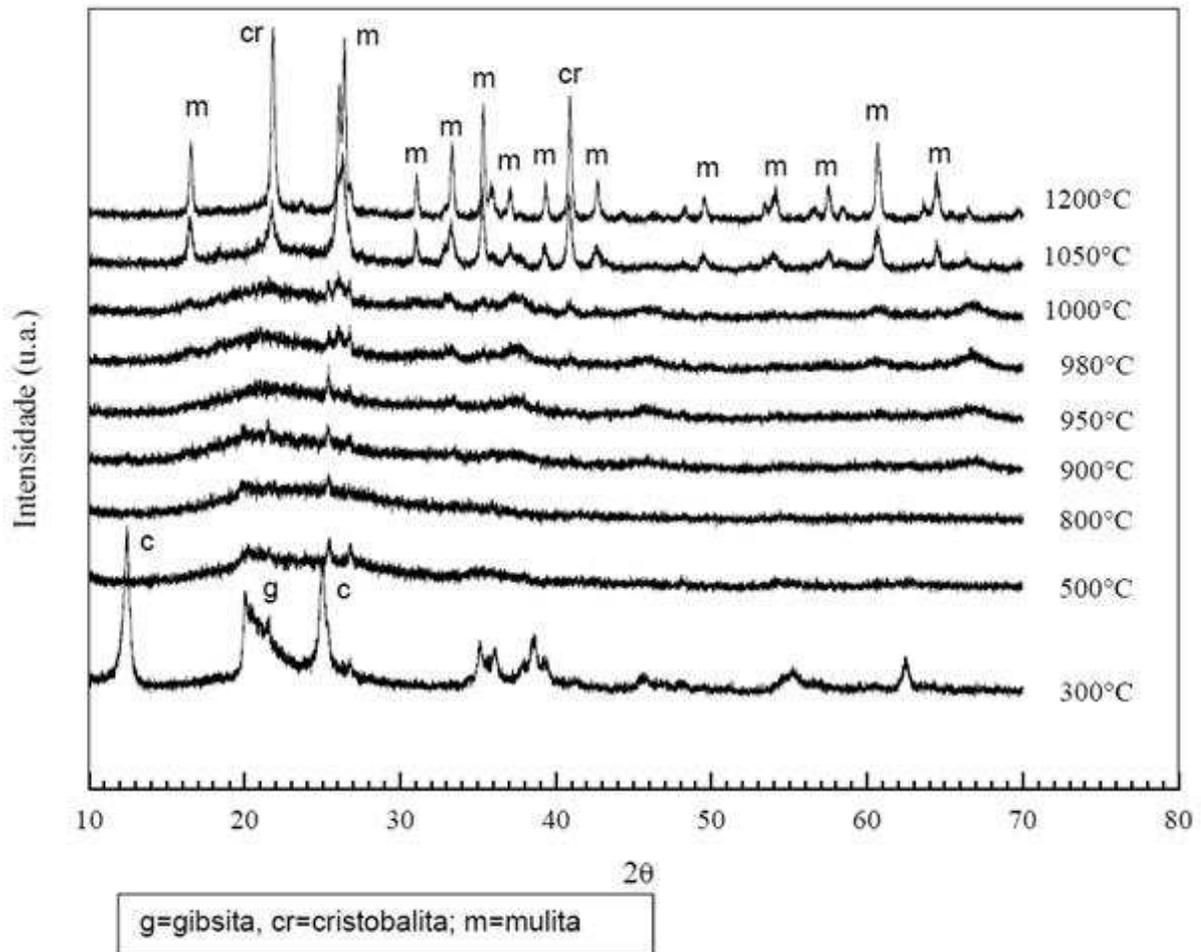


Figura 4.4 - Espectros de Raios-X, fonte: Alexandre (2000)

Segundo Alexandre (2000), na temperatura de 300°C é ainda observado o padrão cristalino da caulinita que começa a desaparecer acima de 500°C. A partir de 950°C, surgem novos picos de cristalinidade representando as estruturas da mulita (m) e da cristobalita (cr), que se tornam mais evidenciadas para temperaturas superiores a 1050°C. Observa-se que, partindo de um valor de aproximadamente 30%, a cristalinidade inicialmente diminui com a temperatura e atinge um valor mínimo de cerca de 0,41% para 800°C. Para temperaturas superiores é observado um aumento da cristalinidade, devido à formação da cristobalita e da mulita, atingindo um valor máximo de 47,76% a 1200°C.

Alexandre *et al* (2004) realizou análise térmica diferencial e termogravimétrica de amostras de argila da jazida Alegria, as curvas obtidas são apresentadas na Figura 4.5.

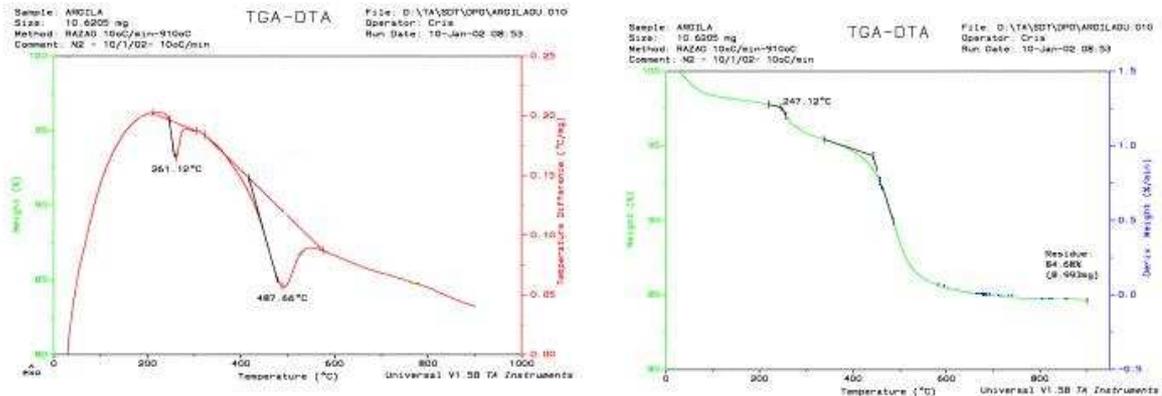


Figura 4.5 - Curva da análise termogravimétrica diferencial da massa cerâmica, fonte: Alexandre *et al* (2004)

Alexandre *et al* (2004) em sua análise da curva termogravimétrica diferencial (ATG) da Figura 4.5, mostra que houve uma pequena perda de massa (1,58 e 1,104%) a 52,28°C e 63,95°C, correspondente à perda de água livre e adsorvida. Foi apontada entre 265,99°C e 268,89°C uma perda de massa (2,288 e 2,145%) correspondente a desidroxilação de hidróxidos de alumínio e ferro (podendo ser devido a gibsita e goetita). Também ocorreu perda de massa (9,008 e 8,683%) a 493,13°C e 493,37°C, correspondente à perda de hidroxilas da caulinita transformando-se em metacaulinita.

Após a temperatura de 900°C apresentam-se bandas endotérmicas indicando a transformação da metacaulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) amorfa em espinélio ( $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ ) formando uma estrutura estável.

De posse dos resultados obtidos pelos autores citados, foi possível determinar as condições necessárias aos ensaios, como teor de umidade para conformação hidrolástica e temperaturas de queima.

Para a determinação do teor de umidade de conformação hidroplástica foi usada a equação (3.1) recomendada por Alexandre (1997), utilizando a média entre os valores de limite de liquidez dos autores citados, obtendo-se uma umidade de conformação de 31,8%.

Para a escolha das temperaturas de queima foram utilizados vários critérios, a maioria deles baseados nos resultados dos ensaios apresentados. Dois fatores limitam a temperatura de queima das peças utilizadas nas indústrias, sendo o primeiro o consumo de energia e o segundo a capacidade calorífica dos fornos.

Nesta pesquisa foram utilizadas duas temperaturas de queima. A primeira delas tem o valor de 700°C, que segundo Alexandre (2000) e Ramos (2006), é o utilizado nas cerâmicas campistas. Para escolha da segunda temperatura, se optou por uma temperatura que não superasse a capacidade calorífica dos fornos, e que conferisse melhoras nas propriedades físicas do material.

Observando-se a curva ATG da Figura 4.5 observa-se que nas temperaturas de 265,99°C, 268,89°C, 493,13°C e 493,37°C o argilomineral (caulinita) sofre alterações tornando o material instável, observa-se também que após a temperatura de 900°C a curva apresenta comportamento assintótico, significando que os minerais permanecem estáveis nesta temperatura. Na temperatura de 900°C observa-se na figura 4.4 uma maior cristalinidade, e esta temperatura não supera a capacidade calorífica dos fornos, motivo pelo qual foi escolhida como segunda temperatura de queima neste trabalho.

### **4.3 Amostras cilíndricas de cerâmica**

Muitos autores obtêm propriedades intrínsecas ao material cerâmico de ensaios realizados em blocos ou prismas. Essa metodologia pode não ser a mais adequada, visto que os blocos apresentam formas diversas, e essas propriedades devem representar o comportamento do material independente de sua geometria.

Assim, fica clara a necessidade de uma padronização das dimensões das amostras ensaiadas. Neste trabalho foram testadas amostras de diferentes dimensões para encontrar a que melhor representa o comportamento do material cerâmico, buscando uma forma de produzir ensaios consistentes.

### 4.3.1 Variações lineares

Durante o processo de queima ocorre perda da umidade, perda da água adsorvida, oxidação da matéria orgânica e perda de alguns hidróxidos, o que provoca a retração do material cerâmico. As Tabelas 4.4 e 4.5 mostram as médias das dimensões das amostras de cerâmica vermelha queimadas a 700 e 900°C respectivamente, onde DN representa o diâmetro nominal da amostra. As Tabelas 4.6 e 4.7 mostram a variação linear média das dimensões. Os valores individuais para as amostras encontram-se no Apêndice A.

Tabela 4.4 - Dimensões anteriores e posteriores a queima das amostras à 700°C.

Corpo-de-Prova (15 un.)	Dimensões anteriores à queima								Dimensões posteriores à queima							
	Diâmetros (mm)				Alturas (mm)				Diâmetros (mm)				Alturas (mm)			
	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60
Média	27,8	35,7	47,9	59,4	60,5	78,1	95,7	114,8	27,5	35,2	47,4	58,8	59,9	77,5	94,5	113,0
Desv. Pad.	0,2	0,2	0,1	0,4	0,5	0,4	0,7	0,6	0,2	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5
C. V. (%)	0,7	0,6	0,3	0,6	0,8	0,5	0,7	0,5	0,6	0,4	0,4	0,6	0,9	0,6	0,5	0,4

Tabela 4.5 - Dimensões anteriores e posteriores a queima das amostras à 900°C.

Corpo-de-Prova (15 un.)	Dimensões anteriores à queima								Dimensões posteriores à queima							
	Diâmetros (mm)				Alturas (mm)				Diâmetros (mm)				Alturas (mm)			
	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60
Média	27,9	35,7	48,1	59,9	60,4	78,1	95,5	115,3	27,0	34,5	46,6	58,3	58,9	75,8	93,4	112,4
Desv. Pad.	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,4	1,1	0,3	0,2	0,2	0,6	0,3	0,5	0,5	1,1
C. V. (%)	0,9	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,4	0,9	1,1	0,6	0,5	1,1	0,6	0,6	0,5	1,0

Tabela 4.6 - Tolerâncias dimensionais individuais relacionadas às médias das dimensões efetivas para amostras queimadas a 700°C.

Corpo-de-Prova (15 unidades)	Variação do Diâmetro (%)				Variação da Altura (%)			
	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60
Média	0,925	0,932	1,362	0,964	0,885	0,801	1,222	1,491
Desvio Padrão	0,573	0,566	0,523	0,461	0,629	0,641	0,729	0,498
C. V. (%)	61,926	60,787	38,376	47,790	71,065	80,109	59,609	33,369

Tabela 4.7 - Tolerâncias dimensionais individuais relacionadas às médias das dimensões efetivas para amostras queimadas a 900°C.

Corpo-de-Prova (15 unidades)	Variação do Diâmetro (%)				Variação da Altura (%)			
	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60
Média	3,180	3,103	3,157	2,649	2,438	2,885	2,266	2,463
Desvio Padrão	0,916	0,609	0,477	0,880	0,674	0,587	0,658	0,522
C. V. (%)	28,806	19,632	15,126	33,205	27,621	20,331	29,049	21,206

O coeficiente de variação (C. V.) mostrou que as amostras queimadas a 700°C obtiveram uma dispersão maior que as queimadas a 900°C. Comparações estatísticas utilizando o Teste t de Student comprovaram a maior dispersão para as amostras queimadas a 700°C, e uma relativa homogeneidade para as queimadas a 900°C. Os resultados da aplicação da distribuição de Student para o teste t na comparação da variação linear de amostras com a mesma temperatura de queima e dimensões diferentes encontram-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Comparações pelo teste t entre as médias das variações lineares de amostras com a mesma temperatura de queima.

DN das amostras comparadas	700°C		900°C	
	∅	C	∅	C
30-40	ns	ns	ns	ns
30-50	s	ns	ns	ns
30-60	ns	s	ns	ns
40-50	s	ns	ns	s
40-60	ns	s	ns	s
50-60	s	ns	ns	ns

Legenda:

ns - não significativo

s - significativo

Observa-se na Tabela 4.8 que para as amostras queimadas a 900°C, a aplicação do Teste t revela, com 95% de confiabilidade, que não existem diferenças significativas nas variâncias de corpos-de-prova com diâmetros diferentes, indicando uma queima mais homogênea nesta temperatura.

Os resultados obtidos pela comparação entre as médias dos valores das variações lineares de amostras que possuem as mesmas dimensões nominais, mas queimadas a temperaturas diferentes são mostrados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Comparações pelo teste t para as variações lineares entre amostras com temperatura de queimas diferentes.

DN das amostras comparadas	Ø	C
700°C-900°C (30)	s	s
700°C-900°C (40)	s	s
700°C-900°C (50)	s	s
700°C-900°C (60)	s	s

Legenda:

ns - não significativo

s - significativo

A Tabela 4.9 revela que se variando a temperatura de queima os valores da variação linear sofrem mudanças significativas, de mais acentuada do que quando se conserva a temperatura de queima e se varia as dimensões das amostras. Assim a propriedade variação linear está atrelada a temperatura de queima.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram as distribuições dos valores médios das variações lineares relativas aos diâmetros e alturas respectivamente para corpos-de-prova com temperaturas de queima de 700 e 900°C.

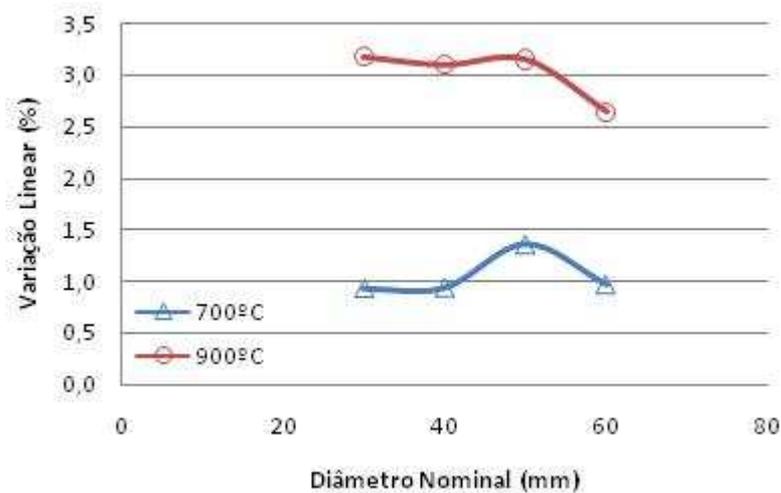


Figura 4.6 - Média da variação linear dos diâmetros para amostras de diferentes diâmetros nominais e temperaturas de queima de 700 e 900°C.

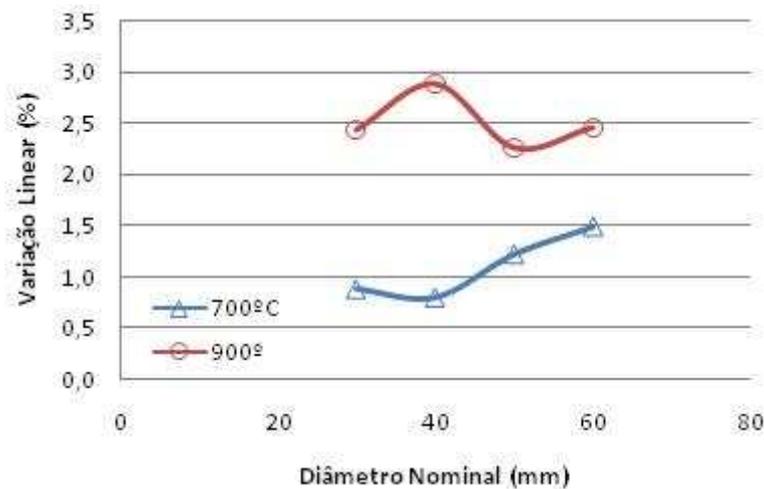


Figura 4.7 - Média da variação linear das alturas para amostras de diferentes diâmetros nominais e temperaturas de queima de 700 e 900°C.

Observando-se a Figura 4.6 percebe-se na variação linear relacionada ao diâmetro das amostras tem variação considerável quando se altera a temperatura de queima da amostra, este efeito deve-se ao aumento da cristalinidade e ao rearranjo das estruturas dos minerais do material cerâmico. O mesmo comportamento é notado na Figura 4.7, que apesar de mostrar pequena influência das dimensões da amostra na variação linear da altura, percebe que as alterações mais significativas são obtidas variando a temperatura de queima do material.

A variação linear é importante para a alvenaria estrutural, pois é uma das causas da heterogeneidade dimensional nas peças cerâmicas, podendo provocar o comprometimento de um processo de modulação eficiente. Entretanto a tabela 4.7 mostra que a maior variação de dimensões verificada nas amostras foi da ordem de 3,2%.

### 4.3.2 Porosidade Aparente e massa específica aparente

Durante o processo de queima ocorrem transformações na estrutura cristalina dos argilominerais que alteram a porosidade da amostra (Xavier, 2006). A Figura 4.3 mostra os resultados dos ensaios de porosidade aparente para amostras com diâmetros e temperaturas de queima diferentes.

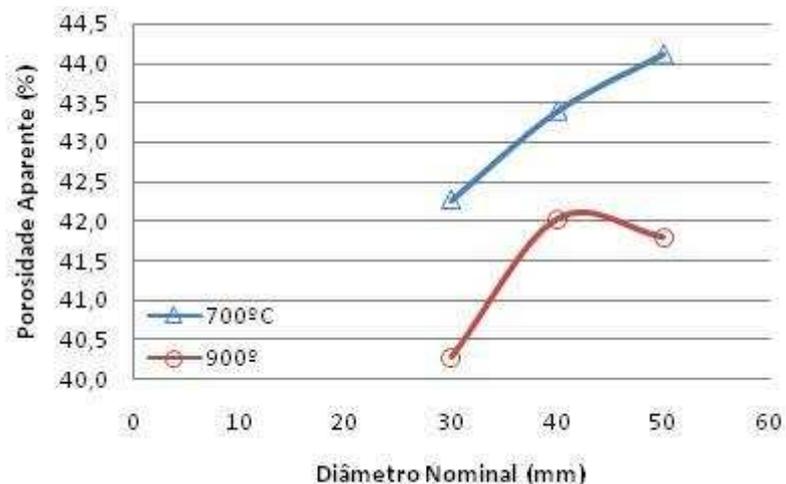


Figura 4.8 - Porosidade aparente (PA) medida em porcentagem, para as amostras de DN 30, 40 e 50 mm, e temperaturas de queima de 700 e 900°C.

Observando-se a Figura 4.8 nota-se que a porosidade tende a crescer com o diâmetro das amostras, esse fato resulta da maior quantidade de defeitos provocados pelo processo de secagem e queima em amostras com dimensões maiores.

A porosidade tem influência direta na resistência última à compressão de uma peça, pois tamanho da falha crítica que provocará a ruína se aproxima do maior poro ou da maior partícula (Zanotto e Migliore, 1991). Defeitos superficiais são muito importantes para a previsão do modo de ruptura da peça, haja vista que, nos ensaios mecânicos convencionais as máximas tensões de tração são concentradas nas regiões superficiais e defeitos nessa região configuram descontinuidades geométricas, onde se tende a ter concentrações de tensão.

Durante os processos de secagem e queima dos corpos-de-prova surgiram fissuras em sua parte central, que se mostraram mais acentuadas quanto maiores às dimensões destes. Esses defeitos podem ser determinantes tanto na porosidade quanto no mecanismo de ruptura da peça.

Outro fato que pode ser observado é que o valor da porosidade aparente decresce com o aumento da temperatura, causado pelo aumento da cristalinidade do material em detrimento da estrutura amorfa da metacaulinita. Na Tabela 4.10 são mostradas as comparações realizadas através do Teste t para verificar a significância da variação entre os valores obtidos para a porosidade aparente das amostras.

Tabela 4.10 - Resultados da aplicação do Teste t para comparação da porosidade aparente das amostras.

DN das amostras comparadas	700°C	900°C
30-40	s	s
30-50	s	s
40-50	s	ns

Legenda:

ns - não significativo

s - significativo

As comparações estatísticas através do Teste t de Student mostram que para a temperatura de queima de 900°C as porosidades aparentes dos corpos-de-prova com diâmetros de 40 e 50 mm podem ser consideradas iguais.

A massa específica aparente (MEA) sofre variações pequenas no grupo de amostras com mesma temperatura de queima, assim sendo, foi encontrado o valor médio de 1,452 g/cm<sup>3</sup> para a MEA dos corpos-de-prova queimados a 700°C, e para os queimados a 900°C foi de 1,522 g/cm<sup>3</sup>. Os valores individuais das massas específicas dos corpos-de-prova são mostrados no Apêndice A.

Tabela 4.11 - Massa específica aparente em g/cm<sup>3</sup> (MEA).

Corpos-de-Prova (15 unidades)	Temperatura de Queima 700°C				Temperatura de Queima 900°C			
	DN 30 mm	DN 40 mm	DN 50 mm	DN 60 mm	DN 30 mm	DN 40 mm	DN 50 mm	DN 60 mm
Média	1,476	1,448	1,442	1,440	1,545	1,523	1,500	1,518
Desvio Padrão	0,032	0,015	0,020	0,038	0,028	0,022	0,027	0,040
C. V. (%)	2,146	1,024	1,375	2,658	1,839	1,438	1,799	2,611

A Tabela 4.11 mostra que valor da MEA aumenta com a temperatura de queima. A densificação sofrida pelo material é resultante da transformação da metacaulinita amorfa em espenélio, segundo Alexandre (2000) na temperatura de 900°C se inicia a nucleação de mulita e a cristalinidade aumenta. Esse comportamento já era assinalado pela porosidade, pois como os corpos-de-prova queimados a 900°C possuem menor porosidade, ou seja, possui um menor índice de vazios, era de se esperar que também apresentasse uma maior massa específica.

