

**AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS NÃO-CONVENCIONAIS DE
LABORATÓRIO PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO
MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE MATERIAIS CERÂMICOS
VERMELHOS**

Felipe Fraga de Almeida

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF

Campos dos Goytacazes – RJ

Abril, 2012

**AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS NÃO-CONVENCIONAIS DE
LABORATÓRIO PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO
MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE MATERIAIS CERÂMICOS
VERMELHOS**

Felipe Fraga de Almeida

“Dissertação de Mestrado apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

Orientador: Prof. D.Sc. Paulo César de Almeida Maia

Coorientador: Prof. D. Sc. Gustavo de Castro Xavier

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF

Campos dos Goytacazes – RJ

Abril, 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

22/2013

Almeida, Felipe Fraga de

Avaliação dos procedimentos não-convencionais de laboratório para determinação do comportamento mecânico e de durabilidade de materiais cerâmicos vermelhos / Felipe Fraga de Almeida. – Campos dos Goytacazes, 2012.

xviii, 107 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, 2012.

Orientador: Paulo César de Almeida Maia.

Co-orientador: Gustavo de Castro Xavier.

Área de concentração: Geotecnia.

Bibliografia: f. 101-107.

1. CERÂMICA 2. ENSAIOS DE LABORATÓRIO 3. MINI-PRESSIÔMETRO 4. MICRO DEVAL 5. SLAKE-DURABILITY I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título.

**AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS NÃO-CONVENCIONAIS DE
LABORATÓRIO PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO
MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE MATERIAIS CERÂMICOS
VERMELHOS**

Felipe Fraga de Almeida

“Dissertação de Mestrado apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

Aprovado em 02 de abril de 2012

Comissão Examinadora:

Prof. Itamara Farias Leite D. Sc., UFPB/CT/DEMAT

Prof. Fernando Saboya de Albuquerque Júnior D. Sc., UENF/CCT/LECIV

Prof. Gustavo de Castro Xavier D. Sc., UENF/CCT/LECIV
Co-Orientador

Prof. Paulo César de Almeida Maia D. Sc., UENF/CCT/LECIV
Orientador

Aos meus pais, Walter e Eloisa, e irmãos, por não medirem esforços para a minha educação.

Ao Ronaldo Sardinha pelo total apoio, incentivo e amizade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela força e coragem para superar os obstáculos da vida.

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.

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

Ao Laboratório de Engenharia Civil – LECIV, por ter me oferecido condições para a realização deste trabalho, em especial, aos técnicos Milton Pereira Soares Júnior e Vanuzia Almeida dos Santos Ferreira.

Ao Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV, pela realização de alguns ensaios e à técnica Luciana Lezira Pereira de Almeida.

Ao orientador Prof. D. Sc. Paulo César de Almeida Maia 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.

Ao coorientador Prof. D. Sc. Gustavo de Castro Xavier por sua presença centrada e regrada, motivação e atitude sempre servil ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e funcionários do LECIV pelo incentivo, estímulo e ensinamentos.

Aos amigos, Zélia, Aline, Mirian, Suzane, Izabel, Wagner pelo companheirismo, amizade, carinho, paciência, estímulos, atenção, risos e momentos de descontração.

A todos que, mesmo não sendo citados, ofereceram-me apoio para a realização deste, deixo meu humilde agradecimento, muito obrigado.

***“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais volta ao seu tamanho original”***

Albert Einstein

Sumário

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE ABREVIÇÕES E SÍMBOLOS.....	XVI
RESUMO	XIX
ABSTRACT	XX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVO GERAL	2
1.3. ESCOPO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE MATERIAIS CERÂMICOS.....	3
2.2. FABRICAÇÃO DE PRODUTOS CERÂMICOS	4
2.2.1. <i>Matéria Prima</i>	4
2.2.2. <i>Moldagem</i>	5
2.2.3. <i>Secagem</i>	7
2.2.4. <i>Queima</i>	8
2.3. PROPRIEDADES DA MATÉRIA PRIMA.....	12
2.3.1. <i>Distribuição Granulométrica</i>	12
2.3.2. <i>Limite de Atterberg</i>	12
2.3.3. <i>Massa Específica dos Grãos</i>	13
2.3.4. <i>Composição Química</i>	13
2.3.5. <i>Mudança de Fase</i>	14
2.3.6. <i>Composição Mineralógica</i>	16
2.4. PROPRIEDADES FÍSICAS DO MATERIAL CERÂMICO	18
2.4.1. <i>Absorção de Água</i>	18
2.4.2. <i>Porosidade Aparente</i>	19
2.4.3. <i>Retração Linear</i>	20
2.4.4. <i>Massa Específica Aparente</i>	21
2.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS CERÂMICOS.....	21
2.5.1. <i>Tensão de Ruptura à Flexão</i>	23

2.5.2.	<i>Resistência à Compressão Uniaxial</i>	25
2.5.3.	<i>Resistência à Tração pelo Ensaio de Compressão Diametral</i>	27
2.5.4.	<i>Resistência à Tração pelo Ensaio Brasileiro</i>	29
2.5.5.	<i>Resistência à Tração pelo Ensaio de Cunha</i>	30
2.5.6.	<i>Resistência à Tração pelo Ensaio Mini-Pressiométrico</i>	33
2.6.	PROPRIEDADES DE DURABILIDADE	36
2.6.1.	<i>Slake Durability</i>	37
2.6.2.	<i>Micro-Deval</i>	39
2.6.3.	<i>Abrasão Los Angeles</i>	41
2.6.4.	<i>Desgaste Amsler</i>	43
2.7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE MATERIAIS CERÂMICOS	44
3.	MATERIAL DE ESTUDO E PROGRAMA EXPERIMENTAL	46
3.1.	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	46
3.1.1.	<i>Vigotas</i>	48
3.1.2.	<i>Cilíndricos</i>	51
3.2.	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....	55
3.2.1.	<i>Tensão de Ruptura à Flexão</i>	55
3.2.2.	<i>Compressão Uniaxial</i>	57
3.2.3.	<i>Compressão Diametral</i>	58
3.2.4.	<i>Ensaio Brasileiro</i>	59
3.2.5.	<i>Ensaio de Cunha</i>	60
3.2.6.	<i>Ensaio Mini-Pressiométrico</i>	63
3.3.	ENSAIOS DE DURABILIDADE.....	64
3.3.1.	<i>Ensaio Slake-Durability</i>	66
3.3.2.	<i>Ensaio Micro Deval</i>	68
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1.	MATÉRIA PRIMA: SOLO	70
4.1.1.	<i>Distribuição Granulométrica</i>	71
4.1.2.	<i>Limite de Atterberg</i>	73
4.1.3.	<i>Massa Específica dos Grãos</i>	74
4.1.4.	<i>Composição Química</i>	74
4.1.5.	<i>Mudanças de Fase</i>	74
4.1.6.	<i>Composição Mineralógica</i>	76

4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS	76
4.2.1. <i>Absorção de Água</i>	76
4.2.2. <i>Porosidade Aparente</i>	78
4.2.3. <i>Retração Linear</i>	80
4.2.4. <i>Massa Específica Aparente</i>	82
4.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	83
4.3.1. <i>Resistência à Ruptura à Flexão</i>	83
4.3.2. <i>Resistência à Compressão Uniaxial</i>	85
4.3.3. <i>Resistência à Tração pelo Ensaio de Compressão Diametral</i>	89
4.3.4. <i>Resistência à Tração pelo Ensaio Brasileiro</i>	91
4.3.5. <i>Resistência à Tração pelo Ensaio de Cunha</i>	93
4.3.6. <i>Resistência à Tração pelo Mini-Pressiômetro</i>	94
4.4. ENSAIOS DE DURABILIDADE.....	100
4.4.1. <i>Slake-Durability</i>	100
4.4.2. <i>Micro Deval</i>	101
5. CONCLUSÕES.....	102
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva ATD esquemática do argilomineral caulinita (Santos, 1989).	15
Figura 2.2 - Difração de Raios X por um mineral. (Ohlweiler, 1981).....	17
Figura 2.3 – Equipamento de ensaio, prensa hidráulica. Catálogo EMIC (2012).	27
Figura 2.4 – (a) Tensões de tração uniformes devido à carga concentrada; (b) Tensões de tração não-uniformes devido à influência do friso; (c) Deformações horizontais devido à carga concentrada; (d) Deformações horizontais devido à influência do friso.(Hondros, 1998).....	28
Figura 2.5 – Forças iguais e opostas geradas no corpo de prova no ensaio de cunha (DONOVAN e KARFAKIS, 2004)	31
Figura 2.6 – Força de compressão aplicada por meio de uma cunha (DONOVAN e KARFAKIS, 2004).	31
Figura 2.7 – Curva típica do mini-pressiometro versus volume (Hobbs <i>et al.</i> , 1998).	34
Figura 2.8 – Tensões radiais e circunferenciais (a); Tensões na fratura (b); cisalhamento da fratura com pré-furo do ensaio mini-preiometro (c).	35
Figura 2.9 – Comparação do Mini-pressiometro e Ensaio Brasileiro (Hobbs <i>et al.</i> , 1998).	36
Figura 2.10 – Classificação dos ensaios para avaliação da degradação.....	37
Figura 2.11 – Equipamento para o ensaio de desgaste Slake Durability (MATEST, 2012).	39
Figura 2.12 – Equipamento para o ensaio de desgaste Micro- Deval (MATEST, 2012).	40
Figura 2.13 – Equipamento Los Angeles (MATEST, 2012).	42
Figura 2.14 – Equipamento Amsler (MATEST, 2012).....	44
Figura 3.1 – Forma dos Corpos de Prova.	48
Figura 3.2 – Corpo de prova: Vigota.	49
Figura 3.3 – Material de ensaio micro Deval; Detalhe: as arestas.	50
Figura 3.4 – Material de ensaio micro deval; Detalhe: sem arestas.....	50
Figura 3.5 – Corpos de Prova: Cilíndricos.	52

Figura 3.6 – Corpos de prova do slake-durability: arredondamento das arestas.	52
Figura 3.7 – Corpos de prova entalhados para o ensaio de cunha.....	53
Figura 3.8 – Corpo de prova com furo guia central para o ensaio mini- pressiométrico.....	53
Figura 3.9 – Corpo de prova furado para o ensaio mini-pressiométrico.	54
Figura 3.10 – Corpo de prova furado com a borracha para o ensaio mini- pressiométrico.....	54
Figura 3.11 – Base de Duralumínio – Utilizado para o Mini-pressiômetro.	56
Figura 3.12 – Disposição da base e corpo de prova para o ensaio de resistência à tração pelo ensaio de compressão uniaxial.	57
Figura 3.13 – Ensaio de compressão uniaxial.	58
Figura 3.14 - Ensaio de compressão diametral.....	59
Figura 3.15 – Ensaio brasileiro.	60
Figura 3.16 – Cunha utilizada no ensaio de cunha.....	61
Figura 3.17 - Tilt Test.....	62
Figura 3.18 – Disposição do corpo de prova na cunha para o ensaio de cunha.	62
Figura 3.19 – Detalhe do corpo de prova entalhado e a cunha.	63
Figura 3.20 – Disposição do corpo de prova para o ensaio mini-pressiométrico.	64
Figura 3.21 – Tambores e corpos de prova.....	65
Figura 3.22 – Cuba + Motor e Painel do Equipamento para os ensaios de sSlake-Durability e micro Deval.....	66
Figura 3.23 – Corpos de prova antes do primeiro ciclo, Slake-Durability.....	67
Figura 3.24 - Corpos de prova depois do quinto ciclo, Slake-Durability.....	67
Figura 3.25 – Material antes do ensaio micro Deval.	68
Figura 3.26 – Material depois do ensaio micro Deval.	69
Figura 4.1 – Processo de quarteamento da Matéria Prima.....	70
Figura 4.2 – Processo de quarteamento da Matéria Prima.....	70
Figura 4.3 – Material Retido, Peneira nº20.	71
Figura 4.4 – Material Passante, Peneira nº20.....	71
Figura 4.5 – Material destorroado com auxílio de mão de gral e almofariz.....	71
Figura 4.6 –Material passante na peneira nº40.	71

Figura 4.7 – Ensaio de Sedimentação.....	72
Figura 4.8 - Análise Granulométrica da argila da Baixada de Campos – LECIV (2011).....	73
Figura 4.9 – Resultados de ATD e TG da argila – LAMAV (2011).....	75
Figura 4.10 – Difratoograma de Raio-X. C – Caulinita; Gi – Gibsita; Go – Goetita e Q – Quartzo – LAMAV (2011).	76
Figura 4.11 – Variação de absorção de água em produtos cerâmicos.	78
Figura 4.12 – Variação de porosidade aparente em produtos cerâmicos.	79
Figura 4.13 - Variação da retração linear em produtos cerâmicos.....	81
Figura 4.14 – Variação da massa específica aparente em produtos cerâmicos.	83
Figura 4.15 – Variação da tensão de ruptura à flexão em produtos cerâmicos.	84
Figura 4.16 – Métodos de determinação do módulo de elasticidade.	85
Figura 4.17 – Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial.....	87
Figura 4.18 – Valores médios de módulos de elasticidade em diferentes temperaturas de queima.	88
Figura 4.19 – Resultados da resistência à compressão uniaxial em diferentes temperaturas.	89
Figura 4.20 – Resultados do ensaio de compressão diametral em diferentes temperaturas.	90
Figura 4.21 – Resultados do ensaio diametral.....	91
Figura 4.22 – Resultados de resistência à tração pelo ensaio brasileiro e médias em diferentes temperaturas.	92
Figura 4.23 – Resultados do ensaio brasileiro.....	93
Figura 4.24 –Tensão VS Deformação – Ensaio Triaxial.	95
Figura 4.25 –Deformação Axial VS Deformação Volumétrica – Ensaio Triaxial.	95
Figura 4.26 –Tensão VS Deformação – Modelo Hiperbólico.	97
Figura 4.27 – Deformação Axial VS Deformação Volumétrica – Modelo Hiperbólico.	97
Figura 4.28 – Curva dos ensaios do mini-pressiômetro.....	98
Figura 4.30 – Comparação do mini-pressiômetro com o ensaio brasileiro.	99

Figura 4.31 – Resultados dos ensaios mini-pressiometro, brasileiro e diametral.	99
Figura 4.32 – Índice de desgaste slake-durability de acordo com o número de ciclos.	100
Figura 4.33 – Resultados dos ensaios slake-durability e micro Deval.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais transformações ocorridas em função da temperatura de queima nos processos cerâmicos. (Todor, 1976; Santos, 1975; Toledo, 2003; Boshi, 2010; Firing, 2010.)	11
Tabela 2.2 - Alguns parâmetros que influenciam as propriedades mecânicas de materiais cerâmicos, fonte: Zanotto <i>et al.</i> (1991).	22
Tabela 2.3 – Classificação das rochas de acordo com a resistência à compressão. ISRM (1977) (a).	26
Tabela 2.4 – Classificação das rochas de acordo com a resistência à compressão. ISRM (1978) (b).	27
Tabela 2.5 - Classificação da Durabilidade de acordo com a Perda de massa (Gamble, 1971; Maia, 2004).....	38
Tabela 2.6 – Faixa granulométrica com base estabilizada granulometricamente	42
Tabela 3.1 – Tipos de ensaios e quantidades de corpos de prova.	47
Tabela 4.1 – Valores do ensaio do Índice de Atterberg, LECIV (2011).....	73
Tabela 4.2 – Composição química do solo, LECIV (2011).	74
Tabela 4.3 – Resultados de absorção de água, LECIV (2011).....	77
Tabela 4.4 – Resultados de porosidade aparente, LECIV (2011).....	79
Tabela 4.5 – Resultados da retração linear, LECIV (2011).....	81
Tabela 4.6 – Resultados da massa específica aparente, LECIV.	82
Tabela 4.7 – Resultados da tensão de ruptura à flexão e σ à 500°C, 700°C e 900°C.	84
Tabela 4.8 – Resultados de resistência à compressão uniaxial à 500°C, 700°C e 900°C.	86
Tabela 4.9 - Resultados da resistência à compressão diametral à 500°C, 700°C e 900°C.....	89
Tabela 4.10 – Resultados do ensaio brasileiro à 500°C, 700°C e 900°C.....	91
Tabela 4.11 – Resultados dos parâmetros de resistência à tração obtidos pelo ensaio de cunha.	94
Tabela 4.12 – Resultados do ensaio mini-pressiômetro	98
Tabela 4.13 – Resultados do ensaio micro-Deval.....	101

LISTA DE ABREVIATÖES E SÍMBOLOS

ABC	Associação brasileira de cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Standard Test Methods
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodovias
ISRM	International Society Rocks Mechanics
JCPDS	Joint Comitee of Power Diffraction Standards (Banco de Dados)
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançados
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
AA	Absorção de Água
ATD	Análise Térmica Diferencial
DRX	Análise por Difração de Raio X
DTG	Curva Termogravimétrica Derivada
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
PA	Porosidade Aparente
RL	Retração Linear
TG	Análise Termogravimétrica
XRF	Análise por Fluorescência de Raio X
A	Área
a	Comprimento da trinca

b	Largura entre os apoios
d	Distância entre os planos atômicos
D	Diâmetro
F_v	Força vertical
h	Altura do corpo de prova
L	Distância entre os apoios
L_0	Comprimento inicial
L_f	Comprimento final
M_h	Massa úmida
M_i	Massa inicial
M_s	Massa seca
n	Números inteiros
P	Carga
P_{sp}	Carga aplicada horizontalmente
t	Espessura do corpo de prova
y	Deslocamento
E	Módulo de Elasticidade
P	Pressão da cavidade
P_f	Pressão na fratura
Id_{md}	Índice de Desgaste Micro Deval
Id_{sd}	Índice de Desgaste Slake-Durability
K_{ic}	Tenacidade à Fratura em Deformação Plana

LA	Índice de Abração Los Angeles
θ	Ângulo Bragg
α	Ângulo da cunha
μ	Ângulo de atrito
σ_{xx}	Carga concentrada
λ	Comprimento de onda
γ	Massa específica aparente
π	Número PI
σ_u	Resistência à compressão uniaxial
σ_f	Resistência à flexão
σ_{br}	Resistência à tração pelo ensaio brasileiro
σ_{cd}	Resistência à tração pelo ensaio de compressão diametral
σ_{mp}	Resistência à tração pelo ensaio mini-pressiométrico
σ_n	Tensão de tração máxima
σ_θ	Tensões circunferências
σ_i	Tensões iniciais
σ_r	Tensões radiais

RESUMO

As indústrias de cerâmicas vermelhas do Município de Campos dos Goytacazes, no Estado do Rio de Janeiro, representam, na atividade econômica, um dos polos mais importantes, possuindo mais de 130 empresas produtoras, as quais geram mais de 100 milhões de peças/mês, entre telhas, tijolos e lajotas. Este polo utiliza-se do solo encontrado na região. Sendo o material mais importante para a produção de artefatos cerâmicos, principalmente para a confecção de materiais utilizados pelas indústrias da construção civil e que é adotado, no Brasil, pelo termo de cerâmica vermelha, torna-se importante conhecer suas características. A utilização de ensaios convencionais vem sendo a única proposta para determinação das propriedades do material cerâmico. Essas propriedades ficam restritas às propriedades físicas do material cerâmico e a propriedade mecânica determinada pelo o ensaio de tensão de ruptura à flexão. Com isso, propõe a utilização de ensaios, denominados de, não-convencionais, para a determinação das propriedades mecânicas mais abrangente e também de durabilidade do material cerâmico. Para os não-convencionais são utilizados os ensaios de resistência à tração pelo, ensaio compressão diametral, ensaio brasileiro, método de cunha e também pelo ensaio mini-pressiométrico. Os ensaios de durabilidade proposto são os ensaios slake durability e o micro-Deval. Os ensaios não-convencionais, principalmente os ensaios de tração à compressão diametral, ensaios brasileiro e o mini-pressiométrico, demonstram uma boa relação entre si, tornando esses ensaios coerentes. As amostras testadas pelo método da cunha apresentaram menores valores, isto deve estar relacionado com falhas ocorridas durante o processo de confecção e execução do ensaio. O material cerâmico apresenta uma durabilidade muito elevada, como foi determinado pelos ensaios de durabilidade.

Palavras-chave: Cerâmica; Ensaio de Laboratório; Mini-presiiômetro; Micro Deval; Slake-Durability.

ABSTRACT

The red ceramic industries in the city of Campos dos Goytacazes, State of Rio de Janeiro, representing one of the most important poles of economic activity, with over 130 manufacturing companies, which generate more than 100 million pieces / month, between tiles, bricks and tiles. This pole uses the soil found in the region. This soil is the most important material for the production of ceramic artifacts, mainly for the manufacture of materials used for construction industries, and is adopted in Brazil by the term "red ceramic", making it important to know its features. The use of standard assays has been the only proposal for determining the properties of the ceramic material. These properties are restricted to the physical properties of the ceramic material and the mechanical properties determined by the voltage rupture test. Thus, proposes the use of assays, called non-standard for further determination of mechanical properties and also durability of the ceramic material. For non-conventional tests, were used the tensile strength, diametral compression test, Brazilian test, wedge method and also the mini-pressiométrico test. For durability testing is proposed slake durability tests and micro-Deval. The non-conventional tests, particularly the tensile compressive diametral, Brazilian tests and mini-pressiométrico demonstrate a good relationship between them, making them consistent. The samples tested using the wedge method have a lower value, this should be related to failures during the process of making and performance of the test. The ceramic material has a very high durability, as determined by the durability testing.

Key words: Ceramic; Laboratory test; Mini-presiiômetro; Micro Deval; Slake-Durability.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

As indústrias de cerâmicas vermelhas do Município de Campos dos Goytacazes, no Estado do Rio de Janeiro, representam, na atividade econômica, um dos polos mais importantes, possuindo mais de 130 empresas produtoras, as quais geram mais de 100 milhões de peças/mês, entre telhas, tijolo e lajotas. Polo este, desenvolvido há 40 anos devido ao declínio da indústria açucareira (Alexandre, 1997; Ramos, 2006). Este fato só se torna possível por Campos dos Goytacazes apresentar aspectos geológicos favoráveis para a formação de depósitos sedimentares quaternários do tipo flúvio lacustres, formando as jazidas. Estas estão localizadas numa grande enseada ao sudeste do Município, aonde dispõem das principais olarias da região e que retiram a principal matéria prima que é a argila (Ramos, 2006). As argilas, para indústria cerâmica, são normalmente encontradas nas margens dos rios ou várzeas, originando camadas lenticulares alternadas de materiais finos e grosseiros (Ramos, 2006). Sendo o material mais importante para a produção de artefatos cerâmicos, principalmente para a confecção de materiais absorvidos pela indústria da construção civil e que é adotado, no Brasil, pelo termo de “cerâmica vermelha”, torna-se importante conhecer as características da matéria prima e também das cerâmicas. Dentre eles, as propriedades físicas, tenacidade, resistências mecânicas e de durabilidade (Xavier, 2001).

Na engenharia geotécnica os materiais cerâmicos envolvem processos similares aos que geram a formação de materiais rochosos: massa de solo submetida à elevada pressão e temperatura, à exceção do tempo. Podendo assim ser tratados como materiais rochosos. Isto se justifica pela similaridade entre as características físicas, de resistência, e deformabilidade entre os materiais. Sob este princípio a aplicação do conhecimento das técnicas de caracterização físicas, resistência e de durabilidade em materiais rochosos pode ser aplicado para o estudo de materiais cerâmicos.

1.2. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo a aplicação de ensaios convencionais e não-convencionais para avaliar o comportamento estrutural de peças cerâmicas queimadas em diferentes temperaturas. Para isto, são realizados ensaios convencionais (caracterização físicas e ensaio de tensão de ruptura à flexão) e ensaios não-convencionais (compressão uniaxial; compressão diametral; ensaio brasileiro; método da cunha; mini-pressiômetro) e ensaios de durabilidade (slake durability Test e ensaio micro-Deval).

1.3. Escopo

No primeiro capítulo, fez-se uma introdução do polo cerâmico instalado no município de Campos dos Goytacazes/RJ, a importância do conhecimento das propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade.

O Capítulo 2 é composto por uma revisão bibliográfica da fabricação do material cerâmico, as propriedades da matéria prima, suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade. Definição do material cerâmico e também suas propriedades mecânicas.

O Capítulo 3 é composto pela caracterização da matéria prima e suas propriedades físicas, químicas e mineralógica e do programa experimental utilizado neste trabalho.

O Capítulo 4 é a apresentação dos resultados e discussão das propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do material cerâmico.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões da dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão tratados assuntos que permitem a compreensão dos procedimentos que serão utilizados para caracterização do material cerâmico. Inicialmente fez-se a definição de materiais cerâmicos, dando-se ênfase na descrição dos processos de fabricação de produtos cerâmicos. Apresentam-se os principais procedimentos utilizados para caracterização da matéria prima utilizada na fabricação de produtos cerâmicos. Mostram-se os procedimentos de laboratório aplicados para determinação das características físicas, mecânicas e de durabilidade de produtos cerâmicos. Destaca-se que são apresentados tanto os procedimentos convencionais quanto os não-convencionais para determinação desta propriedades.

2.1. Considerações Iniciais sobre Materiais Cerâmicos

O termo “cerâmico” é derivado do grego *keramikos*, que significa “matéria prima queimada” ou “feito de terra”. A *American Ceramic Society* define materiais cerâmicos como todos os materiais de emprego em engenharia ou produtos químicos inorgânicos, tratados termicamente sob elevada temperatura.

De modo geral, podem-se classificar os materiais em dois grupos: os cerâmicos tradicionais e os cerâmicos técnicos. Os cerâmicos tradicionais utilizam como matéria-prima a argila, sílica e feldspato. Os cerâmicos técnicos são compostos por materiais puros ou quase puros. No entanto, para os materiais cerâmicos produzidos na Região de Campos dos Goytacazes-RJ, a classificação será apresentado mais adiante como uma sub-classificação dos cerâmicos tradicionais.

Do ponto de vista prático da engenharia civil o termo cerâmico está relacionado a materiais de construção derivados de argila que após um processo de moldagem ou conformação é submetido a elevadas temperaturas, resultando em produtos de boa resistência mecânica e considerável durabilidade.

É importante destacar que a produção de cerâmicas exige o uso de matéria prima com características específicas e a aplicação de técnica de fabricação controlada e adequada. Somente nestas condições os materiais cerâmicos vão atender as exigências prescritas nas normas técnicas pertinentes.

2.2. Fabricação de Produtos Cerâmicos

2.2.1. Matéria Prima

Os materiais que formam os cerâmicos tradicionais são as argilas, provenientes da composição das rochas. Essas argilas se classificam em duas categorias: argilas primárias e argilas secundárias ou sedimentares. As primeiras são formadas no mesmo local da rocha mãe e têm sido pouco atacadas pelos agentes físicos e químicos. Possuem partículas mais grossas e coloração mais clara, são pouco plásticas, porém de grande pureza. Argilas secundárias ou sedimentares, que representam as argilas da Região de Campos dos Goytacazes-RJ, são as que têm sido transportadas pela água, pelo vento e incluindo ainda o degelo. A água, especialmente, fragmenta a argila em partículas de diferentes tamanhos, fazendo com que as mais pesadas se depositem primeiro, enquanto que as outras vão se depositando de acordo com seu peso pelo decorrer do caminho, sendo que as partículas mais leves se depositam onde a água para (Xavier, 2001).

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 μm . 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 (ISRM, 1978; ABNT, 2005)

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).

Esses depósitos podem ser agrupados em dois tipos: sedimentos marinhos e fluvio-lacustres. Os sedimentos marinhos são constituídos quase que exclusivamente de areias quartzosas litorâneas de coloração amarelada e acinzentada. Já os sedimentos fluvio-lacustre apresentam uma litologia diversa, conforme a origem fluvial ou lacustre (Xavier, 2001). As olarias utilizam dos depósitos fluvio-lacustre como fonte de suas matérias primas para a produção dos materiais cerâmicos.

2.2.2. Moldagem

O material cerâmico é constituído basicamente por uma mistura de dois ou mais tipos de argilas com características diferentes. Dessa forma, uma das etapas fundamentais do processo de fabricação de produtos cerâmicos é a dosagem das matérias primas e dos aditivos, que deve seguir com rigor as formulações de massas, previamente estabelecidas. Os diferentes tipos de massas são preparados de acordo com a técnica a ser empregada para dar forma às peças. De modo geral, as massas podem ser classificadas em (ABC, 2010):

- Suspensão, também chamada barbotina, para obtenção de peças em moldes de gesso ou resinas porosas;
- Massas secas ou semi-secas, na forma granulada, para obtenção de peças por prensagem;

- Massas plásticas, para obtenção de peças por extrusão, seguida ou não de torneamento ou prensagem.

As olarias da região, em sua maioria, utilizam na mistura dois tipos de argilas: plásticas e não-plásticas, para produção de peças, principalmente por extrusão. A principal diferença entre essas argilas está na percentagem da fração argila que constitui esse solo. Solos com alto teores de argilas são chamados de argilas plásticas e solos com baixos teores de argilas de não-plásticas. No entanto, o presente trabalho, utiliza-se de mistura fornecida diretamente pela indústria, que é usada no seu processo de fabricação, para a confecção dos corpos de prova.

Existem diversos processos para dar forma às peças cerâmicas, e a seleção de um deles depende fundamentalmente de fatores econômicos, da geometria e das características do produto. Os métodos mais utilizados compreendem: colagem, prensagem, extrusão e torneamento (Oliveira, 2000).

- Colagem ou Fundição

Consiste em verter uma suspensão (barbotina) num molde de gesso, onde permanece durante certo tempo até que a água contida na suspensão seja absorvida pelo gesso; enquanto isso, as partículas sólidas vão se acomodando na superfície do molde, formando a parede da peça. O produto assim formado apresentará uma configuração externa que reproduz a forma interna do molde de gesso. Mais recentemente tem se difundido a fundição sob pressão em moldes de resina porosa (Oliveira, 2000).

- Prensagem

Nesta operação utiliza-se sempre que possível massas granuladas e com baixo teor de umidade. Diversos são os tipos de prensas utilizados, como fricção, hidráulica e hidráulica-mecânica, podendo ser de mono ou dupla ação e ainda ter dispositivos de vibração, vácuo e aquecimento. A massa granulada com praticamente 0% de umidade é colocada num molde que é comprimido e em consequência exercendo uma forte pressão, por igual, no molde (Oliveira, 2000).

- Extrusão

A massa plástica é colocada numa extrusora, também conhecida como maromba, onde é compactada e forçada por um pistão ou eixo helicoidal, através de bocal com determinado formato. Como resultado obtém-se uma coluna extrudada, de seção transversal com formato e dimensões desejadas; Em seguida, essa coluna é cortada, obtendo-se desse modo peças como tijolos vazados, blocos, tubos e outros produtos de formato regular (Oliveira, 2000).

Dentre esses métodos, o processamento por extrusão é amplamente utilizado pelas olarias da região de Campos dos Goytacazes, principalmente por ser um método rápido e contínuo. Apesar de este método apresentar essa vantagem, para a grande maioria dos corpos de prova extrudados, com a matéria prima da região, apresentam falhas internas devido a concentração de umidade aprisionada no seu interior. Essas falhas (heterogeneidade) alteram significativamente o comportamento mecânico e de durabilidade do material cerâmico. A fim de evitar tais falhas, dentre estes métodos, o processamento por prensagem apresenta uma melhor opção, pois garante um melhor controle na confecção, dimensão e uma queima mais homogênea dos produtos cerâmicos.

2.2.3. Secagem

Após a etapa de moldagem das peças, ainda se observa água de conformação na estrutura da massa. É durante a etapa de secagem que essa água residual caracterizada pela água presente nos poros e também pela água adsorvida é removida.

De acordo com Grayson (1985), durante o processo de remoção dessa água ocorre então a redução dos poros e, conseqüentemente, uma diminuição do volume da peça cerâmica. Para evitar acréscimos de tensões que provocam defeitos nas peças, é necessário eliminar a água de conformação, de forma lenta e gradual, em secadores intermitentes ou contínuos, a temperaturas variáveis entre 50 °C e 150 °C (Santos, 1989). No entanto, Grayson (1985) destaca que esse processo não deve ser excessivamente lento, pois pode ocorrer rompimento da estrutura da massa

cerâmica, gerando fissuras. A presença de materiais não-plásticos, como feldspato e quartzo, nas massas cerâmicas torna mais fácil o controle de eliminação da água de conformação.

Na etapa de secagem, a retração sofrida pelo corpo cerâmico é aproximadamente igual ao volume de água perdido. O ponto máximo de retração ocorre quando se observa uma fina camada de água recobrendo as partículas. Nesse momento a água presente no poro cerâmico já é praticamente ausente. Além deste ponto, a retração a ser sofrida pelo corpo não é tão significativa (Grayson, 1985).

2.2.4. Queima

Nessa etapa, os produtos ou peças cerâmicas adquirem suas propriedades finais como cor e resistências mecânicas. Após a secagem, as peças são levadas a fornos contínuos ou intermitentes onde são submetidas a elevadas temperaturas. Para a maioria dos tipos de produtos cerâmicos, as temperaturas de queima situam-se entre 800 °C e 1700 °C. De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC, 2010), geralmente os fornos operam em três fases: elevação da temperatura ambiente até a temperatura de queima desejada, estabilização da temperatura durante determinado tempo na temperatura especificada e redução da temperatura a valores inferiores a 200 °C.

Do ponto de vista de transformações intrínsecas da cerâmica, a etapa de queima pode ser separada em duas faixas de temperatura (Grayson, 1985). Da temperatura ambiente a 400°C ocorrem às maiores perdas físicas do material atribuídas às perdas de água e matéria orgânica. Nessa fase ocorre consolidação da forma da peça. A etapa seguinte ocorre entre 400°C e a temperatura final de queima desejada. São nelas que se observam importantes mudanças como dissociação, formação de compostos, transformação polimórfica, sinterização e vitrificação. Segundo Santos (1989), a argila caulinítica apresenta a partir da temperatura de 450°C, a reação de desoxidilação, perda de hidroxilas da estrutura cristalina dos argilominerais, e esta reação se completa ao atingir a temperatura de 600°C.

Durante o processo de queima da massa cerâmica observam-se importantes transformações químicas. O carbonato de cálcio (CaCO_3), por exemplo, apresenta perda associada à sua dissociação na temperatura de 700°C em virtude da liberação de CO_2 (Santos, 1975). De acordo com Machado 2005, os minerais de argila, como os silicatos hidratados, perdem sua combinação química com a água em temperaturas que podem variar de 300°C a 950°C .

As transformações observadas pela elevação da temperatura ocorrem devido à quebra das ligações gerando uma estrutura inicialmente instável, rearranjada até um ponto em que o nível de energia livre reduz até a estabilização. As alterações sofridas na estrutura da argila influenciam significativamente as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos produtos cerâmicos (Figueiredo, 2008).

Falhas e alterações bruscas durante este processo de queima podem alterar a microestrutura afetando significativamente o valor das propriedades finais dos corpos cerâmicos. Por isso, todo esse processo, deve ser realizado de maneira lenta e gradativa.

Todos os processos que envolvem perda de água ou gás devem ser devidamente completados antes que o processo de sinterização da argila ocorra. Como neste processo há uma grande eliminação de porosidade, se esse estágio ocorrer prematuramente antes que as reações se completem, pode haver o aparecimento de bolhas ou de inchamento da peça em temperaturas mais elevadas (Bachi, 2007).

Há ainda as alterações na estrutura cristalina das argilas. Em torno de 573°C o quartzo presente na argila altera de tamanho, com um brusco aumento de volume superior a 3%. Durante essa transformação a taxa de aquecimento deve ser lenta para evitar o surgimento das trincas provocadas pela brusca variação do volume (Bachi, 2007).

Entre 600°C e 700°C há uma espécie de soldagem ou ligação entre os pontos de contato das partículas argilosas, provocado por uma fase líquida. Esse é o primeiro fator que contribui para a elevação da resistência mecânica das argilas (Bachi, 2007).

Durante a operação de queima 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 (Alexandre, 2000) e (Xavier, 2001).

É comum observar variações dos comportamentos na massa cerâmica queimada. Isto se justifica pela heterogeneidade e diversidade de concentrações das constituintes da matéria prima, além de impurezas variadas como, por exemplo, óxido, hidróxidos, matéria orgânica e materiais não cristalinos.

As principais transformações em função da temperatura de queima são demonstradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Principais transformações ocorridas em função da temperatura de queima nos processos cerâmicos. (Todor, 1976; Santos, 1975; Toledo, 2003; Boshi, 2010; Firing, 2010.)

Temperatura (°C)	Efeitos Térmicos
Até ≈ 150	Evaporação de água de plasticidade, de amassamento e de capilaridade- águas não ligadas, presentes nos poros e preenchendo vazios.
≈ 100 - 400	Liberação contínua da água zeolítica (presente entre as moléculas de alguns tipos de argilas).
≈ 280	A gibsita [Al (OH) ₃] sofre desidroxilação
320- 360	Reação de desidroxilação da goethita [FeO(OH)], considerando: <ul style="list-style-type: none"> • 320 °C – <i>com substituição isomórfica por Al³⁺ (muito próximo da gibsita);</i> • 360 °C - <i>sem substituição por Al³⁺</i>
200 - 600	Oxidação da matéria orgânica
450- 600	Em caulinitas ocorre uma rápida saída de água, processo de desidroxilação, transformando-a na fase amorfa metacaulinita. Nesta etapa, os gases formados a partir de outros materiais são liberados. É importante que a atmosfera do forno seja oxidante para ocorram reações completa das liberações gasosas.
≈ 573	Inversão polimorfa do quartzo (SiO ₂) α↔β; provoca alterações de volume ± 2% (expande no aquecimento).
≈ 600 - 800	Impurezas solúveis (sais) que se precipitam dos interstícios das partículas fundem-se formando um filme líquido preenchendo poros capilares, estabelecendo pontos de contato entre partículas (uma espécie de pseudosinterização das argilas).
700-950	Ocorre a desidratação química contínua (perda da água de constituição das moléculas pelos processos de desidroxilação) dos minerais micáceos (muscovita), cujo efeito máximo ocorre em torno de 850°C.
≈ 675 - 950	Decomposição da calcita: CaCO ₃ = CaO + CO ₂ – óxido não reage até alcançar temperaturas acima de 1000°C. Há liberação de CO ₂ .
≈ 800 - 900	Argilas reagem com fluxos tais como impurezas tipo carbonatos (ex.: K ₂ CO ₃) para formarem uma fase líquida viscosa nos interstícios das partículas.
> 950	Ocorre a vitrificação seguida da cristalização
980	Nucleação da mulita
1050	Silica amorfa proveniente dos argilominerais inicia a formação da cristobalita
1050 - 1200	Feldspatos presentes na massa iniciam fusão, dissolvem a sílica e alguns outros materiais, favorecem a formação de uma fase vítrea da cerâmica com o fechamento de poros e rápido decréscimo da porosidade. Presença de mulita e cristobalita, dependendo da matéria-prima.

2.3. Propriedades da Matéria Prima

As propriedades da matéria prima utilizada na constituição de materiais cerâmicos podem ser avaliadas do ponto de vista físico ou químico. As propriedades físicas mais relevantes são: distribuição granulométrica; Limites de Atterberg e massa específica dos grãos. Do ponto de vista químico, procura-se caracterizar a composição química e mineralógica além das possíveis mudanças de fase que o material pode apresentar durante o processo de queima.

2.3.1. Distribuição Granulométrica

O ensaio utilizado para determinação da distribuição granulométrica da argila é feito segundo a Norma ABNT/NBR 7181/84. Solos com partículas nas frações grossa e fina utilizam a combinação entre o peneiramento e a sedimentação para se determinar a distribuição granulométrica.

2.3.2. Limite de Atterberg

Os limites de Atterberg são utilizados para permitir uma análise em relação à plasticidade, propriedade importante para a produção de cerâmica. E os procedimentos de ensaios são feitos de acordo com as Normas ABNT/NBR 6459/84 e ABNT/NBR 7180/84. O Limite de Liquidez (LL) por definição é o teor de umidade necessária para passar um determinado solo do estado plástico para o estado líquido. A definição de Limite de Plasticidade (LP) é determinada basicamente pelo cálculo da porcentagem de umidade onde o solo começa a se quebrar quando se tenta moldar, com ele, um cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento (Caputo, 2008). Este ensaio pode ser definido como a quantidade mínima de água, cuja massa plástica perde sua plasticidade tornando-se um material “sem coesão”; ou seja, é a umidade de transição entre os estados plástico e semi-sólido do solo. A diferença entre o LL e LP é o Índice de Plasticidade (IP). Quando

um material não tem plasticidade, o índice de plasticidade pode ser considerado com NP (não plástico) (Caputo, 2008).

2.3.3. Massa Específica dos Grãos

Por definição a massa da substância sólida é dividida pela sua unidade de volume. A variação do seu valor depende do constituinte mineralógico da partícula. Para a maioria dos solos este valor oscila entre 2,55 a 2,77 g/cm³, diminui para solos que apresentam elevado teor de matéria orgânica e aumenta para solos ricos em óxidos de ferro, conseqüentemente, o seu conhecimento é importante para complementar a caracterização de solo (Caputo, 2008).

2.3.4. Composição Química

A composição química de solos pode ser feita diretamente através da análise química total do material. Neste procedimento amostras de solo são submetidas a diferentes reações químicas que permitem identificar quantitativamente sua composição química. No entanto, procedimentos mais expeditos de laboratório permitem a determinação semi-quantitativa desta composição. Dentre estes procedimentos destaca-se a análise química por fluorescência de raios X (Emiliani e Corbara, 1999).

A análise química multielementar instrumental por fluorescência de raios X (FRX) é um método não destrutivo usado para análise elementar baseada na medida das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra, quando devidamente excitados por uma fonte de raios X. Isso se deve às transições de elétrons em camadas internas quando submetidos à referida excitação (Emiliani e Corbara, 1999).

Um sistema detector é usado para medir a posição de picos de fluorescência de raios X para uma identificação qualitativa dos elementos presentes e também para medir a intensidade dos picos para uma determinação quantitativa da composição (Emiliani e Corbara, 1999).

De acordo com Emiliani e Corbara (1999), esta técnica vem sendo utilizada principalmente para amostras sólidas, permitindo a determinação simultânea ou sequencial da concentração de vários elementos sem nenhum pré-tratamento químico, sem que a amostra seja danificada.

Bitencourt (2004) nos diz que os óxidos de ferro (Fe_2O_3) são responsáveis pela coloração vermelha ou marelada na maioria das argilas e reduz a plasticidade, mas diminuind a retração e facilitando a secagem.

Segundo Santos (1975), uma argila pode conter, além dos argilominerais, algumas impurezas, como por exemplo: quartzo, micas, feldspatos, óxidos e hidróxidos de alumínio, matéria orgânica e compostos químicos não cristalinos ou amorfos, visto que o conhecimento das respectivas porcentagens desses elementos é de grande importância, pois influenciará no comportamento físico-químico do conjunto. A análise química não permite uma avaliação completa da composição mineralógica e das propriedades físico-químicas das argilas, no entanto estabelece dados importantes que ajudam na identificação posterior dos minerais presentes na amostra.

2.3.5. Mudança de Fase

Os pontos de mudança de fase em solos podem ser avaliados através da análise térmica diferencial (ATD) e a termogravimétrica (TG). Estas duas técnicas são de grande aplicação no estudo de argilas como método de identificação de argilominerais e suas misturas (Santos, 1989). Análise térmica (TG) é uma técnica analítica usada para determinar a estabilidade térmica de materiais bem como a sua fração de componentes voláteis através do monitoramento da mudança de massa que ocorre quando a amostra do material é submetida à temperatura. A medição é normalmente conduzida sob atmosfera oxidante (ar) ou em uma atmosfera inerte (hélio e argônio e nitrogênio) e a massa é acompanhada como uma função da elevação da temperatura. Além do acompanhamento da mudança da massa do material, alguns instrumentos também registram a diferença de temperatura entre a espécie química e uma ou mais substâncias de referência (Mendhan *et al.*, 2002).

Na ATD é medida a diferença de energia cedida a uma substância e a um material de referência em função da temperatura.

Na análise térmica diferencial quando as transições ou reações entálpicas (endotérmica ou exotérmica) ocorrem, aparecem como deflexões, em sentidos opostos, cuja curva que apresenta a temperatura no eixo das abscissas (curva termodiferencial) (Figura 2.1) (Santos,1989). Isto ocorre devido a mudanças de fase, fusão, inversões da estrutura cristalina, sublimação, vaporização, reações de desidratação, reações de dissociação ou decomposição, oxidação, reações de redução e outras reações químicas. Normalmente, transições de fase, desidratações, reduções e algumas reações de decomposição produzem efeitos endotérmicos, enquanto que cristalização, oxidação e outras reações de decomposição produzem efeitos exotérmicos (Mothé e Azevedo, 2002). Estas reações entálpicas definem exatamente quais são as temperaturas, aonde as transformações atingem seu ápice. Com isso podemos então determinar as fases cristalinas e as fases amorfas da matéria prima.

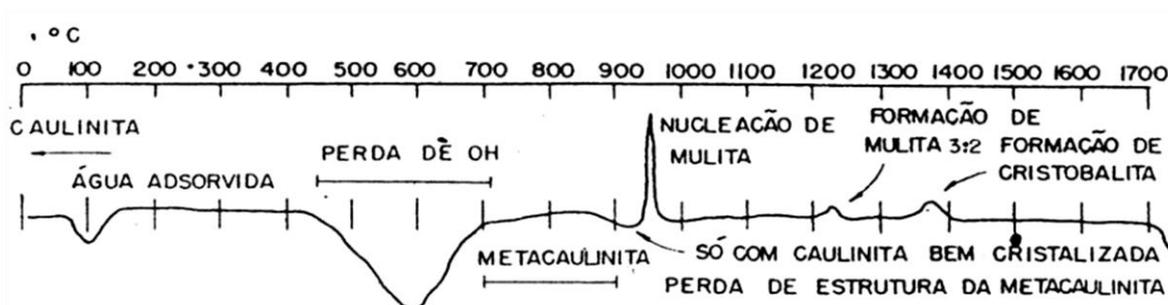


Figura 2.1 - Curva ATD esquemática do argilomineral caulinita (Santos, 1989).

O equipamento de termogravimetria consiste essencialmente, em microbalança acoplada a forno programado para que a temperatura aumente linearmente com o tempo. Os resultados são apresentados na forma de uma curva termogravimétrica (TG), em que se registra a variação de peso em função da temperatura ou do tempo, ou na forma de curva termogravimétrica derivada (DTG), em que se registra a primeira derivada da TG contra a variação da temperatura ou do tempo.

2.3.6. Composição Mineralógica

O procedimento de laboratório mais comum para determinação da composição mineralógica de solos é a difratometria de raios X, principalmente na fração argila. A aplicação desse ensaio é fundamental para identificação e caracterização dos compostos cristalinos presentes nos solos (Resende *et al.*, 2005). Assim, pode-se identificar e classificar qual é o tipo de argila está sendo utilizado para a confecção dos produtos cerâmicos.

Raios X são radiações eletromagnéticas, cujos comprimentos de onda situam-se entre 0,2 e 10 nanômetros ou 200 e 1000 picômetros (Resende *et al.*, 2005), causados pela desaceleração (refreamento) de elétrons de alta energia e/ou elétrons de transição das camadas internas dos átomos, isto ocorre quando um feixe destes elétrons acelerados por uma diferença de potencial de alguns milhares de volts é freado, alcançando um alvo metálico (o anodo) (Klugg e Alexander, 1974).

A difração de raios X pelos minerais resulta de um processo em que os raios X são dispersos pelos elétrons dos átomos sem a mudança de comprimento de onda. Um feixe difratado é produzido por dispersão só quando algumas condições geométricas, expressas pela Lei de Bragg, são satisfeitas (Resende *et al.*, 2005). O difratograma resultante de um cristal, compreendendo posições e intensidade, é uma propriedade física fundamental da substância, servido não somente para a identificação das fases cristalinas presentes como também ao estudo de sua estrutura. Vale ressaltar que a análise dos picos de difração permite ainda o conhecimento do tamanho, tipo e orientação da cela unitária, bem como uma avaliação qualitativa e quantitativa das fases cristalinas presentes na amostra (Klugg e Alexander, 1974).

A incidência de raios X sobre um átomo provoca o espalhamento da radiação em todas as direções. A interferência construtiva dos raios X espalhados, provenientes de vários átomos, caracteriza a difração. No caso de um cristal (Figura 2.2), a sequência ordenada e periódica de átomos, pode ser visualizada como um conjunto de planos, os quais são denominados planos coerentes dos raios X por um conjunto de planos cristalinos (hkl) ocorrem em um ângulo bem definido, denominado ângulo de Bragg (Klugg e Alexander, 1974).

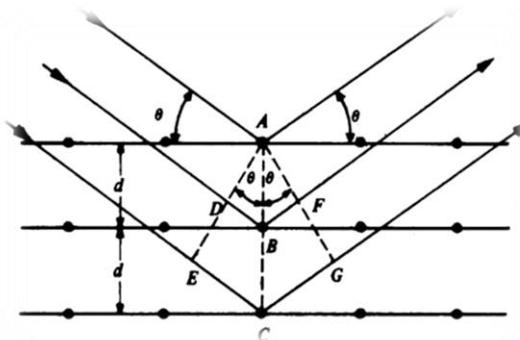


Figura 2.2 - Difração de Raios X por um mineral. (Ohlweiler, 1981).

Se ambos os planos difratarem em fase, a diferença de caminho deve ser um número inteiro de comprimentos de onda. A condição é estabelecida pela Lei de Bragg (Equação 2.1) (Klug e Alexander, 1974; Resende *et al.*,2005).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.1)$$

onde n é o número inteiro (1, 2, 3...) referente à ordem de difração; λ é o comprimento de onda dos raios X incidente (tidos como aproximadamente monocromáticos); d é a distância entre planos atômicos; θ é o ângulo de Bragg (ângulo de incidência e de reflexão dos raios X)

No caso, em que o comprimento de onda, λ , é conhecido e o ângulo θ é determinado experimentalmente, os valores das distâncias interplanares, d_{hkl} , são obtidos através da Lei de Bragg e comparados com valores tabelados pelo *Joint Comitee of Powder Diffraction Standards* (JCPDS) e assim identificados os argilominerais ou outras fases cristalinas presentes na amostra em análise.

O método da difração de raios-X em relação a outros métodos físicos, como a análise térmica diferencial, ou química, como a análise química, oferece a vantagem de o difratograma apresentar um número grande de picos, o que facilita a identificação. Isso é ainda mais vantajoso no caso de misturas onde pode haver superposição de picos, mas nunca de todos. No entanto, para a DRX, na análise de uma mistura, a posição dos picos não se altera (Santos, 1989).

2.4. Propriedades Físicas do Material Cerâmico

Os ensaios convencionais utilizados para a caracterização física das propriedades dos materiais cerâmicos são: absorção de água, porosidade aparente, retração linear, massa específica aparente. Essas propriedades definem a viabilidades dos materiais de acordo com a sua utilização. A seguir apresenta-se uma descrição dos procedimentos utilizados para a determinação destas propriedades.

2.4.1. Absorção de Água

O método de determinação da massa e da absorção de água (AA) é descrito na NBR 6480 – 1985 (telha cerâmica – Determinação da massa e da absorção de água) no qual se determina a absorção de água pela Equação 2.2 descrita abaixo:

$$AA (\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2.2)$$

onde M_s é a massa seca, M_h é a massa úmida. A massa seca (M_s) é a massa do corpo de prova após secagem em estufa a 105 ± 5 °C. Para obter o dado da massa úmida, o corpo de prova queimado é submetido à fervura com água por 2 horas. Ao término da fervura o corpo de prova foi enxuto em pano úmido para remoção da água excedente e em seguida, pesados.

As argilas brasileiras apresentam, em média, valores de absorção de água entre 3 e 27 % quando queimada a 950°C. Existe para este ensaio um valor máximo recomendado que classifica o material como apropriado para determinadas aplicações: 25 % para tijolos furados e de 20 % para telhas (Souza Santos, 1989; Figueiredo, 2008).

Esse fenômeno ocorre decréscimo da porosidade mesmo com uma maior perda ao fogo para os corpos queimados a 1100°C (Santos, 1975).

Alexandre (1997) observou que os produtos cerâmicos obtidos a partir das argilas de Campos dos Goytacazes apresentaram absorção de água de 20 e 15 % para os corpos de prova queimado a 950°C e 1050°C. Por outro lado, os corpos de prova queimados à 1200°C, apresentaram valores de absorção relativamente baixos.

Xavier (2001), também utilizou corpos de prova obtidos a partir das argilas de Campos do Goytacazes. O autor obteve em seus estudos valores de absorção de água incorporando resíduos de serragem de mármore e granito na massa cerâmica. Seus valores variam de 20,21% até 27,90%, em diferentes queimas.

2.4.2. Porosidade Aparente

O método de descrição da porosidade aparente (PA) é obtido pela Equação 2.3 descrito em seguida:

$$PA (\%) = \frac{M_h - M_s}{M_h - M_i} \times 100 \quad (2.3)$$

onde M_i é a massa imersa.

As porosidades aparentes dos corpos de prova moldadas com argilas brasileiras variam entre 5% a 43% (Santos, 1989).

Alexandre (1997) observou para as argilas de Campos dos Goytacazes, que seus valores de porosidade aparente são da ordem de 40%. O autor conclui que a porosidade aparente decrescente em relação com o aumento da temperatura de queima.

Xavier (2001) , em seu trabalho, demonstra diferentes valores de porosidade aparente incorporando resíduos de serragem de mármore e granito na massa cerâmica. O autor obteve corpos de prova queimados em 500°C, 700°C e 900°C e os valores de porosidade variam entre 33,32% a 44, 08%.

2.4.3. Retração Linear

A determinação da retração linear (RL) do corpo de prova é feita comparando-se as dimensões antes da secagem e após secagem em estufa a 105 ± 5 °C. Os valores da retração linear (RL) serão calculados de acordo com a Equação 2.4 descrita abaixo:

$$RL (\%) = \frac{L_0 - L_f}{L_0} \times 100 \quad (2.4)$$

onde L_0 é o comprimento inicial antes da secagem e L_f é o comprimento final após secagem. Assim, se obtém os valores correspondentes da retração linear dos corpos de prova.

Para corpos de prova extrudados o valor limite superior recomendado para retração linear (RL) após secagem é de 8,5%. Os valores limites recomendados para os corpos de prova extrudados são inferiores a 14%, quando queimados a 950°C (Santos, 1989).

Alexandre (1997) observou, para as argilas de Campos dos Goytacazes, que os valores de retração linear apresentam-se bem distintos à temperatura de 950°C, de 10%, dentro do aceitado, conforme Santos (1975). Essas mudanças são acompanhadas coerentemente pela variação da porosidade aparente e pelo aumento da massa específica aparente.

Xavier (2001) em seus estudos mostram diferentes valores de retração linear incorporando resíduos de serragem de mármore e granito na massa cerâmica. Seus valores variam entre 4,34% a 5,95%. Valores dentro dos limites observados por Santos (1975).

2.4.4. Massa Específica Aparente

A determinação da massa específica aparente (γ) é descrita segundo a norma NBR 8947 (1984) e será calculado pela Equação 2.5 descrita a seguir:

$$\gamma = \frac{M_s}{M_h - M_i} \quad (2.5)$$

Onde M_s , M_h e M_i , são, respectivamente, massa seca, massa úmida e massa imersa.

As argilas padrões brasileiras apresentam massa específica aparente variando de 1,7% a 2,5% (Santos, 1989).

Alexandre (1997) observou para as argilas de Campos dos Goytacazes, que há uma pequena variação nos valores de massa específica aparente para as amostras secas a 110°C e queimadas a 950°C, com o valor médio na ordem de 1,6 g/cm³. Em temperaturas elevadas como 1050°C e 1200°C, a massa específica aparente é, respectivamente, 1,6 g/cm³ e 2,3 g/cm³.

Xavier (2001) mostra diferente valor de massa específica aparente incorporando resíduos de serragem de mármore e granito na massa cerâmica. Variando entre 1,56 g/cm³ a 1,84 g/cm³.

2.5. 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 sofrem o carregamento (Smith, 1998).

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 resistência de uma peça cerâmica, como mostrado na Tabela 2.2.

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

Parâmetros do Material	Meio Ambiente
Composição	Temperatura
Estrutura Cristalina	Atmosfera
Microestrutura	Taxa de Deformação
Defeitos/Falhas	Fadiga estática ou cíclica
Condições Superficiais	Estado de Tensão
Tensões Internas	
Tamanho e Geometria da amostra	

A principal propriedade mecânica de interesse para os materiais cerâmicos é a resistência à tração e à compressão. A literatura indica, no entanto, que a resistência à tração é a propriedade que define as condições de utilização destes materiais. Convencionalmente, a resistência à tração é determinada através de ensaios de flexão. Apesar disto existem outros ensaios que permitem a determinação da resistência à tração. Este ensaios podem ser classificados como não-convencionais,

como por exemplo: compressão diametral, ensaio brasileiro, ensaio de cunha e mini-pressiométrico.

2.5.1. Tensão de Ruptura à Flexão

Os ensaios de flexão podem ser executados de acordo com dois procedimentos: o da norma ASTM-C99 (ABNT-NBR 12763), efetuado com três cutelos e designado “tração na flexão”; e, o da norma ASTM-C880, efetuado com quatro cutelos (dois de ação e dois de reação), designado “resistência à flexão”. São distintas as dimensões dos corpos de prova utilizados para cada um dos procedimentos e as especificações de seus resultados.

A resistência à flexão (σ_f) expressa a tensão máxima em um material não-dúctil, num carregamento em três pontos, conforme as prescrições sugeridas pela a NBR 9541 (1986). A resistência à flexão pode ser calculada a partir de Equação 2.6, descrito abaixo:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (2.6)$$

onde P é a carga atingida no instante da ruptura, L é a distância entre os apoios do corpo de prova, b é a largura do corpo de prova e h altura do corpo de prova.

É observado na literatura que os corpos de prova queimados em elevadas temperatura (acima de 1050°C), apresentara menores valores de porosidade e consequentemente maiores resistência a ruptura. Os valores recomendados de tensão de ruptura à flexão variam conforme o tipo de artefato produzido. Para os tijolos furados em cerâmica vermelha, admite-se valores de tensão de ruptura à flexão maiores 5,5 MPa. Também é recomendado que seja feito o ensaio para os corpos de prova secados a 110°C e o valor de referência mínimo é de 4,7 MPa. Santos (1989) destaca ainda, faixas mínimas de aceitabilidade a depender do tipo de produto a ser fabricado, para tijolos furados, o limite inferior é de 2,5 MPa. Para as telhas, o valor mínimo recomendado é de 3 MPa.

Alexandre (1997) observou para as argilas de Campos dos Goytacazes, que a de tensão de ruptura à flexão varia conforme a temperatura de queima, variando entre 2,5 MPa, 10 MPa e 30 MPa para 110°C, 950°C e 1200°C, respectivamente.

Xavier (2001), em seus estudos mostrara diferentes valores de tensão de ruptura à flexão incorporando resíduos de serragem de mármore e granito na massa cerâmica. Seus valores variam entre 5,11 MPa a 12,40 MPa, em diferentes temperaturas de queimas (500°C, 700°C e 900°C).