### 4.3.3 Propriedades Mecânicas

Sobre o comportamento mecânico dos materiais cerâmicos, pode-se afirmar que geralmente apresentam ruptura frágil, com uma fase elástica extremamente reduzida, e pouca ou nenhuma deformação plástica. Materiais não cristalinos, tais como a fase vítrea componente da maioria das cerâmicas, apresentam geralmente uma forma coincidental para a superfície de ruptura (Zanotto, 1991). A ruptura desses materiais em temperatura ambiente tende a ocorrer por clivagem sobre planos cristalográficos preferenciais, fratura intragranular, quando em altas temperaturas tende a se fraturar de forma intergranular.

Neste trabalho foram ensaiados 120 corpos-de-prova cilíndricos de cerâmica, divididos em quatro diâmetros (3, 4, 5 e 6 cm) e duas temperaturas de queima diferentes (700 e 900°C). Os corpos-de-prova tiveram sua ruptura determinada por esforços de compressão simples, as médias dos resultados se encontram expressas nas Tabelas 4.12 e 4.13 para amostras com temperatura de queima de 700°C e 900°C respectivamente. Os resultados individuais são mostrados no Apêndice A.

Tabela 4.12 - Tensão de ruptura para amostras, calcinadas a 700°C.

Corpos-de-prova (15 unidades)	Tensão de Ruptura (MPa)			
	DN 30mm	DN 40mm	DN 50mm	DN 60mm
Média	21,283	14,138	6,949	7,377
Desv. Padrão	4,351	1,672	1,554	3,809
C. V. (%)	20,443	11,828	22,363	51,635

Observando a Tabela 4.12 pode-se notar que o maior coeficiente de variação ocorreu para o diâmetro de 60 mm, e para os diâmetros de 30 e 50 mm esse coeficiente se manteve acima de 20%, resultando em um nível de incerteza merecedor de uma análise estatística mais criteriosa. Os dados da Tabela 4.12 foram submetidos então ao Teste de Tamanho Mínimo de Lote (TML) e o Critério de Chauvenet.

A Tabela 4.13 apresenta os valores de resistência para os corpos-de-prova queimados à temperatura de 900°C, se nota neste caso valores altos para o coeficiente de variação das amostras com diâmetros de 50 e 60 mm. Verifica-se a necessidade dos mesmos tratamentos estatísticos utilizados nos dados da tabela 4.12. Os valores individuais das tensões de ruptura são mostrados no apêndice A.

Tabela 4.13 - Tensão de ruptura para amostras queimadas a 900°C.

Corpos-de-prova (15 unidades)	Tensão de Ruptura (MPa)			
	DN 30mm	DN 40mm	DN 50mm	DN 60mm
Média	31,276	23,723	10,849	12,263
Desv. Padrão	5,571	3,502	2,216	6,043
C. V. (%)	17,813	14,762	20,425	49,279

A Tabela 4.14 mostra os resultados da aplicação do Teste de TML para as amostras cilíndricas de cerâmica vermelha. Este Teste indica que o número de amostras utilizadas nos ensaios possui boa representatividade do comportamento do material cerâmico. Entretanto, necessita-se ainda utilizar um critério para reduzir a dispersão entre os valores, neste trabalho empregou-se o Critério de Chauvenet.

Tabela 4.14 - Teste do Tamanho Mínimo de Lote (TML) para dados sobre as resistências das amostras (MPa).

Corpos-de-prova (15 unidades)	700°C				900°C			
	DN 30mm	DN 40mm	DN 50mm	DN 60mm	DN 30mm	DN 40mm	DN 50mm	DN 60mm
Xm (média)	21,28	14,14	7,08	7,38	31,28	23,72	10,85	12,26
Sx(DesvioP.)	4,35	1,67	1,56	3,81	5,57	3,50	2,22	6,04
N (graus de lib.)	11,00	13,00	12,00	11,00	13,00	13,00	13,00	10,00
t (tabela $\alpha=0,975$ )	2,20	2,16	2,18	2,16	2,16	2,16	2,16	2,23
R	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
$n_0$	80,91	26,11	92,59	497,57	59,22	40,67	77,86	483,05
$n_{calc}$	11,00	10,00	12,00	12,00	12,00	11,00	12,00	11,00
$n_{amostra}$	12,00	14,00	13,00	12,00	14,00	14,00	14,00	11,00

Como se percebe na Tabela 4.14 o número de amostras utilizadas é superior ao exigido pelo Teste de TML para todos os lotes, de forma que se pode considerar satisfatória a quantidade de unidades ensaiadas por lote.

A seguir, apresenta-se na Tabela 4.15 o Critério de Chauvenet (C. C.) aplicado para as resistências em MPa das amostras. Avaliou-se neste caso, os dados fora da tendência central.

Tabela 4.15 - Aplicação do Critério de Chauvenet (C. C.) para dados sobre a resistência das amostras (MPa).

Tensões (MPa)	700°C				900°C			
	DN 30mm	DN 40mm	DN 50mm	DN 60mm	DN 30mm	DN 40mm	DN 50mm	DN 60mm
máxima	25,71	16,60	11,36	19,13	42,36	30,19	14,71	25,69
mínima	13,47	11,00	5,13	4,50	21,74	19,05	7,45	6,29
X <sub>m</sub> (média)	21,28	14,14	6,95	7,38	31,28	23,72	10,85	12,26
S <sub>x</sub> (DesvioP.)	4,35	1,67	1,55	3,81	5,57	3,50	2,22	6,04
N° de amostras	12	14	12	12	14	14	14	11
DR <sub>mín</sub>	1,80	1,88	1,17	0,75	1,71	1,34	1,53	0,99
DR <sub>máx</sub>	1,02	1,47	2,84	3,09	1,99	1,85	1,74	2,22
DR <sub>0</sub>	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96
Valor Rejeitado	0,00	0,00	11,36	19,13	42,36	0,00	0,00	25,69

A Tabela 4.15 mostra que os lotes de amostras com temperatura de calcinação de 700°C e diâmetros de 50 e 60 mm tiveram seus valores máximos rejeitados, assim como os lotes com temperatura de queima de 900°C e diâmetros de 30 e 60 mm. Após descartar os valores rejeitados pelo C. C., realizou-se novamente o teste e seus resultados são mostrados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Segunda aplicação do Critério de Chauvenet (C. C.) para dados sobre a resistência das amostras (MPa).

Tensões (MPa)	700°C				900°C			
	DN 30mm	DN 40mm	DN 50mm	DN 60mm	DN 30mm	DN 40mm	DN 50mm	DN 60mm
máximo	25,71	16,60	7,93	7,35	36,30	30,19	14,71	16,92
mínimo	13,47	11,00	5,13	4,50	21,74	19,05	7,45	6,29
X <sub>m</sub> (média)	21,28	14,14	6,55	6,31	30,42	23,72	10,85	10,92
S <sub>x</sub> (DesvioP.)	4,35	1,67	0,73	0,94	4,75	3,50	2,22	4,31
N° de amostras	12,00	14,00	11,00	11,00	13,00	14,00	14,00	10,00
DR <sub>mín</sub>	1,80	1,88	1,94	1,92	1,83	1,34	1,53	1,07
DR <sub>Max</sub>	1,02	1,47	1,89	1,10	1,24	1,85	1,74	1,39
DR <sub>0</sub>	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96
Valor Rejeitado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota-se na Tabela 4.13 que os valores calculados para DR mínimo e máximo não ultrapassam o valor do DR<sub>0</sub> (1,96) após descartar os valores indicados pela

Tabela 4.13. Pela Hipótese  $H_0$ , os valores são aceitos para a incerteza da medida no nível de probabilidade igual a 5%, mesmo apresentando aparentes dispersões.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram as curvas tensão-deformação para as deformações verticais dos corpos-de-prova de diferentes dimensões e temperaturas de queima. Na Figura 4.9 são apresentadas as curvas para as amostras queimadas a 700°C, e na Figura 4.10 a curvas para amostras queimadas a 900°C. A área abaixo da curva fornece uma medida da tenacidade do material. A inclinação da reta tangente relativa à parte da curva que obedece a lei de Hooke, ou seja, mantém proporcionalidade linear entre a tensão e a deformação, foi utilizada para definir o valor do módulo de elasticidade (E), ou módulo de Young.

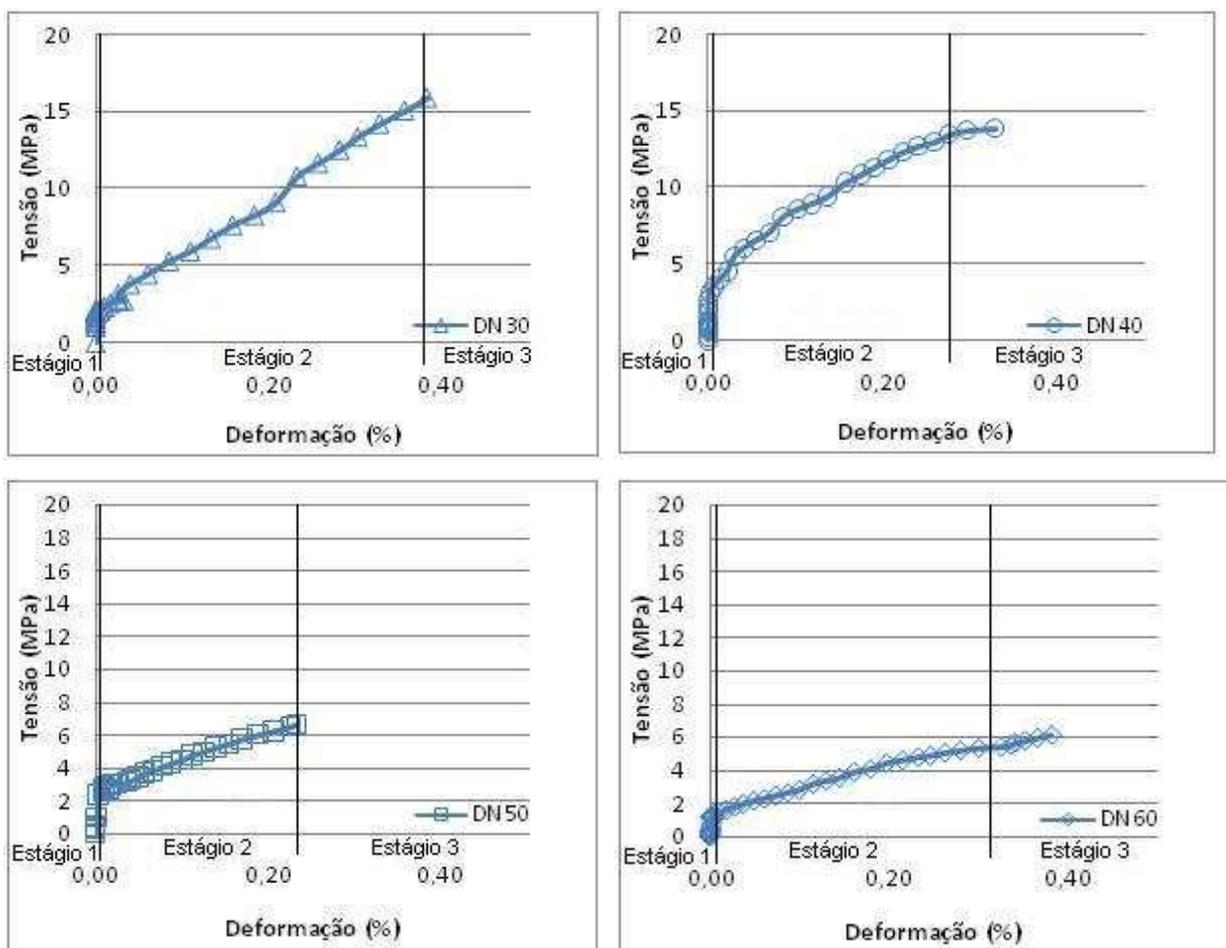


Figura 4.9 - Curvas tensão versus deformação vertical para corpos-de-prova queimados a 700°C.

A Figura 4.9 mostra o comportamento das curvas tensão-deformação para amostras com temperatura de queima de 700°C. As curvas são compostas por três estágios: o primeiro estágio equivale a uma conformação inicial sofrida pelo corpo-de-prova logo, o segundo corresponde à fase onde é válida a lei de Hooke, e o terceiro corresponde ao trecho onde a relação entre tensão e deformação deixa de ser linear.

O primeiro estágio, que ocorre no início da aplicação da carga e possui seu término variando entre 2 e 3 MPa, apresenta deformações extremamente pequenas, e decorre do fechamento de poros, fissuras, e da acomodação do corpo-de-prova aos esforços de compressão.

O segundo estágio, ocorre proporcionalidade linear entre a tensão e deformação, com deformações da ordem de 0,4%, equivalendo a maior parte da curva. Neste trabalho o comportamento do material foi considerado elástico neste trecho, entretanto, não se pode aplicar a ele a definição de elasticidade, pois após o primeiro estágio de conformação não foram executados ensaios de carregamento-descarregamento para verificar se o corpo-de-prova retornaria as suas dimensões originais ou acumularia deformação. A consideração desse trecho como linear neste trabalho deve-se apenas ao seu comportamento que permite a aplicação da lei de Hooke.

O terceiro e último estágio corresponde ao comportamento não linear da relação entre tensão e deformação, neste trabalho esse trecho da curva foi considerado plástico apenas por não respeitar a lei de Hooke, entretanto como a ruptura ocorre neste trecho, a possibilidade de atender a definição de elasticidade é muito grande. O terceiro estágio corresponde a uma parte muito pequena da curva, da ordem de 0,05% de deformação, quase imperceptível em algumas curvas.

A Figura 4.10 demonstra as curvas tensão-deformação vertical para corpos-de-prova com temperatura de queima de 900°C, e apresentam o terceiro estágio melhor definido.

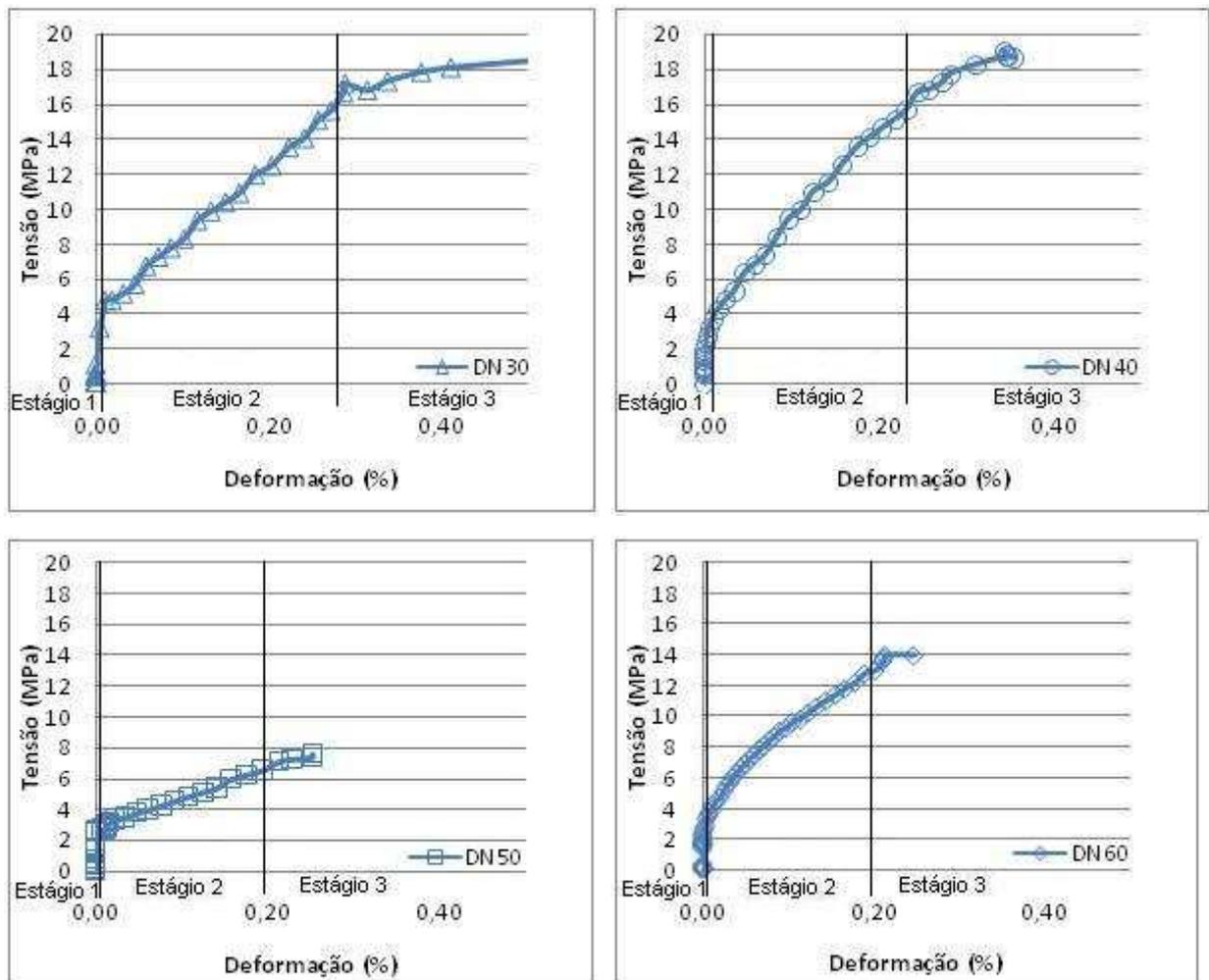


Figura 4.10 - Curvas tensão versus deformação vertical para corpos-de-prova queimados a 900°C.

Comparando-se as Figuras 4.9 e 4.10 percebe-se como dito anteriormente que os corpos-de-prova com temperatura de queima de 900°C apresentam o terceiro estágio da curva melhor definido, maior tensão de ruptura e um maior valor de deformação imediatamente anterior a ruptura. As diferenças para os valores de deformação vertical última se atenuam na medida em que aumentam as dimensões do corpo-de-prova.

A deformação horizontal das amostras também foi monitorada, entretanto não foram todos os diâmetros que tiveram suas deformações registradas, aqueles com diâmetro nominal 30 mm não possuíam espaço suficiente para que se colassem os extensômetros nas posições horizontal e vertical, dessa forma, nessas amostras

apenas a deformação vertical foi medida. A Figura 4.11 mostra a curva tensão-deformação horizontal para corpos-de-prova com diferentes dimensões queimados a temperatura de 700°C.

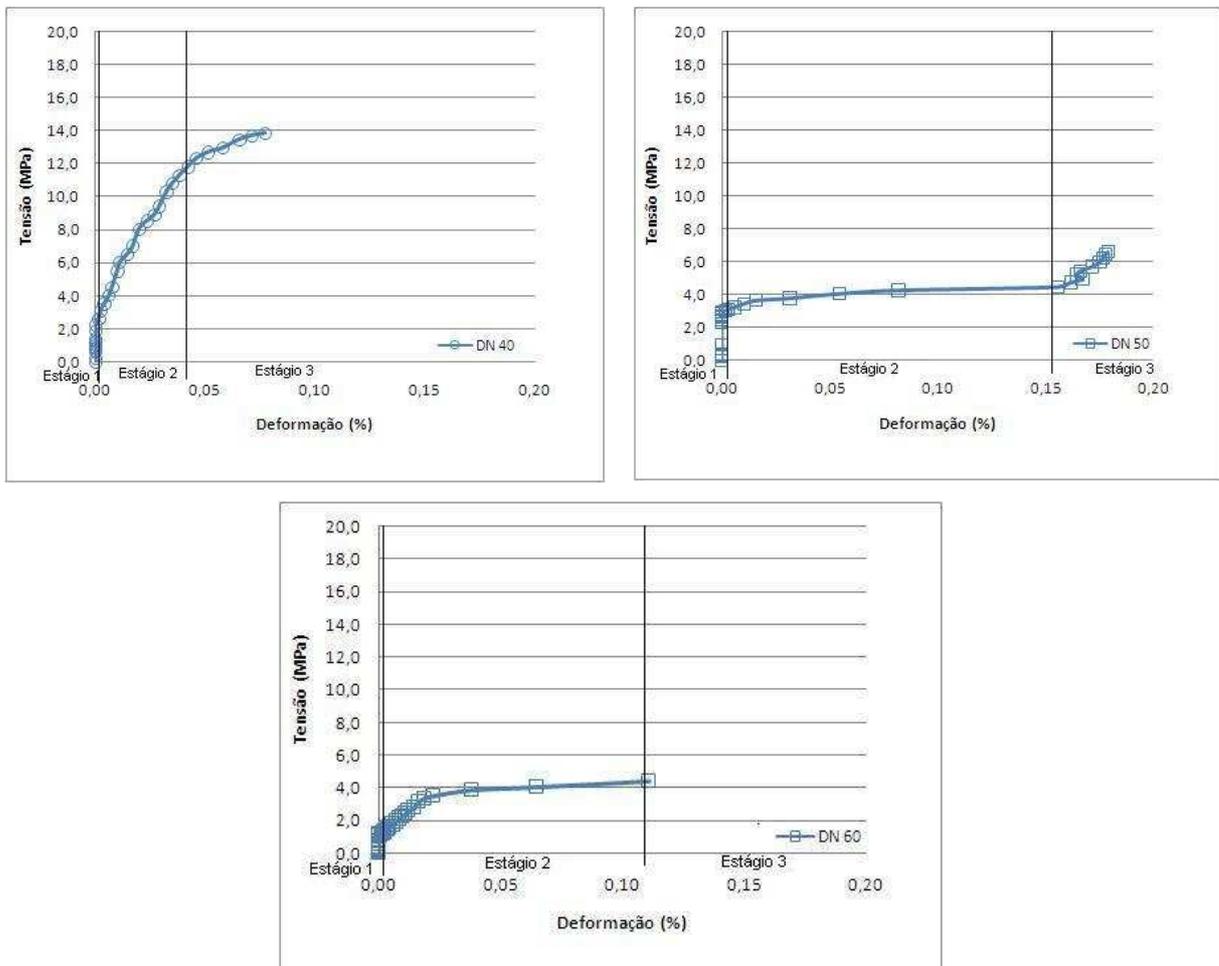


Figura 4.11 - Curvas tensão versus deformação horizontal para corpos-de-prova queimados a 700°C.

Observando a Figura 4.11 percebe-se que o comportamento da curva é semelhante aquele apresentado na Figura 4.9, apresentando os mesmos três estágios, contudo os valores das deformações são consideravelmente menores, assim como a inclinação do trecho linear da curva tensão-deformação.

Na Figura 4.12 são apresentadas as curvas que expressam a relação entre a tensão e a deformação horizontal para corpos-de-prova com temperatura de queima de 900°C.

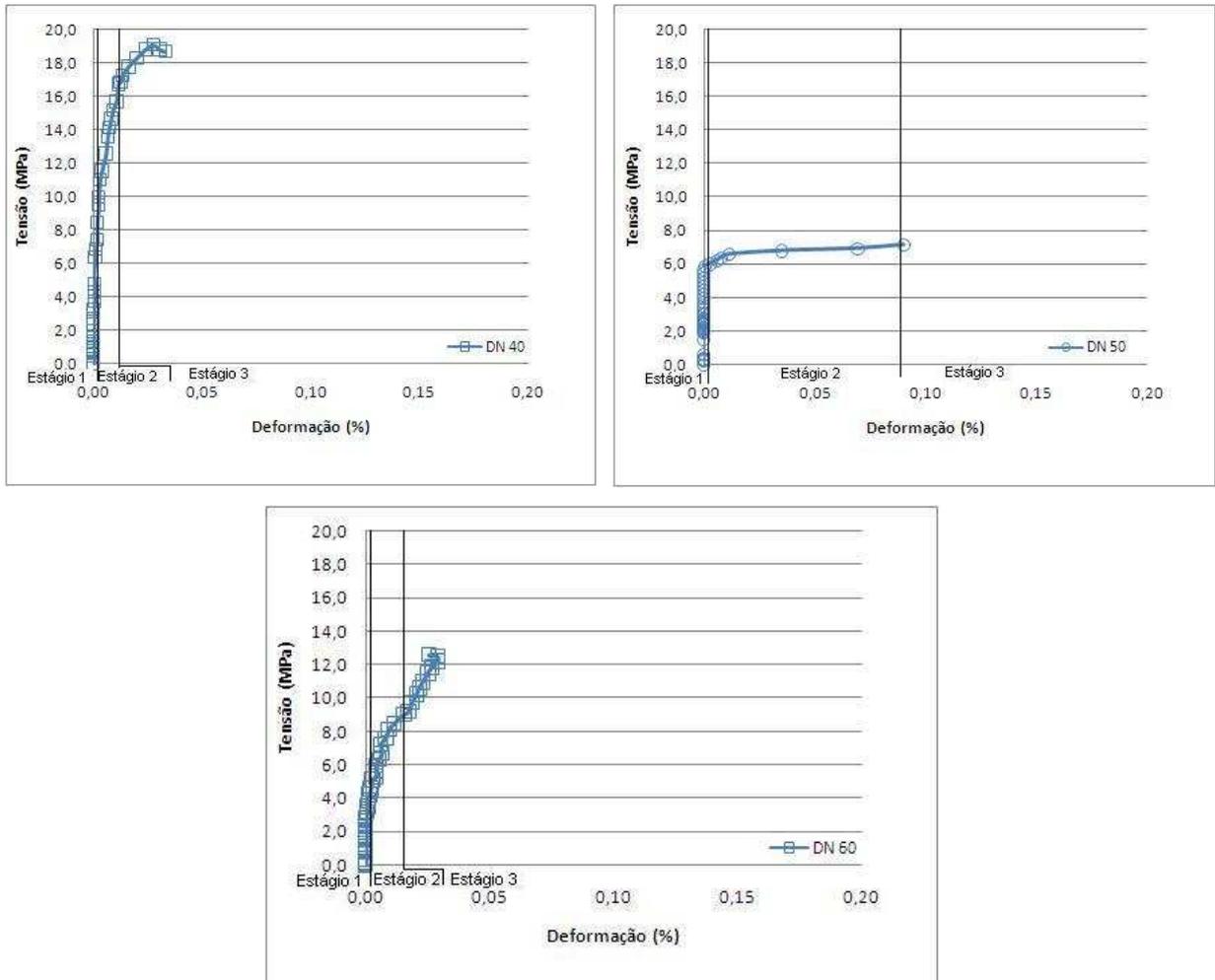


Figura 4.12 - Curvas tensão versus deformação horizontal para corpos-de-prova queimados a 900°C.

Comparando-se as curvas das Figuras 4.11 e 4.12 nota-se que os corpos-de-prova queimados a 900°C encerram seu primeiro estágio com o dobro da tensão necessária para concluir o primeiro estágio de amostras queimadas a 700°C. O ângulo de inclinação do trecho linear das curvas para corpos-de-prova com temperatura de queima de 900°C é maior que nos queimados a 700°C, sinalizando o aumento de rigidez trazido pelo ganho de cristalinidade no material com transformação da metacaulinita para espinélio.

A Figura 4.13 mostra a forma característica da ruptura dos corpos-de-prova, a superfície concoidal apresentada, e como descrito por Zanotto (1991), esta é a forma de ruptura mais comumente apresenta por materiais cerâmicos vermelhos.



Figura 4.13 - Ruptura de corpo-de-prova com diâmetro nominal de 60 mm.

O objetivo de ensaiar os corpos-de-prova cilíndricos a compressão simples foi a determinação das propriedades do comportamento mecânico do material, foram determinados os módulos de elasticidade tangente e secante, o coeficiente de Poisson e a tensão de ruptura.

Os módulos de elasticidade foram obtidos do trecho da curva tensão-deformação vertical assumido neste trabalho como elástico. O coeficiente de Poisson também foi obtido do trecho assumido como elástico, utilizando o mesmo valor da deformação vertical usado para o cálculo do módulo de elasticidade, e o valor da deformação horizontal relativo à tensão da respectiva deformação vertical. As Tabelas 4.17 e 4.18 mostram as propriedades mecânicas dos materiais ensaiados.

Tabela 4.17 - Propriedades mecânicas para amostras queimadas a 700°C.

Diâmetros Nominais (mm)	Tensão de Ruptura (MPa)	E (tan) (MPa)	E (sec) (MPa)	Coeficiente Poisson -	Deformação Máxima (%)	Deslocamento Máximo (mm)
30	21,28	4504,10	3785,70	-	0,29	0,16
40	14,14	4287,69	3741,91	0,20	0,32	0,24
50	6,55	2332,13	1950,55	0,22	0,25	0,22
60	6,31	2009,96	1883,39	0,27	0,29	0,27

Os dados da Tabela 4.17 mostram deformações máximas com valores próximos, o valor do módulo de elasticidade cresce de forma proporcionalmente inversa ao diâmetro dos corpos-de-prova, indicando que amostras menores são mais rígidas. A maior rigidez de amostras com diâmetro menor é provavelmente resultados dos defeitos provocados pelo tratamento térmico, que se propagaram em maior grau nos corpos-de-prova de maior diâmetro.

Tabela 4.18 - Propriedades mecânicas para amostras cozidas a 900°C.

Diâmetros Nominais (mm)	Tensão de Ruptura (MPa)	E (tan) (MPa)	E (sec) (MPa)	Coefficiente Poisson -	Deformação Máxima (%)	Deslocamento Máximo (mm)
30	30,42	5536,11	5319,67	-	0,47	0,31
40	23,72	5370,55	5139,60	0,12	0,40	0,28
50	10,85	2538,50	2248,15	0,20	0,22	0,31
60	10,92	3755,13	3651,37	0,24	0,30	0,31

As relações entre os valores da tabela 4.17 e 4.18 são mostradas a seguir. A Figura 4.14 ilustra a variação da resistência última a compressão simples dos corpos-de-prova com temperatura de queima de 700°C e 900°C.

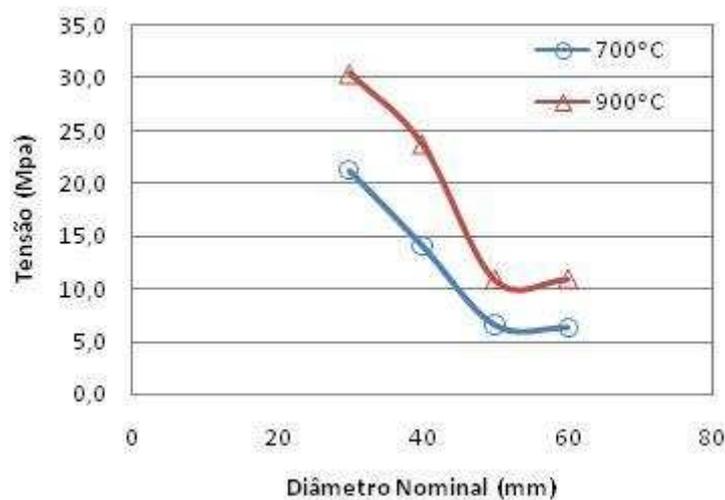


Figura 4.14 - Variação da resistência compressão simples dos lotes das amostras.

A Figura 4.14 mostra a tendência não-linear, com forte aumento do valor da resistência para diâmetros inferiores a 50 mm, após o qual a variação entre as resistências tende a se tornar assintótica. Esse efeito é resultado de uma menor porosidade aparente de amostras com diâmetros menores, e aos defeitos advindos

do processo de tratamento térmico, que se mostraram mais acentuados nos corpos-de-prova de diâmetros maiores.

O comportamento da curva da Figura 4.14, que mostra que após o diâmetro de 50 mm a resistência a compressão tende um valor constante, indica que este diâmetro é adequado para representar o comportamento do material cerâmico tanto para a temperatura de queima de 700°C quanto para a de 900°C. Contudo, para confirmar essa tendência, torna-se aconselhável a realização de ensaios em corpos-de-prova com outros diâmetros superiores ao de 60 mm.

A Figura 4.14 mostra ainda que o aumento da resistência a compressão é diretamente proporcional ao da temperatura de queima, revelando os benefícios de um melhor tratamento térmico. O aumento da temperatura de queima foi responsável pela densificação do material, fato evidenciado pelo aumento da massa específica aparente. A mudança da temperatura de 700°C para 900°C foi suficiente para promover aos corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm um aumento na resistência a compressão de aproximadamente 65%.

A Figura 4.15 mostra o comportamento dos módulos de elasticidade tangente (E) como variável dependente dos diâmetros e temperatura de queima das amostras.

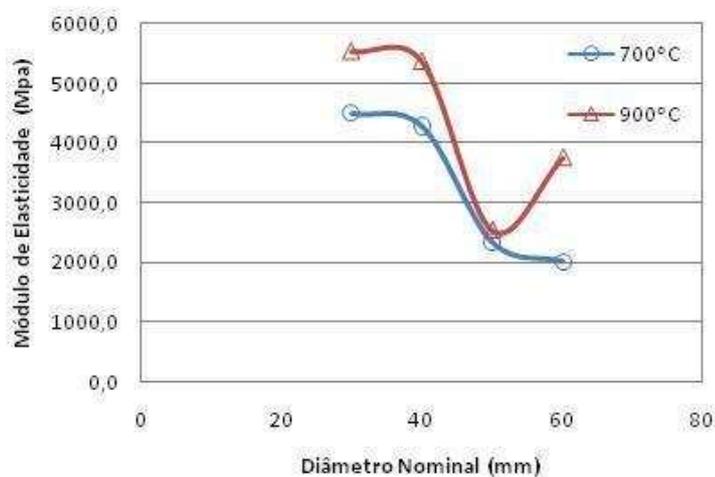


Figura 4.15 - Variação do módulo de elasticidade tang. (E) dos lotes das amostras.

A Figura 4.15 mostra que o valor de  $E$  sofre variação em função da temperatura de queima e das dimensões dos corpos-de-prova. Os corpos-de-prova com diâmetros menores apresentam comportamento mais rígido, a rigidez aumenta também com a temperatura de queima.

O aumento da rigidez dos corpos-de-prova com a temperatura de queima está associado às modificações da estrutura cristalina do material ocorridas na passagem do mineral amorfo metacaulinita para cristais de espinélio, aumentando a cristalinidade do material e melhorando suas características mecânicas.

O comportamento das curvas para os corpos-de-prova de ambas as temperaturas é semelhante, exceto a amostra de 60 mm queimada a 900°C que se afastou um pouco da tendência que vinha sendo definida pelas demais. Todavia a Figura 4.15 apresenta novamente os corpos-de-prova com diâmetro de 50 mm como mais adequados para representar o material, devido ao fato de não superestimar as propriedades mecânicas do material, e amostras superiores apresentarem valores muito próximos para estas propriedades.

Os valores dos módulos de elasticidade são compatíveis com os encontrados por Garcia (2000) em ensaios com meio blocos estruturais cerâmicos sem graute, o valor de médio encontrado por esta autora para o bloco cerâmico por ela estudado foi de 4086 MPa.

Na Figura 4.16 é descrito graficamente o comportamento do coeficiente de Poisson.

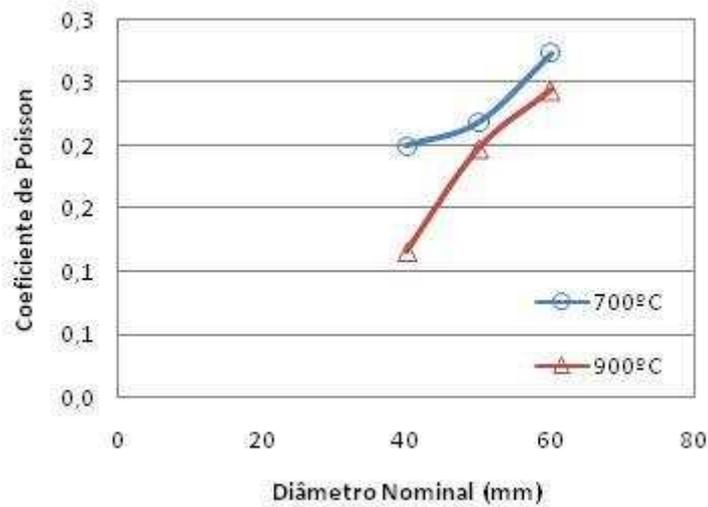


Figura 4.16 - Variação do coeficiente de Poisson dos lotes de corpos-de-prova.

Pode-se observar pela Figura 4.16 que o valor do coeficiente de Poisson cresce com o diâmetro do corpo-de-prova e com o aumento da temperatura de queima, esse aumento de rigidez aparece nas curvas tensão-deformação relativas tanto as deformações verticais quanto horizontais, e podem ser associadas a alterações da estrutura dos minerais durante o tratamento térmico.

A variação de valores para o coeficiente de Poisson para corpos-de-prova com mesma temperatura de queima é muito semelhante à forma como varia a porosidade das amostras, e, portanto, deve-se tanto a porosidade quanto aos defeitos advindos dos processos de secagem e queima.

Os resultados obtidos para resistência a compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson apontam as dimensões de 50x100 mm como as mais adequadas à confecção dos corpos-de-prova cilíndricos em cerâmica vermelha, de forma que estas são as dimensões recomendadas por esse trabalho.

#### 4.4 Blocos cerâmicos estruturais

Os blocos cerâmicos são as unidades básicas da alvenaria estrutural, e o produto final da indústria ceramista ao qual se pretende agregar valor. São

responsáveis pela resistência à compressão nos painéis de parede, e suas dimensões são de suma importância no processo de modulação das edificações. Assim sendo, foram realizados ensaios para caracterização das propriedades das unidades e ensaios de compressão simples para análise de seu comportamento mecânico.

Foram verificadas as dimensões dos blocos, nos pontos mostrados na Figura 4.17, as médias do resultado desse procedimento são apresentadas nas Tabelas 4.19 e 4.20, os resultados de para as amostras encontram-se no Apêndice B.

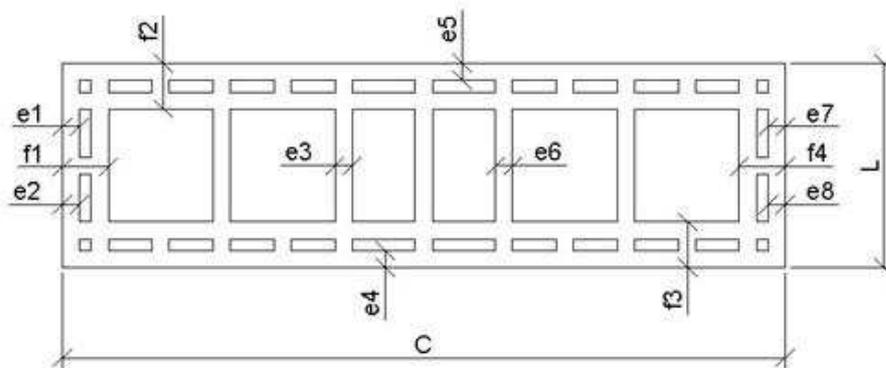


Figura 4.17 - Dimensões em planta do bloco estrutural.

Tabela 4.19 - Dimensões (mm) dos blocos cerâmicos queimados a 700 °C.

13 Blocos	L	H	C	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	f1	f2	f3	f4
Média	117,4	185,5	401,5	9,5	7,6	9,4	11,6	13,3	9,2	7,6	9,5	26,1	26,8	26,0	25,7
Desv. Padrão	0,9	2,6	2,4	0,6	0,4	0,5	1,7	1,3	0,7	0,5	0,8	0,7	1,3	1,3	0,6
Coef. Variação (%)	0,7	1,4	0,6	6,1	5,7	5,8	14,4	9,6	8,0	7,1	8,0	2,7	4,7	4,9	2,2

A Tabela 4.19 mostra as dimensões tomadas para blocos estruturais cerâmicos com temperatura de queima de 700°C, as medidas se encontram apresentadas em milímetros, e pode-se observar que as variações encontram-se dentro do limite recomendado pela norma, possibilitando que o lote pode ser aceito.

A dimensão cuja variação foi mais significativa foi a espessura dos septos, onde se apresentou também o maior número de defeitos, que puderam ser identificados visualmente, nas peças.

A Tabela 4.20 mostra as dimensões encontradas nos blocos com temperatura de queima de 900°C, que também apresentam um desvio padrão abaixo dos limites estabelecidos pela NBR 15270-2 (2005), mostrando que as retrações causadas pela queima provocam variações dimensionais aceitáveis nos blocos, garantindo a aceitação deste lote.

Tabela 4.20 - Dimensões (mm) dos blocos cerâmicos queimados a 900°C.

13 Blocos	L	H	C	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	f1	f2	f3	f4
Média	115,2	183,7	394,2	9,1	7,4	9,2	12,4	12,2	9,2	7,3	9,6	25,8	25,6	25,1	25,2
Desv. Padrão	1,0	2,4	2,0	0,6	0,5	0,6	1,7	1,6	0,7	0,5	0,6	0,7	2,4	1,8	1,3
Coef. Variação (%)	0,9	1,3	0,5	6,3	6,6	6,4	13,6	13,3	7,9	6,4	6,6	2,7	9,2	7,2	5,0

#### 4.4.1 Índice de absorção de água (AA)

Uma propriedade importante que foi determinada para caracterização de blocos é o índice de absorção de água, que pode representar uma característica indicativa da durabilidade do bloco. A Tabela 4.21 apresenta os valores obtidos dos ensaios realizados com os blocos recebidos. A NBR 15270-2 (2005) fixa como limites para absorção de água os valores: mínimo de 8% e máximo de 22%. A média dos blocos ensaiados possui o valor de 26,6%, mostrando que neste quesito os blocos ainda não atendem ao recomendado pela NBR 15270-2 (2005).

Tabela 4.21 - Massa do bloco e índice de absorção de água.

Blocos	massa aparente (g)	massa seca (g)	massa úmida (g)	AA (%)
Média	5519,923	5411,154	6860,909	26,559
Desv Padrão	91,955	89,026	99,620	0,609

A Tabela 4.21 mostra a massa aparente, massa seca e massa úmida dos blocos. A primeira é caracterizada pela massa determinada por pesagem com a amostra da forma com que é recebida da olaria (umidade ambiente), a segunda é determinada após a secagem em estufa, e a última, após as amostras ficarem submersas por período superior a 48 horas.

#### **4.4.2 Resistência à compressão simples de blocos**

Os ensaios à compressão simples de blocos além de fornecerem a resistência última do bloco, têm sido utilizados pelas indústrias ceramistas como indicativo da qualidade de produção, caracterizando os primeiros passos a caminho da certificação dos artefatos produzidos. As empresas que fazem parte do Sindicato da Indústria Cerâmica para a Construção de Campos/RJ separam lotes de suas fornadas e enviam para o laboratório de Cerâmica do campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) no município de Campos dos Goytacazes/RJ para realização desses ensaios.

Os blocos utilizados nessa pesquisa, como mencionado anteriormente, possuem dimensões nominais de 400x190x115 mm (comprimento, altura e espessura, respectivamente) com furos na vertical. A Figura 4.18 mostra a forma geométrica do bloco que é comercializado no município. Muitas construtoras não utilizam todo o potencial desse material, a maioria o emprega ou para construção de edificações de dois pavimentos, ou para alvenaria de fachada de prédios.

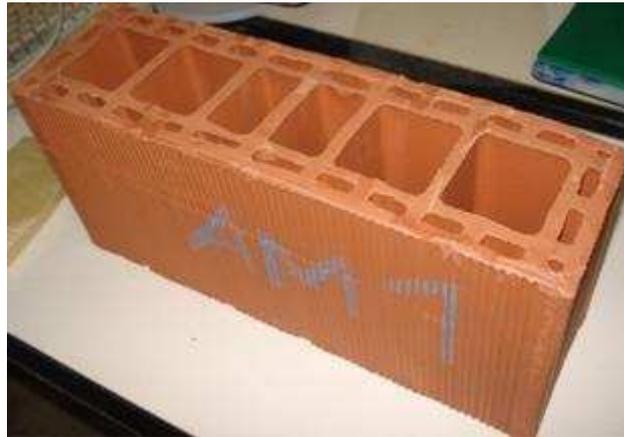


Figura 4.18 - Forma geométrica dos blocos ensaiados.

Durante o programa experimental foram ensaiados 26 blocos divididos em dois grupos com temperatura de queima diferentes, o primeiro 700°C e o segundo 900°C. A Figura 4.19 mostra um bloco pronto para ser ensaiado. A tela de proteção mostrada é devida à ruptura frágil do material, que culmina com o lançamento de fragmentos.



Figura 4.19 - Bloco pronto para ensaio a compressão simples.

As resistências individuais dos blocos são mostradas no Apêndice B, e os valores médios dos resultados são mostrados nas Tabelas 4.22 e 4.23, que apresentam os resultados em ordem crescente de temperatura de queima. As tensões apresentadas são relativas à área bruta do bloco.