Amorós, et al. (2000) propõe determinar o módulo de elasticidade através dos resultados obtidos do ensaio de tensão de ruptura à flexão. Considerando um comportamento elástico, isto é, uma representação em linha reta do ensaio, pode-se então calcular o módulo de elasticidade, que é dado pela Equação 2.7:

$$E = \frac{PL^3}{4bh^3y} \quad (2.7)$$

onde P é a carga atingida no instante da ruptura, L é a distância entre os apoios do corpo de prova, b é a largura do corpo de prova, em centímetros e h é a altura do corpo de prova e y é o deslocamento.

Amorós, et al. (2000) ressaltara que os valores do módulo de elasticidade calculados a partir dos ensaios de flexão por 4 pontos são mais dispersos que os módulos de elasticidade dos ensaio de flexão por 3 pontos. Isto ocorre principalmente por pequenos erros experimentais durante a montagem e a preparação do ensaio. Com isso, o autor recomenda, a partir de seus resultados, o uso do método de ensaio de flexão por 3 pontos para o cálculo do módulo de elasticidade.

Os resultados obtidos por Amorós, et al. (2000) são para corpos de provas prensados em diferentes tensões de confinamento e diferentes teor de umidade da massa durante o processo de moldagem. Os módulos de elasticidade médio determinado a partir do ensaio de flexão por 3 pontos variara nafaixa de 1,73 – 5,41 GPa.

2.5.2. Resistência à Compressão Uniaxial

De modo geral, podemos dizer que a compressão é um esforço axial, que tende a provocar um encurtamento do corpo submetido a este esforço.

No ensaio de compressão uniaxial, o corpo de prova é submetido a uma força axial, distribuída de modo uniforme em toda a seção transversal do corpo de prova.

As relações que valem para a tração valem também para a compressão. Isso significa que um corpo submetido à compressão também sofre uma deformação elástica e a seguir uma deformação plástica.

Nos ensaios de compressão, a lei de Hooke é válida para a fase elástica das deformações, e é possível determinar o módulo de elasticidade para diferentes materiais.

O módulo de elasticidade é obtido do trecho da curva tensão-deformação vertical na fase elástica. O coeficiente de Poisson também é obtido do trecho assumido como elástico.

O ensaio de compressão uniaxial é exigível para todas as utilizações possíveis de uma rocha (revestimentos verticais, pisos, degraus e tampos). Este ensaio é realizado conforme a norma ISRM – *Commission on Testing Methods (1978) – Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*.

A Equação 2.8 permite o cálculo da resistência à compressão uniaxial de um corpo de prova cilíndrico:

$$\sigma_u = \frac{P}{A} \quad (2.8)$$

sendo, σ_u a resistência à compressão uniaxial, P a carga de ruptura e A a área da seção transversal do cilindro.

Miller (2008) realizou ensaios de compressão em corpos cerâmicos cilíndricos, queimados em 700°C e 900°C. O ensaio forneceu deformações máximas

com valores aproximados (0,35%). O valor do módulo de elasticidade cresce de forma proporcionalmente inversa com o diâmetro do corpo de prova, indicando que amostras menores são mais rígidas. Menor rigidez de amostras de menor diâmetro é provavelmente resultados dos defeitos provocados pelo tratamento térmico, que se propagam em maior grau.

Os valores, dos módulos de elasticidade, são compatíveis com os encontrados por Garcia (2000), em ensaios com meio blocos estruturais cerâmicos, o valor médio encontrado por esta autora para a o bloco cerâmico por ela estudado foi de 4,1 MPa.

O ensaio de compressão uniaxial é amplamente utilizado na engenharia geotécnica com corpos de provas rochosos. Normalmente são rochas isotrópicas, de granulação fina a média, são por sua vez, normalmente mais resistentes. Utilizando a classificação de acordo com *Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masse* – ISRM (1977) pode-se classificar as rochas com base na resistência à compressão uniaxial de acordo com as Tabela 2.3 e Tabela 2.4. Assim, conhecendo os valores de compressão uniaxial em materiais cerâmicos, pode-se por analogia, classificar o material.

Tabela 2.3 – Classificação das rochas de acordo com a resistência à compressão. ISRM (1977) (a).

Classificação	σ_c (MPa)
Extremamente Branda	< 1
Muito Branda	1 - 5
Branda	5 - 25
Resistência média	25 - 50
Resistente	25 - 100
Muito Resistente	100 - 250
Extremamente Resistente	> 250

Tabela 2.4 – Classificação das rochas de acordo com a resistência à compressão. ISRM (1978) (b).

Intervalos Mpa	Símbolos		Designações	
> 200	S1	S1-2	Muito Elevada	Elevada
60 - 200	S2		Elevada	
20 - 60		S3	Média	Média
6 - 20	S4	S4-5	Baixa	Baixa
< 6	S5		Muito Baixa	

Para esse ensaio de resistência à compressão uniaxial, utiliza-se de prensas hidráulicas conforme mostra a Figura 2.3.



Figura 2.3 – Equipamento de ensaio, prensa hidráulica. Catálogo EMIC (2012).

2.5.3. Resistência à Tração pelo Ensaio de Compressão Diametral

Normalmente, o ensaio de resistência à compressão uniaxial é utilizado para a determinação do Módulo de Deformação (Módulo Young) e Coeficiente de Poisson em materiais rochosos, cimentícios e eventualmente em materiais cerâmicos. Para a determinação da resistência à tração, pode-se utilizar o ensaio de compressão

diametral. Este ensaio, quando aplicado em materiais de sistema cimentício é realizado de acordo com o “método brasileiro” ou “método Lobo Carneiro”, baseando-se nos procedimentos da norma NBR 7222 (ABNT, 1994), que consiste em submeter corpos de prova cilíndricos à compressão diametral com presença de frisos superior e inferior, Figura 2.4(b).

Estudos demonstram que na presença de frisos as tensões de tração ao longo do diâmetro solicitado diminuem seus valores (Figura 2.4b), ficando o centro do cilindro sob o friso com uma tensão de tração máxima (σ_N) inferior àquela gerada por igual carga agindo concentradamente (σ_{xx}). O aumento da largura do friso para a mesma força P aplicada reduz a tensão de tração ($\sigma_N < \sigma_{xx}$) (Hondros, 1998).

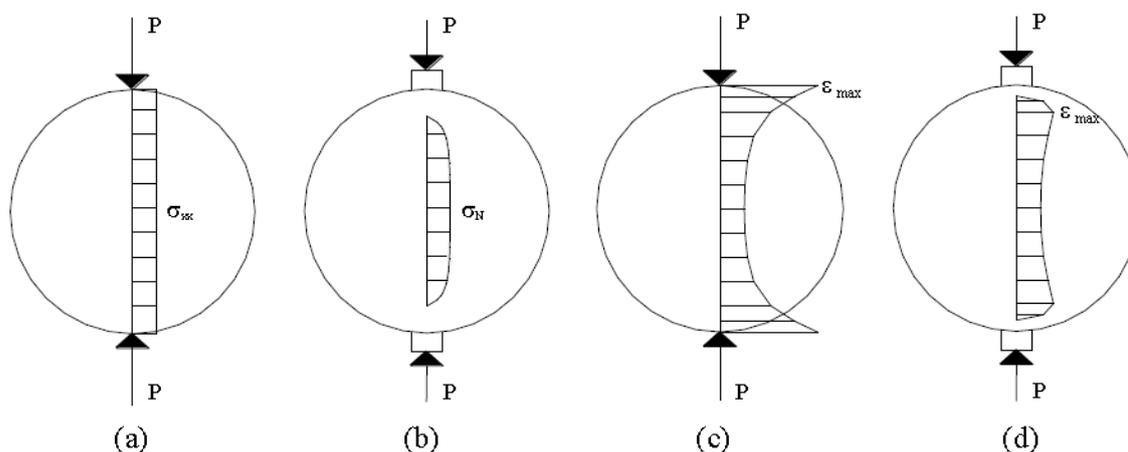


Figura 2.4 – (a) Tensões de tração uniformes devido à carga concentrada; (b) Tensões de tração não-uniformes devido à influência do friso; (c) Deformações horizontais devido à carga concentrada; (d) Deformações horizontais devido à influência do friso. (Hondros, 1998)

A tensão principal de tração, distribuída no plano diametral e normal ao plano da seção, é dada pela Equação 2.9.

$$\sigma_{cd} = \frac{2P}{\pi dL} \quad (2.9)$$

onde σ_{cd} é a resistência à tração; P é a carga de ruptura aplicada ao longo da geratriz; d é o diâmetro do corpo-de-prova e; L é o comprimento do corpo-de-prova. Este ensaio é executado numa prensa hidráulica (Figura 2.3).

Conde et al. (2004) realizou ensaios de resistência mecânica para a determinação de parâmetros do material rochoso. Foram utilizadas amostras das rochas intactas e dos agregados. Para este ensaio, foi utilizado segundo o procedimento realizado pela ISRM – *Commission on Testing Methods (1977) – Suggested Method for Determining Indirect Tensile Strength by the Brazil Test*. Em seus estudos, em diferentes calcários, obtiveram valores mínimos variando de 5,36 MPa a 6,57 MPa e valores máximos de 8,32 MPa a 11,06 MPa. Suas conclusões estão ligadas aos valores de resistência das rochas aumentam com a diminuição da perda por desgaste de Los Angeles.

Borlini, et al. (2006), avalia a cinza do bagaço de cana de açúcar e da sua granulometria nas propriedades físicas e mecânicas de cerâmica argilosa. Para um dos ensaios mecânicos, utiliza a compressão diametral. O autor observou um decréscimo da resistência mecânica devido à incorporação de cinza. Quanto maior a percentagem de cinza incorporada, menor é a resistência mecânica, exceto para incorporação em pequenas proporções (5%). O autor sugere que a cinza pode estar atuando como defeito crítico na cerâmica. Para a resistência à compressão diametral obteve-se valores entre 28 MPa, sem a incorporação da cinza e chegando a decrescer até por volta de 14 MPa, com a incorporação de 20% de cinza com maiores dimensões.

Romano (2006) utilizou o ensaio de compressão diametral segundo a norma ASTM C 496 – *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*, 1990. Foram obtidas as propriedades das cerâmicas porosas pela técnica de incorporação de espuma. Observou que a compressão diametral é influenciada pela temperatura de queima de maneira significativa. Os ensaios mostram que a resistência mecânica à compressão diametral para 110°C é 0,1 MPa e cresce até 18,6 MPa para 1500°C.

2.5.4. Resistência à Tração pelo Ensaio Brasileiro

Este ensaio é destinado para medir indiretamente a resistência à tração por compressão nos corpos de provas. A justificativa para o ensaio é baseada em circunstâncias experimentais em que a maioria das amostras fissure no campo de

tensões biaxiais, na tensão axial na força de resistência à tração uniaxial quando a tensão principal é a tração e a outra tensão principal finita é compressiva com a magnitude não excedendo três vezes que a tensão principal de tração. Para este ensaio, utiliza-se o procedimento realizado pela ISRM – *Commission on Testing Methods (1977) – Suggested Method for Determining Indirect Tensile Strength by the Brazil Test*.

Neste caso, a resistência mecânica é calculada a partir da Equação 2.10, a seguir:

$$\sigma_{br} = \frac{0,636P}{Dt} \quad (2.10)$$

onde P é carga atingida no instante da ruptura, D é o diâmetro do corpo de prova do ensaio, t é a espessura da corpo de prova do ensaio medido até o centro. Assim, se obtém os valores correspondentes da tensão do ensaio brasileiro dos corpos de prova.

2.5.5. Resistência à Tração pelo Ensaio de Cunha

O ensaio de cunha é proposto de maneira que a resistência da partícula seja submetida por uma medida mais descritiva da capacidade do material para resistir à ruptura. A tenacidade é uma propriedade intrínseca do material que expressa à resistência à propagação da ruptura e é uma indicação da energia requerida para criar uma nova superfície de ruptura no material. Mais especificamente, a tenacidade é um valor crítico do fator de intensidade de tensão, é a quantidade que caracteriza a severidade das circunstâncias de fratura dentro do material, afetada pela diminuição do tamanho dos grãos, tensões perto da ponta da fratura, geometria da fratura, forma do material e a forma do carregamento (Dowling, 1999).

Donovan e Karfakis (2004) propõe que o teste da cunha, que utiliza um corpo de prova na forma de um disco com uma borda entalhada (Figura 2.5), seja empregado como meio para adquirir valores de tenacidade satisfatórios para rápida identificação e futura comparação. O ensaio permite que um grande grupo de tipos

de rochas sejam testadas e assim estas relações chegariam a energia de quebra e distribuição do tamanho de fragmentos.

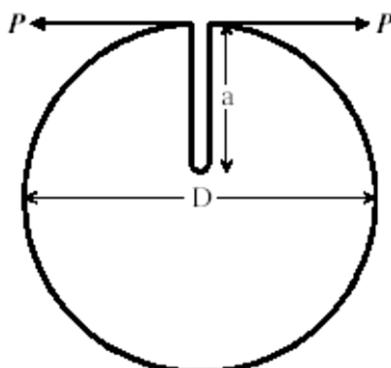


Figura 2.5 – Forças iguais e opostas geradas no corpo de prova no ensaio de cunha (DONOVAN e KARFAKIS, 2004)

A carga pode ser realizada com o uso de uma cunha introduzida em uma cavidade no corpo de prova. A força, P_{sp} , correspondente a componente horizontal da força que atua no início da extremidade da fratura do corpo de prova pode ser determinada pela análise de equilíbrio de forças apresentado, na Figura 2.6.

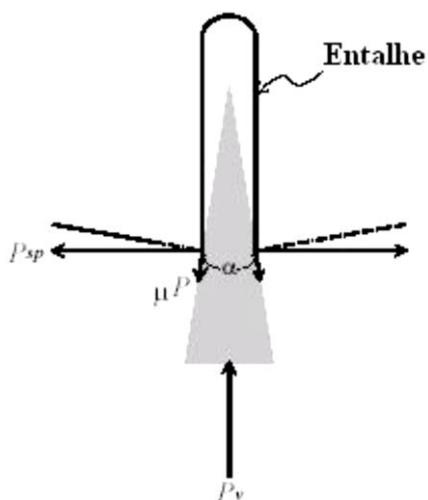


Figura 2.6 – Força de compressão aplicada por meio de uma cunha (DONOVAN e KARFAKIS, 2004).

A cunha promove uma vantagem mecânica quando empregado na cavidade e essa vantagem aumenta com a diminuição do ângulo em que a cunha é produzida. Porém, para entalhar uma fratura na rocha, a quantidade de atrito entre o material

da cunha e o corpo de prova pode ser significativa e as perdas por atrito podem ocorrer.

Em geral, os valores de tenacidade para as rochas não sofrem nenhum tipo de dependência com o tamanho da amostra. Mas o tamanho do corpo de prova não deve ser pequeno assim como a espessura não deve ser menor que a largura da zona de fratura (Barton, 1983).

Donovan e Karfakis (2004) usou taxas de carregamento (ISRM, 1983), para testar a fratura de rochas, variando de 0,01 a 0,03 MPa√m/s. Segundo, a velocidade de carregamento não deve ser superior a 25 MPa√m/s ou a fratura acontecerá em 10 segundos

O cálculo da tenacidade usando o ensaio da cunha pode ser feito de forma direta. O carregamento crítico, se não for o máximo carregamento, é determinado pela curva deslocamento-carregamento horizontal.

Uma análise estatística dos resultados de Donovan e Karfakis (2004) indica que os valores de tenacidade obtidos através do ensaio de cunha adaptado e dos ensaios convencionais para medir a tenacidade, não são significativamente diferentes (observou-se nível de confiança igual a 99%). A partir de uma análise inicial parece razoável esperar que o ensaio de cunha avalie de forma representativa o valor da tenacidade.

Whittaker, *et al.*, (1922) observou que as rochas com maiores tamanhos de partículas tiveram um maior valor de tenacidade.

As amostras empregadas para medir a tenacidade com um entalhe tendem a subestimar o valor de K_{Ic} (Tenacidade à Fratura em Deformação Plana), que representa a concentração de tensões na extremidade da abertura em que se inicia e se propaga a fissura, sendo em função da máxima carga aplicada e da geometria da amostra e da abertura. Esta é a maior desvantagem do uso de corpos de prova na forma de um disco com borda entalhada. Porém o propósito do ensaio é fornecer valores representativos de tenacidade em diferentes rochas, sendo considerados rápidos e fáceis a preparação e o ensaio nas amostras. Deste ponto de vista, o efeito limitado de um entalhe não será notado (Donovan e Karfakis, 2004).

Portanto o ensaio de cunha é capaz de produzir valores de tenacidade que podem ser usados como índices e avaliar as propriedades de fratura de diferentes rochas. A determinação da Tenacidade à Fratura em Deformação Plana, o ensaio de cunha, pode então ser calculado pela Equação 2.11 proposta por Donovan e Karfakis (2004).

$$K_{Ic} = 2\sqrt{\frac{D}{2a}} \left(\frac{F_v}{2 \tan(\alpha/2)} \frac{1 - \mu \tan(\alpha/2)}{1 + \mu \cot(\alpha/2)} \right) \times \left(\frac{a}{0,355715(D-a)^{3/2}} + \frac{1}{0,966528(D-a)^{1/2}} \right) \quad (2.11)$$

onde D é o diâmetro do corpo de prova; a é o comprimento da trinca; F_v é a força vertical aplicada; α é o ângulo da cunha e; μ é o coeficiente de atrito.

2.5.6. Resistência à Tração pelo Ensaio Mini-Pressiométrico

O ensaio configura-se com pré-furo nos corpos de prova, onde é introduzida uma membrana de diâmetro aproximadamente igual ao do furo, aplicando-se incrementos de pressão, mantidos por alguns segundos para que as leituras de volumes possam ser apuradas, para permitir que as deformações ocorram de maneira lenta.

Estudos feitos por Hobbs, *et al*, (1998) utilizara membranas de PVC e látex. As membranas de PVC demonstraram serem mais resistentes do que as de látex, pois estas tendem a se romper, porém, apresentam resultados mais consistentes do que a de PVC.

A Figura 2.7 apresenta um resultado típico do ensaio (Hobbs, *et al*, 1998). A porção inicial da curva representa a expansão da membrana antes do contato com as paredes da cavidade. A elevação da pressão, a partir do ponto A, representa o início da transferência de pressão para as paredes da cavidade. O ponto B indica o início da expansão da cavidade. As pressões neste ponto correspondem aproximadamente às pressões de campo. O ponto C indica a fratura na cavidade cuja pressão é denominada P_f . A maioria das amostras feito por Hobbs, *et al*, (1998)

rompeu-se pela formação de fraturas principalmente a partir da cavidade até a extremidade das amostras.

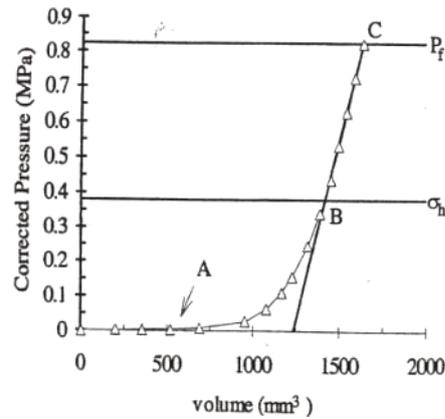


Figura 2.7 – Curva típica do mini-pressiometro versus volume (Hobbs *et al.*, 1998).

De acordo com Nair e Wood (1987) *apud* Hobbs, et al, (1998), as tensões diretas radiais e circunferenciais σ_r e σ_θ (Figura 2.8a), são inicialmente igual a σ_i . Uma vez que a pressão da cavidade P excede σ_i estes valores mudam para quantias iguais e opostas, tais como:

$$\sigma_r = \sigma_i + P \quad (2.12)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_i - P \quad (2.13)$$

Podemos ver, esquematicamente, ilustrado na Figura 2.8, a tensão circunferencial, σ_θ , se torna elástica uma vez que P excede $2\sigma_i$. Quando σ_θ excede a resistência à tração, fraturas elásticas ocorrem pelo desenvolvimento de fraturas radiais que começam na parede da cavidade.

A determinação da resistência à tração por meio do mini-pressiometro pode ser dado pela equação 2.14:

$$\sigma_{mp} = P_f - 2\sigma_i \quad (2.14)$$

No entanto, também é possível ocorrer fratura por cisalhamento, onde $(\sigma_r - \sigma_\theta)$ excede a resistência ao cisalhamento (Figura 2.8c). A fratura por cisalhamento é favorecida onde σ_i é relativamente maior em comparação com σ_{mp} , e onde a relação compressão e a resistência à tração é menor. Um valor para a tensão in-situ σ_i é necessário para a obtenção de resistência à tração a partir dos dados mini-pressiometro usando a Equação 2.13. De acordo com Clarke (1995) *apud* Hobbs, *et al.*, (1998), σ_i pode ser obtido a partir da curva pressão versus volume porque a expansão da cavidade torna-se linear uma vez que a pressão da cavidade superior σ_i (por exemplo, σ_i é dada a pressão relativa ao ponto B na Figura 2.7).

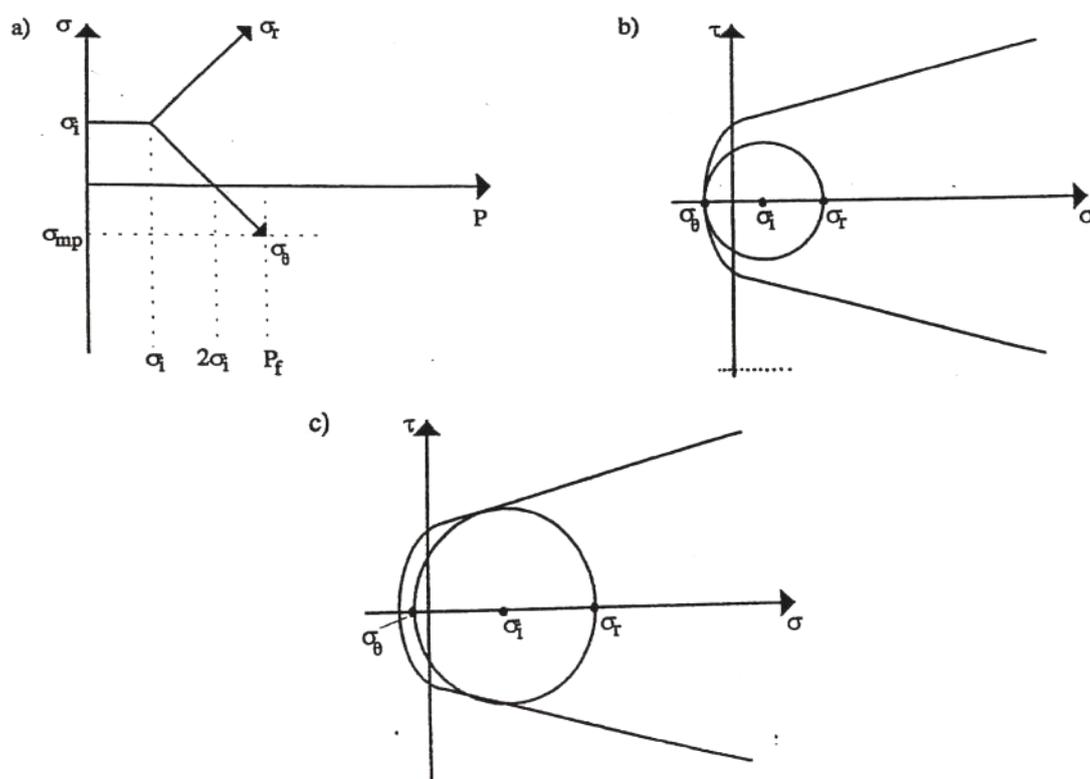


Figura 2.8 – Tensões radiais e circunferenciais (a); Tensões na fratura (b); cisalhamento da fratura com pré-furo do ensaio mini-pressiometro (c). (Hobbs et al., 1998).

Expansão da cavidade também ocorre antes σ_i é atingido, porque não há descarga localizada ao redor de qualquer cavidade, mas essa expansão é não-linear. O método de ajuste de curva deu σ_i os valores de cerca de 0,3 MPa.

Hobbs, Omar e West, (1998) apresenta os dados mini-pressiometro contra os dados do ensaio brasileiro na Figura 2.9. Os resultados mostram que existe uma boa concordância entre os métodos, especialmente onde a membrana de látex foi usada.

O único valor baixo de σ_{mp} pode ter sido resultado de um defeito dentro do corpo de prova induzida pelo processo de perfuração.

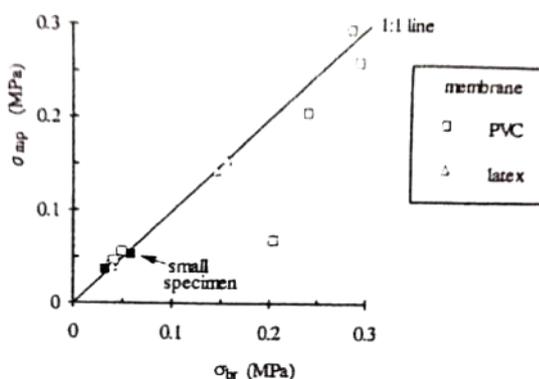


Figura 2.9 – Comparação do Mini-pressiômetro e Ensaio Brasileiro (Hobbs *et al.*, 1998).

A concordância com o ensaio brasileiro é válida com a curva utilizada na relação 1:1, e observou-se que os resultados não são sensíveis ao comprimento do pressiômetro, o tipo de bomba e sistema de controle de pressão, ou tamanho da amostra.

2.6. Propriedades de Durabilidade

Devido aos procedimentos de fabricação e às características da matéria-prima, os materiais cerâmicos podem ser afetados significativamente pelos agentes de degradação o que ocasiona frequentes problemas construtivos (Amorim, et al. 2001). As modificações das propriedades dos materiais de construção devido à degradação ocorrem de modo gradativo.

Salles (2006) apresenta uma classificação dos ensaios para caracterização das propriedades de durabilidade de materiais geotécnicos (Figura 2.9). A partir desta classificação nota-se que para determinação direta, expedita e de forma prévia à utilização do material, somente os ensaios de desgaste e de impacto são indicados. Considerando as características de utilização dos materiais cerâmicos, os ensaios de desgaste são mais apropriados, tendo em vista que os produtos cerâmicos não sofrem solicitações por impacto durante sua utilização.

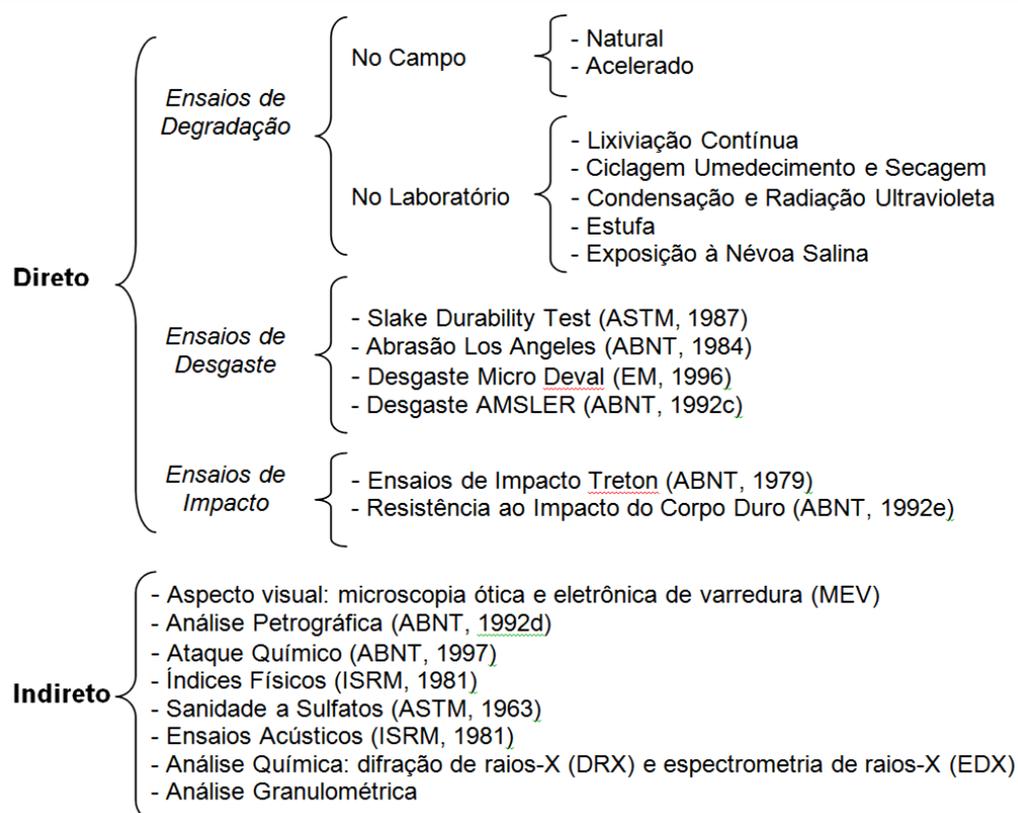


Figura 2.10 – Classificação dos ensaios para avaliação da degradação (Salles, 2006).

2.6.1. Slake Durability

Neste ensaio os corpos de prova são submetidos a uma baixa energia de desgaste superficial. Eles sofrem um processo de lavagem enquanto ocorre desgaste por abrasão entre as próprias partículas e a tela, o tambor fica parcialmente submerso e girando em torno de seu eixo. O ciclo torna-se completo após as rotações de 20 RPM e 10 min.

O índice de desgaste (Id_{sd}) é definido pela equação 2.15, conforme a ASTM D 4644-04:

$$Id_{sd} = \frac{M_{inicial} - M_{ciclo}}{M_{ciclo}} \times 100 \quad (2.15)$$

onde o Id_x é o índice de desgaste slake durability e o índice subscrito 'x' representa o número correspondente do ciclo, $M_{inicial}$ é a massa total da partícula seca antes do ensaio e M_{ciclo} é a massa total da partícula seca após a cada ciclo correspondente.