Tabela 4.22 - Dimensões, área, carga última e resistência a compressão de blocos queimados a 700°C.

Blocos (13 unidades)	Dimensões (mm)			Área (m <sup>2</sup> )	Carga Última (kN)	Tensão Última (MPa)
	comprimento	Altura	Espessura			
<b>Médias</b>	<b>401,49</b>	<b>185,52</b>	<b>117,43</b>	<b>0,05</b>	<b>174,88</b>	<b>3,71</b>
<b>Desv. Padrão</b>	2,50	2,68	0,89	0,00	25,09	0,54

Tabela 4.23 - Dimensões, área, carga última e resistência a compressão de blocos queimados a 900°C.

Blocos (13 unidades)	Dimensões (mm)			Área (m <sup>2</sup> )	Carga Última (kN)	Tensão Última (MPa)
	comprimento	Altura	Espessura			
<b>Médias</b>	<b>394,18</b>	<b>183,68</b>	<b>115,15</b>	<b>0,05</b>	<b>226,53</b>	<b>4,99</b>
<b>Desv. Padrão</b>	2,12	2,45	1,05	0,00	54,87	1,21

A NBR 15270-2 (2005) estabelece como valor mínimo para resistência característica a compressão ( $f_{bk}$ ) o valor de 3 MPa, observando as médias das amostras tanto para a temperatura de queima de 700°C como de 900°C são superiores a esse valor. Contudo, o critério adotado pela norma não é a média, mas resistência característica à compressão ( $f_{bk}$ ) que calculada conforme o critério da norma descrito no Capítulo 3, resulta nos valores de 2,5 e 3,5 MPa para as temperaturas de queima de 700°C e 900°C respectivamente.

Os blocos com temperatura de queima de 700°C, que são hoje os encontrados no mercado campista, não atendem a resistência mínima estabelecida pela norma para serem classificados como estruturais. Se o tratamento térmico for alterado a planta de produção de forma a se alterar a temperatura em 200°C para atingir o patamar de queima de 900°C o acréscimo na resistência à compressão será de 40%, e o produto passará a atender confortavelmente os requisitos da norma.

A Figura 4.20 mostra um bloco após a ruptura. As fissuras iniciam-se geralmente na parte central do bloco em suas paredes laterais, culminando na separação deste ao meio. Os septos e as paredes perimetrais tendem a sofrer flambagem, provocando concentração de tensões nos cantos.



Figura 4.20 - Bloco em rompido à compressão simples.

#### 4.4.3 Resistência a compressão de prismas

Foram ensaiados à compressão simples, quatro prismas compostos por dois blocos, para cada temperatura de queima, seus resultados, em relação à área bruta do bloco, são expressos no Apêndice C, e as médias nas Tabelas 4.24 e 4.25. A Figura 4.21 mostra os prismas confeccionados com 28 dias de período de cura.

Tabela 4.24 - Resistência a compressão de prismas queimados a 700°C.

Identificação	Carga Última (kN)	Tensão Última (MPa)
<b>Médias</b>	<b>95,92</b>	<b>2,03</b>
<b>Desv. Padrão</b>	11,50	0,24

Tabela 4.25 - Resistência a compressão de prismas queimados a 900°C.

Identificação	Carga Última (kN)	Tensão Última (MPa)
<b>Médias</b>	<b>63,48</b>	<b>1,40</b>
<b>Desv. Padrão</b>	18,99	0,42



Figura 4.21 - Prismas de dois blocos.

A ruptura dos prismas se deu por processo semelhante ao de ruptura do bloco. As correlações entre as resistências dos prismas e blocos podem ser vistas na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 - Eficiência e correlações entre resistências.

	Temp. Queima	Valor (MPa)
$f_{bm}$	700	3,71
$f_{pm}$	700	2,03
$f_p/f_b$	700	0,55
$f_{bm}$	900	4,99
$f_{pm}$	900	1,40
$f_p/f_b$	900	0,28

Segundo Camacho (2003) mantendo-se a mesma resistência da argamassa ocorre uma perda de eficiência na medida em que se aumenta a resistência a compressão dos blocos. Quando a resistência da argamassa é consideravelmente inferior a do bloco o mecanismo de ruptura é alterado, e o mecanismo de falha ocorre primeiramente na argamassa por tração, daí é transmitido ao bloco que então sofre ruptura por tração ao invés da compressão, reduzindo sua capacidade resistente.

Neste trabalho foi utilizado o mesmo traço de argamassa para a confecção de prismas com blocos queimados a 700°C e 900°C. Como a resistência da argamassa era inferior a do bloco queimado a 900°C o mecanismo de ruptura se deu inicialmente na argamassa transferindo tensões de tração para o bloco e reduzindo a capacidade resistente do prisma, de forma tal, que a capacidade resistente do prisma com blocos com temperatura de queima de 900°C foi menor que os queimados a 700°C.

A argamassa de assentamento utilizada para confecção dos prismas teve o seguinte traço: 1:1:10 em massa, com 26,5 mm de abatimento determinados no ensaio de consistência padrão. Foram moldados 18 corpos-de-prova com as dimensões de 5x10 cm, sendo diâmetro e altura respectivamente, a Figura 4.22 mostra os corpos-de-prova após a ruptura, formam-se fissuras verticais iniciadas na parte superior da amostra e se prolongam até causas a ruptura. A Tabela 4.27 mostra as resistências para as diferentes idades.



Figura 4.22 - Corpos-de-prova de argamassa

Tabela 4.27 - Resistência a compressão de corpos-de-prova de argamassa

6 Corpos-de-prova para cada idade	Resistência a compressão (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
Média	1,092	1,787	2,844
Desvio Padrão	0,237	0,281	0,256

O traço da argamassa foi escolhido de forma que sua resistência final fosse um pouco menor que a do bloco cerâmico, Garcia (2000) recomenda 80% da resistência do bloco. A Figura 4.23 mostra o crescimento da resistência da argamassa com o tempo.

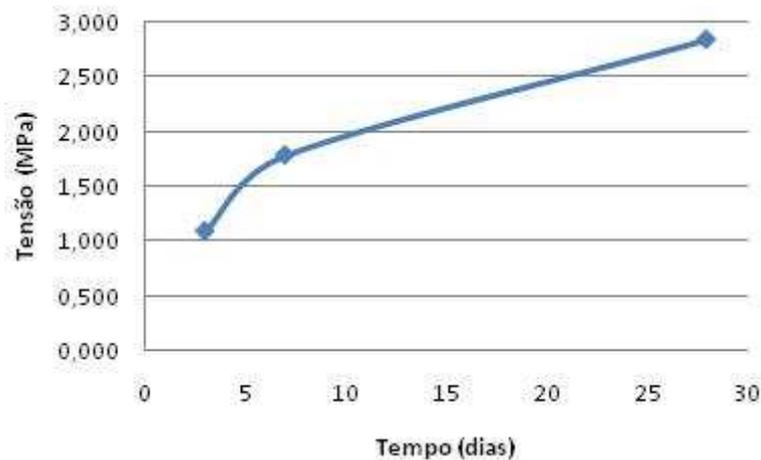


Figura 4.23 - Resistência de corpos-de-prova de argamassa

Os resultados dos ensaios em corpos-de-prova em argamassa mostram que sua resistência à compressão tem valor aproximado de 80% da resistência a compressão do bloco queimado a 700°C, contudo possui uma porcentagem bem menor da resistência a compressão em relação aos blocos queimados a 900°C, provocando a redução da eficiência nos prismas.

#### 4.5 Paredes de blocos cerâmicos estruturais

Foram construídas quatro paredes com a dimensões de 1,20 x 2,60 x 0,115 m (largura, altura e espessura, respectivamente), conforme recomendado pela NBR 8949. Foram fixados três transdutores de deslocamento nos painéis: um em cada lado medindo o deslocamento vertical, e um no terço médio superior medindo a flambagem. Para sua construção foram utilizados blocos com temperatura de queima de 700°C, não foram construídas paredes com blocos queimados a 900°C por falta de tempo para efetuar a queima do número de blocos necessários. A Figura 4.24 mostra um painel sendo preparado para ensaio.



Figura 4.24 - Bloco em início de ensaio a compressão simples.

A Tabela 4.28 mostra os resultados obtidos dos ensaios de compressão simples, os deslocamentos verticais exibidos representam valores médios, mais detalhes são mostrados no Apêndice D. Percebe-se que o deslocamento vertical médio encontrado foi de 2,16 mm, Silva (2005) encontrou um deslocamento de 2,8 mm para sua parede, enquanto Garcia (2000) encontrou deslocamentos da ordem de 3,0 mm.

Tabela 4.28 - Carga última e resistência a compressão de paredes

Ident.	Área (m <sup>2</sup> )	Carga Última (kN)	Tensão Última (MPa)	deslc vertical (mm)	deslc horizontal (mm)
<b>Médias</b>	<b>0,1409</b>	<b>168,75</b>	<b>1,20</b>	<b>2,16</b>	<b>1,12</b>
<b>Desv. Padrão</b>	0,00	31,46	0,22	0,45	1,06

As correlações entre as resistências dos prismas, blocos e paredes podem ser vistas na Tabela 4.29. Os valores das correlações obtidos são condizentes com encontrados por Garcia (2000) e Silva (2005).

Tabela 4.29 - Eficiência para painéis, prisma e blocos queimados a 700°C

Parâmetro	Resistência (MPa)
$f_{bm}$	3,71
$f_{pm}$	2,03
$f_{pam}$	1,20
$f_p/f_b$	0,55
$f_{pa}/f_b$	0,32
$f_{pa}/f_p$	0,59

A ruptura ocorreu sempre no terço médio superior do painel. No mecanismo de ruptura, inicialmente, forma-se uma trinca vertical central na parte superior da alvenaria e se prolonga até sua base, a seguir forma-se uma trinca horizontal na altura do terço médio superior do painel que separa as fiadas assentes, os blocos presentes nessa fiada tem suas faces laterais arruinadas com frequência. A Figura 4.25 mostra um painel depois de rompido, as fissuras foram realçadas por linhas para mostrar a direção de propagação da trinca.



Figura 4.25 - Parede fissurada.

As Figuras 4.26 e 4.27 mostram curvas de carga versus deslocamento vertical e perpendicular ao plano da parede.

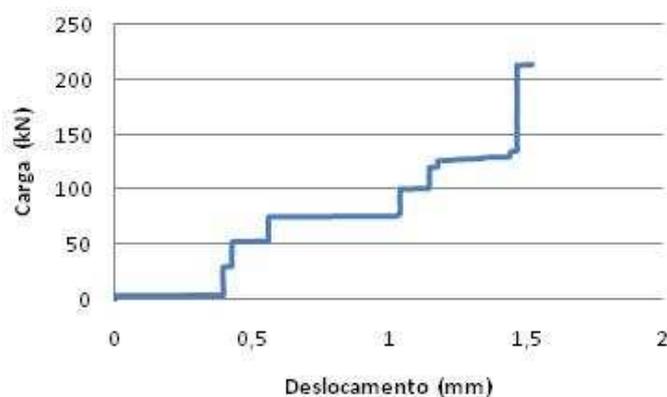


Figura 4.26 - Deslocamento vertical médio

Na Figura 4.26 nota-se que na primeira parte da curva, compreendida entre 0,0 e 0,5 mm de deslocamento, sem que seja acrescentado carregamento ocorre uma acomodação do capeamento da parede produzindo esse deslocamento de 0,5 mm.

Nas partes posteriores da curva ocorrem acréscimos de deslocamentos sucedidos de períodos com carregamento constante, mas mesmo nestes períodos nota-se a ocorrência de deslocamentos, que são resultados da fissuração do painel.

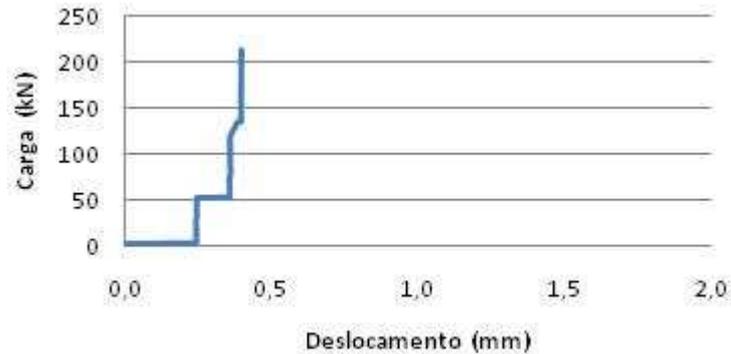


Figura 4.27 - Deslocamento perpendicular (flambagem).

Para cada parede construída foram moldados seis corpos-de-prova de argamassa, os valores médios de suas resistências a compressão simples encontram-se na Tabela 4.30, e os valores individuais no apêndice D. O traço utilizado foi 1:1:6 (cimento, cal e areia).

Tabela 4.30 - Carga última e resistência à compressão corpos-de-prova de argamassa.

Identificação	Carga Última (kN)	Tensão Última (MPa)
<b>Médias</b>	<b>15,23</b>	<b>7,76</b>
<b>Desv. Padrão</b>	1,10	0,56

O módulo de elasticidade tangente encontrado para argamassa foi de 6.192,63 MPa, e o secante foi de 5.524,26 MPa. A Figura 4.28 mostra o comportamento de uma curva tensão-deformação da argamassa.

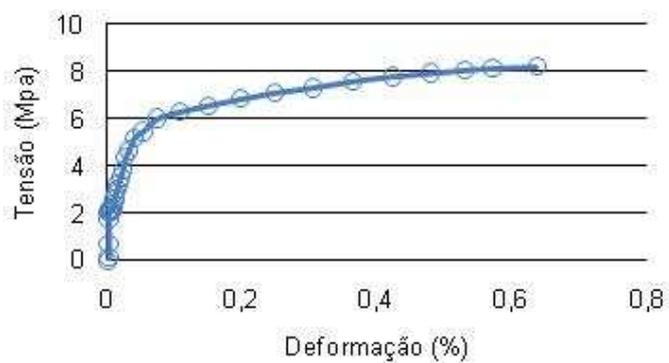


Figura 4.28 - Curva tensão-deformação da argamassa.

## **CAPÍTULO 5 -      MODELAGEM NUMÉRICA**

### **5.1    Introdução**

A modelagem estrutural é uma ferramenta de grande valia para engenheiros e pesquisadores que, através de sua aplicação, pode-se compreender mais profundamente o comportamento mecânico, a forma como se distribuem os esforços e os prováveis mecanismos causadores de ruína. A capacidade de prever a resistência última de um material permite um melhor aproveitamento de suas propriedades sem provocar riscos à segurança.

Basicamente, podem-se classificar as técnicas de modelagem em duas: analítica e numérica. A primeira se caracteriza pela análise de tensões baseada na metodologia da mecânica dos sólidos, (teoria da elasticidade e/ou plasticidade) partindo de uma distribuição de tensões previamente adotada, podendo gerar imprecisão, e para alguns casos não fornece solução.

A metodologia numérica se baseia na discretização do meio contínuo. Trata-se de procedimentos aproximados que toleram uma determinada dispersão cuja ordem de grandeza é estabelecida pelo usuário. Para estruturas complexas a utilização dos métodos numéricos se torna quase obrigatória, e os principais são: elementos finitos, elementos de contorno e método das diferenças finitas.

O avanço da tecnologia, principalmente no que tange ao desenvolvimento de softwares, gera um campo de aplicação para os métodos numéricos fornecendo

uma poderosa ferramenta de análise comportamental da estrutura aos engenheiros e pesquisadores.

Os métodos numéricos podem ser empregados tanto para balizar os resultados de ensaios, como para evitar a necessidade de ensaios para se prever o comportamento de determinado material. Seguindo este caminho, neste capítulo foram realizadas modelagens com elementos finitos dos corpos-de-prova cilíndricos, dos blocos, prismas e paredes, utilizando o software ANSYS 10.0. Dando os primeiros passos para trilhar o caminho que objetiva a modelagem e dimensionamento de elementos portantes em alvenaria estrutural com dados relativos às propriedades mecânicas dos materiais comercializados pela indústria da construção civil de Campos dos Goytacazes/RJ.

## **5.1 Modelagem dos corpos-de-prova cilíndricos**

O objetivo da modelagem dos corpos-de-prova cilíndricos de cerâmica vermelha é determinar se a utilização dos valores das propriedades determinadas nos ensaios para modelar as amostras, aproxima-se do real.

Para simular os ensaios de compressão foi realizada uma modelagem em três dimensões utilizando o elemento solid 92 do software ANSYS versão 10.0, com todos os graus de liberdade da base do modelo restringidos. O elemento solid 92 possui dez nós e três graus de liberdade em cada nó. O elemento pode ser aplicado ao modelo através de malha quadrada ou tetraédrica, neste trabalho se optou pela malha tetraédrica pela forma cilíndrica da amostra. A Figura 5.1 mostra o elemento solid 92.

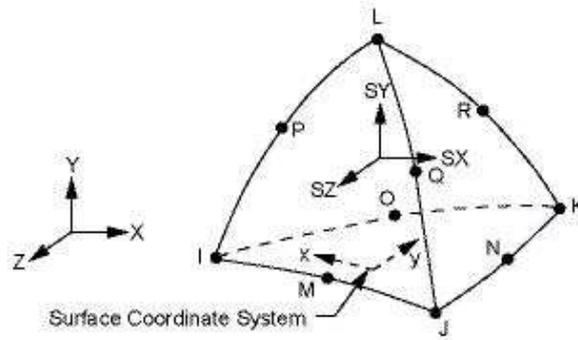


Figura 5.1 - Elemento SOLID 92, fonte: help ANSYS, versão 10.0.

Pelo fato de não se ter determinado o coeficiente de Poisson em amostras com diâmetros de 30 mm, foram modeladas apenas as amostras com diâmetros de 40, 50 e 60 mm. A Figura 5.2 mostra os corpos-de-prova modelados.

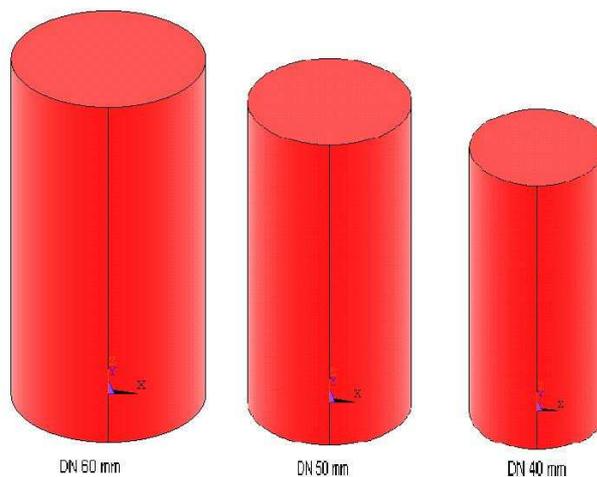


Figura 5.2 - Corpos-de-prova cilíndricos de cerâmica vermelha modelados em elementos finitos.

Para cada corpo-de-prova foram realizadas modelagens utilizando o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson de cada amostra para identificar a que melhor reproduza os deslocamentos finais obtidos pelo ensaio de compressão simples. A Tabela 5.1 mostra os dados obtidos dos ensaios utilizados na modelagem.

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas utilizadas na modelagem dos blocos.

Diâmetro (mm)	Temp. de Queima (°C)	E (MPa)	$\nu$ (Coef. Poisson)	$\sigma$ (rup.) (MPa)	Deslocamento (mm)
40	700	4.287,69	0,20	14,14	0,24
50	700	2.332,13	0,22	6,55	0,22
60	700	2.009,96	0,27	6,31	0,27
40	900	5.370,55	0,12	23,10	0,28
50	900	2.538,50	0,20	10,85	0,31
60	900	3.755,13	0,24	10,92	0,31

Os resultados das modelagens realizadas para todos os corpos-de-prova encontram-se no Apêndice E. A Figura 5.3 mostra uma comparação entre os deslocamentos obtidos pelas modelagens dos corpos-de-prova com suas respectivas propriedades mecânicas e os deslocamentos medidos nos ensaios.

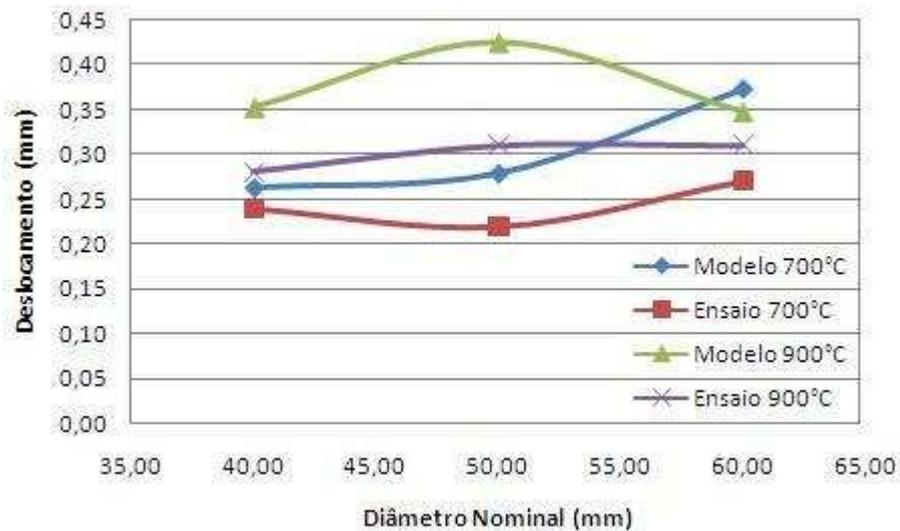


Figura 5.3 - Comparação entre deslocamentos calculados e medidos.

A Figura 5.3 mostra que para os corpos-de-prova queimados a 700°C a dispersão entre os valores dos deslocamentos obtidos pela modelagem em elementos finitos e medidos durante o ensaio tendem a crescer juntamente com o diâmetro da amostra. Para os corpos-de-prova queimados a 900°C a tendência parece ser contrária. Contudo, para ambos os casos, os corpos-de-prova com diâmetros de 50 mm apresentam boa representatividade do comportamento do material.

A Figura 5.4 mostra a distribuição de tensões no corpo-de-prova cilíndrico de cerâmica vermelha com 50 mm de diâmetro, temperatura de queima de 700°C e submetido à compressão simples, sendo que a superfície da base possui todos os graus de liberdade de todos os nós restritos.

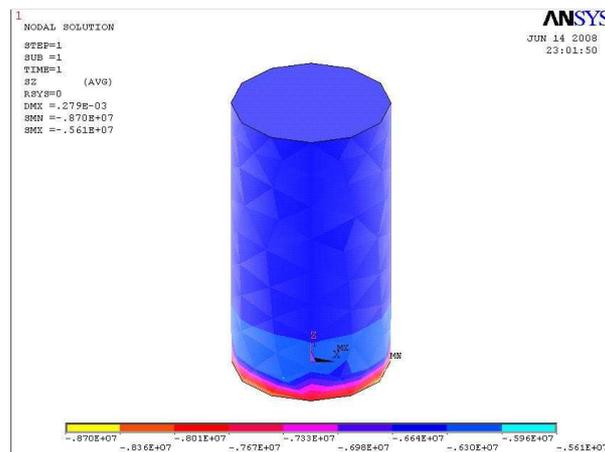


Figura 5.4 - Distribuição de tensões no corpo-de-prova com diâmetro de 50 mm e temperatura de queima de 700°C.

A Figura 5.4 mostra uma concentração de tensões próxima à base do corpo-de-prova, esse comportamento não se comprovou nos ensaios realizados, pois a ruptura das amostras ocorre geralmente no centro da amostra e por clivagem, configurando uma superfície de ruptura coincidental, como mostrado na Figura 5.5.



Figura 5.5 - Corpo-de-prova com diâmetro de 50 mm e temperatura de queima de 700°C após a ruptura à compressão simples.

Assim, o processo de modelagem sofreu alteração em seus vínculos. Os deslocamentos horizontais na face superior do corpo-de-prova foram restringidos, de forma que somente deslocamentos verticais são permitidos. A nova distribuição de tensões é apresentada na Figura 5.6.

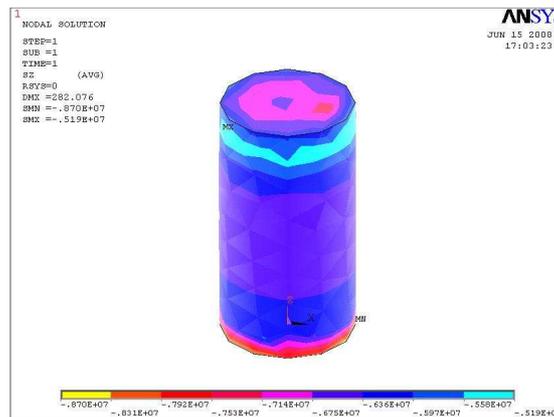


Figura 5.6 - Distribuição para segunda modelagem do corpo-de-prova com diâmetro de 50 mm e queimado a 700°C.

A nova distribuição de tensões mostrada na Figura 5.6 representa de forma mais adequada o comportamento do material durante o ensaio. A região central do corpo-de-prova possui uma faixa de acúmulo de tensão exatamente onde as amostras ensaiadas sofreram ruptura. Os deslocamentos sofridos pelo corpo-de-prova são mostrados na Figura 5.7.

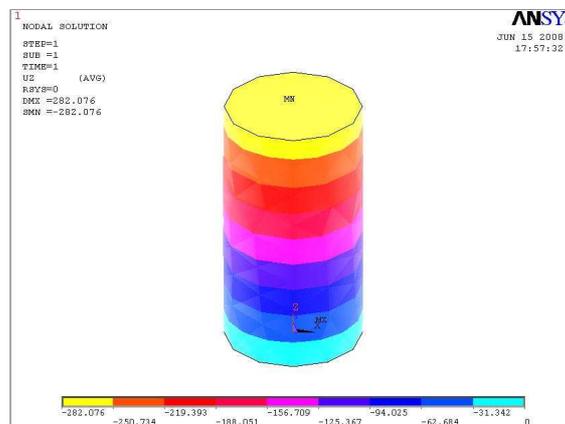


Figura 5.7 - Distribuição dos deslocamentos do corpo-de-prova com diâmetro de 50 mm e temperatura de queima de 700°C.

O deslocamento máximo apresentado foi de 0,28 mm para as duas formas de modelagem, enquanto o deslocamento medido em ensaio foi de 0,22 mm. Para todas as simulações os valores dos deslocamentos foram superiores aos medidos, mas mantiveram sempre uma relativa proximidade.

A Figura 5.8 apresenta a distribuição das tensões cisalhante no corpo-de-prova com diâmetro de 50 mm e temperatura de queima de 700°C no plano XZ.

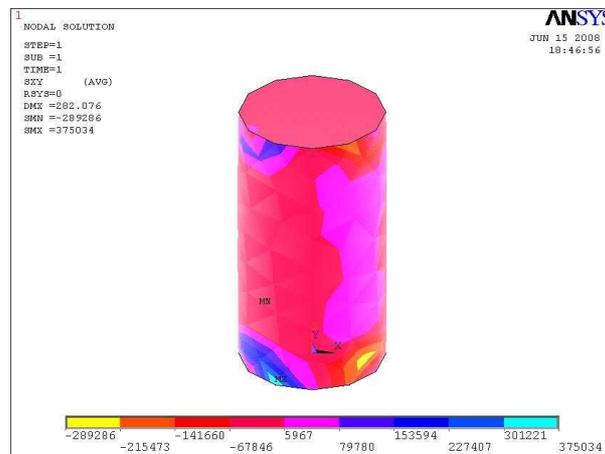


Figura 5.8 - Distribuição das tensões cisalhantes do corpo-de-prova com diâmetro de 50 mm e temperatura de queima de 700°C.

Na Figura 5.8 percebe que as regiões onde se concentram as tensões de cisalhamento são muito semelhantes às atingidas pelas fissuras na Figura 5.5, evidenciando a representatividade do modelo em relação ao comportamento real da amostra. Assim, nas simulações posteriores serão utilizados os mesmos procedimentos de modelagem, ou seja, a face inferior com todos os graus de liberdade dos nós restritos, e na face superior, para simular o atrito entre o prato da prensa e a amostra, serão restritos os deslocamentos horizontais.

## 5.2 Modelagem dos blocos

Para modelagem dos blocos serão utilizadas duas propostas: a primeira bidimensional, e a segunda tridimensional. O objetivo de modelar os blocos em duas

e três dimensões é avaliar se existe considerável perda de precisão nos resultados obtidos, a fim de validar a utilização da modelagem bidimensional no estudo das paredes.

Foram realizadas modelagens com os módulos de elasticidade de cada diâmetro de corpo-de-prova e para as temperaturas de queima de 700°C e 900°C. Os dados utilizados na modelagem encontram-se na Tabela 5.1. Os nós da base dos modelos tiveram todos os seus deslocamentos restringidos, enquanto que os do topo tiveram livres apenas seu deslocamento vertical. 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.

Foram modelados blocos cerâmicos estruturais, vazados, com furos verticais, descritos nos capítulos anteriores. Para confecção do modelo tridimensional foi utilizado o elemento solid 92 do software ANSYS, que possui 10 nós com 3 graus de liberdade em cada nó. A Figura 5.9 ilustra a forma de modelagem do bloco.

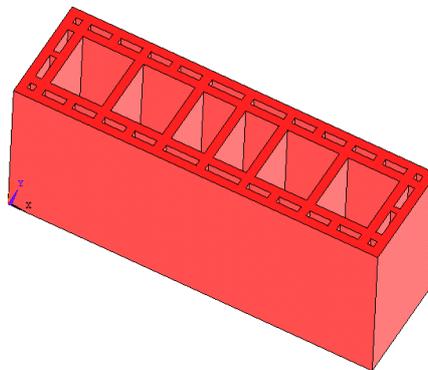


Figura 5.9 - Modelo do bloco com modelagem tridimensional no ANSYS

Para confecção do modelo bidimensional foi utilizado o elemento plane 42, que possui 4 nós e dois graus de liberdade em cada nó, este elemento permite o recurso de se configurar uma espessura para a placa, a espessura utilizada foi equivalente a de um bloco maciço cujo valor da área bruta seja igual ao valor da área líquida do bloco real.

Nas Figuras 5.10 e 5.11 pode-se fazer uma comparação da modelagem bi e tridimensional para blocos com temperatura de queima de 700°C, de forma que se conclui que os deslocamentos obtidos nas duas modelagens possuem valores muito próximos, e não há perda significativa de precisão para esta simplificação, neste caso de aplicação.

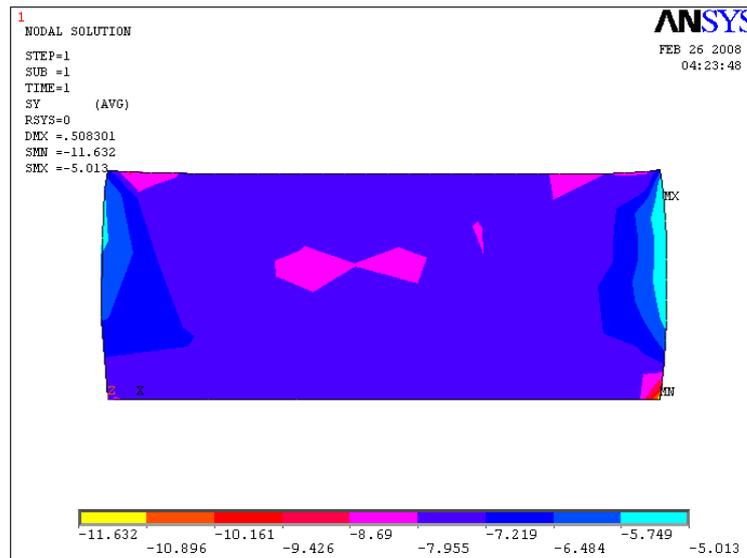


Figura 5.10 - Modelagem bidimensional da distribuição de tensões em bloco queimado a 700°C (propriedades mecânicas de amostra de Ø de 50 mm).

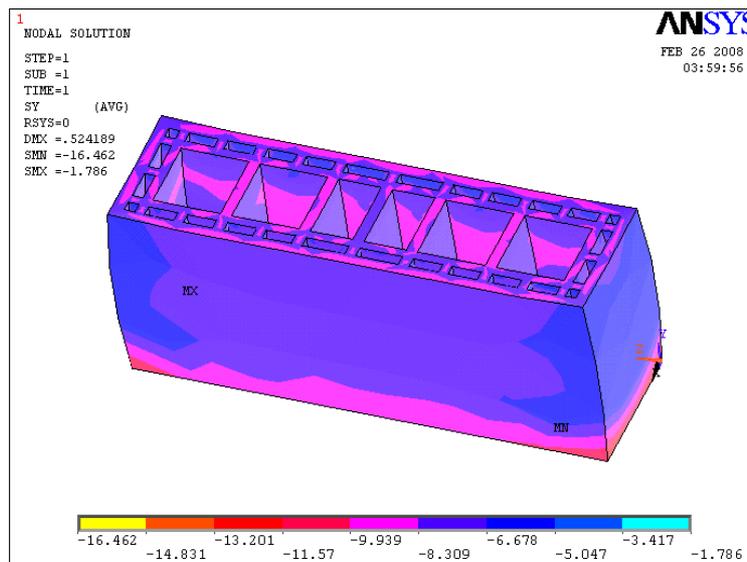


Figura 5.11 - Modelagem tridimensional da distribuição de tensões em bloco queimado a 700°C (propriedades mecânicas de amostra de Ø de 50 mm).

Comparando-se as duas modelagens percebe-se uma distribuição quase idêntica, onde as paredes laterais tendem a flambar e ocorre concentração de tensões nas arestas, exatamente nos pontos onde se detectou nos ensaios os primeiros indícios de ruína.

A Figura 5.12 mostra um bloco ensaiado à compressão simples, e é notória a semelhança dos pontos rompidos do bloco com os pontos de concentração de tensão do modelo da Figura 5.11, inclusive muitos blocos apresentaram fissuras horizontais iniciadas no centro onde se encontra acúmulo de tensão no modelo. A tendência de deformação por flambagem das paredes dos blocos faz com que ele sofra ruptura por tração, analogamente ao caso e compressão de corpos cilíndricos.



Figura 5.12 - Bloco rompido à compressão simples.

As Figuras 5.13 e 5.14 mostram a distribuição de deslocamentos para as modelagens bi e tridimensionais.

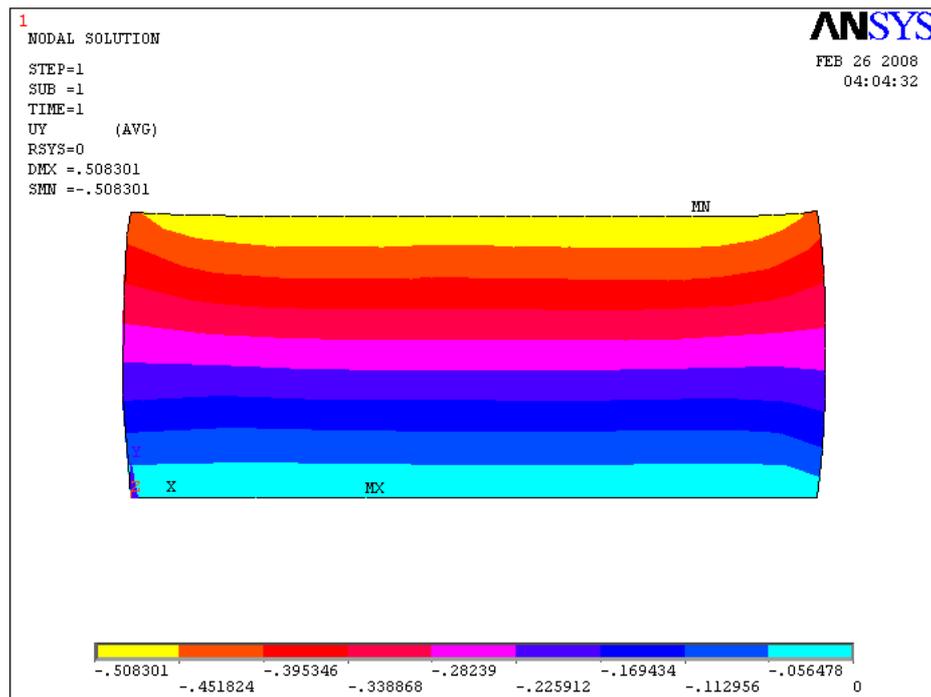


Figura 5.13 - Modelagem bidimensional da distribuição de deslocamentos em bloco queimado a 700°C (propriedades mecânicas de amostra de Ø de 60 mm).

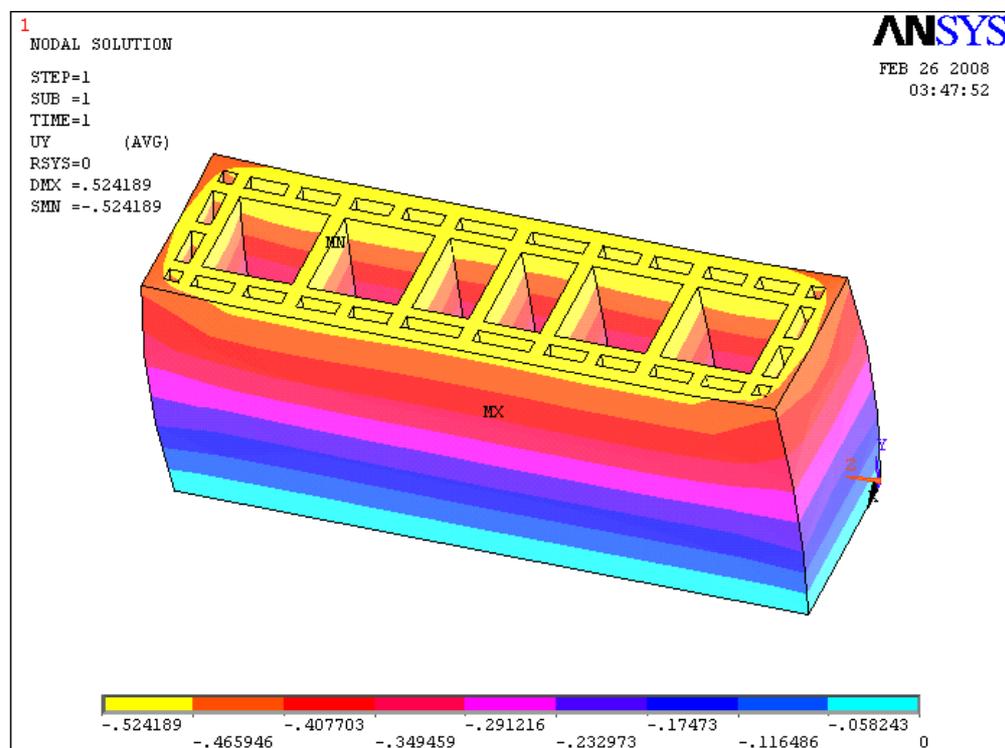


Figura 5.14 - Modelagem tridimensional da distribuição de deslocamentos em bloco queimado a 700°C (propriedades mecânicas de amostra de Ø de 60 mm).

Observa-se novamente a semelhança do comportamento nas duas modelagens, inclusive no que concerne no valor do deslocamento máximo, que para a modelagem tridimensional apresentou o valor de 0,52 mm e para a bidimensional 0,51 mm, e principalmente na forte indicação da tendência de flambagem das faces laterais.

A Figura 5.15 mostra uma comparação entre os resultados obtidos nas modelagens dos blocos utilizando as propriedades mecânicas extraídas dos ensaios realizados com corpos de prova cilíndricos de diferentes diâmetros. Para a temperatura de queima de 700°C observa-se que a simulação cujo deslocamento mais se aproximou dos deslocamentos obtidos em ensaios foi aquela que utilizou parâmetros da amostra cilíndrica com diâmetro de 50 mm. Para a temperatura de queima de 900°C foi a amostra de 60 mm que forneceu os parâmetros que mais se aproximaram dos deslocamentos medidos experimentalmente.

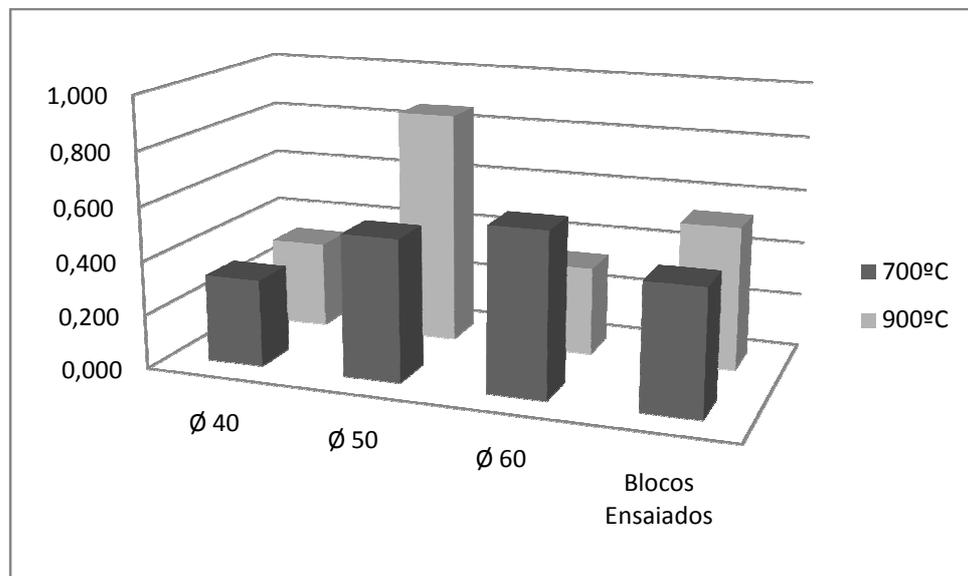


Figura 5.15 - Comparação entre deslocamento médio dos blocos ensaiados e os deslocamentos obtidos pelas modelagens.

Assim sendo, para as próximas modelagens serão utilizados apenas os parâmetros mecânicos fornecidos pelas amostras cilíndricas com diâmetro de 60 mm. Outra observação interessante é que a modelagem bidimensional se mostrou bem eficiente, apresentando variações de pequena ordem em relação a

tridimensional. Assim sendo nas modelagens que se seguem nesse trabalho serão da seguinte forma: prismas modelados de forma tridimensional, e paredes modeladas de forma bidimensional.

### 5.3 Modelagem dos prismas

Os prismas modelados são compostos por dois blocos unidos por uma camada de argamassa, e sua modelagem foi realizada de forma análoga a descrita para os blocos. A Tabela 5.2 mostra as propriedades utilizadas e a Figura 5.16 mostra um prisma representado por modelagem tridimensional. Foram restringidos todos os deslocamentos da base e os deslocamentos do plano paralelo ao topo do modelo.

Tabela 5.2 - Propriedades mecânicas utilizadas na modelagem dos prismas.

Díâmetro (mm)	Temp de Queima (°C)	E (MPa)	$\nu$ Coef. Poisson)	$\sigma$ (rup. Área liq.) (MPa)
Ø 60	700	2315,46	0,273	4,157
Ø 60	900	5715,13	0,419	2,751
Argamassa	-	7563,31	0,374	-

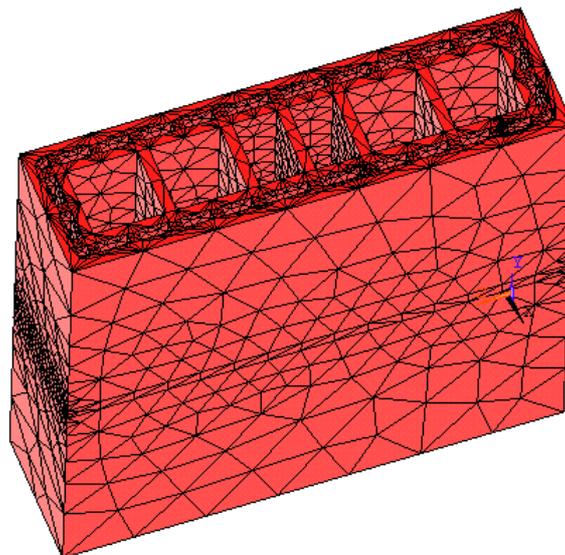


Figura 5.16 - Modelo tridimensional para o estudo comportamental do prisma.

O comportamento mediante carga do prisma queimado a 700°C é mostrado nas Figuras 5.17 e 5.18. Ocorre um acúmulo de tensão na região da junta horizontal de argamassa, e nas arestas formadas entre as paredes laterais e os septos internos. O comportamento de sua superfície superior se assemelha ao comportamento do bloco na ruptura. A Figura 5.18 mostra que os maiores deslocamentos ocorrem na parte superior da peça, com um deslocamento máximo no valor de 0,67 mm.