Xavier (2001) em seu trabalho, conclui que os materiais cerâmicos se classifica num grupo de muito alta durabilidade (> 99% no primeiro ciclo e > 98% no segundo ciclo), principalmente para os corpos de prova com 5% de resíduo. Fato este, devido ao melhor entrosamento entre os grãos na homogeneização do material e na conformação a verde, conferindo assim uma maior resistência por atrito entre suas amostras.

A Tabela 2.5 apresenta a classificação da durabilidade de acordo com a perda de massa (Gamble, 1971 e Maia, 2004).

Tabela 2.5 - Classificação da Durabilidade de acordo com a Perda de massa (Gamble, 1971; Maia, 2004)

Classificação de Durabilidade	Perda de massa (%)		
	1º ciclo	2º ciclo	5º ciclo
Muito alta	< 1	< 2	< 5
Alta	1 - 2	2 - 5	5 - 15
Medianamente alta	2 - 5	5 - 15	15 - 40
Média	5 - 15	15 - 40	40 - 70
Baixa	15 - 40	40 - 70	10 - 80
Muito baixa	> 40	> 70	> 80

A Figura 2.11 mostra o equipamento de ensaios utilizado para o ensaio de durabilidade slake durability.

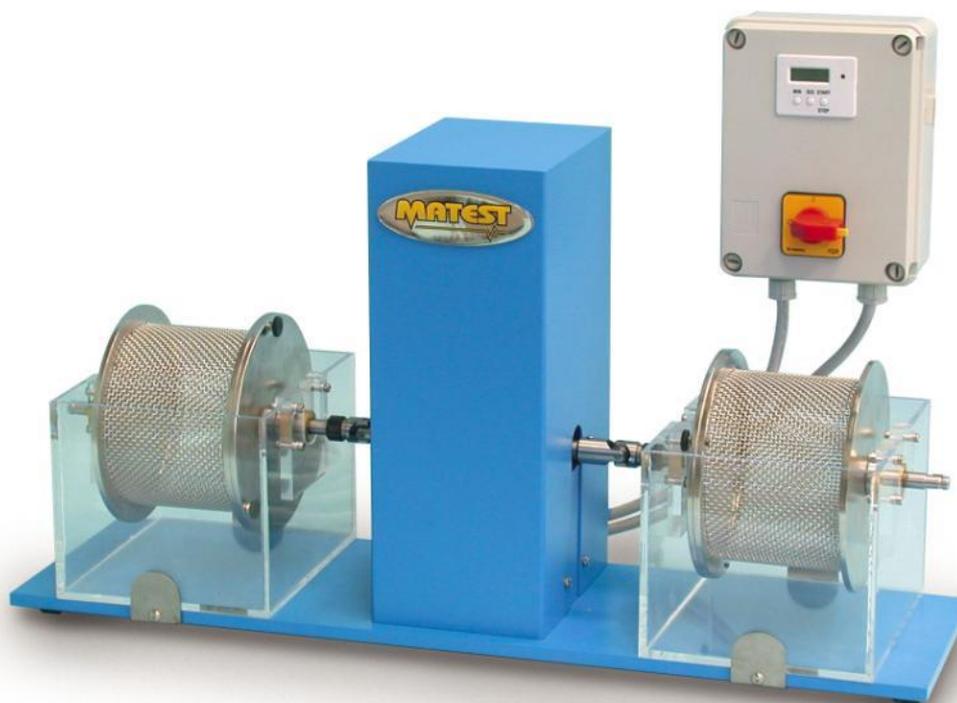


Figura 2.11 – Equipamento para o ensaio de desgaste Slake Durability (MATEST, 2012).

2.6.2. Micro-Deval

Neste ensaio os corpos de prova são submetidos a uma alta energia de desgaste (alta rotação por longo intervalo de tempo), provocando um desgaste até a parte mais central das partículas. Para o Micro-Deval Test, o tambor possui uma capacidade para 5 litros com um sistema hermeticamente fechado, capaz de receber 5 Kg de esferas de aço inoxidável, com diâmetro de 10 mm.

O índice de desgaste ($I_{d_{md}}$) é definido pela Equação 2.16, conforme a ASTM D 6928-03:

$$I_{d_{md}} = \frac{M_{inicial} - M_{ciclo}}{M_{ciclo}} \times 100 \quad (2.16)$$

onde o $I_{d_{md}}$ é o índice de desgaste micro-Deval, $M_{inicial}$ é a massa total da partícula seca antes do ensaio e M_{ciclo} é a massa total da partícula seca após ao ciclo correspondente.

Cooper *et al.* (2003) em seu trabalho demonstra que a qualificação de 104 agregados do Norte de Ontatio, o micro-Deval obteve sucesso de 64% e uma combinação de inspeção do micro-Deval e visual, rendeu uma taxa de 94% de sucesso. Demonstrando assim sendo um excelente indicador de desempenho em campo.

Maia (2001) observou que a resistência ao desgaste da rocha sofrem redução devido à alteração do basalto no campo ou no laboratório e essa relação correspondente à parte mais central das partículas e que está na ordem de 50%, apresentara resultados realmente representativos da condição da rocha alterada.

A Figura 2.12 mostra o equipamento de ensaios utilizado para o ensaio de durabilidade micro-Deval.



Figura 2.12 – Equipamento para o ensaio de desgaste Micro- Deval (MATEST,

2012).

2.6.3. Abrasão Los Angeles

Este ensaio é normalmente utilizado para agregados cimentícios, em revestimentos asfálticos e lastros de ferrovias. As amostras, cerca de 5 Kg, são submetidas a 500 ou 1.000 revoluções, com velocidade de 30 a 33 RPM, no interior do cilindro de um equipamento padronizado. Um número variado de esferas de aço, conforme a granulometria da amostra, é adicionado no cilindro, induzindo impactos nas partículas durante as suas revoluções. O resultado é avaliado pela redução de massa dos agregados retidos na peneira de nº 12 (1,7mm) em relação à massa inicial da amostra especificada, conforme a Equação 2.17 (Bernucci, *et al.*, 2006):

$$LA = \frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{ciclo}} \times 100 \quad (2.17)$$

Os equipamentos e o procedimento são detalhados nas normas DNER-ME 035/98 para agregados pétreos e DNER-ME 222/94 para agregados sintéticos fabricados com argila. Os limites de aceitação para a abrasão Los Angeles dependem do tipo de aplicação do agregado e das exigências dos órgãos viários.

As especificações brasileiras que envolvem o uso de agregados em camadas de base e revestimento de pavimentos, normalmente limitam o valor da abrasão Los Angeles (LA) entre 40 e 55%.

Jiménez (2011) utilizou agregados de diferentes faixas granulométricas, conforme DNER-ES 303/97 (Tabela 2.6). Foram ensaiados 5 kg de agregados com 500 ciclos. Para amostras de graduação 'B', utilizou 11 esferas, obtendo valor à abrasão Los Angeles de 35% e para amostras de graduação 'C', foi utilizado 8 esferas obtendo valor de abrasão Los Angeles de 38%, valores estes, cumprindo o requerimento da norma.

Tabela 2.6 – Faixa granulométrica com base estabilizada granulometricamente (Jiménez, 2011).

Tipos	N>5x10 ⁶				N<5x10 ⁶		Tolerância
	A	B	C	D	E	F	
Peneiras	% em pesos passantes						
2"	100	100	-	-			±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-50	20-50	30-70	±2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

A Figura 2.13 mostra o equipamento de ensaios utilizado para o ensaio de durabilidade Los Angeles.



Figura 2.13 – Equipamento Los Angeles (MATEST, 2012).

2.6.4. Desgaste Amsler

Este ensaio é amplamente utilizado para determinar o desgaste superficial, em materiais rochosos e cimento, quando esses são, normalmente designados para uso em pavimentações.

Na norma Brasileira MB 3379, Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por Abrasão, a determinação dos resultados é obtida por diferença, entre as medidas de realizadas antes e depois da realização do ensaio.

Segundo Almeida (1990), no ensaio utiliza-se a máquina de desgaste Amsler-Laffon, composta basicamente por disco horizontal de ferro fundido que gira em torno do seu eixo vertical; dispositivos que mantêm os corpos de prova apoiados sobre a face superior do disco, sob uma força de 334 N, e os obriga a uma velocidade angular de $\frac{3}{4}$ de volta por minuto; dispositivo que deixa cair sobre o disco, junto a cada corpo de prova, com água e areia (partículas com dimensões compreendidas entre 0,2 mm e 0,6 mm) com uma vazão de 150 g/min.

Cruz (2003), em seu trabalho, utilizou-se de agregados de rochas Traquito. O resultado de desgaste pelo ensaio Amsler para essa rocha (sã) foi de $0,621 \pm 0,181$ e seus corpos de prova, utilizando agregados dessa rocha, em diferentes traços de cimento variou de 0,323 até 0,788. O autor conclui que para os concretos de consistência seca, não basta ter como parâmetros apenas o consumo de cimento para garantir baixo nível de desgaste no ensaio de abrasão.

A Figura 2.14 mostra o equipamento de ensaios utilizado para o ensaio de durabilidade Amsler.



Figura 2.14 – Equipamento Amsler (MATEST, 2012).

2.7. Considerações Finais sobre Materiais Cerâmicos

Observa-se que o conhecimento prévio da fabricação do material cerâmico, desde a matéria prima, passando pelos processos de moldagem, secagem e queima são necessários, principalmente para elucidar quais são os processos mais adequados para obtenção dos produtos cerâmicos e quais são suas etapas de fabricação. Esses conhecimentos auxiliam na análise das propriedades, tanto da matéria prima como também das propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos materiais cerâmicos.

O comportamento do material cerâmico sofre influência de vários fatores, especialmente: temperatura de queima, matéria prima e processo de moldagem.

As propriedades da matéria prima nos amparam numa classificação deste material. Com base nestas propriedades, pode-se então determinar, por exemplo, qual a melhor temperatura de queima para obtenção dos materiais cerâmicos.

Os ensaios tradicionais utilizados para a determinação das propriedades físicas do material cerâmicos são: absorção de água, porosidade aparente, retração linear e massa específica aparente. Estes ensaios por si só, não permitem a determinação das propriedades mecânicas e de durabilidade do material cerâmico. Visando uma melhor determinação dessas propriedades, observa-se na literatura que existem vários ensaios utilizados na mecânica das rochas que podem apresentar uma caracterização mais refinada dos produtos cerâmicos.

Um ponto importante a se comentar é a pouca publicação na literatura referentes a estes ensaios, principalmente referente aos materiais cerâmicos. Observou-se que os ensaios tradicionais são amplamente utilizados como única fonte de parâmetros. O uso da matéria prima com aditivos que envolvem misturas de diferentes materiais é muito utilizado.

3. MATERIAL DE ESTUDO E PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta a escolha da confecção dos corpos de prova, utilizado neste trabalho, de acordo com o tipo de ensaio a ser empregado. Os procedimentos de ensaios laboratoriais aplicados para determinação das características físicas, mecânicas e de durabilidade de produtos cerâmicos.

3.1. Confecção dos Corpos de Prova

Neste trabalho foram confeccionados corpos de prova cerâmicos com formas e quantidades específicas para cada um dos ensaios utilizado de acordo com as suas respectivas normas e/ou métodos de ensaios.

Na Tabela 3.1 observa-se os ensaios utilizados para obtenção das propriedades física, mecânica e de durabilidade do material cerâmico, a forma dos corpos de prova em cada ensaio, as quantidades de corpos de prova em cada temperatura e o total de corpos de provas ensaiados no presente trabalho.

A escolha do processo de moldagem dos corpos de prova está relacionada com a forma desejada para cada ensaio e também com a possibilidade de produção dos mesmos. Observa-se na Tabela 3.1 que há duas formas principais de corpos de prova: vigotas e cilindros (Figura 3.1).

Tabela 3.1 – Tipos de ensaios e quantidades de corpos de prova.

Ensaio	Propriedades	Forma	Temperaturas/ Unidades			Nº de CP's
			500°C	700°C	900°C	
Física do Material Cerâmico	Absorção de Água	Vigotas	15	15	15	45
	Porosidade Aparente					
	Retração Linear					
	Massa Específica Aparente					
Mecânicas do Material Cerâmico	Tensão de Ruptura à Flexão	Vigotas	10	10	10	30
	Resistência à Compressão Uniaxial	Cilindro	10	10	10	30
	Resistência à Tração pelo Ensaio de Cunha	Cilindro	10	10	10	30
	Resistência à Tração pelo Ensaio de Compressão Diametral	Cilindro	10	10	10	30
	Resistência à Tração pelo Ensaio Brasileiro	Cilindro	10	10	10	30
	Resistência à Tração pelo Ensaio Mini-pressiométrico	Cilindro	10	10	10	30
De Durabilidades	Slake-Durability	Cilindro	10	10	10	30
	Micro Deval	Vigotas	40	40	40	120
					Total de CP's	375

Optou-se pelo o processo de moldagem por prensagem, já que este processo é de possível execução para a obtenção dos corpos de prova. Neste processo pode-se garantir um melhor controle das dimensões, homogeneidade pós queima e peso dos corpos de prova pelo fato de utilizar-se de fôrmas e quantidades de solos padronizados de acordo com cada tipo de corpo de prova. Este processo de moldagem também é o que mais se assemelha, quando comparado aos tipos de rochas, ao processo de formação, tornando-se assim, mais adequados à produção para os ensaios propostos. Uma desvantagem do processo de prensagem está relacionada ao tempo de produção, pois os corpos de prova são preparados individualmente.

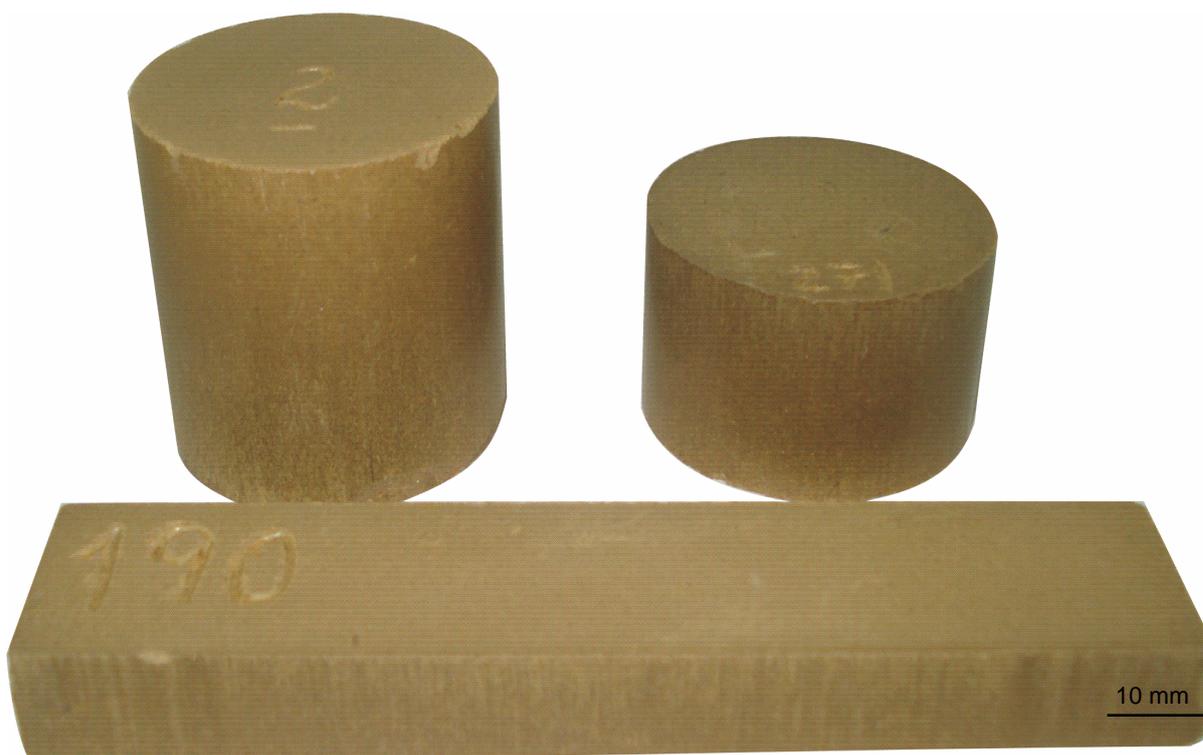


Figura 3.1 – Forma dos Corpos de Prova.

3.1.1. Vigotas

As vigotas são confeccionadas por meio de uma fôrma de aço retangular (20x10x100 – largura x espessura x comprimento, mm), preenchido com solo, aproximadamente 45 gramas e com umidade de 9,4%, prensadas hidraulicamente sob 5 toneladas de carga axial por 2 minutos. Este procedimento é executado para os respectivos ensaios:

- **Ensaio de absorção de água, porosidade aparente, retração linear e massa específica aparente**, apresentado na Figura 3.2;
- **Ensaio de tensão de ruptura à flexão**, apresentado na Figura 3.2;
- **Ensaio micro deval**: Neste caso, as vigotas, após os tratamentos térmicos, são redimensionadas com auxílio de uma serra de mão a fim obter partículas entre 19,0 mm e 9,5 mm, num total de 1500 gramas de material para o ensaio. Depois de cortadas, são lixadas para que pudesse retirar todas as arestas, pois poderiam influenciar de modo negativo no comportamento real do ensaio. As Figura 3.3 e Figura 3.4 mostram respectivamente o material utilizado para esse ensaio, antes e

depois de serem lixadas, que podem ser observadas claramente nos detalhes das figuras.



Figura 3.2 – Corpo de prova: Vigota.

10 mm



Figura 3.3 – Material de ensaio micro Deval; Detalhe: as arestas.



Figura 3.4 – Material de ensaio micro deval; Detalhe: sem arestas.

3.1.2. Cilíndricos

Os cilindros são confeccionados de modo similar aos da vigota, utiliza-se de uma fôrma de aço cilíndrica (aproximadamente de 37,10 mm de diâmetro), preenchido com solo, alterando entre 50 gramas a 80 gramas e com umidade de 9,4%, prensados hidraulicamente sob 5 toneladas de carga axial por 2 min. Este procedimento é executado para os respectivos ensaios:

- **Ensaio de compressão uniaxial**, os corpos de prova são apresentados na Figura 3.5;
- **Ensaio diametral**, os corpos de prova são apresentados na Figura 3.5;
- **Ensaio brasileiro**, os corpos de prova são apresentados na Figura 3.5;
- **Ensaio slake-durability** (Figura 3.6); Para execução do ensaio, utilizou-se de 50 gramas de solo para obter um corpo de prova com massa aproximadamente igual ou inferior, conforme o recomendado pela norma. Neste ensaio, as arestas dos corpos de prova também são lixadas para que não alterem o resultado final do ensaio.
- **Ensaio de cunha**: Este ensaio utiliza-se desses corpos de prova que, após os tratamentos térmicos, são entalhados com auxílio de uma serra de mão a fim de obter os entalhes necessários para a colocação da cunha (Figura 3.7).
- **Ensaio mini-pressiométrico**: Utiliza-se destes cilindros, após os tratamentos térmicos, onde são feitos furos centrais, com auxílio de uma furadeira de bancada, iniciando com furos com brocas menores até ao furo com a broca de 16 mm para a instalação da borracha. Os furos são executados via úmido para que a broca não cause grandes danos à parede interna do furo (Figura 3.8). As Figura 3.9 e Figura 3.10 mostram, respectivamente, o corpo de prova com furo central e corpo de prova com a borracha.

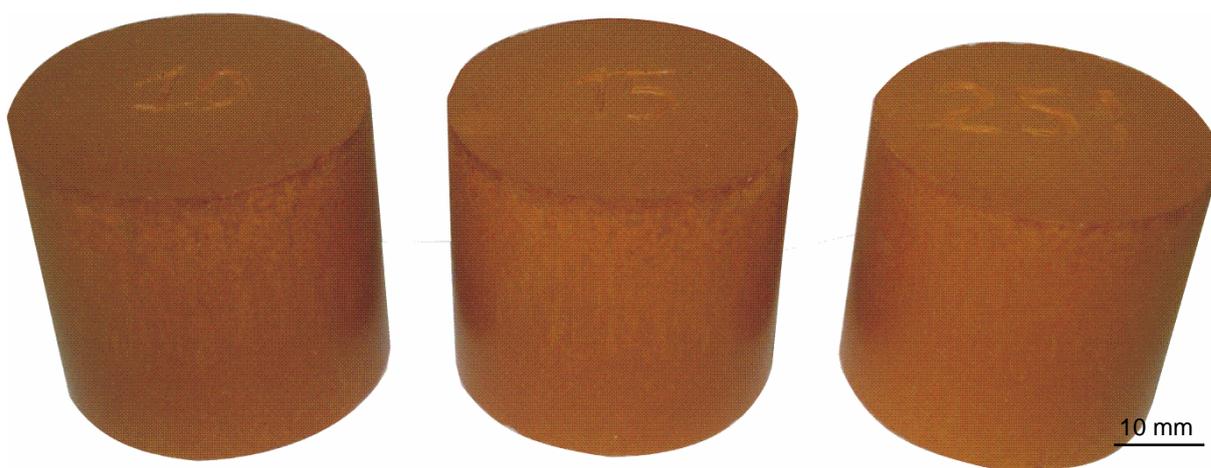


Figura 3.5 – Corpos de Prova: Cilíndricos.



Figura 3.6 – Corpos de prova do slake-durability: arredondamento das arestas.

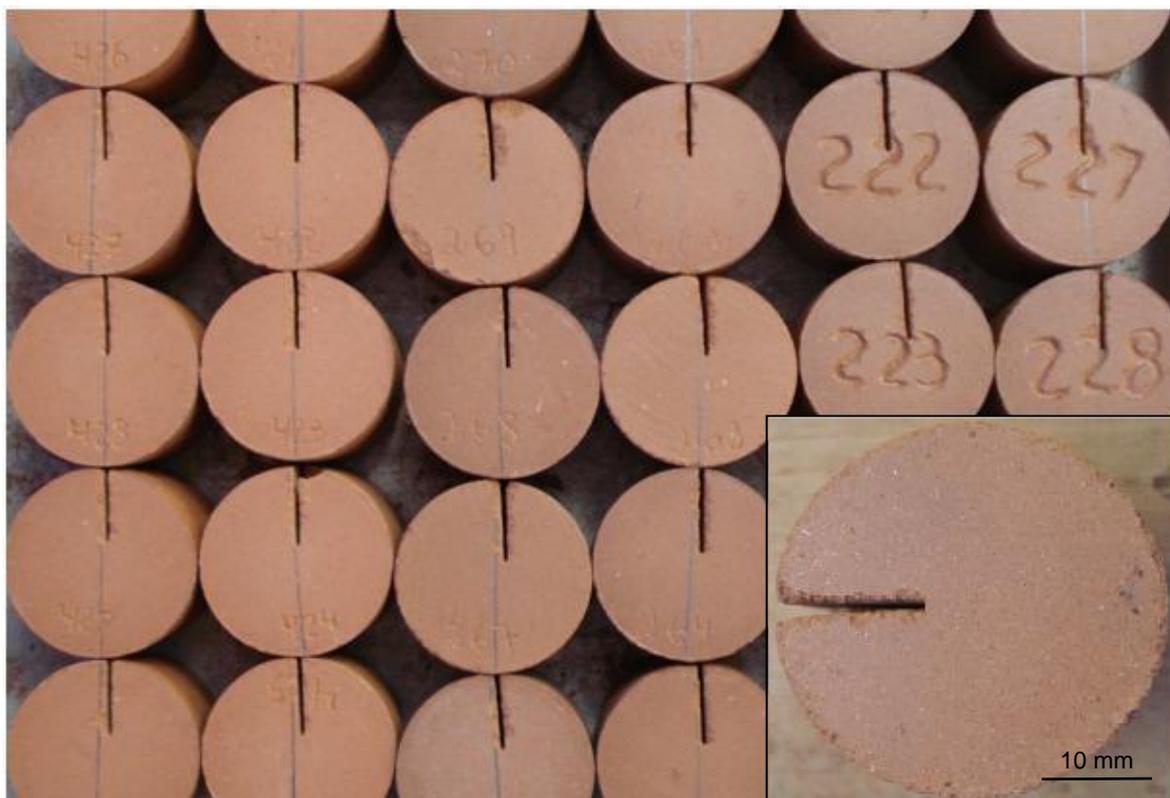


Figura 3.7 – Corpos de prova entalhados para o ensaio de cunha.

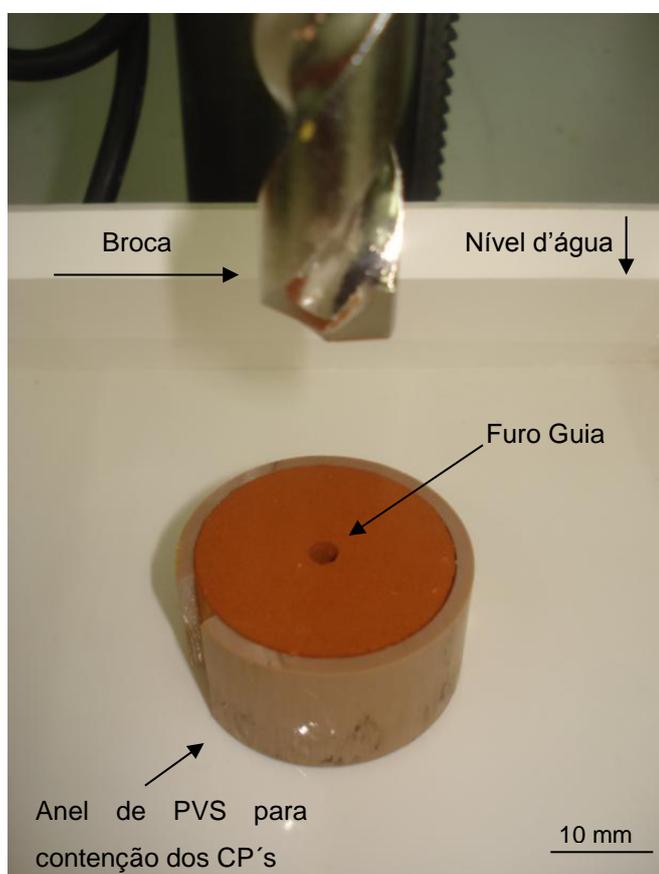


Figura 3.8 – Corpo de prova com furo guia central para o ensaio mini-pressiométrico.



Figura 3.9 – Corpo de prova furado para o ensaio mini-pressiométrico.



Figura 3.10 – Corpo de prova furado com a borracha para o ensaio mini-pressiométrico.

3.2. Procedimentos de Ensaio

Os procedimentos de ensaios utilizados para caracterização do material de estudo seguiram as metodologias convencionais e não convencionais descritas no capítulo 2, nos item 2.4 e 2.5. Para determinação das características de durabilidade foram utilizados somente os ensaios slake durability e micro-Deval. A elaboração de um equipamento na própria Universidade tornou-se possível a execução de ensaios de desgaste. Estes ensaios estão relacionados com as dimensões e capacidade do equipamento, por isso, o ensaio de desgaste Los Angeles não foi utilizado. A capacidade dos tambores tornou limitado aos demais ensaios. Para o ensaio de desgaste Amsler, problemas técnicos com o equipamento tornou impossível a realização do ensaio.

Para execução dos ensaios de compressão uniaxial, compressão diametral, ensaio brasileiro e o ensaio mini-pressiometro, foi confeccionado uma base de duralumínio com diferentes componentes para cada tipo de ensaio (Figura 3.11). Estes componentes foram confeccionados de aço inox com dimensões previstos em normas de acordo com cada tipo de ensaio. Esta base juntamente com os componentes foi criada para facilitar e padronizar todos os ensaios realizados.

3.2.1. Tensão de Ruptura à Flexão

O ensaio de flexão foi realizado conforme o item 2.5.1. Para este ensaio, utilizou-se dos corpos de prova do tipo vigotas, disposto no equipamento e depois ensaiado com velocidades de carregamento de 0,6 mm/min.

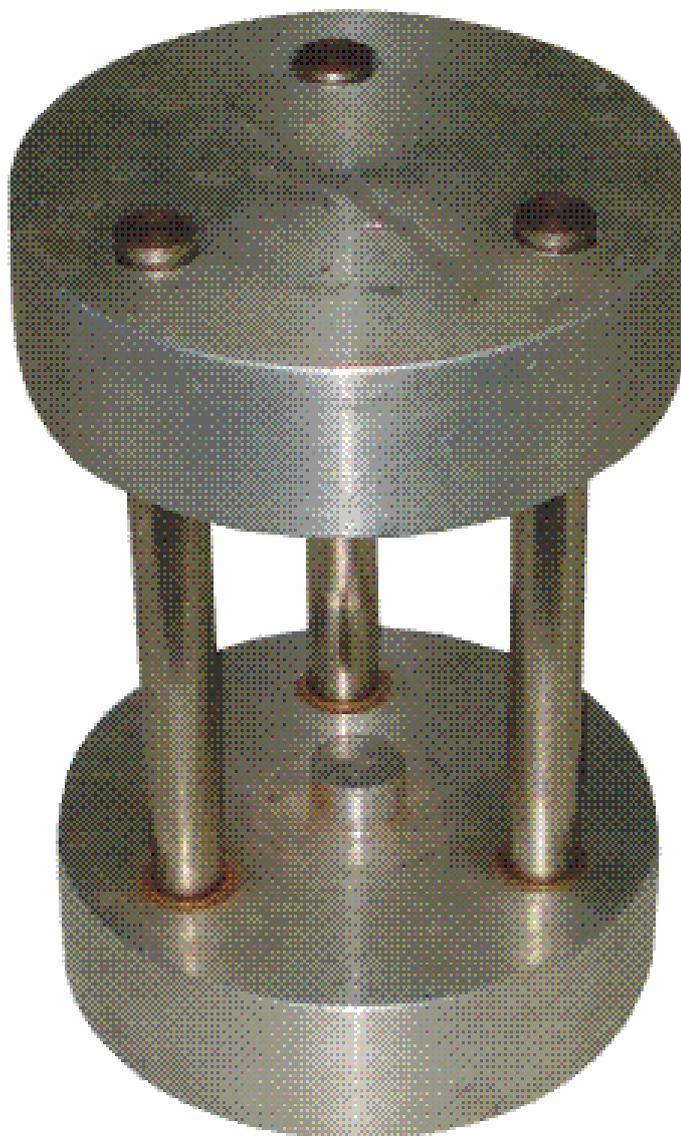


Figura 3.11 – Base de Duralumínio – Utilizado para o Mini-pressiômetro.