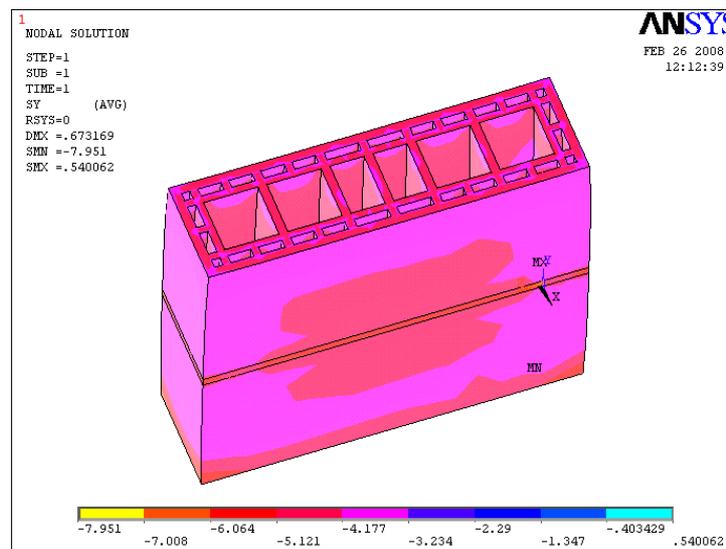


Figura 5.17 - Distribuição de tensões – 700°C.

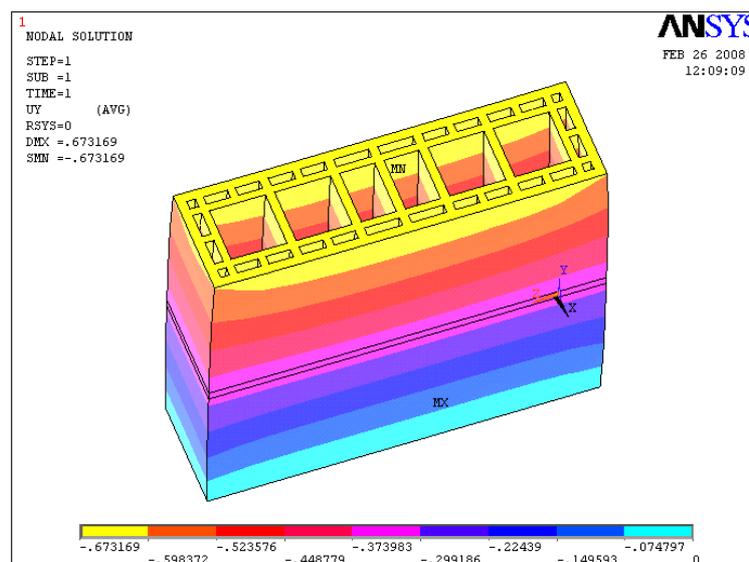


Figura 5.18 - Distribuição de deformações – 700°C.

As Figuras 5.19 e 5.20 mostram o comportamento do prisma de blocos com temperatura de queima de 900°C.

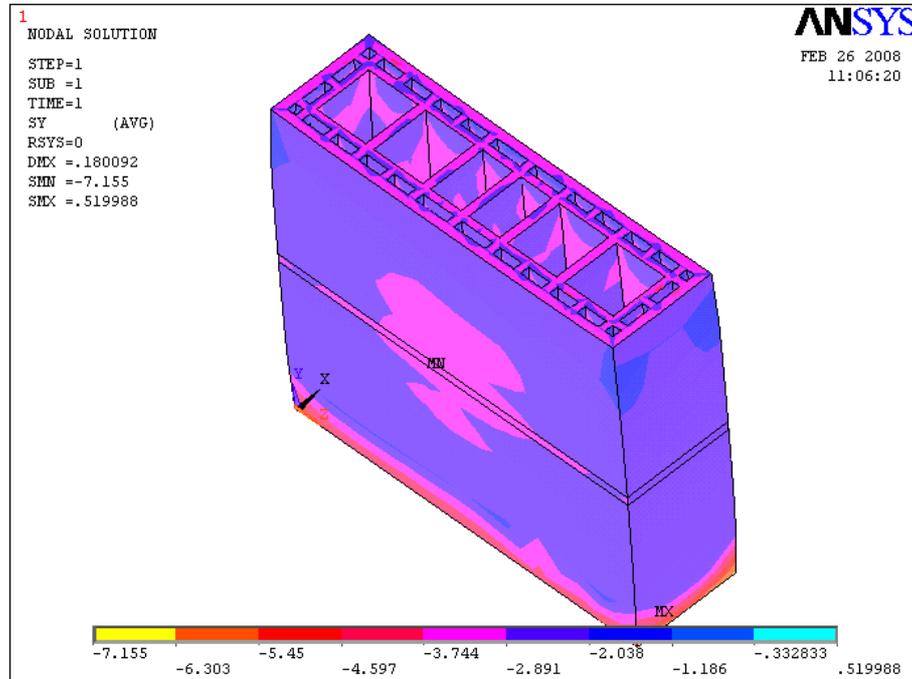


Figura 5.19 - Distribuição de tensões – 900°C.

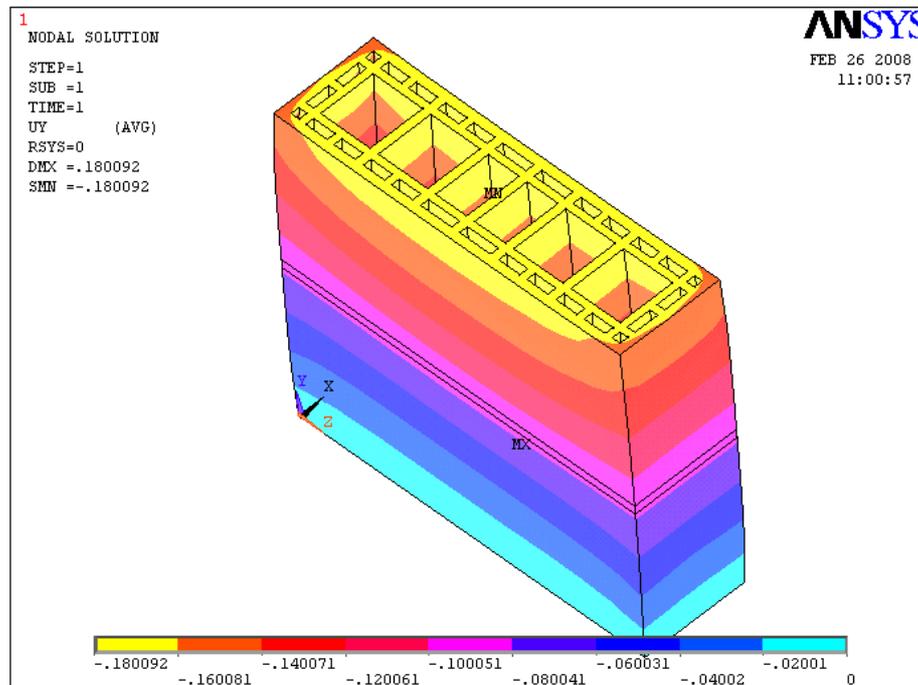


Figura 5.20 - Distribuição de deformações – 900°C.

O comportamento do prisma com blocos queimados a 900°C é análogo ao de 700°C, apresentando, porém uma gama de valores de deslocamento de ordem mais baixa.

## 5.4 Modelagem do painel de parede

O painel de parede foi construído com 1,20mx2,60mx0,115m, sendo comprimento, altura e largura respectivamente. Em seu processo de modelagem foi empregado o elemento plane 42 do ANSYS, utilizando-se também do recurso de se configurar uma espessura para esse elemento. Testes iniciais realizados sem atribuir espessura a parede apresentaram deslocamentos muito superiores aos determinados pelos experimentos, chegando à ordem de grandeza de aproximadamente seis vezes maior, sendo então descartada a modelagem sem a espessura. A Figura 5.21 mostra o painel de parede modelado com especificação de sua espessura.

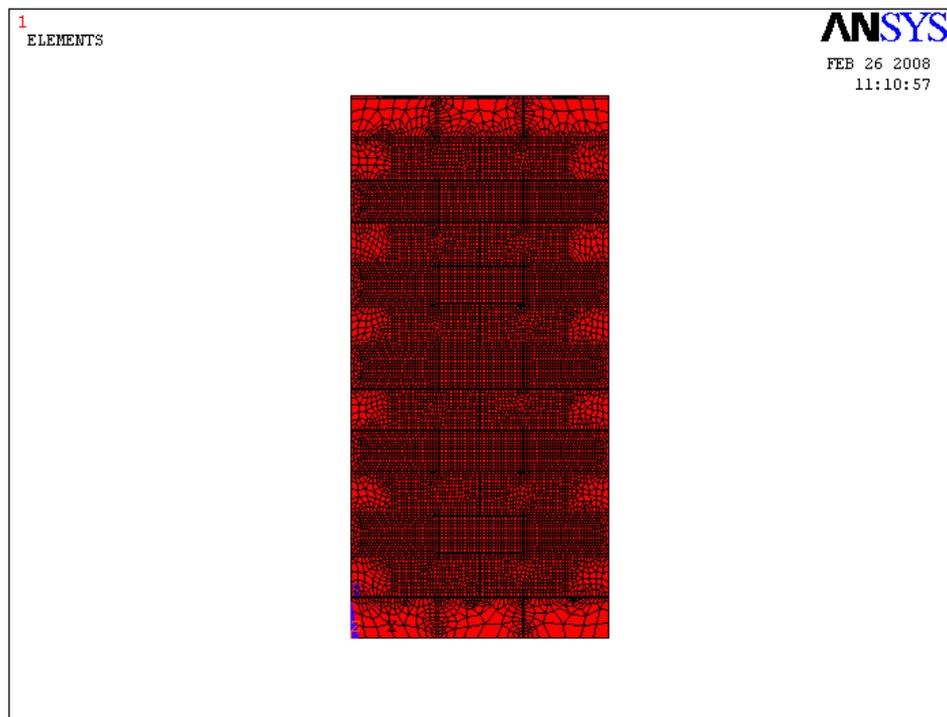


Figura 5.21 - Modelo bidimensional representativo do painel de parede.

As propriedades dos materiais utilizadas são idênticas àquelas utilizadas no prisma composto por blocos queimados a 700°C. Foram restringidos todos os deslocamentos da base e os deslocamentos horizontais do topo. A Figura 5.22 mostra a distribuição de tensões na parede modelada.

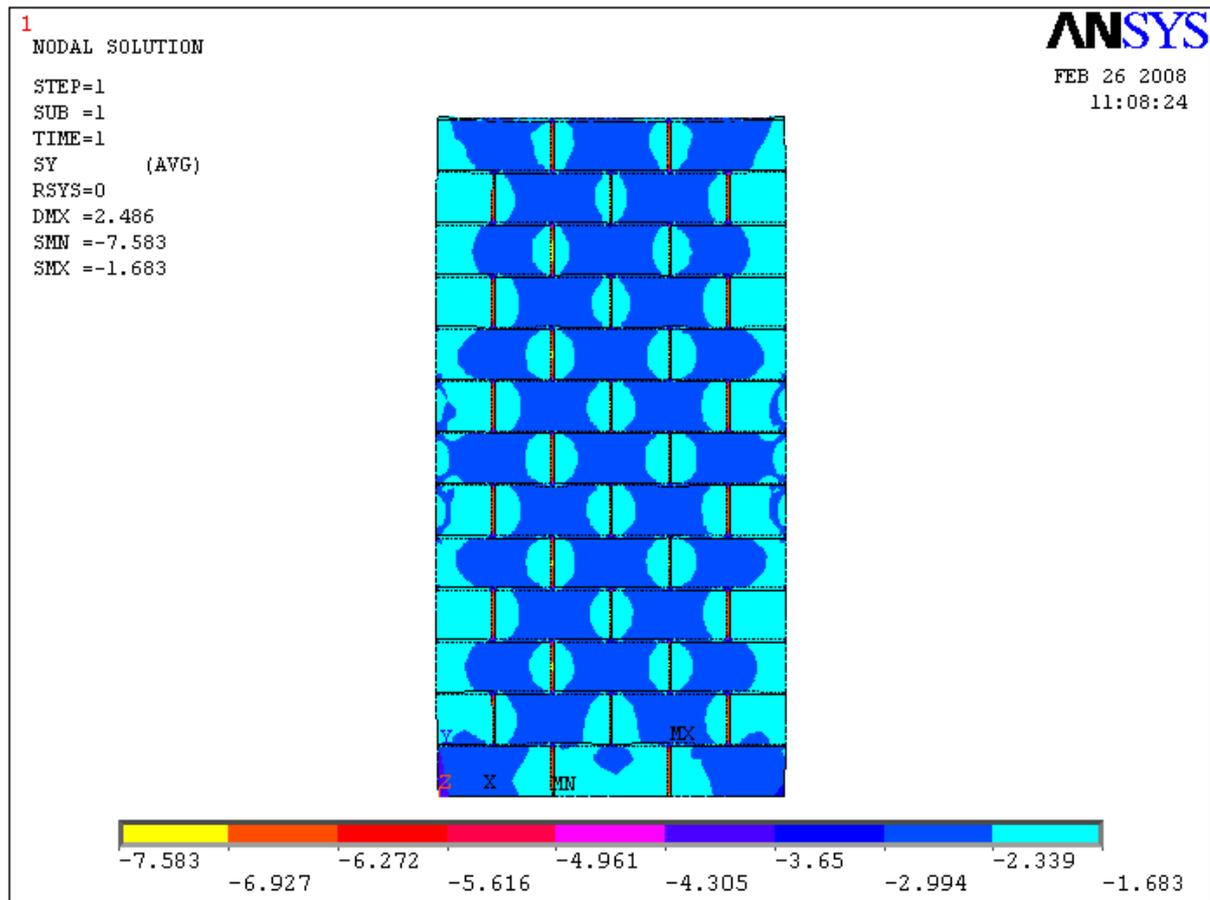


Figura 5.22 - Modelo bidimensional representativo do painel de parede com blocos queimados a 700°C.

Na Figura 5.22 notam-se os pontos de acúmulo de tensão promovidos pelas juntas verticais de argamassa, devido à descontinuidade geométrica e a transferência de esforços entre materiais com propriedades diferentes nesses pontos, resultados semelhantes foram obtidos por Garcia (2000). Percebe-se também que as juntas horizontais de argamassa auxiliam na uniformização da distribuição dos esforços.

A Figura 5.23 apresenta a distribuição de deformações no painel de parede, onde se observa que assim como no ocorre nos prismas, os maiores deslocamentos estão próximos ao topo, o que justifica o fato de em todos os ensaios, a ruptura do painel ocorre no terço médio superior. A modelagem apresentou como valor máximo de deslocamento 2,486 milímetros, muito próximo ao valor obtido dos ensaios que foi de 2,16 mm.

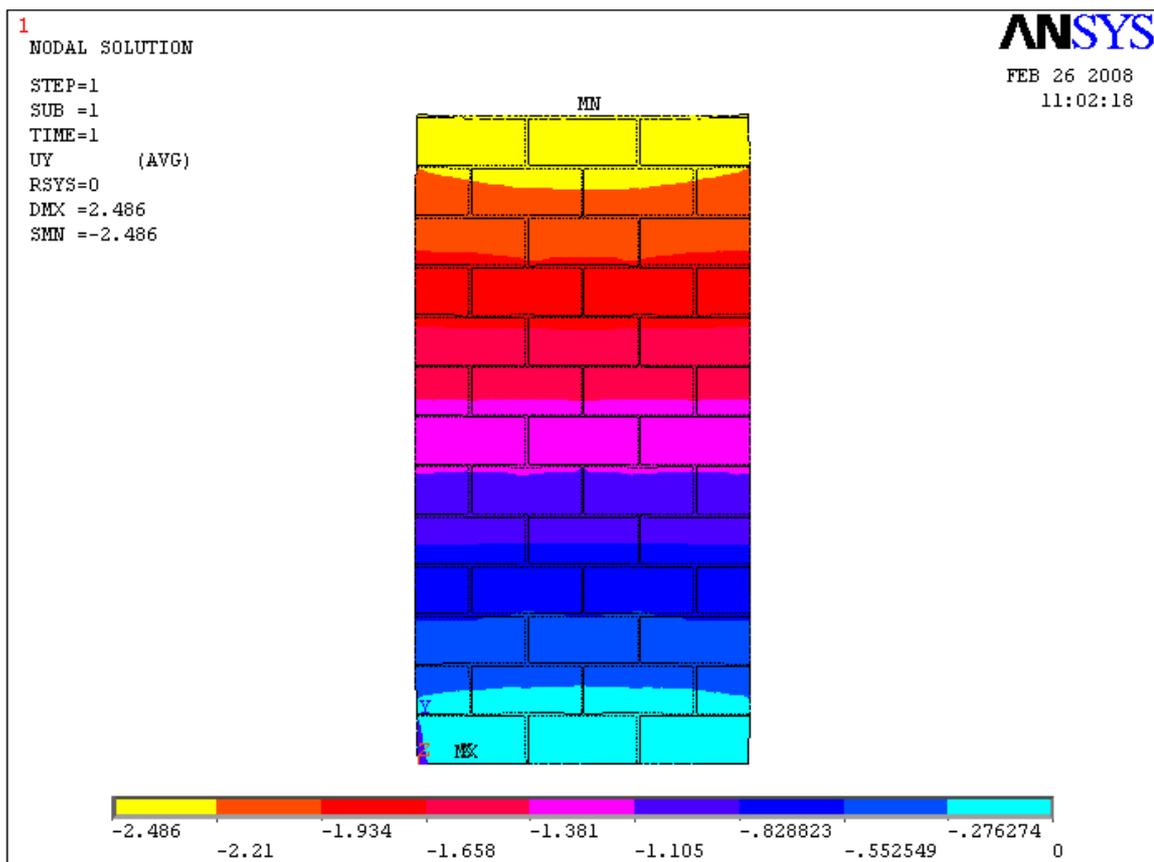


Figura 5.23 - Modelo bidimensional representativo do painel de parede.

Conclui-se que as propriedades dos corpos-de-prova cilíndricos utilizadas na modelagem, tanto de blocos, como de prismas, como dos painéis de parede, fornecem valores de deslocamento muito próximos dos observados em ensaios experimentais, mostrando que seus valores são bastante representativos das propriedades do material cerâmico vermelho. Cabe em trabalhos futuros a utilização desses parâmetros em modelagens mais complexas

## **CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

### **6.1 Conclusões**

A importância do estudo das propriedades físicas e mecânicas dos produtos de material cerâmico vermelho, que já vem sendo comercializado pela indústria campista, encontra-se tanto na possibilidade de melhorar sua qualidade, como de favorecer a disseminação do seu uso, quanto de dispor de dados consistentes para o dimensionamento de seus elementos estruturais e garantir a segurança de seus usuários. A obtenção dessas propriedades para a matéria-prima e o conhecimento do comportamento mecânico do produto regional virão por certo lhe agregar valor financeiro.

A determinação das propriedades intrínsecas ao material são necessárias para nortear os engenheiros calculistas no processo de modelagem de estruturas, a fim de prever o comportamento dos materiais de forma mais próxima ao que realmente ocorre. Neste trabalho foram utilizados para determinação dessas propriedades, amostras cilíndricas de cerâmica, blocos cerâmicos estruturais, prismas e paredes.

A utilização de diferentes diâmetros na confecção dos corpos-de-prova cerâmicos se mostrou útil na determinação das dimensões mais representativas, para moldagem de corpos-de-prova cilíndricos para ensaios de compressão simples em materiais de cerâmica vermelha. A escolha da temperatura de queima para

essas amostras foi baseada na análise de curvas termogravimétricas e difração de raios X, e se optou pela temperatura de 700°C, por ser a já utilizada na produção das peças pela indústria, e de 900°C, por oferecer uma maior cristalinidade ao material devido à transformação da metacaulinita (amorfa) em espinélio (estrutura cristalina) nesta temperatura. Trabalhos avaliando a questão da durabilidade, realizado por Xavier (2000) mostram que amostras queimadas a 900°C são mais duráveis que as queimadas a 700°C.

A Tabela 4.6 do Capítulo 4 mostra que as temperaturas de queima utilizadas não produzem variações dimensionais exageradas às peças. Segundo comparações estatísticas utilizando o Teste t, essas variações foram aproximadamente iguais para todos os corpos-de-prova com temperatura de queima 900°C, independente das dimensões. Nota-se também que a variação linear é intimamente ligada ao tratamento térmico, e seu valor aumenta juntamente com o da temperatura usada nesse tratamento.

A porosidade aparente é outra propriedade dependente do tratamento térmico, seu valor diminui quanto maior a temperatura usada nesse processo, devido às mudanças sofridas pelos argilominerais e o aumento da cristalinidade. As dimensões das amostras também influenciaram nesta propriedade devido aos defeitos produzidos pelos processos de secagem e queima que se acentuam conforme se aumenta as dimensões dos corpos-de-prova.

O teste de Tamanho Mínimo de Lote mostrou que os números de amostras utilizados na determinação da resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos de cerâmica vermelha se mostram bem representativos do universo amostral. Entretanto a variabilidade dos valores tornou necessária a aplicação do tratamento estatístico do Critério de Chauvenet, que mostrou a necessidade de se descartar alguns valores.

Após o tratamento estatístico os valores da resistência a compressão das amostras crescem à medida que suas dimensões diminuem, mantendo-se a proporção entre a altura e diâmetro igual a dois. Essas variações podem se justificar

pelo fato de corpos-de-prova como maiores dimensões apresentarem maior porosidade e defeitos advindos dos processos de secagem e queima. A temperatura de queima também influencia na resistência a compressão, pois o aumento da cristalinidade do material também lhe confere maior resistência mecânica.

A curva da Figura 4.14 do capítulo 4 mostra que diâmetros inferiores a 50 mm possuem grande variabilidade nos valores de resistência a compressão, enquanto que para diâmetros superiores, essas variações são muito pequenas, motivo pelo qual se recomenda sua utilização neste trabalho.

Os valores dos módulos de elasticidade decrescem com o aumento das dimensões dos corpos-de-prova, mostrando novamente a influência da porosidade e dos defeitos, e crescem com o aumento da temperatura do tratamento térmico, significando que o aumento da cristalinidade confere maior rigidez ao material. A variação do módulo de elasticidade se mostra mais acentuada para amostras com diâmetros menores que 50 mm, fornecendo mais um indicativo de que corpos-de-prova com dimensões de 50x100 mm são os mais adequados para representar o comportamento do material cerâmico vermelho.

Os valores do Coeficiente de Poisson crescem com as dimensões das amostras, mostrando que a existência de defeitos em maior escala favorece a deformação horizontal, e decrescem com o aumento da temperatura de queima, que em concordância com o módulo de elasticidade aponta para o aumento da rigidez do material provocado por um maior grau de cristalinidade.