3.2.2. Compressão Uniaxial

Utilizou-se da base juntamente com componente, como visto na Figura 3.11 (a e 1b e 2b) para execução do ensaio de compressão uniaxial. Os corpos de prova foram dispostos na base e em seguida, ensaiados em uma prensa EMIC, da linha DL com velocidade de carregamento de 0,2 MPa/s (Figura 3.12 e Figura 3.13).



Figura 3.12 – Disposição da base e corpo de prova para o ensaio de resistência à tração pelo ensaio de compressão uniaxial.



Figura 3.13 – Ensaio de compressão uniaxial.

3.2.3. Compressão Diametral

Este ensaio também faz uso da base, como pode ser visto na Figura 3.11 para a execução do ensaio de compressão diametral. Observa-se que o ensaio utiliza de frisos de comprimento igual ao da geratriz do corpo de prova e seção transversal com as dimensões, de acordo com a Norma da NBR 7222-94, de b igual a 5,49 mm e h igual a 3,5 mm. Com os corpos de prova dispostos na base podem-se realizar os ensaios utilizando a prensa com carregamento de 0,02 MPa/s (Figura 3.14).



Figura 3.14 - Ensaio de compressão diametral.

3.2.4. Ensaio Brasileiro

Para a execução do ensaio brasileiro utilizou-se das mandíbulas de aço como descrito no ISRM (1977). Os corpos de prova são envolvidos radialmente por uma fita e dispostos nas mandíbulas (Figura 3.15) e, em seguida, ensaiados. Com os corpos de prova dispostos na base pode-se realizar os ensaios utilizando a prensa com carregamento de 0,02 MPa/s.

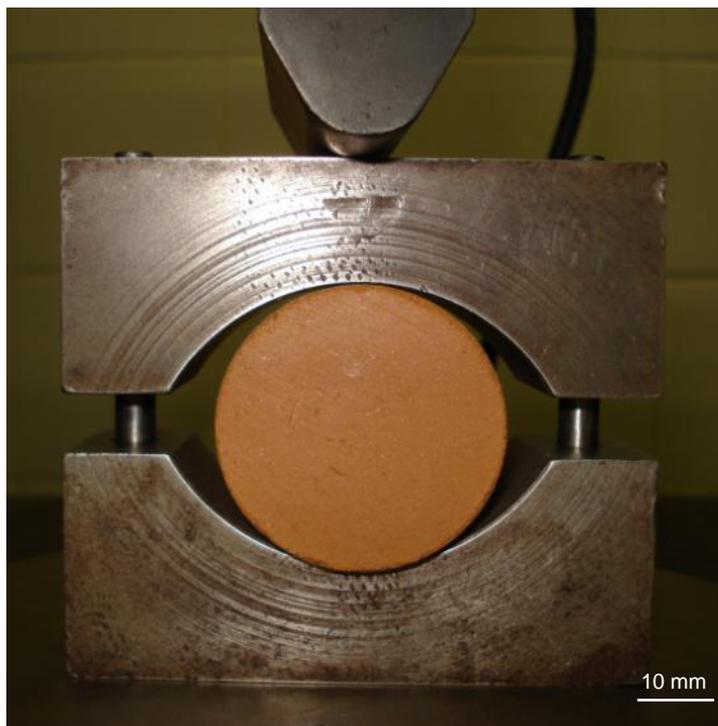


Figura 3.15 – Ensaio brasileiro.

3.2.5. Ensaio de Cunha

Análises preliminares são feitas para determinação de alguns parâmetros utilizados no ensaio propriamente dito, como mostrado em seguida. Primeiramente, obteve-se a Cunha, que consiste em uma placa de ferro fundido com formato de uma cunha. O ângulo da cunha (α) deve ser conhecido, pois influencia diretamente nas forças aplicadas durante o ensaio e posteriormente nos cálculos dos resultados. A Figura 3.16 representa a cunha utilizada para o ensaio. A determinação do ângulo da cunha foi executada através de técnicas fotográficas, onde se obteve várias fotos da cunha e depois determinado o ângulo, com ajuda de software de medidas.



Figura 3.16 – Cunha utilizada no ensaio de cunha.

Outros parâmetros importantes são o ângulo de atrito (μ) e o comprimento do entalhe (a). Para a determinação do ângulo de atrito, utilizou-se do Tilt Test (Figura 3.17). Este ensaio foi executado com uma placa de ferro fundido, do mesmo material utilizado para a confecção da cunha, onde os corpos de provas são dispostos sobre a placa e devido à inclinação gradativa da mesma, determinam-se, através de um medidor angular, os ângulos de atrito quando os corpos de prova começam a se deslizar. Este ensaio foi executado para todos os corpos de prova, totalizando dez determinações para cada temperatura de queima.

Após a obtenção dos parâmetros necessários, os corpos de prova são dispostos na cunha e em seguida ensaiados na prensa com velocidade de carregamento igual a 0,02 MPa/s (Figura 3.18). Na Figura 3.19, observa-se melhor o corpo de prova com o entalhe a disposição da cunha durante o procedimento de ensaio.



Figura 3.17 - Tilt Test.



Figura 3.18 – Disposição do corpo de prova na cunha para o ensaio de cunha.

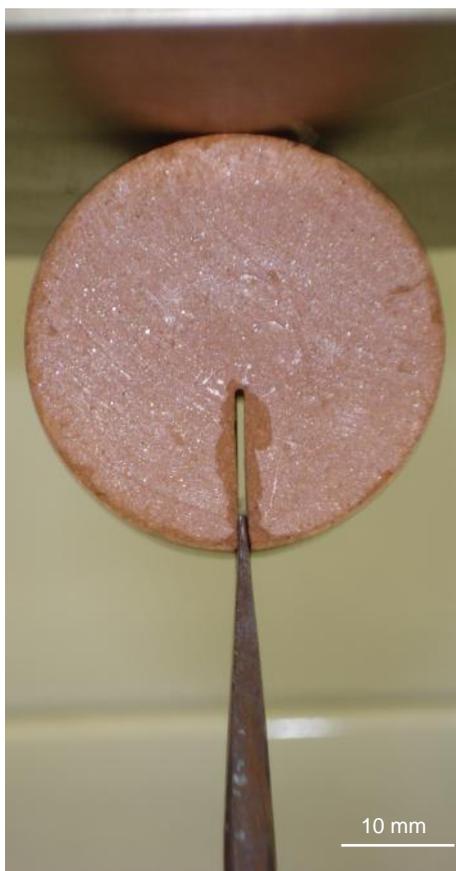


Figura 3.19 – Detalhe do corpo de prova entalhado e a cunha.

3.2.6. Ensaio Mini-Pressiométrico

Neste ensaio empregam-se corpos de prova em formato cilíndricos conforme descrito anteriormente no item 3.2.2. Os corpos de prova são dispostos na base (Figura 3.11) juntamente com borracha no pré-furo a fim de realizar o ensaio (Figura 3.20).



Figura 3.20 – Disposição do corpo de prova para o ensaio mini-pressiométrico.

3.3. Ensaios de Durabilidade

Para a execução dos ensaios de durabilidade utilizou-se de um equipamento construído na própria Universidade seguindo as normas da ASTM D 4644-04 e D 6928-03, para o slake durability e o micro-Deval, respectivamente. Para o ensaio slake-durability, usa-se um tambor envolto por uma tela de abertura cilíndrica padrão de 2 mm, com altura desobstruída de 100 mm e com diâmetro de 140 mm (Figura 3.21).

Para o micro-Deval o tambor é hermeticamente fechado, com diâmetro de 194 mm, altura de 177 mm, capaz de manter 2 litros de água juntamente com os corpos de prova e as esferas de aço inoxidável (Figura 3.21). Os tambores são resistentes para manter a sua forma durante todo o ensaio. Estes resistem a uma temperatura de 105°C, possui uma tampa removível e com o interior e o exterior completamente desobstruído.



Figura 3.21 – Tambores e corpos de prova.

O equipamento possui uma Cuba (Figura 3.22) que contém um suporte para o tambor de ensaio com eixo horizontal de maneira que permita uma livre rotação, capaz de ser preenchido com um fluido de hidratação, tal como água a 20°C, a um nível de 20 mm abaixo do eixo do tambor, no caso do ensaio slake durability e para o micro-Deval o tambor é montado acima do eixo horizontal de maneira que haja uma folga entre a cuba e a base da malha.

Uma unidade de motor é acoplada a cuba (Figura 3.22), sendo capaz de rotacionar o tambor a uma velocidade superior de 6,50 RPM, com velocidade constante e controlada por um painel de controle capaz de medir as rotações do eixo da base horizontal da cuba. É através deste painel que podemos alterar as velocidades de um ensaio para o outro.

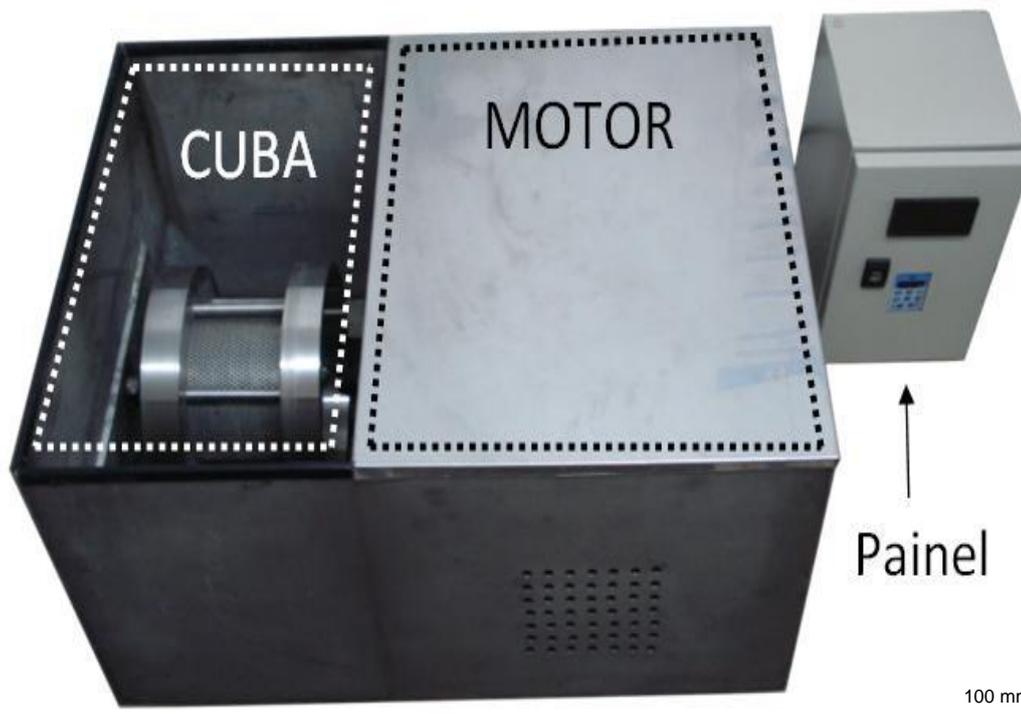


Figura 3.22 – Cuba + Motor e Painel do Equipamento para os ensaios de sSlake-Durability e micro Deval..

3.3.1. Ensaio Slake-Durability

Neste ensaio os corpos de provas, secos à 110°C, são introduzidos no tambor e disposto na cuba que é preenchida com água à 20°C de modo que o tambor fique submerso parcialmente. Inicia-se então o ensaio de modo que o tambor seja rotacionado em 20 RPM durante 10 min. Este processo corresponde a um ciclo de degradação. Para análise de resultado, é recomendado por norma que sejam feitos dois ciclo. Porém, como observado por Gamble (1971); Maia (2004) recomenda-se serem feitos, para uma melhor avaliação dos resultados, cinco ciclos de degradação. Depois de cada ciclo, o material é retirado do tambor, seco em estufa e depois pesados.

As Figura 3.23 e Figura 3.24, mostraram os corpos de provas dispostos no tambor antes e depois do primeiro ciclo e depois do quinto ciclo, respectivamente.



Figura 3.23 – Corpos de prova antes do primeiro ciclo, Slake-Durability.



Figura 3.24 - Corpos de prova depois do quinto ciclo, Slake-Durability.

3.3.2. Ensaio Micro Deval

No micro Deval, os corpos de prova (1500 gramas), depois de secos à 110°C, são introduzidos no tambor juntamente com 2 litros de água e 5 kg de esferas de aço inox, de 10 mm de diâmetro. Então o ensaio é iniciado de maneira que o tambor rotacione em 10 RPM num período de 2 horas. Após o ensaio, o material é peneirado de maneira que o material retido na peneira nº16 (1,18 mm) é anotado depois de seco.

As Figura 3.25 e Figura 3.26, mostram o material disposto no tambor antes e depois do ensaio micro Deval.



Figura 3.25 – Material antes do ensaio micro Deval.



Figura 3.26 – Material depois do ensaio micro Deval.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Matéria Prima: Solo

A matéria prima, solo, após coletada foi levada até ao pátio do Laboratório de Engenharia Civil – LECIV, da UENF para que o material secasse ao ar livre. Em seguida, com auxílio de uma pá, desfragmentaram-se os torrões formados para se obter um material de partículas mais finas.

Para a uniforme homogeneização do material foi utilizado o quarteamento (Figura 4.1 e Figura 4.2), segundo as recomendações da ABNT 6457 (1986). Depois de quarteado, utiliza-se desse solo para os ensaios de caracterização e para a confecção dos corpos de provas.

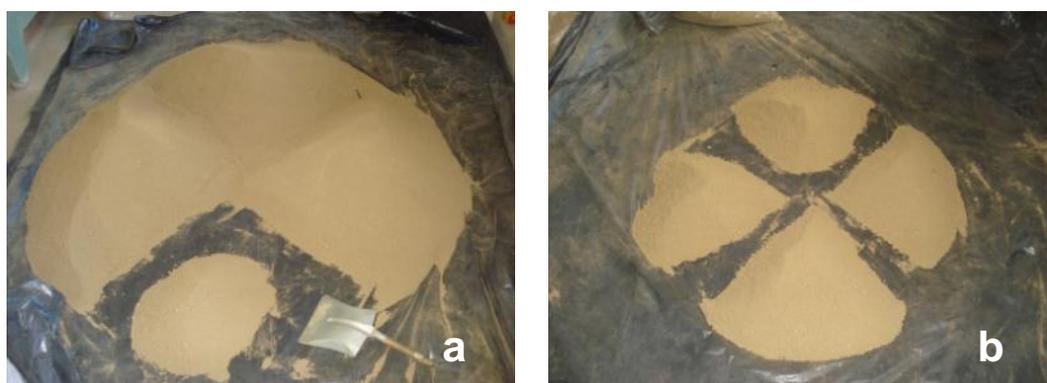


Figura 4.1 – Processo de quarteamento da Matéria Prima.

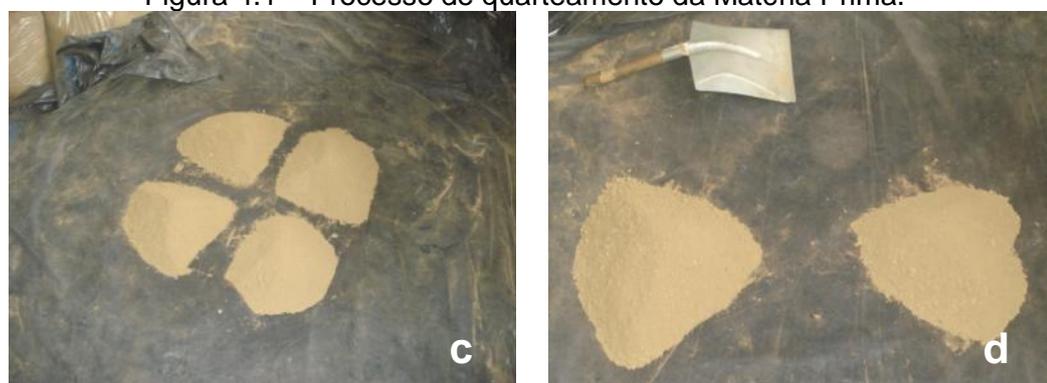


Figura 4.2 – Processo de quarteamento da Matéria Prima.

Posteriormente, o material foi passado na peneira nº20 (0,84mm) descartando-se o material retido (Figura 4.3), já que a matéria prima apresenta uma

granulometria grossa para o processo de caracterização. O material passante (Figura 4.4) foi destorroado com auxílio de mão de gral e almofariz (Figura 4.5) até passar na peneira nº40 (0,42 mm) (Figura 4.6). As amostras foram secas à estufa a 110°C para eliminação da água livre e adsorvida.



Figura 4.3 – Material Retido, Peneira nº20.



Figura 4.4 – Material Passante, Peneira nº20.



Figura 4.5 – Material destorroado com auxílio de mão de gral e almofariz.



Figura 4.6 – Material passante na peneira nº40.

Deste modo, a matéria prima está pronta para a execução dos ensaios de caracterização, bem como para a utilização da confecção dos corpos de provas. Os procedimentos para obtenção desta caracterização é descrito a seguir.

4.1.1. Distribuição Granulométrica

Para execução da técnica de sedimentação utilizou-se defloculante de hexametáfosfato de sódio e agitação por um tempo pré-determinado da mistura água + solo + defloculante. A velocidade de decantação foi determinada pela Lei de Stokes que consiste na retirada de várias amostras da suspensão a intervalos de

tempo definidos (Figura 4.7). Os valores encontrados são lançados no gráfico do peneiramento e, desse modo, obtém-se a curva granulométrica da amostra ensaiada. A separação das frações do solo foi feita segundo a escala do USCS (Unified Soil Classification System).

A Figura 4.8 apresenta a distribuição granulométrica da amostra de argila estudada. A amostra apresenta uma fração de areia média e grossa de 1% e fina de 7%, silte de 50% e argila de 41%. Classificada, segundo USCS, de CH, isto é, solo de granulometria fina, inorgânica, muito plástica (LECIV, 2011).



Figura 4.7 – Ensaio de Sedimentação.

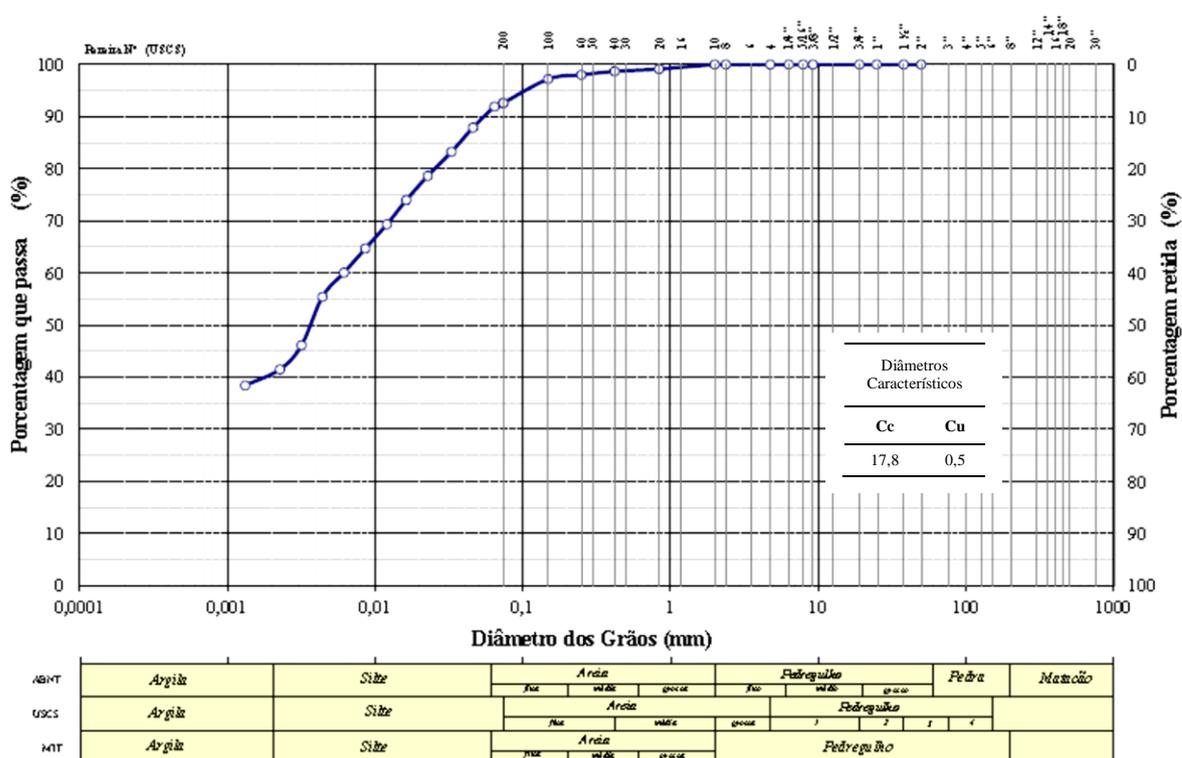


Figura 4.8 - Análise Granulométrica da argila da Baixada de Campos – LECIV (2011)

4.1.2. Limite de Atterberg

O Limite de Atterberg foi determinado segundo as normas: NBR 6459 (Limite de Liquidez) e NBR 7180 (Limite de Plasticidade). O solo foi inicialmente passado na peneira nº40 (0,42 mm) para realização dos ensaios. Os ensaios de limite de liquidez foram realizados no aparelho de Casagrande e os ensaios de limite de plasticidade foram feitos na placa esmerilada. O Limite de Atterberg da amostra é apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores do ensaio do Índice de Atterberg, LECIV (2011)

Índices de Atterberg:	
Limite de Liquidez	59,0 %
Limite de Plasticidade	32,4 %
Índice de Plasticidade	26,6 %

4.1.3. Massa Específica dos Grãos

O ensaio de massa específica real dos grãos foi determinado segundo a NBR 6508 (1984) e NBR 6457 (1986), e utilizou-se o método clássico do picnômetro. O resultado obtido por Alexandre (1997), Xavier (2001) e Ramos (2006) variam na faixa de 2,56 a 2,77 g/cm³. A matéria prima utilizada apresenta massa específica dos grãos um valor de 2,64 g/cm³, resultado este, dentro da variação observada, anteriormente, da matéria prima coletado na região por Xavier (2001).

4.1.4. Composição Química

A caracterização química foi determinada por meio de espectroscopia por fluorescência de raios X, foi utilizado o equipamento Shimadzu EDX – 700 acoplado a um computador para o processamento dos dados. As amostras foram passadas na peneira nº 200 (abertura de 0,075 mm) e secas em estufa a 110° C por 24 horas. O ensaio foi realizado sob a condição de ajuste de vácuo de dois canais e amostras estavam na forma de pó. Os resultados estão apresentados na forma de óxidos quantificados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Composição química do solo, LECIV (2011).

Componentes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	CaO	MnO	V ₂ O ₅	ZnO	ZrO ₂	SrO
%	44,56	37,60	11,12	2,6	1,79	1,46	0,51	0,14	0,12	0,6	0,4	0,01

4.1.5. Mudanças de Fase

A Figura 4.9 apresenta a Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica do solo. As curvas TG/DTG foram obtidas numa termobalança da marca Shimadzu, modelo TGA-51 no Laboratório do LAMAV. O ensaio foi executados no intervalo de temperatura de 25 até 1100°C com massa de amostras de cerca de 50 mg, em

cadinho de platina, em atmosfera dinâmica de N_2 ($50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$) e taxa de aquecimento de $2^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

A Figura 4.9 nos fornece informações importantes para a escolha da temperatura de queima. Foram escolhidas três temperaturas, a de 500°C , 700°C e 900°C , fora dos picos endotérmicos e exotérmicos. Nota-se um pico endotérmico entre 147°C a 190°C , possivelmente relacionado à perda de água livre presente na amostra. Ocorre um pico endotérmico entre 300°C a 360°C , possivelmente devido à formação de Gipsita. Outro pico endotérmico entre 520°C a 630°C , associados provavelmente à desidroxilação dos argilominerais presentes nas argilas. Picos exotérmicos entre 920°C e 950°C , possivelmente relacionados à formação de espinélio após a total destruição da estrutura da mica/ilita como descrito por Santos (1989).

Observa-se também que a perda de massa ocorre mais acentuadamente entre 520°C a 630°C , correspondendo aproximadamente a 4% de perda de massa. A amostra obteve uma perda de massa total de 12,8%. Essa perda é contínua desde o início do aquecimento, com perda de água livre até o final da banda associada à desidroxilação do material argiloso.

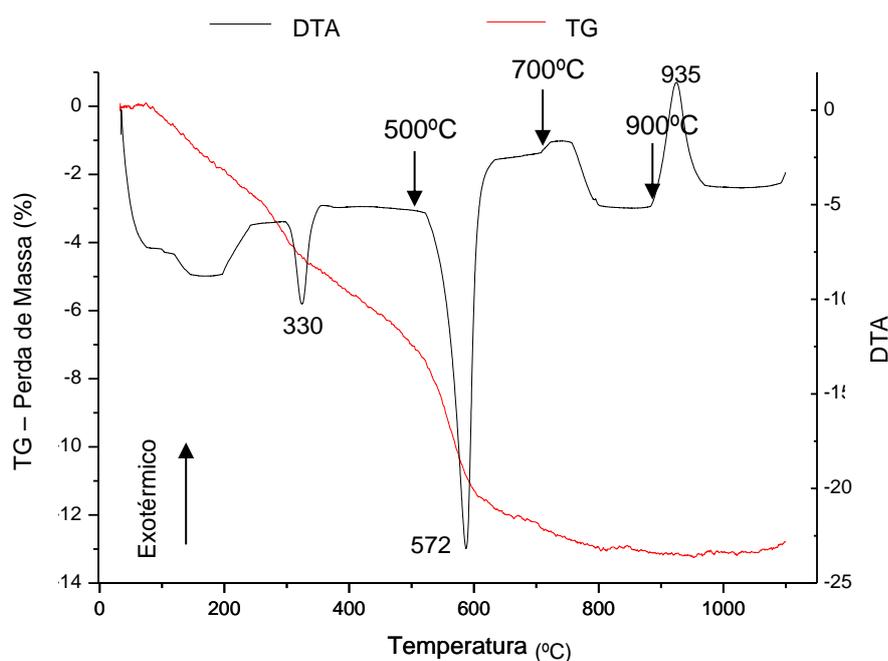


Figura 4.9 – Resultados de ATD e TG da argila – LAMAV (2011).

4.1.6. Composição Mineralógica

A Figura 4.10 nos mostra o resultado do difratograma de raio X do solo utilizado neste trabalho. É observado que o solo apresenta os seguintes minerais: caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), gibssita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$). O quartzo está presente na amostra e mesmo passando por tratamentos térmicos acima de 570°C , onde ocorre a expansão, transformando-se de α para β , mantém-se estável, apresentando picos de grande intensidade.

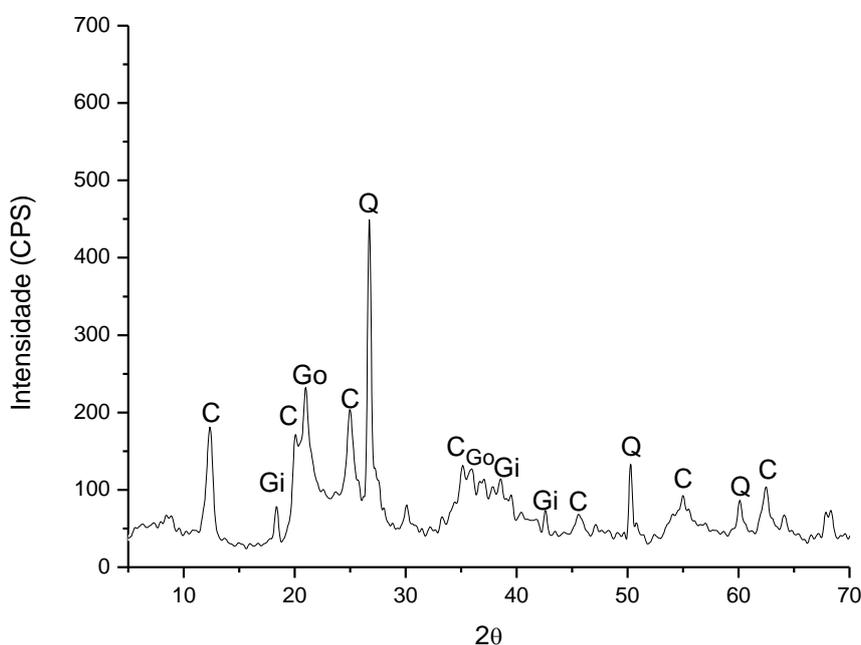


Figura 4.10 – Difratograma de Raio-X. C – Caulinita; Gi – Gibssita; Go – Goethita e Q – Quartzo – LAMAV (2011).

4.2. Propriedades físicas

4.2.1. Absorção de Água

Os resultados de absorção de água são apresentados na Tabela 4.3. Observa-se a variação da absorção de água conforme a temperatura de queima e seus respectivos desvios padrão. Esses resultados corroboram com resultados

encontrados por outros autores que trabalharam com solos provenientes da Baixada Campista do tipo caulínítico (Alexandre, 1997 e 2000; Xavier, 2001 e Ramos, 2006).

Tabela 4.3 – Resultados de absorção de água, LECIV (2011).

T (°C)	AA (%)
500	21,54 ± 0,47
700	23,24 ± 0,72
900	22,43 ± 0,42

T – Temperatura.

AA – Absorção de água.

Observa-se que a partir de 550°C, as impurezas solúveis, a desidroxilação, a inversão polimorfa do quartzo, que promovem uma fase amorfa e líquida, que conferem a cerâmica uma diminuição dos vazios. Isto ocorre devido ao preenchimento dos poros capilares que resulta numa tendência de diminuição das percentagens de absorção de água nas argilas. Porém na temperatura de 700°C, observa-se um acréscimo na absorção de água. Provavelmente, as transformações que conferem tais resultados não tenham atingido ao seu estágio por completo.

A Figura 4.11 apresenta os valores de absorção de água encontrados por diferentes autores juntamente com os resultados dos materiais cerâmicos estudados neste trabalho. Podemos observar que há uma tendência de redução da absorção de água com a temperatura de queima, que está diretamente relacionado com suas fases no processo de queima, isto é, seu arranjo da microestrutura.

Nota-se também os limites superiores e inferiores de absorção de água das argilas brasileiras proposto por Santos (1989). Entre estes limites, destaca-se os limites de absorção de água para tijolos e tenhas. Os corpos de prova submetidos a temperaturas de 500°C, 700°C e 900°C, encontram-se abaixo do limite de absorção de água para tijolos furados, mostrando serem indicados para esses artefatos cerâmicos.

Na Figura 4.11, observa-se a tendência da absorção de água pelos limites superiores e inferiores obtidos com os dados da literatura. Pode-se observar que abaixo da temperatura de 800°C, a absorção de água apresenta pouca dispersão, diferentemente dos valores acima de 800°C, onde a dispersão é maior. Este

comportamento está diretamente ligado a influencia da queima na estrutura cristalina do material.

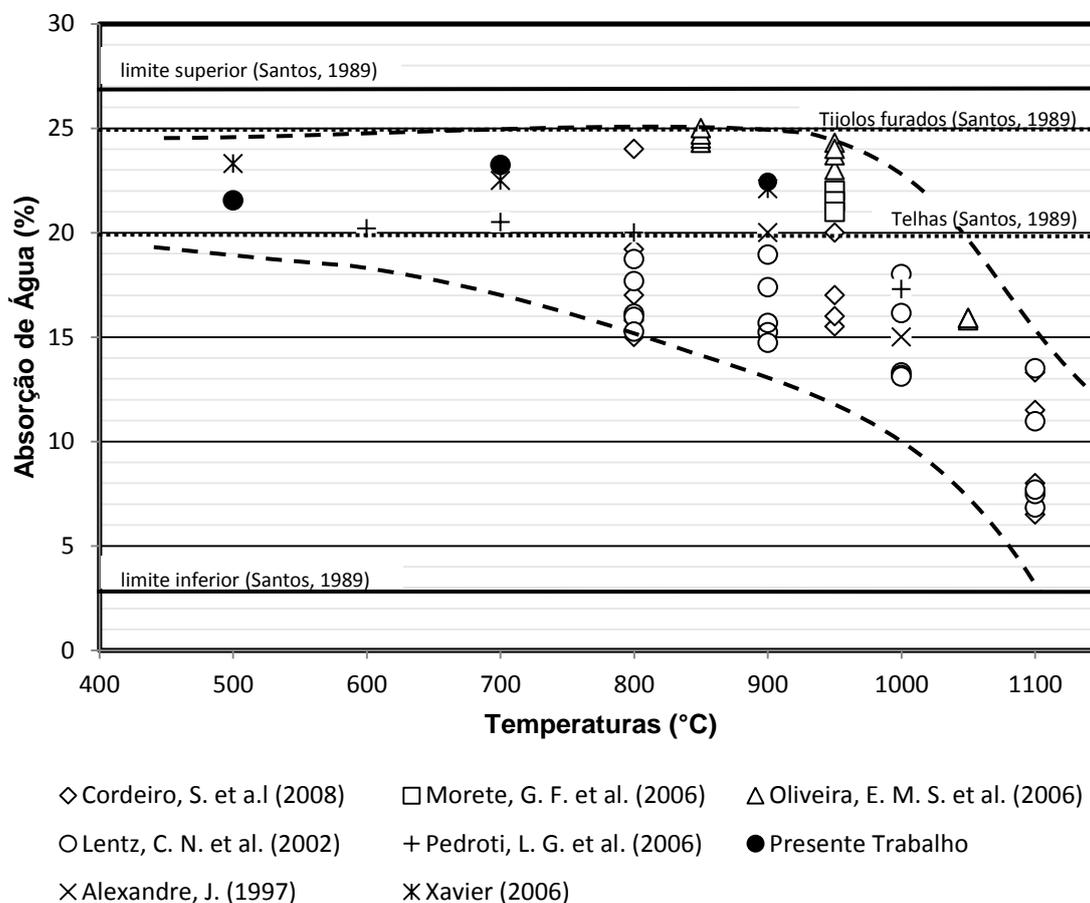


Figura 4.11 – Variação de absorção de água em produtos cerâmicos.

4.2.2. Porosidade Aparente

Os resultados de porosidade aparente são apresentados na Tabela 4.4. Observa-se que a porosidade à 500°C é menor em relação a demais temperaturas, reforçando os resultados de absorção de água. No entanto, à 700°C apresenta a maior valor de porosidade aparente. Os valores à 900°C apresentou estar bem próxima à de 700°C. Provavelmente, a não mudança de fases à 900°C, como demonstrado na análise TG e ATD (item 4.1.5), influencia nesse comportamento. A 900°C há uma menor taxa de absorção de água, comparado com a de 700°C, demonstrando que sua porosidade apresenta-se com uma menor interligação dos poros.

Tabela 4.4 – Resultados de porosidade aparente, LECIV (2011).

T (°C)	PA (%)
500	37,00 ± 0,52
700	38,76 ± 0,75
900	38,70 ± 0,47

T – Temperatura.
PA – Porosidade aparente.

Assim como ocorre com a absorção de água, a Figura 4.12 mostra, através dos limites superiores e inferiores, que abaixo da temperatura de 800°C a porosidade aparente mantém mais estável e que acima de 800°C a uma tendência da diminuição da porosidade aparente.

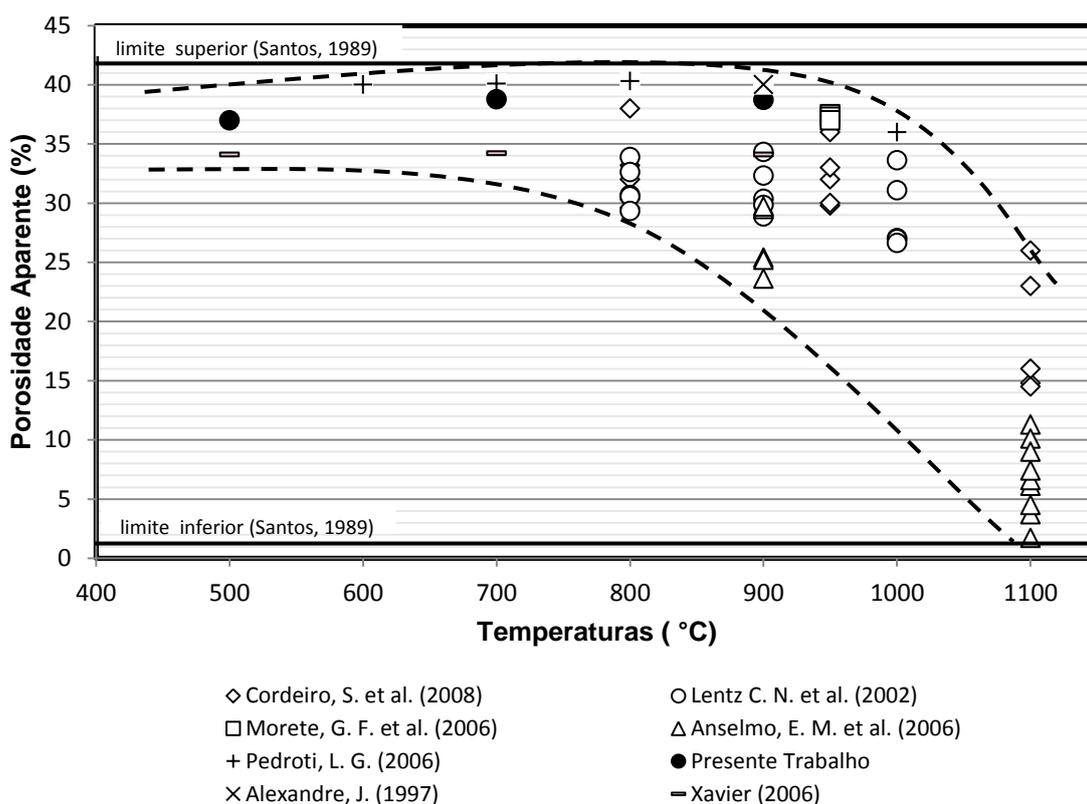


Figura 4.12 – Variação de porosidade aparente em produtos cerâmicos.

A Figura 4.12 apresenta as porcentagens de porosidade aparente de diferentes autores juntamente com os resultados da argila deste trabalho. Do mesmo modo

como foi observado na Figura 4.11, a porosidade aparente apresenta uma tendência no comportamento relacionado com as diferentes temperaturas de queima. Maiores temperaturas de queima geram menores percentagens de absorção de água e consequentemente menor porosidade aparente. Este comportamento é típico de um solo caulínico. No entanto, houve um acréscimo de porosidade aparente, principalmente para 700°C. Este resultado está diretamente ligado com o de absorção de água. Apesar de apresentar algumas percentagens de impurezas como visto na análise química (item 4.1.4), como por exemplo, K_2O e TiO_2 , que proporcionado uma fase líquida, provavelmente a temperatura não tornou-se suficiente para a diminuição da porosidade aparente em 700°C e 900°C.

4.2.3. Retração Linear

Os resultados de retração linear são apresentados na Tabela 4.5. Observa-se que os valores de retração linear encontrados crescem com a temperatura. A 900°C ocorre a maior retração linear, que está correlacionado com a absorção de água e com a porosidade aparente de forma inversamente proporcional. Nesta temperatura, a estrutura do material passou por transformações, tipo inversão polimorfa no qual ocorre a maior perda de massa. Este comportamento é apresentado pela análise termogravimétrica e diferencial (Figura 4.9).

A Figura 4.13 apresenta os resultados das percentagens de retração linear de diferentes autores juntamente com os valores obtidos neste trabalho. Quanto maior a temperatura de queima, maior é a retração linear. Isto está relacionado com a desidratação química contínua (desidroxilação), com a liberação dos gases que se formam a maiores temperaturas, como, por exemplo, CO_2 , conferindo aos corpos de prova maiores percentagens de retração linear. Também está relacionado diretamente ao nível de sucção do material cerâmico.

Tabela 4.5 – Resultados da retração linear, LECIV (2011).

T(°C)	RL (%)
500	0,57 ± 0,06
700	0,90 ± 0,05
900	1,98 ± 0,10

T – Temperatura.
RL – Retração linear.

Na Figura 4.13, abaixo da temperatura de 800°C, observa-se que os valores de retração linear são mais aproximados, tendo pouca variação e que acima da temperatura de 800°C a uma tendência de maior retração linear, demonstrado pelos limites superiores e inferiores.

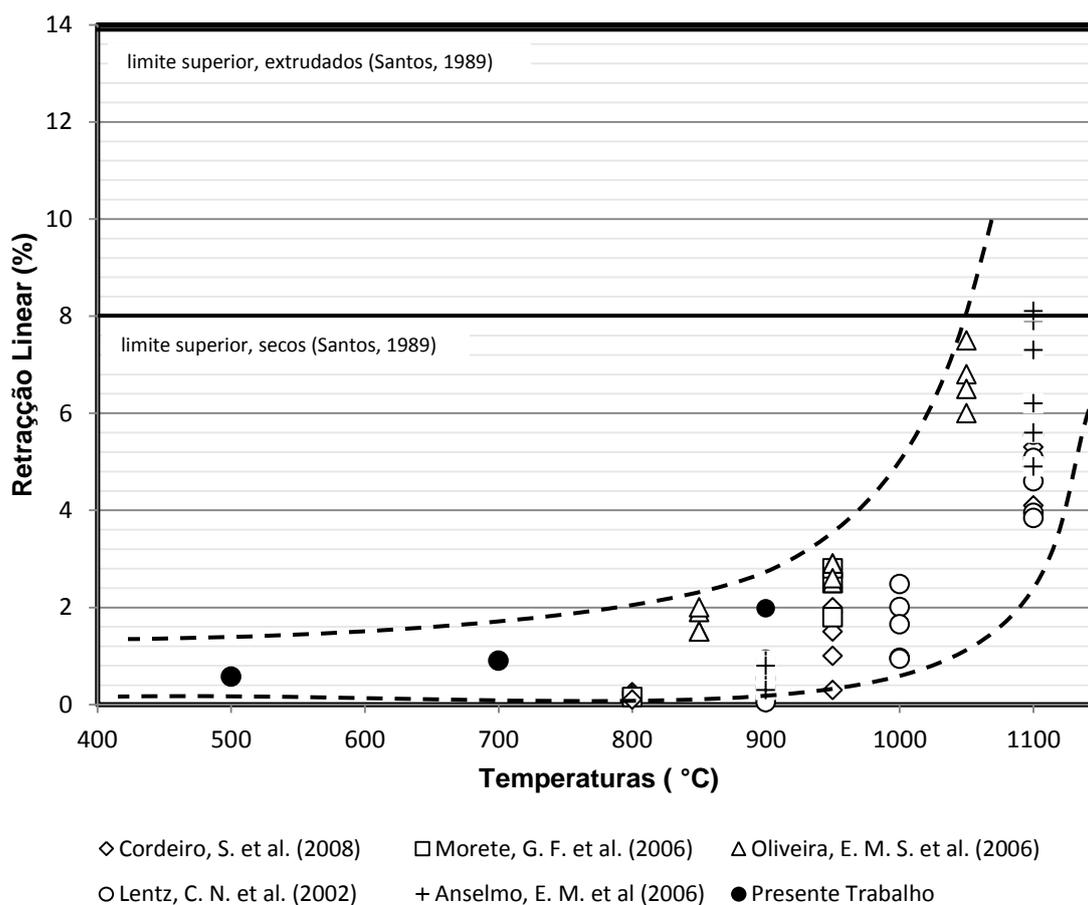


Figura 4.13 - Variação da retração linear em produtos cerâmicos.

4.2.4. Massa Específica Aparente

Os resultados da massa específica aparente são apresentados na Tabela 4.6. Os valores observados encontram-se dentro dos valores citados por Alexandre (1997), Alexandre (2000), Xavier (2001) e Ramos (2006), apresentado para argila caulínica de Campos. Os valores de massa específica aparente estão relacionados com o alto teor de ferro encontrado na argila utilizada neste trabalho, como pode-se observar na composição química, no item 4.1.4.

Tabela 4.6 – Resultados da massa específica aparente, LECIV.

T (°C)	γ (g/cm³)
500	1,86 ± 0,02
700	1,67 ± 0,02
900	1,73 ± 0,01

T – Temperatura.

γ – Massa específica aparente.

A Figura 4.14 apresenta os valores de massa específica aparente obtida por diferentes autores juntamente com os resultados obtidos neste trabalho nas diferentes temperaturas de queima. Observa-se que a partir da temperatura de 800°C os valores de massa específica aparente tendem a aumentarem e que abaixo de 800°C, esses valores, apresentam limites superiores e inferiores mais constantes.

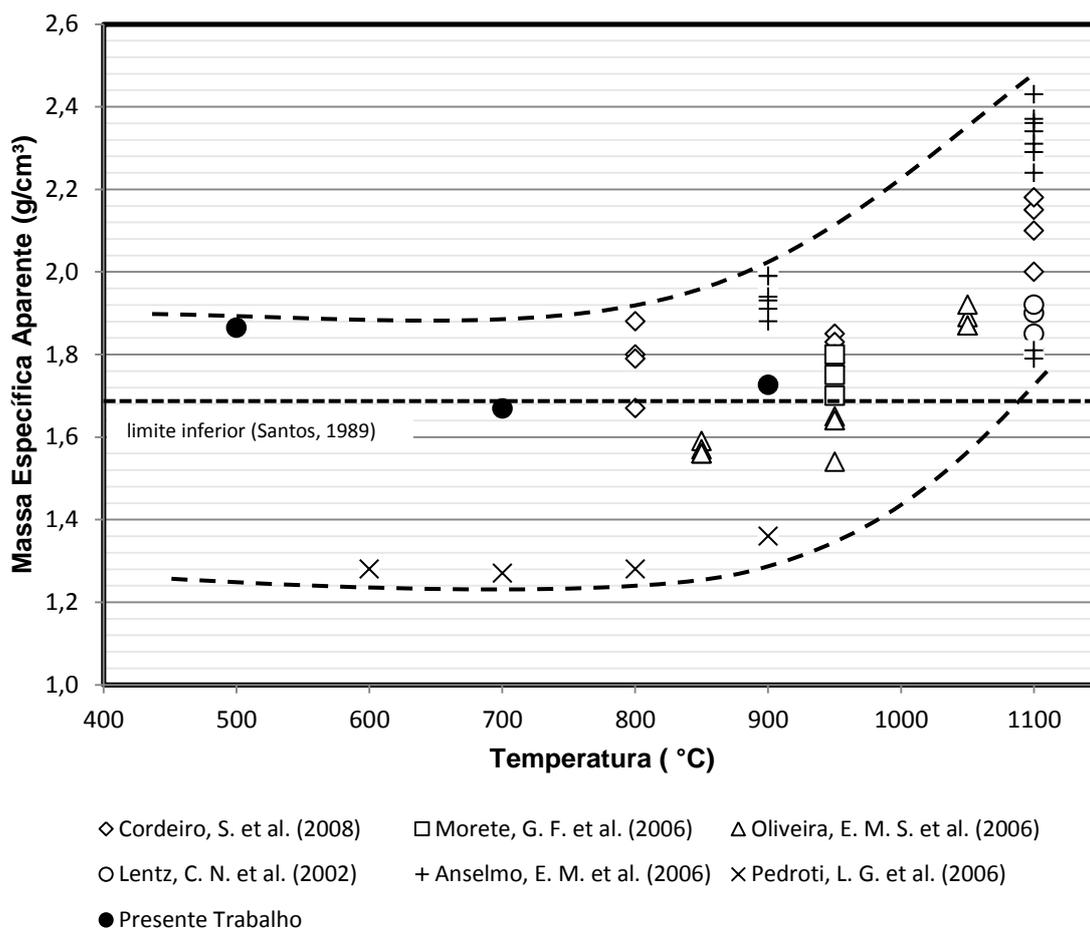


Figura 4.14 – Variação da massa específica aparente em produtos cerâmicos.

4.3. Propriedades Mecânicas

4.3.1. Resistência à Ruptura à Flexão

A Tabela 4.7 apresenta os resultados dos ensaios de tensão de ruptura à flexão e também o Módulo de Elasticidade do material em suas respectivas temperaturas de queima. Sendo P a carga atingida no instante da ruptura, L a distância entre os apoios do corpo de prova, b é a largura do corpo de prova e h é a altura do corpo de prova. Observa-se que há um aumento na tensão de ruptura à flexão e também para o módulo de elasticidade tangente.

Tabela 4.7 – Resultados da tensão de ruptura à flexão e E à 500°C, 700°C e 900°C.

Temp. (°C)	b (cm)	h (cm)	L (cm)	P (N)	σ_{rf} (MPa)	E (GPa)
500	2,01	1,10	8,00	6,92 ± 0,68	3,40 ± 0,40	2,32 ± 1,47
700	2,00	1,09	8,00	8,48 ± 1,77	4,31 ± 0,88	2,97 ± 0,22
900	1,97	1,03	8,00	10,19 ± 0,67	5,77 ± 0,47	3,43 ± 0,13

σ_{rf} – Tensão de ruptura à flexão.

E – Módulo de elasticidade.

A Figura 4.15 apresenta os valores de tensão de ruptura à flexão, encontrados por diferentes autores e também dos valores obtidos neste trabalho. Observa-se, claramente, uma tendência de aumento no comportamento da tensão de ruptura à flexão com o aumento das temperaturas de queima. Isso ocorre principalmente pela transformação de suas fases cristalinas, onde o material tende a fusão em altas temperaturas, dissolvendo a sílica e alguns outros materiais, favorecendo a fase vítrea da cerâmica com o fechamento dos poros.

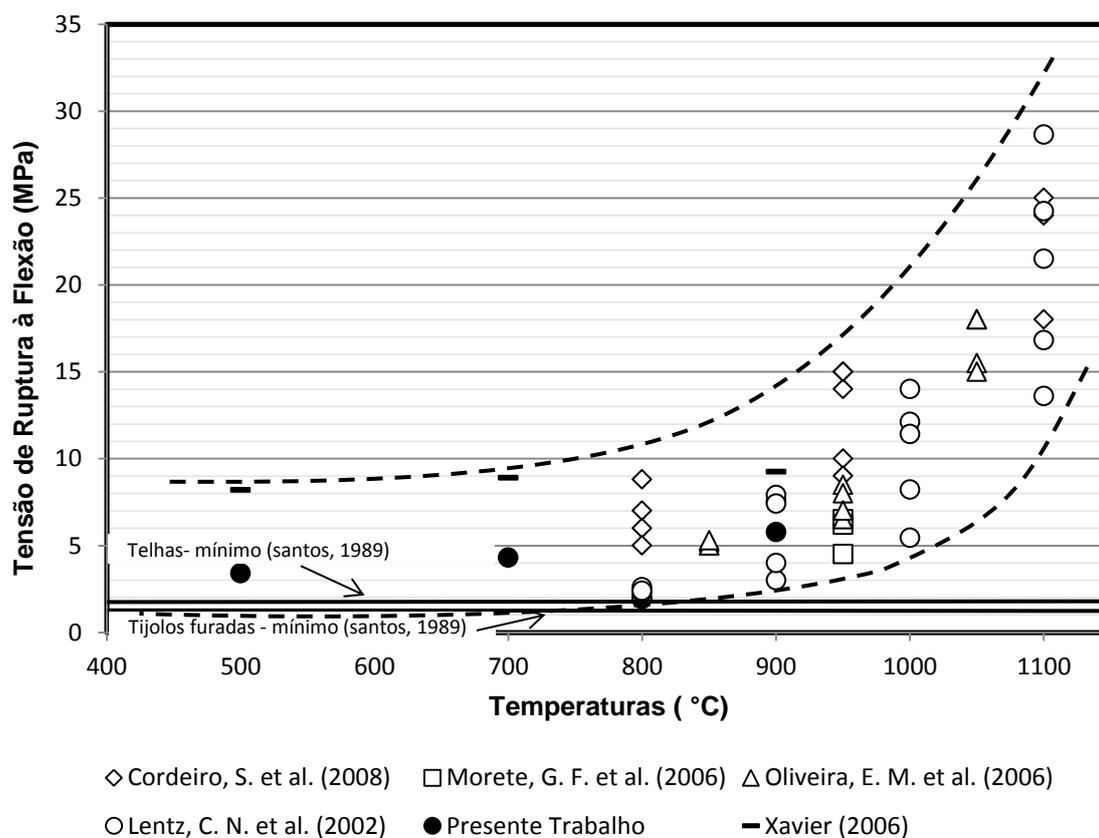


Figura 4.15 – Variação da tensão de ruptura à flexão em produtos cerâmicos.

Assim como se observa para as propriedades físicas, há um aumento da tensão de ruptura à flexão a partir da temperatura de 800°C, já para os valores abaixo de 800°C, tendem a se manter mais constantes. Essa tendência é melhor observadas pelos limites superiores e inferiores obtidos na literatura.

4.3.2. Resistência à Compressão Uniaxial

Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados da resistência à compressão uniaxial em seu valor máximo e médio, a 50%, e também os valores dos módulos de elasticidade tangente (E), secante (E_s) e inicial (E_i), com seus respectivos desvios padrões. Os módulos de elasticidade são determinados conforme a Figura 4.16.

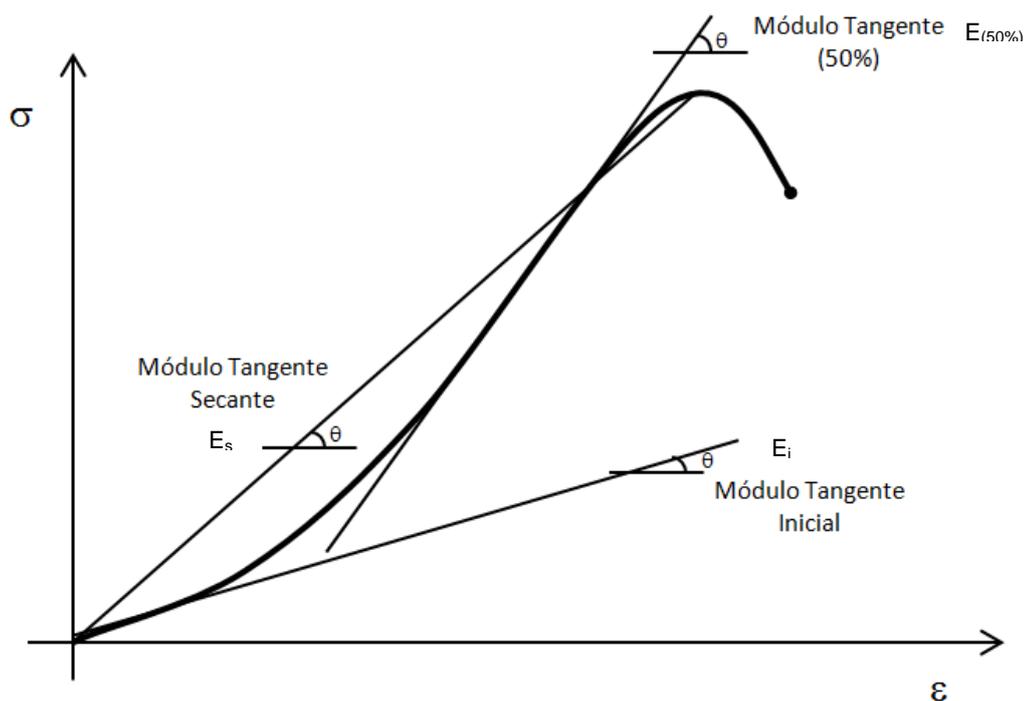


Figura 4.16 – Métodos de determinação do módulo de elasticidade.

Tabela 4.8 – Resultados de resistência à compressão uniaxial à 500°C, 700°C e 900°C.

Temp. (°C)	σ_u (MPa)	$\sigma_{(50\%)}$ (MPa)	E (MPa)	E_s (MPa)	E_i (MPa)
500	2,08 ± 0,14	1,04 ± 0,21	2,28 ± 0,21	3,00	2,30
700	2,77 ± 0,23	1,38 ± 0,16	2,61 ± 0,16	3,20	2,20
900	2,98 ± 0,29	1,49 ± 0,19	2,54 ± 0,19	3,41	1,80

σ_u – Resistência à compressão uniaxial.

$\sigma_{(50\%)}$ – Resistência à compressão uniaxial à 50%.

E – Módulo de elasticidade tangente.

E_s – Módulo elasticidade secante.

E_i – Módulo elasticidade inicial.

Pode-se observar que os valores obtidos na resistência à compressão uniaxial para o material cerâmico, com base na classificação ISRM (1977), Tabela 2.3, são classificados como rochas *muito brandas*, com seus valores de compressão simples entre 1 a 5 MPa. Pela Tabela 2.4, a classificação, de acordo com os valores de compressão uniaxial para o material cerâmico, é designado de *muito baixa resistência*, com valores inferiores a 6 MPa.

Comparando o comportamento do ensaio obtido para materiais cerâmicos com o comportamento dos materiais rochosos, pode-se fazer uma analogia. A Figura 2.1 nos apresenta as curva típica obtida pelo ensaio de resistência à compressão uniaxial dos materiais cerâmicos, onde se pode determinar os módulos de elasticidade.