Com base no exposto, pode-se concluir que os corpos-de-prova com dimensões de 50x100 mm foram aqueles que apresentaram uma melhor representatividade do comportamento mecânico do material, e que a elevação da temperatura de queima para 900°C promove uma série de melhorias no comportamento mecânico do material, que vão desde o aumento da resistência mecânica até a rigidez. Entretanto, faz-se necessário o estudo de amostras com diferentes diâmetros para comprovação desta tendência.

Do estudo dos resultados dos ensaios realizados em blocos cerâmicos estruturais, conclui-se que as peças coletadas no mercado utilizadas neste trabalho ainda possuem características um pouco abaixo das exigências das normas técnicas, principalmente no que se refere à absorção de água e resistência a compressão. Porém essas características superam as exigências quando se promove o aumento da temperatura de queima das peças, como mostra os resultados das amostras queimadas a 900°C.

Os ensaios realizados em prismas de dois blocos mostraram valores de eficiência compatíveis com a literatura (Ramalho, 2003). O estudo da eficiência (relação entre as resistências a compressão de prismas e blocos ou paredes e blocos, ou ainda, paredes e prismas) fornece uma ferramenta rápida e simples para se fazer uma estimativa da tensão resistente do elemento portante da alvenaria estrutural. Os valores obtidos de eficiência entre bloco e prisma (0,55), bloco e parede (0,32) e prisma e parede (0,59), possuem a mesma ordem de valores encontrados em literatura (Garcia, 2000).

Outro fator interessante que se observa nos ensaios em prismas é a relação entre a resistência de bloco e argamassa, que pode até mesmo mudar o mecanismo de ruptura deste. Os ensaios realizados mostram que os prismas construídos com blocos queimados a 700°C apresentaram resistência maior que os construídos com blocos queimados a 900°C, quando se utiliza a mesma argamassa. Este fato mostra que a resistência da argamassa, que era compatível para os blocos com temperatura de queima de 700°C (mas consideravelmente inferior aos queimados a 900°C), faz com que o mecanismo de ruptura se inicie na junta de argamassa e essa transmite esforços de tração para o bloco fazendo com que este tenha uma ruptura precoce.

Os ensaios em parede se mostraram eficientes na determinação tanto da resistência última, quando do máximo deslocamento, cujos resultados mostrados no capítulo 4 também possuem a mesma ordem de grandeza que é encontrada em ensaios descritos por autores com Garcia (2000) e Silva (2005).

A modelagem numérica utilizando as propriedades mecânicas determinadas nos ensaios dos corpos-de-prova com dimensões de 60 mm de diâmetro e 120 mm de altura, queimados a 700°C, forneceu para o carregamento medido imediatamente anterior a ruptura deslocamentos próximos ao medidos nos ensaios, sendo que na modelagem do painel de parede a dispersão foi aproximadamente 13%. De forma, que se pode concluir que realmente essas dimensões de amostras são adequadas a realização dos ensaios.

Pode-se concluir ainda, com base nos dados apresentados no Capítulo 5, referente à modelagem numérica que dispersão entre resultados de deslocamentos obtidos com as modelagens tridimensionais e bidimensionais, mostra a validação desta última, que exige esforço computacional muito menor.

Para concluir, cabe ainda citar, que a contribuição da pesquisas realizadas por centros de produção de tecnologia como a UENF, vem aumentando substancialmente nos últimos anos a qualidade do produto final da indústria ceramista campista. Vale ainda reconhecer os esforços nesse sentido do Sindicato da Indústria Cerâmica para Construção de Campos/RJ, do Laboratório de Cerâmica da Universidade Federal Rural e do SEBRA/RJ.

## **6.1 Sugestões para trabalhos futuros**

A alvenaria estrutural é um campo promissor e vem ganhando destaque nas últimas décadas pelas vantagens proporcionadas de rapidez e economia na execução do empreendimento. Apesar de ser uma técnica muito antiga, umas das primeiras técnicas edificantes utilizada pelo homem, teve por muito tempo caráter empírico, de forma que ainda há muito a se descobrir e determinar sobre seu comportamento.

O elemento portante na alvenaria estrutural é composto de diversos materiais diferentes, o que dificulta o completo entendimento de seu mecanismo de

comportamento estrutural, devendo-se também lembrar a grande variabilidade encontrada em peças cerâmicas. Tudo isso se constitui em um vasto campo de pesquisas a ser desbravado, a seguir serão apresentadas algumas sugestões que visam complementar os passos iniciados nesse trabalho.

Como neste trabalho foi apresentando uma proposta de dimensões e forma para corpo-de-prova a ser utilizado para determinação das propriedades intrínsecas do material, cabe ainda um estudo mais detalhado de como essas propriedades se comportariam em uma escala maior de temperaturas, determinando uma curva de influencia da temperatura para cada propriedade.

Neste trabalho foi estudado um bloco cerâmico estrutural com uma determinada forma geométrica já inserida no mercado do município de Campos dos Goytacazes/RJ, seria de interesse científico comparar essa morfologia com outras que também já estão chegando ao mercado, determinando a relação entre a resistência última e a razão entre área bruta e líquida.

Outro estudo importante seria a influencia de variadas formas de capeamento no comportamento mecânico de blocos estruturais e prismas de dois e três blocos. Assim como também a influencia dos componentes da argamassa no comportamento do prisma, haja vista tantas argamassas que estão adentrando o mercado, muitas delas industrializadas.

No que se refere a painéis de parede, é um dos caminhos que mais precisa ser explorado, determinando-se a influencia de aberturas, e buscando quantificar a influencia da interação entre paredes que promove determinada redistribuição do carregamento. Obter as distribuições de tensões em paredes armadas e não armadas. Determinar de forma racional as dimensões necessárias a elementos construtivos das paredes, tais como vergas e contravergas.

Uma pesquisa relevante que daria continuidade a esse trabalho seria a realização dos ensaios aqui apresentados para um maior número de corpos-de-prova. Utilizando lotes com variação do diâmetro e conservando a relação entre

altura e diâmetro, lotes com um único diâmetro e variando a relação entre altura e diâmetro, e utilizando matérias-primas de jazidas variadas com objetivo de determinar a influência da mineralogia e temperatura nas propriedades mecânicas.

## Referências Bibliográficas

ALEXANDRE, J. (1997). Caracterização das argilas do município de Campos dos Goytacazes para utilização em cerâmica vermelha. Dissertação de mestrado em Ciências da Engenharia – Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 164 p.

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

ALEXANDRE, JONAS, XAVIER, G. C., MANHÃES, A. L. F. (2004). Incorporação da cal na massa de conformação de cerâmica vermelha. 48º Congresso brasileiro de cerâmica, Florianópolis – SC, 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (2008). Panorama nacional da indústria cerâmica; [http://www.abceram.org.br/asp/abc\\_21.asp](http://www.abceram.org.br/asp/abc_21.asp) em 04/02/2008 página mantida pela ABCERAM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). Bloco Cerâmico para Alvenaria – Verificação da Resistência à Compressão: NBR 6461. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). Prismas de Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria Estrutural – Preparo e Ensaio a Compressão: NBR 5215. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1985). Paredes de Alvenaria Estrutural – Ensaio à Compressão Simples: NBR 8949. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1989). Cálculo de Alvenaria Estrutural de Blocos Vazados de Concreto: NBR 10837. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos - Determinação da Resistência à Tração na flexão e à Compressão: NBR 13279. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). Componentes Cerâmicos Parte 2: Blocos Cerâmicos para Alvenaria Estrutural – Terminologia e Requisitos. NBR 15270 – 2. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO (2008). Revestimentos cerâmicos do Brasil; <http://www.anfacer.org.br/principal.aspx?tela=ucTelaConteudos&idMenu=92> em 09/01/2008 página mantida pela ANFACER.

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.

BOULT, B.F. (1979). Concrete Masonry Prism Testing – American Concrete Institute Journal, Proceedings.76, número 4, pp. 513 – 535.

CALÇADA, L. M. L. (1998). Avaliação do comportamento de prismas grauteados e não grauteados de blocos de concreto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Florianópolis – SC. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 167 p.

CALLISTER, W. D. J. (1998). Materials science and engineering, 5ª edição, New York – USA, Editora John Wiley & Sons, inc. 852 p.

CORREA, J. A. N. (2003). Estudo de Painéis com Abertura Constituído por Alvenaria Estrutural de Blocos. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – São Carlos – SP. Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

CHEEMA, T. S., KLINGNER, R. E. (1986). Compressive Strength of Concrete Masonry Prism. ACI Journal – January – February.

DEPARTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS – DRM (2003). Pólo Cerâmico de Campos dos Goytacazes – Uma Questão de Tecnologia; <http://www.drm.rj.gov.br/item.asp?chave=32> em 25/08/2007 página mantida pelo DRM.

FAHAD, A., KALDJAN, M. J. (1989). Finite Element Analysis of Concrete Masonry Prisms. ACI Journal – September – October.

GARCIA, P. D. (2000). Contribuições a Resistência à Compressão de Paredes de Alvenaria de Blocos Cerâmicos. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas – São Carlos – SP. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 108 p.

GOMES, F. P. (1987). Curso de estatística experimental. 12ª Edição. Editora Piracicaba: Nobel, Piracicaba-SP. 167p.

GOMES, N. S. (1974). A Resistência das Paredes de Alvenaria. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – São Paulo – SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 224 p.

HAMID, A. A., DRYSDALE, R. G. (1979). Behavior of Concrete Block Masonry Under Axial Compression – American Concrete Institute Journal, Proceedings.76, número 6, pp. 707 – 721.

HILSDORF, H. K. (1969). "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.

HOLANDA, O. G. J. (2002). Influencia de Recalques em Edifícios de Alvenaria Estrutural. Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas – São Carlos – SP. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 224 p.

HOLLERWEGER, F. R. (2004). Projeto em alvenaria estrutural com blocos de concreto. Apresentação técnica – Interestruturas tecnologia, consultoria e projetos de estruturas.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2007). Contagem populacional em 2007; <http://www.ibge.com.br/cidadesat/default.php> em 04/02/2008 pagina mantida pelo IBGE.

KUBICA, J. (1993). Investigation of the  $\sigma - \epsilon$  Relationship of Unreinforced Masonry. Seventh North American Masonry Conference – Indiana – USA. University of Notre Dame – South Bend.

KHOO, C. L. e HENDRY, A. W. (1975). "A Failue Criterion for Brickwork in Axial Compression", Proceedings of the third International Brick Masonry Conference (Essen)1973, ed. Foertig, L. e Gobel, K. (Bunds verband der Deutschen Ziegelindustrie, Bonn,1975) pp. 139-145.

LIMA, T. V. (2006). Estudo da produção de blocos de solo-cimento com matérias primas do núcleo urbano da cidade de Campos dos Goytacazes - RJ. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 107 p.

MENDES, R. J. K. (1998). Resistência a Compressão de Alvenarias de Blocos Cerâmicos Estruturais. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Florianópolis – SC. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 185 p.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. (2000). Concreto – estrutura, propriedades e materiais. 1.ed. São Paulo – SP. Editora Pini Ltda. 573 p.

MOHAMAD, G. (1998). Comportamento Mecânico na Ruptura de Prismas de Blocos de concreto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Florianópolis – SC. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 117 p.

NETO, J. A. N. (2003). Estudo de painéis com abertura constituídos de alvenaria estrutural de blocos Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas – São Carlos – SP. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 319 p.

NONI Jr, A. (2005) Modelagem matemática aplicada ao controle dimensional de placas cerâmicas de monoqueima processadas por via úmida. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) apresentado pelo Curso de Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 123 p.

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

QUÍMICA NOVA (2007). Análise arqueométrica de cerâmica Tupiguarani da região central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, usando fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF); [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422007000400006&script=sci\\_arttext&tlnq=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422007000400006&script=sci_arttext&tlnq=pt) em 09/01/2008 página mantida pela Química nova.

RAMALHO, M. A., CORRÊA, M. R. S. (2003). Projetos de Edifícios de Alvenaria Estrutural. 1. ed. São Paulo: Editora Pini, 174 p.

RAMOS, I.S. (2006). Os depósitos silto-argilosos da planície de inundação do rio Paraíba do Sul no município de Campos dos Goytacazes – RJ como fonte de materiais para a indústria de cerâmica vermelha. Dissertação de Mestrado em Ciências de Engenharia – Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 164 p.

REGEMEIER, A., KRISHNAMOORTHY, G., NUMM, R. O., MOORTHY, T. V. (1978). Prism test for the Compressive Strength of Concret Masonry – Proceedings of North American Masonry Conference, Boulder, CO.

ROSS, P. J. (1991) Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade. 4ª ed. McGraw-Hill, São Paulo.

ROSS, S.M. (2003). Peirce's Criterion for the Elimination of Suspect Experimental Data. Journal of Engineering Technology. New Haven – USA, 12p.

SABBATINI, F. H. (1989). Desenvolvimento de Métodos, Processos e Sistemas Construtivos - Formulação e Aplicação de uma Metodologia. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – São Paulo – SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 207 p.

SANTOS, P.S. ; “Ciência e Tecnologia de Argilas”; Volume 1 ; 2ªedição; Editora Edgard Blücher LTDA; 1989; pág. 3/211.

SILVA, W. J. (2003). Estudo Experimental de Ligações entre Paredes de Alvenaria Estrutural de Blocos Cerâmicos Sujeitas a Ações Verticais. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Ilha Solteira – SP. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual de Paulista, 119 p.

SILVA, F. A. A. (2005). Proposta de morfologia racional de peças cerâmicas para aplicação em alvenaria estrutural. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil –

Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 107 p.

SILVA, L. M. S. (2005). A cerâmica utilitária do povoado histórico Muquém: a etnomatemática dos remanescentes do quilombo dos Palmares. Dissertação de Mestrado Profissional em Ensino de Matemática – São Paulo – SP. Pontifícia Universidade Católica – PUC, 105 p.

SILVESTRE, B. S. (2001). Uma análise competitiva do setor ceramista de Campos dos Goytacazes. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 123 p.

SMITH, W. F. (1998). Princípios de ciência e engenharia dos materiais, 3ª edição, editora Gran – Hill, 892p.

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

XAVIER, G. C. (2006). Resistência, Alterabilidade e Durabilidade de Peças Cerâmicas Vermelhas Incorporadas com Resíduo de Granito. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 202 p.

ZANOTTO, E. D., MIGLIORE JR., A. R. (1991). Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: uma introdução. Cerâmica, 37: 7-16.

## Apêndice A – Tabelas Referentes a Corpos-de-prova Cilíndricos de Cerâmica

Tabela A.1. - Dimensões anteriores e posteriores a queima das amostras à 700°C.

Corpo-de-Prova	Dimensões anteriores à queima								Dimensões posteriores à queima							
	Diâmetros (mm)				Alturas (mm)				Diâmetros (mm)				Alturas (mm)			
	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60
1	27,6	35,7	47,9	59,7	61,0	77,9	95,3	115,7	27,4	35,3	47,5	59,5	59,7	77,1	93,8	113,9
2	27,8	35,5	47,9	59,8	60,8	77,7	96,3	114,6	27,8	35,0	47,5	58,7	60,6	76,9	94,6	113,6
3	27,6	35,8	47,8	58,9	60,3	77,8	96,4	113,6	27,4	35,3	47,6	58,5	59,1	77,8	95,0	112,9
4	27,8	35,8	47,7	59,2	61,7	78,2	94,9	115,4	27,6	35,4	47,3	58,6	61,2	77,4	94,4	113,0
5	28,1	35,6	48,1	60,0	61,0	77,6	96,1	116,0	-	35,2	47,0	59,2	-	77,4	95,7	113,1
6	27,6	35,4	48,1	59,7	60,2	78,8	97,4	114,8	27,4	35,0	47,7	59,3	59,6	77,7	94,4	112,9
7	27,7	35,9	47,8	59,9	60,5	78,7	95,3	115,0	27,4	35,2	47,5	58,8	60,1	78,6	94,2	113,6
8	28,1	36,1	47,9	58,7	60,7	78,2	95,0	114,2	27,8	35,5	47,4	58,1	60,5	77,5	94,3	111,9
9	28,1	35,8	48,0	59,1	60,1	78,2	95,8	114,0	27,7	35,0	47,5	58,4	59,9	77,5	94,1	112,8
10	27,8	35,4	47,9	59,2	60,1	78,2	95,8	114,7	27,5	35,3	47,4	58,9	59,9	77,6	94,4	113,1
11	27,6	35,5	47,8	59,0	60,2	78,8	95,3	114,6	27,4	35,2	47,7	58,6	59,4	76,8	94,3	112,6
12	27,6	35,7	47,5	59,4	60,0	78,3	95,4	115,1	27,4	35,2	47,5	58,6	59,8	77,6	94,5	113,0
13	27,8	35,8	47,9	59,4	60,1	77,7	96,0	114,7	27,5	35,1	47,2	59,0	59,9	77,1	94,4	113,0
14	27,5	35,3	47,9	59,6	60,3	77,8	95,1	114,3	27,4	35,0	47,5	59,2	59,6	77,5	94,8	113,0
15	27,9	35,9	47,9	59,3	60,6	77,7	95,6	114,6	27,2	35,2	47,1	58,9	59,8	77,7	95,2	113,2
Média	27,8	35,7	47,9	59,4	60,5	78,1	95,7	114,8	27,5	35,2	47,4	58,8	59,9	77,5	94,5	113,0
Desv. Pad.	0,2	0,2	0,1	0,4	0,5	0,4	0,7	0,6	0,2	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5
C. V. (%)	0,7	0,6	0,3	0,6	0,8	0,5	0,7	0,5	0,6	0,4	0,4	0,6	0,9	0,6	0,5	0,4

Tabela A.2. - Dimensões anteriores e posteriores a queima das amostras à 900°C.

Corpo-de-Prova	Dimensões anteriores à queima								Dimensões posteriores à queima							
	Diâmetros (mm)				Alturas (mm)				Diâmetros (mm)				Alturas (mm)			
	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60
1	27,9	35,8	48,0	60,1	60,5	77,3	95,7	116,9	27,0	34,4	46,4	58,6	58,7	74,8	92,8	113,6
2	27,7	35,8	48,4	59,1	60,2	77,9	95,0	113,8	27,1	34,4	46,2	57,6	58,6	75,9	93,4	110,6
3	27,5	35,5	48,3	60,1	60,0	77,5	95,4	115,4	26,7	34,2	46,9	57,8	59,4	75,3	93,0	112,2
4	27,6	35,6	48,4	60,0	60,1	77,7	95,5	115,3	27,1	34,7	46,8	58,5	58,8	75,8	93,5	112,4
5	27,7	35,5	48,2	60,2	61,2	78,4	95,4	115,8	26,9	34,6	46,9	58,4	59,0	76,8	93,0	113,2
6	27,6	35,9	47,8	59,5	60,1	77,9	95,6	113,8	26,7	35,0	46,3	58,0	58,8	75,9	93,8	111,4
7	27,9	35,8	48,3	60,0	60,0	78,3	95,6	114,3	27,0	34,7	46,6	58,0	58,4	76,3	93,4	112,5
8	28,3	35,7	48,2	60,2	60,2	77,7	95,3	115,9	27,1	34,3	47,0	58,8	58,8	75,5	93,7	113,0
9	28,3	35,7	48,1	60,0	60,4	77,6	95,2	116,7	27,8	34,8	46,6	59,0	58,7	75,6	92,4	114,3
10	27,9	35,5	48,3	60,0	60,0	78,6	95,4	116,6	27,0	34,5	46,7	58,9	58,8	75,5	94,3	113,9
11	27,7	35,6	47,8	59,9	60,4	78,8	96,8	114,8	26,8	34,6	46,4	57,8	59,6	76,4	93,2	112,1
12	28,0	35,7	47,9	60,1	60,2	78,9	95,4	116,3	26,6	34,4	46,6	58,2	58,5	75,5	93,6	112,4
13	28,0	35,4	47,9	59,3	61,2	78,2	95,3	113,9	26,8	34,6	46,5	57,7	59,3	75,9	93,2	111,1
14	28,0	35,6	48,3	59,8	60,5	78,4	95,9	114,7	26,9	34,3	46,7	57,5	59,2	76,1	93,3	112,8
15	27,9	35,7	48,2	60,1	60,4	77,8	95,4	115,0	27,2	34,7	46,7	59,8	58,7	75,9	93,8	111,1
Média	27,9	35,7	48,1	59,9	60,4	78,1	95,5	115,3	27,0	34,5	46,6	58,3	58,9	75,8	93,4	112,4
Desv. Pad.	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,4	1,1	0,3	0,2	0,2	0,6	0,3	0,5	0,5	1,1
C. V. (%)	0,9	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,4	0,9	1,1	0,6	0,5	1,1	0,6	0,6	0,5	1,0

Tabela A.3. - Tolerâncias dimensionais individuais relacionadas às médias das dimensões efetivas para amostras queimadas a 700°C.

Corpo de Prova	Variação do Diâmetro (%)				Variação da Altura (%)			
	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60
1	0,725	0,835	1,120	0,335	2,131	1,027	1,574	1,556
2	0,000	0,835	1,408	1,839	0,329	1,030	1,765	0,873
3	0,725	0,418	1,397	0,679	1,990	0,000	1,452	0,616
4	0,719	0,839	1,117	1,014	0,810	1,023	0,527	2,080
5	-	2,287	1,124	1,333	-	0,258	0,416	2,500
6	0,725	0,832	1,130	0,670	0,997	1,396	3,080	1,655
7	1,083	0,628	1,950	1,836	0,661	0,127	1,154	1,217
8	1,068	1,044	1,662	1,022	0,329	0,895	0,737	2,014
9	1,423	1,042	2,235	1,184	0,333	0,895	1,775	1,053
10	1,079	1,044	0,282	0,507	0,333	0,767	1,461	1,395
11	0,725	0,209	0,845	0,678	1,329	2,538	1,049	1,745
12	0,725	0,000	1,401	1,347	0,333	0,894	0,943	1,825
13	1,079	1,461	1,955	0,673	0,333	0,772	1,667	1,482
14	0,364	0,835	0,850	0,671	1,161	0,386	0,315	1,137
15	2,509	1,670	1,950	0,675	1,320	0,000	0,418	1,222
Média	0,925	0,932	1,362	0,964	0,885	0,801	1,222	1,491
Desvio Padrão	0,573	0,566	0,523	0,461	0,629	0,641	0,729	0,498
C. V. (%)	61,926	60,787	38,376	47,790	71,065	80,109	59,609	33,369

Tabela A.4. - Tolerâncias dimensionais individuais relacionadas às médias das dimensões efetivas para amostras queimadas a 900°C.