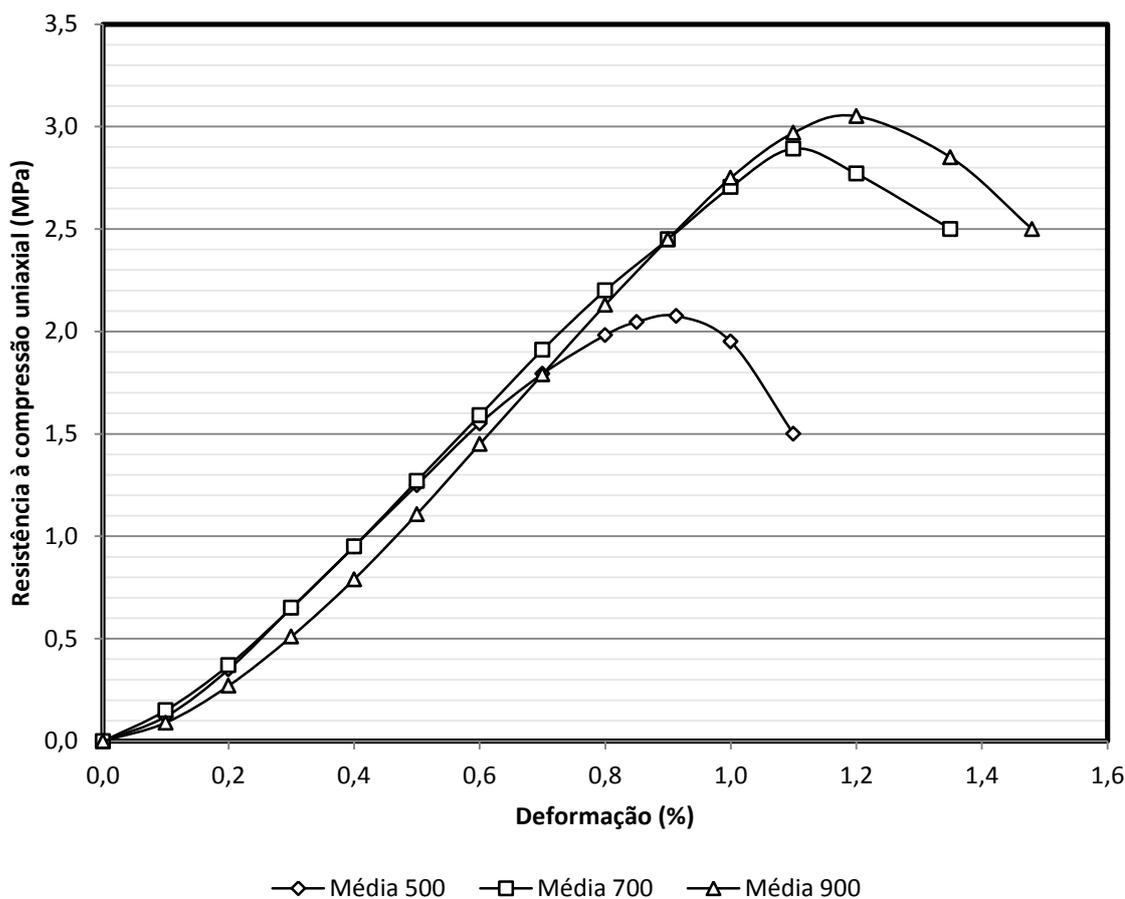


Figura 4.17 – Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial.

A Figura 4.18 representa, graficamente, os resultados obtidos dos módulos de elasticidade tangente, secante e inicial dos materiais cerâmicos ensaiados. É possível observar que o módulo de elasticidade inicial decresce de acordo com o aumento da temperatura de queima. Este comportamento está relacionado diretamente com a fase I, em que o módulo inicial é influenciado. No início do ensaio, ocorre um fechamento das fissuras, onde os grãos são levemente comprimidos. Como anteriormente foi analisado nos ensaios convencionais, observou-se que a absorção de água e a porosidade apresentam um comportamento atípico, quando comparado à literatura. Isto, possivelmente é a causa para que o módulo de elasticidade inicial apresente percentagens decrescentes. Já que a absorção de água e a porosidade aumentam, era de se esperar que possuísem maiores números de vazios.

No módulo de elasticidade tangencial, está relacionado com as fases II do comportamento análogo dos ensaios em rocha. Nestas fases, as maiorias das fissuras estão fechadas ocorrendo a compressão dos grãos e dos poros de modo

aproximadamente linear. Observou-se que à 500°C apresenta o menor resultado devido ao menor valor de resistência à compressão uniaxial. Para os materiais cerâmicos queimados à 700°C e 900°C, o módulo de elasticidade tangencial apresenta valores bem aproximados.

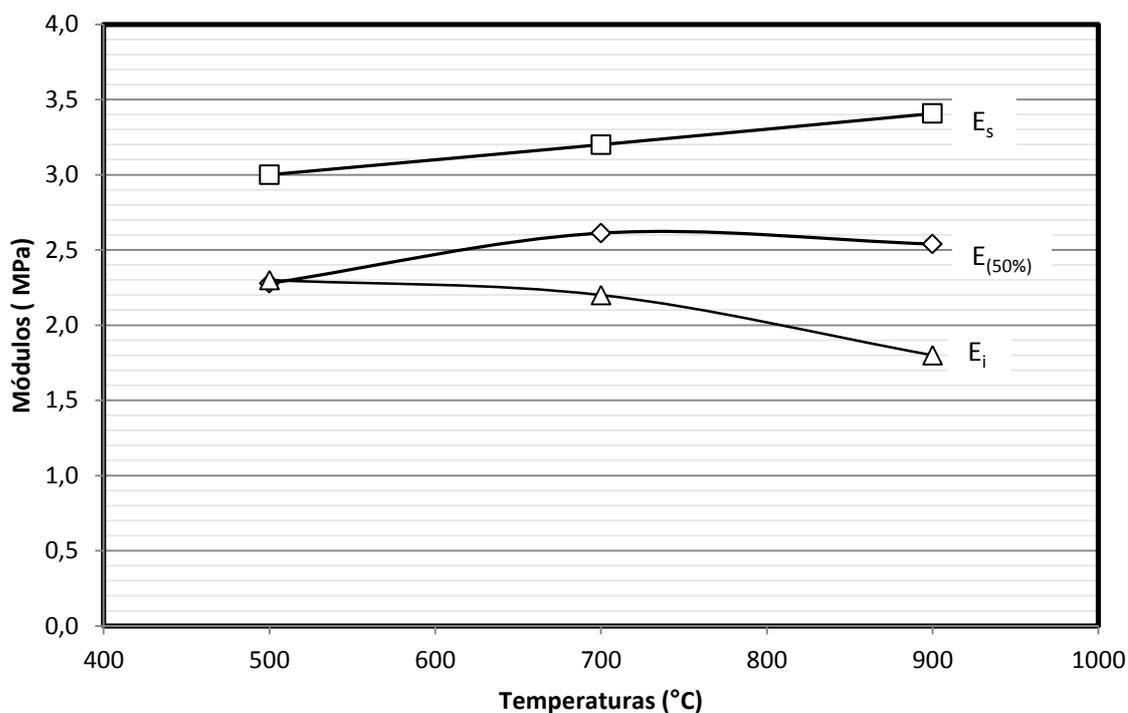


Figura 4.18 – Valores médios de módulos de elasticidade em diferentes temperaturas de queima.

O módulo de elasticidade secante é bem distinto, já que seus valores são analisados mais próximos aos resultados de resistência à compressão uniaxial, perto de 90% do valor. Esses valores encontram-se na fase III, onde as altas concentrações de tensões ao redor dos poros podem causar o colapso. Chegando assim a tensão máxima de ruptura dos materiais rochosos e cerâmicos.

A Figura 4.19 apresenta os valores máximos de resistência à compressão uniaxial para cada amostra de acordo com a temperatura de queima e também os seus valores médios máximos. É possível notar que há uma tendência na elevação do índice de compressão uniaxial.

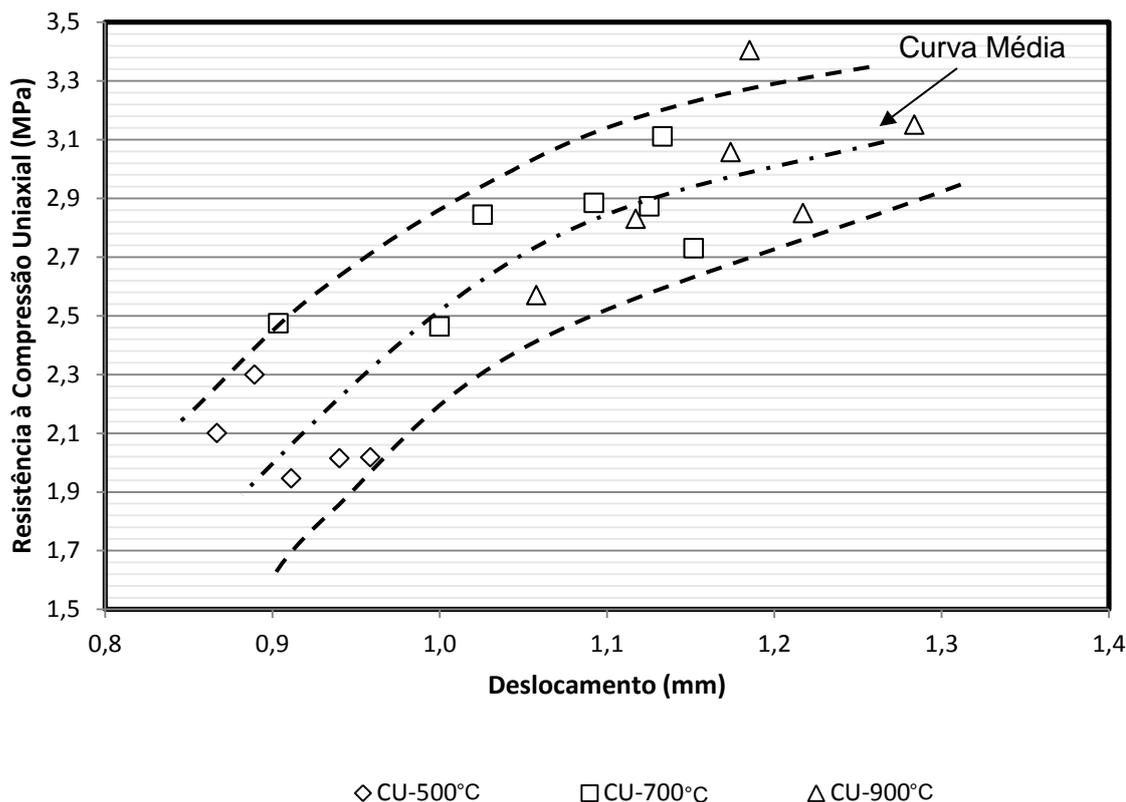


Figura 4.19 – Resultados da resistência à compressão uniaxial em diferentes temperaturas.

4.3.3. Resistência à Tração pelo Ensaio de Compressão Diametral

Na Tabela 4.9 apresenta os resultados da resistência à compressão diametral em seu valor máximo e médio, há cinquenta por cento, com seus respectivos desvios padrões.

Tabela 4.9 - Resultados da resistência à compressão diametral à 500°C, 700°C e 900°C.

Temp. (°C)	σ_{cd} (MPa)	$\sigma_{cd(50\%)}$ (MPa)
500	0,36 ± 0,04	0,18 ± 0,02
700	0,40 ± 0,04	0,20 ± 0,02
900	0,59 ± 0,04	0,29 ± 0,02

σ_{cd} – Resistência à tração à compressão diametral.

$\sigma_{cd(50\%)}$ – Resistência à tração, 50%.

Os resultados à tração obtida através do ensaios de compressão diametral são, bem inferiores aos obtidos nos ensaios de flexão. Como a fratura se propaga pelos pontos de contato entre a peça e o suporte, os frisos são utilizados para maximizar as tensões internas durante o ensaio de compressão diametral. Porém, a presença dos frisos, por si só, não foram capazes de minimizar as causas da resistência mecânica do ensaio diametral.

A Figura 4.20 apresenta os valores máximos de resistência à compressão diametral para cada amostra de acordo com a temperatura de queima e também os seus valores médios máximos. É possível notar que há uma tendência na elevação do índice de compressão diametral.

A Figura 4.21 demonstra o comportamento do ensaio de resistência à compressão diametral. Os valores obtidos são das médias dos ensaios, correspondentes as suas temperaturas de queima.

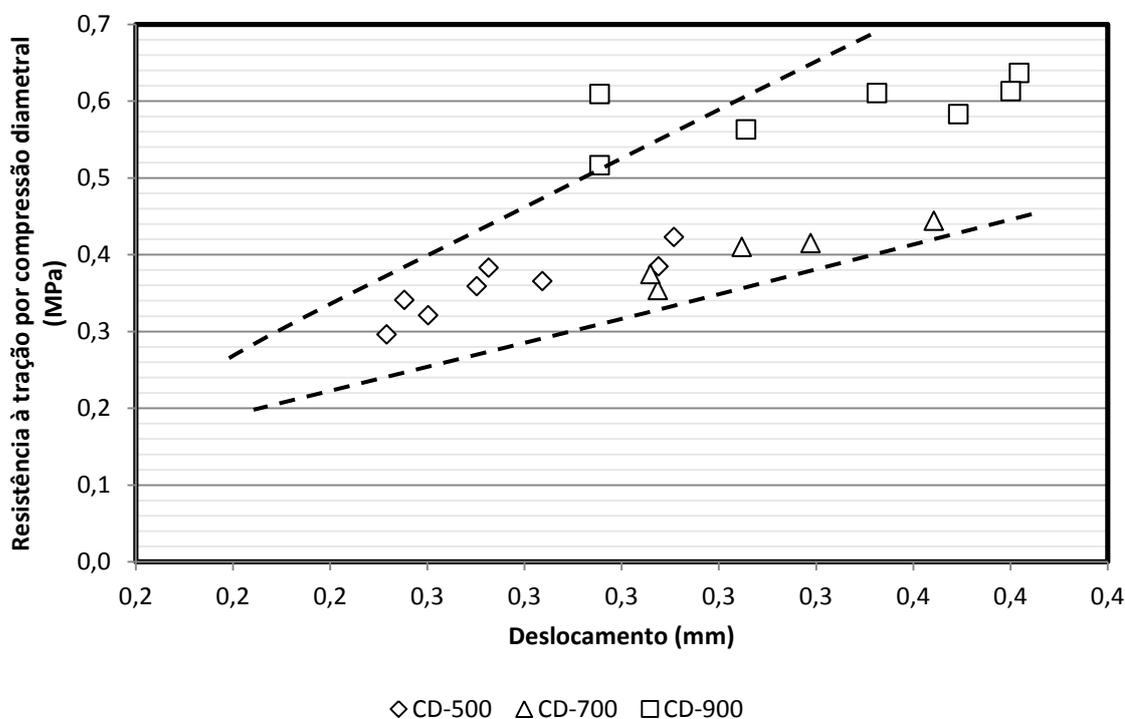


Figura 4.20 – Resultados do ensaio de compressão diametral em diferentes temperaturas.

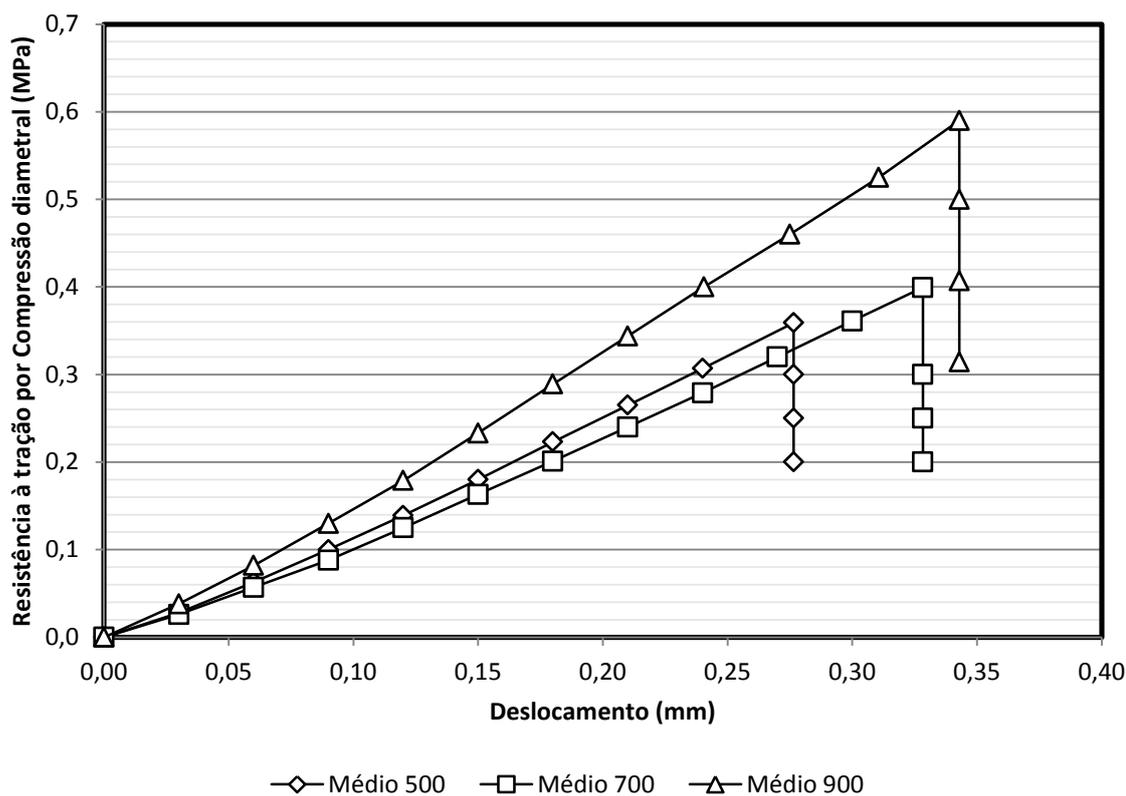


Figura 4.21 – Resultados do ensaio diametral.

4.3.4. Resistência à Tração pelo Ensaio Brasileiro

A Tabela 4.10 apresenta os resultados de resistência à tração pelo ensaio brasileiro em seu valor máximo e médio, à 50%, com seus respectivos desvios padrões. Os resultados do ensaio brasileiro apresentaram valores similares, principalmente entre as temperaturas de 500 e 700 °C. Como já observado no ensaio de compressão diametral, o comportamento mecânico nas temperaturas de 900°C apresentaram maiores valores.

Tabela 4.10 – Resultados do ensaio brasileiro à 500°C, 700°C e 900°C.

Temp. (°C)	σ_{br} (MPa)	$\sigma_{(50\%)}$ (MPa)
500	0,32 ± 0,04	0,16 ± 0,02
700	0,33 ± 0,05	0,17 ± 0,02
900	0,51 ± 0,10	0,25 ± 0,05

σ_{br} – Resistência à tração pelo ensaio brasileiro.

$\sigma_{br(50\%)}$ – Resistência à tração, 50%.

A Figura 4.22 apresenta os valores máximos do ensaio brasileiro para cada amostra de acordo com a temperatura de queima. É possível notar que há uma tendência, na elevação do índice do ensaio brasileiro.

Os valores apresentados na Figura 4.23 correspondem aos valores médios dos ensaios realizados em cada lote de corpos de prova admitindo o mesmo nível de deslocamento. Cada lote é constituído por 10 corpos de prova e queimados em uma mesma temperatura.

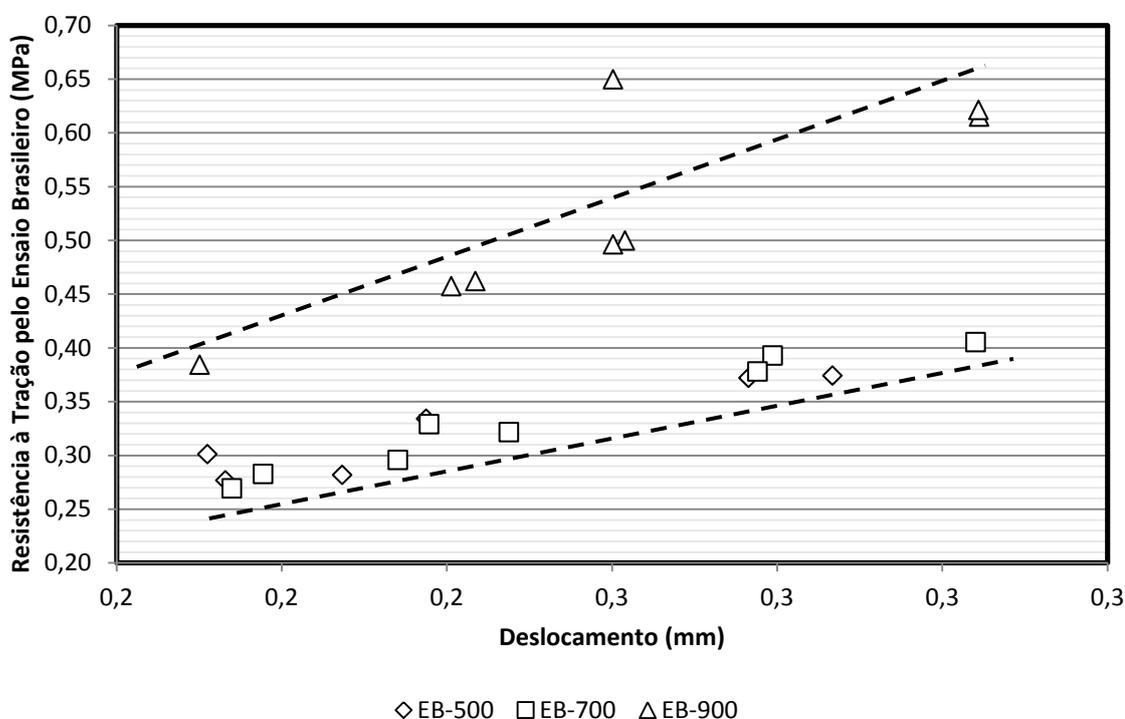


Figura 4.22 – Resultados de resistência à tração pelo ensaio brasileiro e médias em diferentes temperaturas.

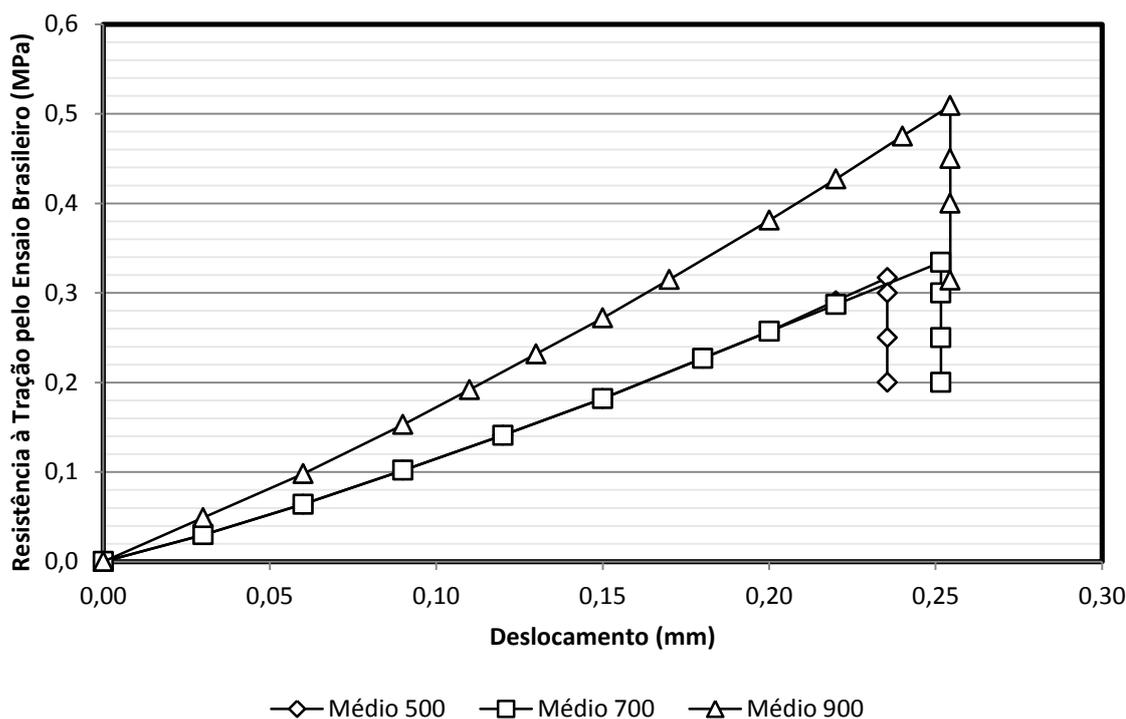


Figura 4.23 – Resultados do ensaio brasileiro.

4.3.5. Resistência à Tração pelo Ensaio de Cunha

A Tabela 4.11 apresenta os valores médios dos parâmetros analisados e dos resultados da tenacidade à fratura e resistência à fratura.

A influência das propriedades físicas na tenacidade é diretamente observada nos resultados obtidos no ensaio da cunha. Principalmente no que se diz respeito a sua estrutura cristalina, isto é, a fase que se encontra as transformações ocorridas pela a influência das temperaturas de queima. Nos resultados, observa-se um aumento do índice de tenacidade (K_{ic}) de acordo com a temperatura de queima e também da resistência à tenacidade (σ_{rc}). Apesar de que as propriedades físicas, principalmente a absorção de água e porosidade, serem maiores para a temperatura de queima de 700°C, não confere ao material uma maior resistência à tração, comparado principalmente com a 900°C. Observou-se que as transformações na mudança de fase (ATD e TG) ocorridas neste processo confere ao corpo de prova uma maior resistência á tração, já que essas transformações ocorrem de uma estrutura cristalina com ligações iônicas mais fracas para uma estrutura cristalina com ligações mais fortes, para maiores temperaturas de queima.

Tabela 4.11 – Resultados dos parâmetros de resistência à tração obtidos pelo ensaio de cunha.

Temp. (°C)	D (cm)	h (cm)	μ	a (cm)	α (°)	K_{Ic} (MPa \sqrt{m})	σ_{rc} (MPa)
500	36,84	35,04	0,505	1,47		0,0190 \pm 0,001	0,0802 \pm 0,006
700	36,73	35,05	0,472	1,51	11	0,0214 \pm 0,004	0,0895 \pm 0,016
900	36,32	34,37	0,446	1,44		0,0274 \pm 0,004	0,1180 \pm 0,019

4.3.6. Resistência à Tração pelo Mini-Pressiômetro

Para entendermos melhor o procedimento do ensaio mini-pressiométrico necessitamos conhecer o comportamento da borracha utilizada para a transferência de tensões axiais em tensões radiais. Utiliza-se do ensaio triaxial aplicado à borracha para obter as tensões (σ_1) e deformações (ε_1 e ε_v) ocorridas em diferentes tensões de confinamento (σ_3).

Na Figura 4.24, demonstra os resultados obtidos pelo ensaio triaxial. Observa-se que a borracha utilizada no ensaio mini-pressiométrico admite uma tendência linear, independentemente das tensões de confinamento e que quanto maior essas tensões de confinamento, maiores são as tensões desviadora ($\sigma_1 - \sigma_3$) aplicadas para uma mesma deformação axial. Quando analisamos os comportamentos da deformação axial VS deformação volumétrica,, observa-se que para maiores tensões de confinamento as deformações volumétricas são menores para uma mesma deformação axial. Esses comportamentos são esperados devido ao confinamento aplicado à borracha.

Para aplicação de tensões de confinamento muito elevada, há a necessidade de um equipamento triaxial de alta resistência, capaz de resistir tais tensões. O equipamento do ensaio triaxial utilizado neste trabalho, não nos permite a aplicação de tensões muito elevadas. Para isso, optou-se de uma modelagem hiperbólica aplicada à borracha apta a representar o comportamento linear, como visto no ensaio triaxial.

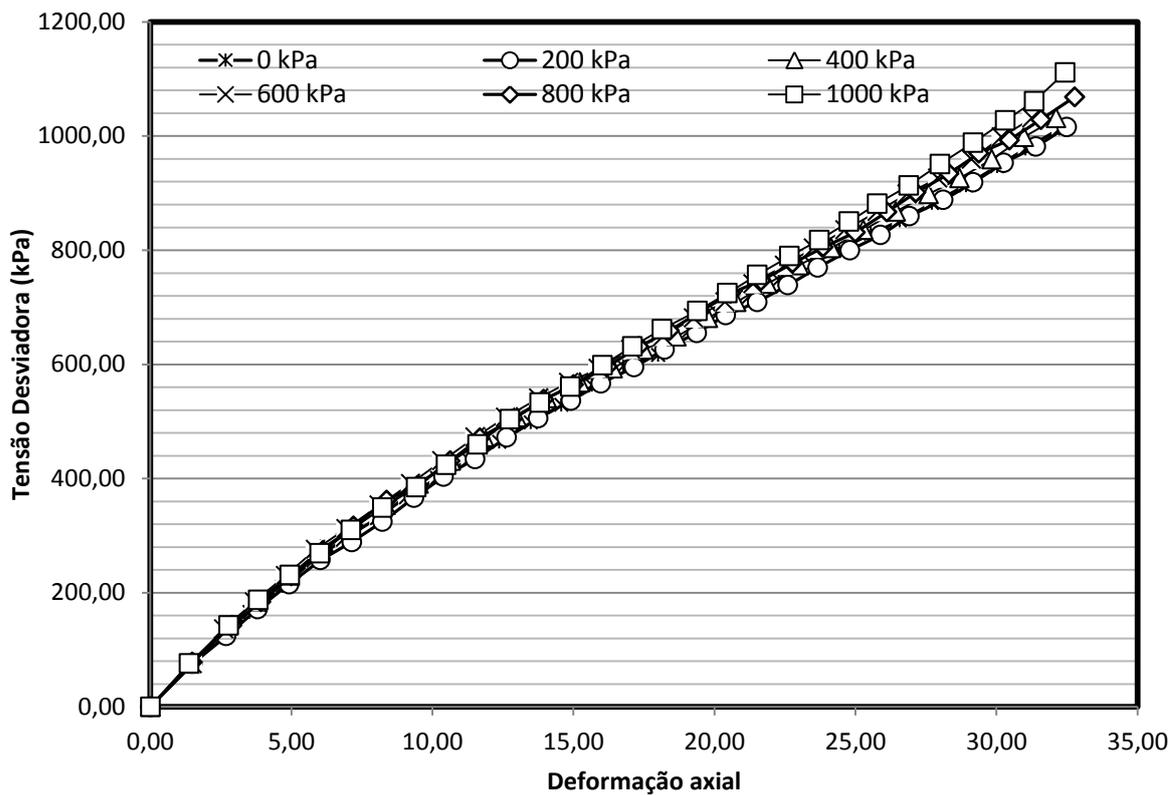


Figura 4.24 –Tensão VS Deformação – Ensaio Triaxial.