Corpo de Prova	Variação do Diâmetro (%)				Variação da Altura (%)			
	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60	DN 30	DN 40	DN 50	DN 60
1	3,226	3,911	3,333	2,496	2,975	3,234	3,030	2,823
2	2,166	3,911	4,545	2,538	2,658	2,567	1,684	2,812
3	2,909	3,662	2,899	3,827	1,000	2,839	2,516	2,773
4	1,812	2,528	3,306	2,500	2,163	2,445	2,094	2,515
5	2,888	2,535	2,697	2,990	3,595	2,041	2,516	2,245
6	3,261	2,507	3,138	2,521	2,163	2,567	1,883	2,109
7	3,226	3,073	3,520	3,333	2,667	2,554	2,301	1,575
8	4,240	3,922	2,490	2,326	2,326	2,831	1,679	2,502
9	1,767	2,521	3,119	1,667	2,815	2,577	2,941	2,057
10	3,226	2,817	3,313	1,833	2,000	3,944	1,153	2,316
11	3,249	2,809	2,929	3,506	1,325	3,046	3,719	2,352
12	5,000	3,641	2,714	3,161	2,824	4,309	1,887	3,353
13	4,286	2,260	2,923	2,698	3,105	2,941	2,204	2,458
14	3,929	3,652	3,313	3,846	2,149	2,934	2,711	1,656
15	2,509	2,801	3,112	0,499	2,815	2,442	1,677	3,391
Média	3,180	3,103	3,157	2,649	2,438	2,885	2,266	2,463
Desvio Padrão	0,916	0,609	0,477	0,880	0,674	0,587	0,658	0,522
C. V. (%)	28,806	19,632	15,126	33,205	27,621	20,331	29,049	21,206

Tabela A.5. - Massa específica aparente em g/cm<sup>3</sup> (MEA).

Corpos de Prova	Temperatura de Queima 700°C				Temperatura de Queima 900°C			
	DN 30 mm	DN 40 mm	DN 50 mm	DN 60 mm	DN 30 mm	DN 40 mm	DN 50 mm	DN 60 mm
1	1,494	1,450	1,480	1,438	1,532	1,554	1,539	1,547
2	1,427	1,471	1,419	1,490	1,535	1,532	1,535	1,533
3	1,512	1,443	1,431	1,417	1,536	1,556	1,521	1,571
4	1,420	1,443	1,418	1,417	1,536	1,507	1,510	1,521
5	-	1,430	1,465	1,425	1,557	1,508	1,465	1,568
6	1,494	1,471	1,427	1,461	1,583	1,508	1,482	1,489
7	1,487	1,429	1,436	1,404	1,558	1,502	1,511	1,522
8	1,432	1,450	1,440	1,550	1,542	1,557	1,449	1,538
9	1,452	1,475	1,437	1,422	1,471	1,495	1,497	1,517
10	1,464	1,429	1,452	1,417	1,542	1,523	1,519	1,528
11	1,502	1,440	1,435	1,435	1,553	1,502	1,499	1,486
12	1,495	1,453	1,415	1,424	1,603	1,546	1,485	1,485
13	1,470	1,453	1,472	1,453	1,554	1,504	1,472	1,530
14	1,500	1,447	1,457	1,453	1,540	1,534	1,534	1,524
15	1,511	1,442	1,449	1,401	1,533	1,514	1,489	1,409
Média	1,476	1,448	1,442	1,440	1,545	1,523	1,500	1,518
Desvio Padrão	0,032	0,015	0,020	0,038	0,028	0,022	0,027	0,040
C. V. (%)	2,146	1,024	1,375	2,658	1,839	1,438	1,799	2,611

Tabela A.6. - Tensão de ruptura para corpos-de-prova queimados a 700°C.

Corpos-de-prova	Tensão de Ruptura (MPa)			
	DN 30mm	DN 40mm	DN 50mm	DN 60mm
1	25,709	15,184	6,923	4,503
2	-	10,996	5,982	-
3	25,376	13,518	6,083	4,772
4	18,272	-	6,235	6,876
5	-	14,236	6,424	6,248
6	19,791	14,007	7,932	6,868
7	25,301	12,446	5,129	7,348
8	24,749	11,909	-	-
9	24,453	15,188	-	19,131
10	-	12,765	6,654	-
11	17,496	13,973	-	6,110
12	25,188	15,124	7,313	7,135
13	19,725	16,604	6,617	6,020
14	15,865	16,309	6,740	6,344
15	13,471	15,674	11,358	7,166
Média	21,283	14,138	6,949	7,377
Desv. Padrão	4,351	1,672	1,554	3,809
C. V. (%)	20,443	11,828	22,363	51,635

Tabela A.7. - Tensão de ruptura para corpos-de-prova queimados a 900°C.

Corpos-de-prova	Tensão de Ruptura (MPa)			
	DN 30mm	DN 40mm	DN 50mm	DN 60mm
1	27,043	19,892	9,929	12,031
2	25,222	20,094	11,724	16,777
3	25,889	27,466	12,001	9,373
4	26,468	23,450	9,064	-
5	42,361	22,348	9,637	8,609
6	34,419	19,045	8,355	-
7	35,749	22,632	12,418	16,258
8	30,986	22,348	14,706	7,047
9	-	24,474	13,330	9,533
10	35,486	22,414	12,654	6,292
11	34,300	27,423	7,449	-
12	36,296	21,388	-	6,361
13	21,741	-	10,959	16,925
14	30,337	30,192	7,637	-
15	31,569	28,956	12,020	25,688
Média	31,276	23,723	10,849	12,263
Desv. Padrão	5,571	3,502	2,216	6,043
C. V. (%)	17,813	14,762	20,425	49,279

Tabela A.8. - Teste do Tamanho Mínimo de Lote (TML) para dados sobre as resistências das amostras (MPa).

nº amostras	700°C				900°C			
	DN 30mm	DN 40mm	DN 50mm	DN 60mm	DN 30mm	DN 40mm	DN 50mm	DN 60mm
1	25,71	15,18	6,92	4,50	27,04	19,89	9,93	12,03
2	-	11,00	5,98	-	25,22	20,09	11,72	16,78
3	25,38	13,52	6,08	4,77	25,89	27,47	12,00	9,37
4	18,27	-	6,24	6,88	26,47	23,45	9,06	-
5	-	14,24	6,42	6,25	42,36	22,35	9,64	8,61
6	19,79	14,01	7,93	6,87	34,42	19,05	8,35	-
7	25,30	12,45	5,13	7,35	35,75	22,63	12,42	16,26
8	24,75	11,91	-	-	30,99	22,35	14,71	7,05
9	24,45	15,19	-	19,13	-	24,47	13,33	9,53
10	-	12,77	6,65	-	35,49	22,41	12,65	6,29
11	17,50	13,97	8,68	6,11	34,30	27,42	7,45	-
12	25,19	15,12	7,31	7,14	36,30	21,39	-	6,36
13	19,73	16,60	6,62	6,02	21,74	-	10,96	16,92
14	15,86	16,31	6,74	6,34	30,34	30,19	7,64	-
15	13,47	15,67	11,36	7,17	31,57	28,96	12,02	25,69
Xm (média)	21,28	14,14	7,08	7,38	31,28	23,72	10,85	12,26
Sx(DesvioP.)	4,35	1,67	1,56	3,81	5,57	3,50	2,22	6,04
N (graus de lib.)	11,00	13,00	12,00	11,00	13,00	13,00	13,00	10,00
t (tabela $\alpha=0,975$ )	2,20	2,16	2,18	2,16	2,16	2,16	2,16	2,23
r	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
n <sub>0</sub>	80,91	26,11	92,59	497,57	59,22	40,67	77,86	483,05
n <sub>calc</sub>	11,00	10,00	12,00	12,00	12,00	11,00	12,00	11,00
n <sub>amostra</sub>	12,00	14,00	13,00	12,00	14,00	14,00	14,00	11,00

## Apêndice B – Tabelas Referentes a Blocos Cerâmicos Estruturais

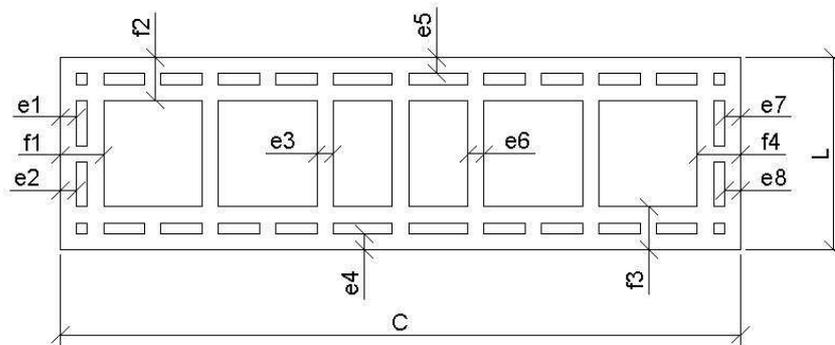


Figura B.1 - Dimensões em planta do bloco estrutural.

Tabela B.1. - Dimensões em milímetros dos blocos queimados a 700 °C.

	L	H	C	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	f1	f2	f3	f4
<b>B1</b>	117,7	188,3	396,1	8,7	8,1	8,5	11,6	11,1	9,3	7,3	8,5	26,6	26,1	29,1	25,8
<b>B2</b>	118,1	185,6	399,2	9,9	7,6	10,1	15,1	12,6	9,6	7,3	9,1	25,9	24,6	27,3	26,7
<b>B3</b>	117,1	185,4	404,1	9,2	7,3	9,6	10,9	12,9	8,1	7,9	9,2	26,1	28,2	26,4	25,7
<b>B4</b>	116,9	187,8	403,0	8,8	7,7	9,6	11,5	15,6	10,1	7,5	8,2	25,9	27,3	24,1	24,6
<b>B5</b>	118,4	184,3	402,9	8,7	7,2	9,4	11,4	12,1	8,6	8,2	9,0	25,4	27,9	27,1	26,3
<b>B6</b>	118,1	186,6	404,4	9,9	7,8	8,9	9,5	15,3	9,9	6,9	10,1	26,8	27,4	24,8	25,4
<b>B7</b>	116,8	178,3	402,7	10,1	7,2	10,2	13,7	11,7	8,4	8,0	9,5	26,5	26,3	26,8	26,5
<b>B8</b>	115,7	185,1	400,7	8,7	7,6	9,4	10,3	14,3	8,6	8,2	9,3	24,4	28,6	26,1	25,9
<b>B9</b>	118,4	185,9	403,3	9,4	6,8	9,1	10,3	12,8	9,7	6,9	10,4	25,7	28,5	25,0	26,1
<b>B10</b>	118,4	188,8	402,6	9,3	7,8	8,7	13,4	14,1	9,9	7,2	10,8	26,4	25,8	25,1	25,1
<b>B11</b>	117,8	185,9	402,4	10,1	8,2	8,8	9,6	12,9	10,2	6,9	10,6	26,8	26,5	25,1	25,1
<b>B12</b>	117,0	183,1	399,9	10,3	6,9	10,2	13,4	13,7	9,0	7,7	9,1	26,2	25,1	25,7	25,7
<b>B13</b>	116,2	186,7	398,1	9,8	8,0	9,6	10,5	13,5	8,1	8,6	9,4	27,2	25,7	25,7	25,7
<b>Média</b>	117,4	185,5	401,5	9,5	7,6	9,4	11,6	13,3	9,2	7,6	9,5	26,1	26,8	26,0	25,7
<b>D. P.</b>	0,9	2,6	2,4	0,6	0,4	0,5	1,7	1,3	0,7	0,5	0,8	0,7	1,3	1,3	0,6
<b>C. V. (%)</b>	0,7	1,4	0,6	6,1	5,7	5,8	14,4	9,6	8,0	7,1	8,0	2,7	4,7	4,9	2,2

Tabela B.2. - Dimensões em milímetros dos blocos queimados a 900°C.

Bloco	L	H	C	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	f1	f2	f3	f4
B1	115,8	179,0	395,7	9,6	7,8	8,5	10,9	12,2	10,7	6,9	10,6	26,5	26,4	24,9	25,9
B2	116,2	184,9	395,9	9,6	7,3	9,4	10,2	12,2	9,8	7,2	9,4	26,9	26,6	24,1	24,9
B3	115,9	183,5	396,0	9,8	6,8	9,9	14,4	12,6	7,9	7,1	9,3	25,7	25,1	24,2	25,9
B4	116,0	187,7	393,5	9,1	7,4	8,3	14,2	14,0	9,3	6,7	10,5	26,1	26,1	25,4	25,6
B5	114,7	185,6	394,7	8,9	7,2	9,9	10,3	12,9	10,0	7,4	9,3	25,3	27,3	25,7	26,2
B6	114,7	181,9	391,2	8,2	7,2	9,9	10,4	13,2	8,7	7,7	9,8	24,2	27,8	26,1	25,1
B7	114,7	184,8	395,7	10,2	6,6	9,2	15,6	11,6	8,8	7,9	9,9	26,4	23,4	26,4	25,9
B8	113,3	184,7	391,9	8,6	8,1	9,1	11,5	14,4	10,0	7,5	9,5	25,2	26,6	24,3	25,2
B9	113,4	186,1	391,6	8,6	8,5	8,6	13,0	10,3	8,7	7,0	8,5	25,5	26,2	27,6	25,1
B10	114,6	184,1	392,2	9,0	7,2	9,8	13,7	9,2	8,8	6,7	9,5	25,4	18,3	20,4	21,1
B11	115,0	182,6	395,7	8,8	7,7	8,3	12,6	10,8	9,4	7,5	8,4	26,2	25,5	27,2	25,1
B12	116,0	179,7	392,5	9,4	7,6	9,3	11,4	15,0	9,2	7,1	10,2	26,4	26,6	23,8	26,2
B13	116,7	183,3	397,7	8,4	7,2	9,5	12,5	10,8	8,5	8,4	9,5	25,6	27,1	26,7	25,5
Média	115,2	183,7	394,2	9,1	7,4	9,2	12,4	12,2	9,2	7,3	9,6	25,8	25,6	25,1	25,2
D. P.	1,0	2,4	2,0	0,6	0,5	0,6	1,7	1,6	0,7	0,5	0,6	0,7	2,4	1,8	1,3
C. V. (%)	0,9	1,3	0,5	6,3	6,6	6,4	13,6	13,3	7,9	6,4	6,6	2,7	9,2	7,2	5,0

Tabela B.3. - Massa do bloco e índice de absorção de água.

Blocos	massa aparente (g)	massa seca (g)	massa úmida (g)	AA (%) (%)
AB1	5419	5315	-	-
AB2	5520	5405	6885	27,382
AB3	5480	5370	6780	26,257
AB4	5505	5395	-	-
AB5	5430	5325	6720	26,197
AB6	5480	5375	6845	27,349
AB7	5625	5510	6960	26,316
AB8	5400	5285	6730	27,342
AB9	5580	5475	6915	26,301
AB10	5600	5485	6955	26,800
AB11	5727	5610	7035	25,401
AB12	5510	5400	6825	26,389
AB13	5483	5395	6820	26,413
Média	5519,923	5411,154	6860,909	26,559
Desv Padrão	91,955	89,026	99,620	0,609

Tabela B.4. - Dimensões, área, carga última e resistência a compressão de blocos cerâmicos estruturais queimados a 700°C.

Identificação	Dimensões (mm)			Área (m <sup>2</sup> )	Carga Última (kN)	Tensão Última (MPa)
	comprimento	Altura	Espessura			
AM 1	396,1	188,3	117,7	0,05	196,50	4,21
AM 2	399,2	185,6	118,1	0,05	185,60	3,94
AM 3	404,1	185,4	117,1	0,05	185,40	3,92
AM 4	403,0	187,8	116,9	0,05	187,80	3,99
AM 5	402,9	184,3	118,4	0,05	184,30	3,86
AM 6	404,4	186,6	118,1	0,05	162,30	3,40
AM 7	402,7	178,3	116,8	0,05	184,10	3,91
AM 8	400,7	185,1	115,7	0,05	123,90	2,67
AM 9	403,3	185,9	118,4	0,05	150,50	3,15
AM 10	402,6	188,8	118,4	0,05	171,70	3,60
AM 11	402,4	185,9	117,8	0,05	150,65	3,18
AM 12	399,9	183,1	117,0	0,05	224,80	4,80
AM 13	398,1	186,7	116,2	0,05	165,90	3,59
<b>Médias</b>	<b>401,49</b>	<b>185,52</b>	<b>117,43</b>	<b>0,05</b>	<b>174,88</b>	<b>3,71</b>
<b>Desv. Padrão</b>	2,50	2,68	0,89	0,00	25,09	0,54

Tabela B.5. - Dimensões, área, carga última e resistência a compressão de blocos cerâmicos estruturais queimados a 900°C.

Identificação	Dimensões (mm)			Área (m <sup>2</sup> )	Carga Última (kN)	Tensão Última (MPa)
	comprimento	Altura	Espessura			
AM 1	395,7	179,0	115,8	0,05	234,36	5,11
AM 2	395,9	184,9	116,2	0,05	239,56	5,21
AM 3	396,0	183,5	115,9	0,05	293,58	6,40
AM 4	393,5	187,7	116,0	0,05	139,52	3,06
AM 5	394,7	185,6	114,7	0,05	186,40	4,12
AM 6	391,2	181,9	114,7	0,04	222,50	4,96
AM 7	395,7	184,8	114,7	0,05	153,30	3,38
AM 8	391,9	184,7	113,3	0,04	179,30	4,04
AM 9	391,6	186,1	113,4	0,04	224,60	5,06
AM 10	392,2	184,1	114,6	0,04	320,10	7,12
AM 11	395,7	182,6	115,0	0,05	301,45	6,62
AM 12	392,5	179,7	116,0	0,05	235,81	5,18
AM 13	397,7	183,3	116,7	0,05	214,40	4,62
<b>Médias</b>	<b>394,18</b>	<b>183,68</b>	<b>115,15</b>	<b>0,05</b>	<b>226,53</b>	<b>4,99</b>
<b>Desv. Padrão</b>	2,12	2,45	1,05	0,00	54,87	1,21

## Apêndice C – Tabelas Referentes a Prismas de Blocos Cerâmicos

Tabela C.1. - Resistência a compressão de prismas queimados a 700°C.

Identificação	Carga Última (kN)	Tensão Última (MPa)
PRM 1	103,50	2,20
PRM 2	98,83	2,10
PRM 3	102,40	2,17
PRM 4	78,93	1,67
<b>Médias</b>	<b>95,92</b>	<b>2,03</b>
<b>Desv. Pad.</b>	<b>11,50</b>	<b>0,24</b>

Tabela C.2. - Resistência a compressão de prismas queimados a 900°C.

Identificação	Carga Última (kN)	Tensão Última (MPa)
PRM 1	41,44	0,91
PRM 2	74,73	1,65
PRM 3	54,52	1,20
PRM 4	83,21	1,83
<b>Médias</b>	<b>63,48</b>	<b>1,40</b>
<b>Desv. Pad.</b>	<b>18,99</b>	<b>0,42</b>

Tabela C.3. - Resistência a compressão de corpos-de-prova de argamassa.

Corpos-de-prova	Resistência a compressão (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
1	0,798	1,556	2,891
2	1,092	1,776	2,715
3	1,058	2,329	2,889
4	1,517	1,793	2,932
5	0,986	1,599	3,203
6	1,102	1,672	2,432
Média	1,092	1,787	2,844
Desvio Padrão	0,237	0,281	0,256

## Apêndice D – Tabelas Referentes a Painéis de Paredes

Tabela D.1. - Dimensões, área, carga última e resistência a compressão de paredes.

Ident.	Carga Últ. (kN)	Tensão Últ. (MPa)	deslc vert. (mm)	deslc horiz. (mm)
PAR 1	125	0,88	2,41	1,92
PAR 2	175	1,24	2,54	2,12
PAR 3	200	1,41	2,17	0,02
PAR 4	175	1,24	1,52	0,40
<b>Médias</b>	<b>168,75</b>	<b>1,20</b>	<b>2,16</b>	<b>1,12</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>31,46</b>	<b>0,22</b>	<b>0,45</b>	<b>1,06</b>

Tabela D.2. - Carga última e resistência à compressão de prismas queimados à 900°C.

Identificação	Carga Última (kN)	Tensão Última (MPa)
P1 - 01	5,57	2,84
P1 - 02	15,62	7,96
P1 - 03	15,50	7,90
P1 - 04	17,19	8,76
P1 - 05	14,77	7,53
P2 - 01	13,80	7,03
P2 - 02	15,62	7,95
P2 - 03	15,26	7,77
P2 - 04	15,26	7,77
P3 - 01	16,10	8,20
P3 - 02	15,62	7,96
P3 - 03	15,74	8,02
P3 - 04	12,59	6,42
P3 - 05	14,53	7,404
P3 - 06	13,56	6,91
P4 - 01	15,02	7,65
P4 - 02	16,35	8,33
P4 - 03	15,74	8,02
P4 - 04	16,11	8,20
P4 - 05	15,26	7,77
P4 - 06	16,11	8,20
<b>Médias</b>	<b>15,23</b>	<b>7,76</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>1,10</b>	<b>0,56</b>

## Apêndice E – Tabelas referentes a Modelagem Numérica

Tabela E.1. - Modelagens de corpos-de-prova cilíndricos de cerâmica vermelha.

Corpos-de-prova	Temp. Queima (°C)	E (Mpa)	$\gamma$	Desl. Calc (mm)	Desl. Med. (mm)	Variação (%)
40,00	700,00	4.287,69	0,20	0,26	0,24	9,58
40,00	700,00	2.332,13	0,22	0,48	0,24	100,83
40,00	700,00	2.009,96	0,27	0,56	0,24	132,50
50,00	700,00	4.287,69	0,20	0,15	0,22	30,91
50,00	700,00	2.332,13	0,22	0,28	0,22	26,82
50,00	700,00	2.009,96	0,27	0,32	0,22	46,82
60,00	700,00	4.287,69	0,20	0,18	0,27	34,81
60,00	700,00	2.332,13	0,22	0,32	0,27	19,63
60,00	700,00	2.009,96	0,27	0,37	0,27	38,15
40,00	900,00	5.370,55	0,12	0,35	0,28	25,71
40,00	900,00	2.538,50	0,20	0,74	0,28	165,36
40,00	900,00	3.755,13	0,24	0,50	0,28	78,93
50,00	900,00	5.370,55	0,12	0,20	0,31	34,84
50,00	900,00	2.538,50	0,20	0,43	0,31	37,10
50,00	900,00	3.755,13	0,24	0,29	0,31	7,42
60,00	900,00	5.370,55	0,12	0,24	0,31	21,29
60,00	900,00	2.538,50	0,20	0,51	0,31	65,81
60,00	900,00	3.755,13	0,24	0,35	0,31	11,94