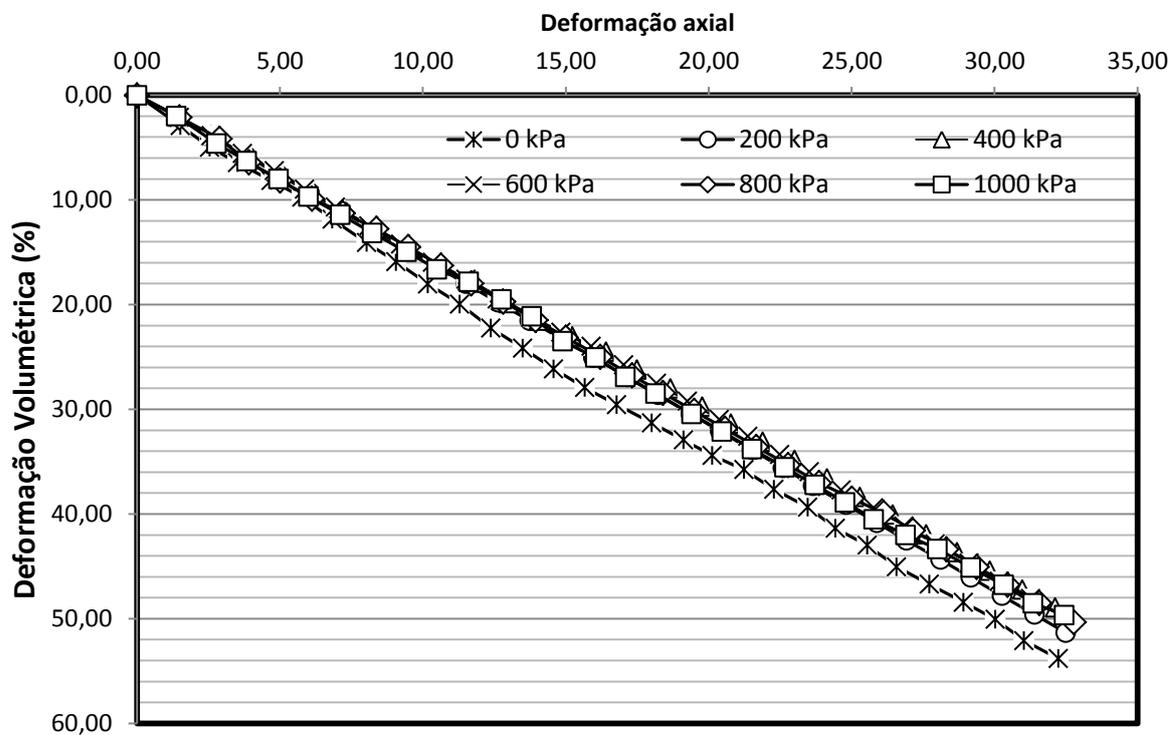


Figura 4.25 –Deformação Axial VS Deformação Volumétrica – Ensaio Triaxial.

Utilizando-se do modelo hiperbólico e, considerando valores de ruptura bem elevados, em torno de 1800 a 2100 kPa, já que a borracha não chega à ruptura, para tensões de confinamento de 0, 200, 400, 600, 800 e 1000 kPa, pode-se construir um modelo analógico que represente o comportamento experimental do ensaio triaxial na borracha. A Figura 4.26, representa o resultado da elaboração do modelo hiperbólico para tais tensões de confinamento. Observa-se a linearidade e a posição correspondente a cada tensão de confinamento para as deformações axiais e tensões desviadora, comparando-se com o ensaio triaxial. A Figura 4.27 representa o resultado da elaboração do modelo hiperbólico para as tensões de confinamento. Do mesmo modo há uma linearidade do ensaio em diferentes tensões de confinamento para as deformações axiais e deformações volumétricas.

De posse desse modelo, pode-se então obter tensões de confinamentos mais elevadas. Permitindo assim uma análise das tensões de confinamento e deformações volumétricas ocorridas no ensaio mini-pressiométrico.

A Figura 4.28 apresenta as curvas do ensaio mini-pressiométrico. A partir desta curva, é possível verificar o comportamento da borracha após a realização do ensaio. A expansão da borracha antes do contato com as paredes da cavidade é representada pelos pontos A_1 , A_2 e A_3 , de acordo com as temperaturas de queima dos corpos de prova à 500°C, 700°C e 900°C, respectivamente. A elevação da pressão a partir do ponto A, representa o início a transferência de pressão. O ponto B indica a expansão da cavidade e o ponto C indica a fratura na cavidade, cuja pressão é denominada de P_f (ponto de fratura).

A Tabela 4.12 apresenta os resultados do ponto de fratura (P_f), tensão interna (σ_i) e tensão mini-pressiométrica (σ_{mp}) do ensaio mini-pressiômetro em suas respectivas temperaturas de queima.

Observa-se uma ligeira queda no ponto de fratura (P_f) de acordo com as temperaturas de queima. Provavelmente estão ligadas as propriedades intrínsecas do material. Apesar de estes valores apresentarem esta gradual diminuição, a tensão mini-pressiométrica (σ_{mp}) apresenta um discreto aumento em comparação com outros ensaios já realizados, como por exemplo, ensaio brasileiro.

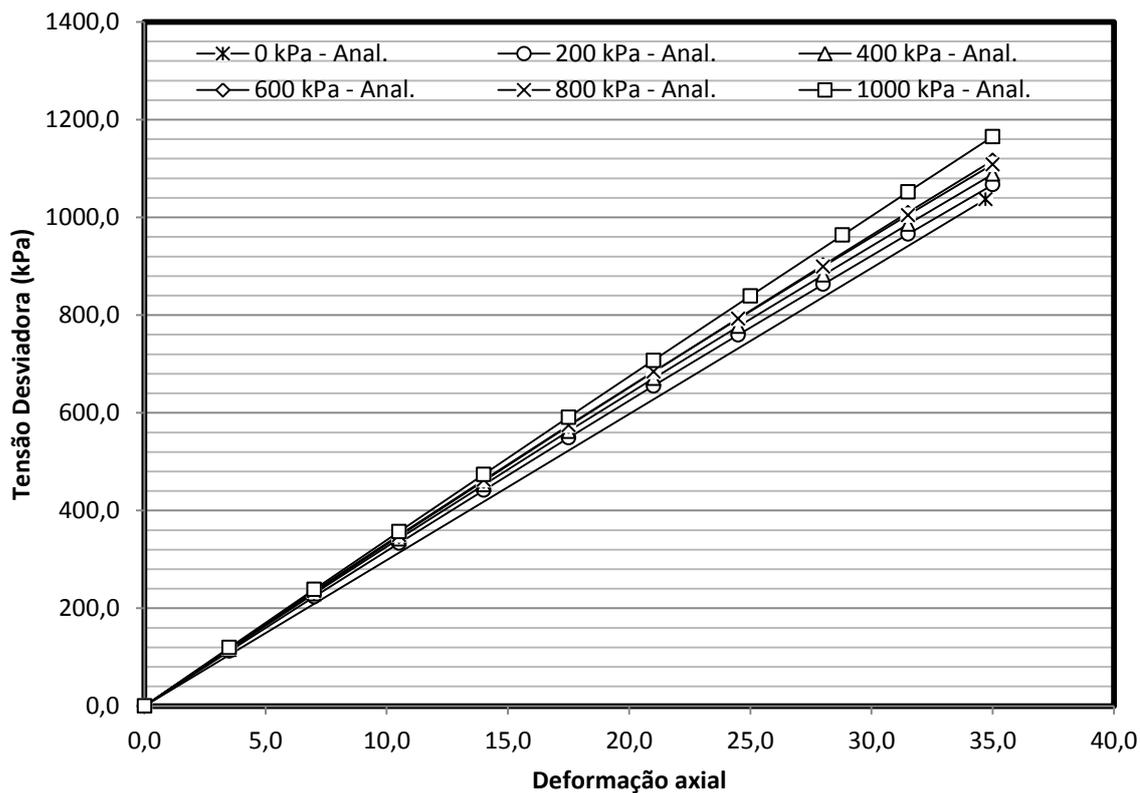


Figura 4.26 – Tensão VS Deformação – Modelo Hiperbólico.

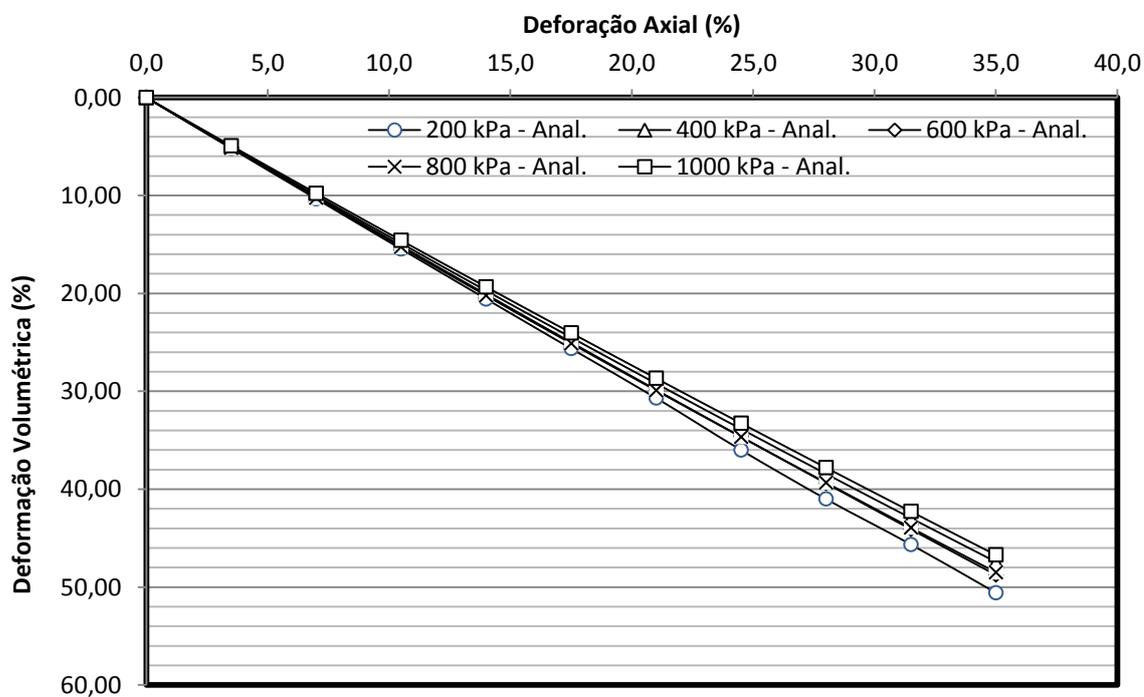


Figura 4.27 – Deformação Axial VS Deformação Volumétrica – Modelo Hiperbólico.

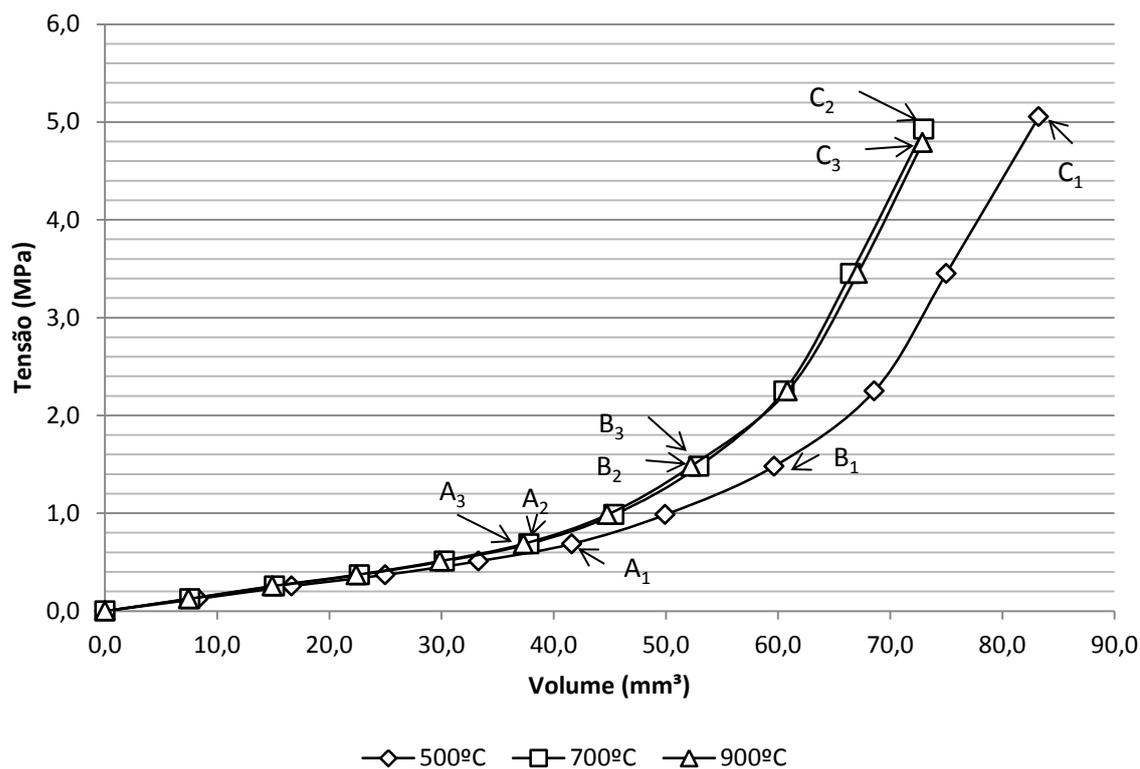


Figura 4.28 – Curva dos ensaios do mini-pressiômetro.

Tabela 4.12 – Resultados do ensaio mini-pressiômetro

Temp. (°C)	P_f (MPa)	σ_i (MPa)	σ_{mp} (MPa)
500	5,05 ± 0,44	2,38	0,31
700	4,93 ± 0,20	2,22	0,35
900	4,79 ± 0,21	2,15	0,49

A Figura 4.29 apresenta uma relação em comparação do ensaio brasileiro e mini-pressiômetro, em suas respectivas temperaturas de queima. Observa-se uma boa concordância entre os resultados, demonstrando a viabilidade do ensaio mini-pressiômetro perante outros ensaios.

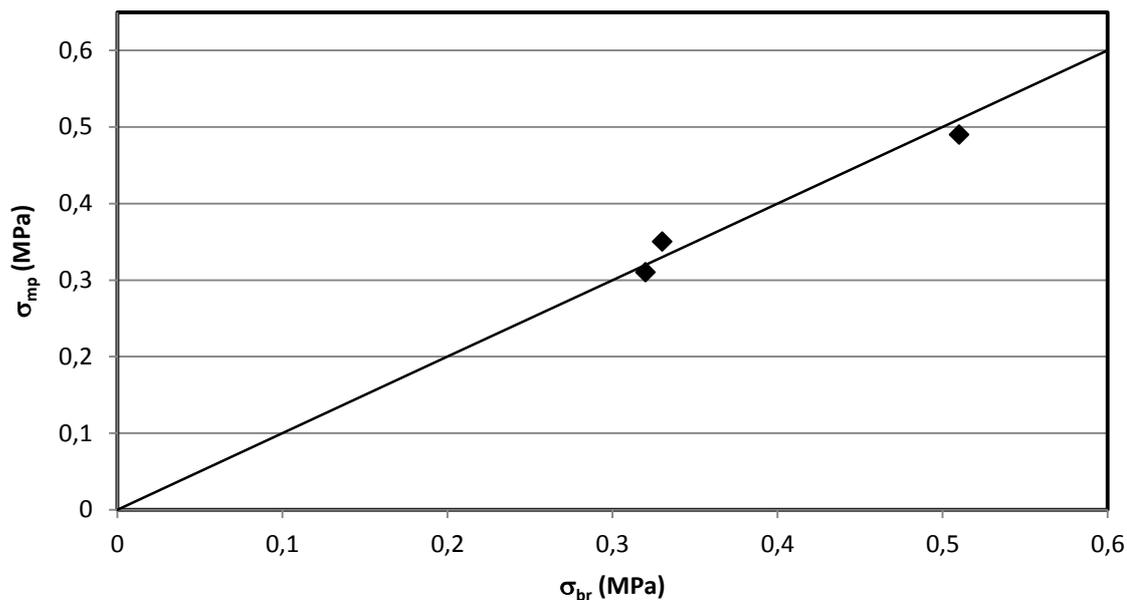


Figura 4.29 – Comparação do mini-pressiômetro com o ensaio brasileiro.

A Figura 4.30 apresenta os valores do ensaio mini-pressiômetro, brasileiro e também o ensaio diametral. Observa-se que o ensaio mini-pressiômetro, além de uma boa relação com o ensaio brasileiro, apresenta também valores aproximados dos valores do ensaio diametral, corroborando ainda mais a eficiência do ensaio mini-pressiométrico.

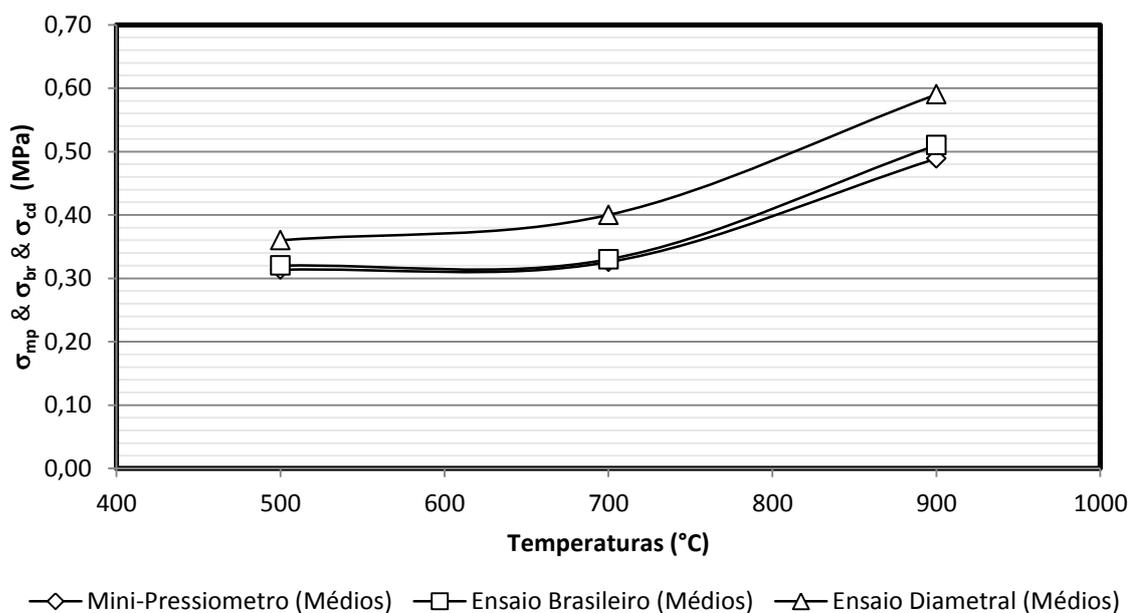


Figura 4.30 – Resultados dos ensaios mini-pressiômetro, brasileiro e diametral.

4.4. Ensaios de Durabilidade

4.4.1. Slake-Durability

A variação de perda de massa da amostra queimada à 500°C, demonstrado pelo Índice de desgaste, entre o 1º ao 5º ciclo, é bem superior aos demais (Figura 4.31). Isso ocorre, provavelmente, devido à dexidroxilação dos argilominerais presentes nas argilas, conseqüentemente, apresentando uma menor resistência ao desgaste.

As amostras queimadas à 700°C e 900°C, demonstraram valores de degradação aproximados, mas os valores da amostra queimada à 900°C apresentam os menores índices de degradação, isto é, uma maior resistência ao desgaste. A aproximação desses resultados está ligada devido a sua fase cristalina. Apesar de uma diferença significativa na temperatura de queima, não foi suficiente para tornar o material mais resistente ao desgaste.

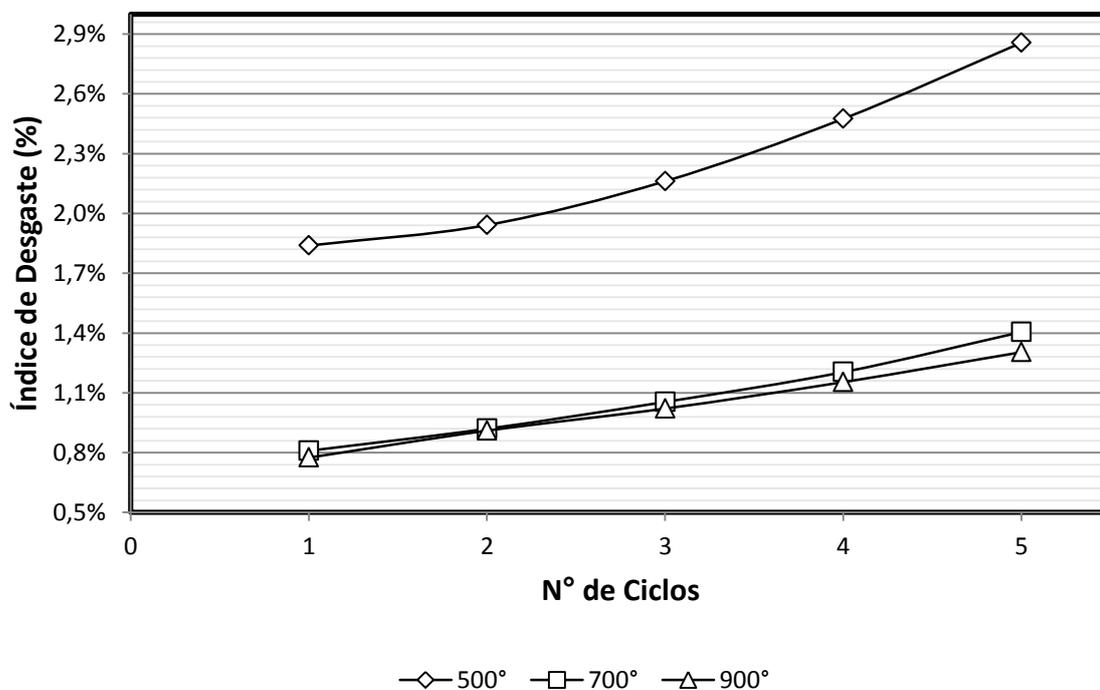


Figura 4.31 – Índice de desgaste slake-durability de acordo com o número de ciclos.

Analisando os resultados do Índice de desgaste de acordo com Gamble (1971) e Maia (2002), Tabela 2.5, pode-se dizer que o material cerâmico, queimada a 500°C, 700°C e 900°C, no 5º ciclo, pode-se classificar o material cerâmico no grupo de durabilidade de *Muito Alta*.

A Tabela 4.13 apresenta os resultados do índice de desgaste slake-durability no 2º e 5º ciclo. Observa-se que no 5º ciclo, os resultados tornam-se mais significativos, demonstrando-se adequados o uso de maiores ciclos de ensaio, como representado por Maia (2002).

4.4.2. Micro Deval

A Tabela 4.13 apresenta os valores do índice de desgaste micro Deval para o material estudado. A variação do índice de desgaste é análogo a variação do índice de desgaste no slake-durability.

Tabela 4.13 – Resultados do ensaio micro-Deval.

Temp.	I _{MD} (%)
500 °C	70,79
700 °C	57,63
900 °C	37,33

A diferença ocorre, no entanto na magnitude dos índices de desgaste (Figura 4.32). Enquanto o ensaio micro-deval provoca desgastes na parte mais interna das partículas, o ensaio slake-durability gera desgaste apenas na porção mais superficial. Esse efeito é inerente às características dos ensaios.

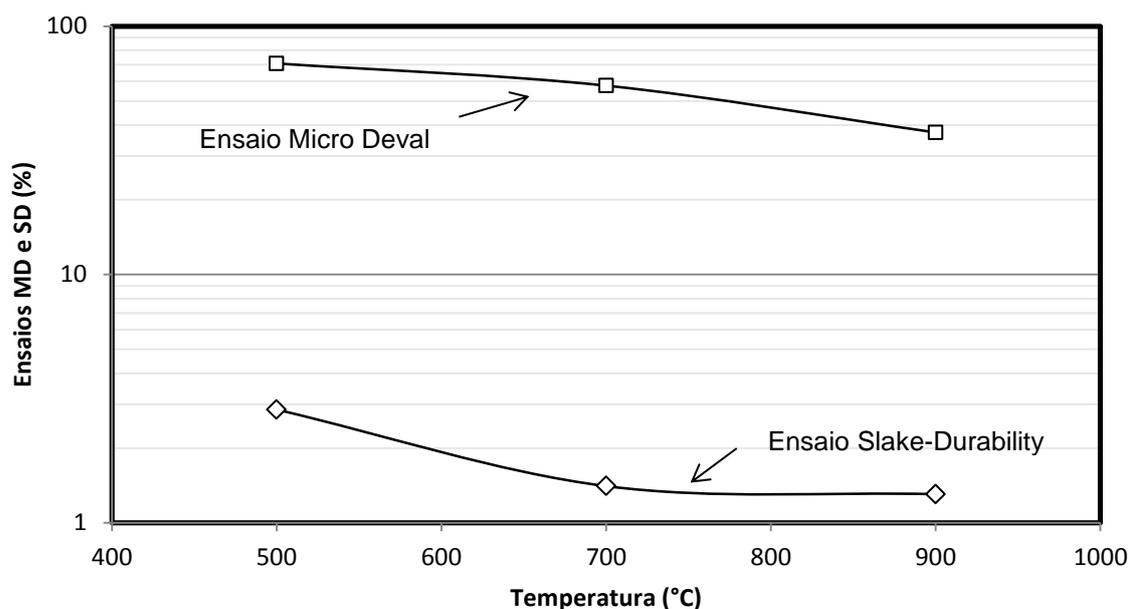


Figura 4.32 – Resultados dos ensaios slake-durability e micro Deval.

5. CONCLUSÕES

As argilas utilizadas no Pólo Cerâmico de Campos dos Goytacazes são consideradas argilas caulínicas. Pode-se constatar essa classificação como observado pelo os resultados dos ensaios de caracterização da argila utilizada neste trabalho. Tendo assim, uma boa coerência com as argilas utilizada por diversos autores mencionados na dissertação. As temperaturas de queima escolhidas são as mais apropriadas para determinação dos parâmetros cerâmicos, quando se usa dessa argila. Variações dos resultados da caracterização, certamente, influenciarão nas escolhas destas temperaturas, mas não de maneira tão significativa.

As escolhas do formato dos corpos de prova estão diretamente ligadas aos ensaios nos quais serão utilizados. Como vimos, os corpos de prova cerâmicos apresentam um comportamento de fratura frágil, tornando-se difíceis a sua confecção em determinadas geometrias. Para os ensaios convencionais, o uso de vigotas é bem convidativo, devido a sua rápida execução e manuseio durante todo o processo nos quais são utilizadas.

Os ensaios não-convencionais apresentam certas particularidades de acordo com cada ensaio. Em sua maioria, são de fáceis execuções. O ensaio micro Deval, apresentou-se dispendioso devido ao uso das vigotas que tiveram de serem redimensionadas para adequar as condições estabelecidas pelo procedimento do ensaio. A execução do entalhe para o ensaio da cunha apresentou dificuldades devido ao processo manual utilizado para serrar.

A preparação dos corpos de prova para o ensaio de mini-pressiômetro também tornou dispendioso devido à confecção do pré-furo central conforme indicado pelo ensaio ou norma.

Os ensaios convencionais apresentaram resultados coerentes conforme indicado na literatura. A absorção de água, porosidade aparente, retração linear, massa específica aparente e tensão de ruptura à flexão estão diretamente relacionadas com a temperatura de queima nos quais os corpos de provas foram submetidos. Seus valores também estão ligados ao tipo de classificação da argila, no caso, caulínica.

Pode-se observar que em todos os ensaios não-convencionais há uma relação direta com os ensaios convencionais, já que estão todos diretamente correlacionados com as temperaturas de queima.

Com o ensaio de compressão uniaxial, podemos observar claramente essa relação. Quanto maior a temperatura de queima, maior será sua resistência. Como é constatado para os demais ensaios não-convencionais e de flexão. Podemos destacar ainda a classificação da cerâmica, comparando seus resultados de compressão uniaxial com os obtidos em rochas, segundo a ISRM (1977), pode-se ser classificada sua resistência como Rocha Muito Branda ou Muito Baixa.

O ensaio de compressão diametral e brasileiro são perfeitamente executados para materiais cerâmicos e apresentam resultados relevantes perante aos ensaios não-convencionais. O ensaio mini-pressiômetro apresenta valores bem aproximados dos obtidos pelo ensaio diametral e brasileiro, corroborando com a utilização do ensaio mini-pressiômetro como determinação rápida e eficaz.

O ensaio da cunha apresenta viável para a determinação da tenacidade à fratura dos materiais cerâmicos, sendo um ensaio de simples execução e de fácil análise.

Para a determinação da degradação dos materiais cerâmicos, os ensaios slake-durability e o micro deval, apresentaram resultados satisfatórios.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABC. “Associação Brasileira de Cerâmica.” 2010. www.abcerm.org.br (acesso em 16 de janeiro de 2010).

ABRIROCHAS, Associação Brasileira da Indústria da Rocha. *Associação Brasileira da Indústria da Rocha*. 2010.

Alexandre, J. *Caracterização das Argilas do Município de Campos dos Goytacazes/RJ para Utilização em Cerâmicas Vermelhas*. Tese de Mestrado, Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 1997.

Alexandre, J. *Análise da Matéria Prima e Composições da Massa Utilizada em Cerâmicas Vermelhas*. Tese de Doutorado, Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2000.

Almeida, G. C. P. *Caracterização Física e Classificação dos Solos*. Juiz de Fora: Universidade de Juiz de Fora / Departamento de Transporte, 2004.

Almeida, I. R. “Betões de Alta Resistência e Durabilidade, Composição e Características.” In: *Tese de Doutorado*. Lisboa, Portugal: Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, 1990.

Amorim, L. V., G. A. Neves, R. A. Oliveira, e H. C. Ferreira. “Estudo da Expansão por Umidade (EPU) em Tijolos Cerâmicos Provenientes de Edifícios em Alvenaria Estrutural com Falência Estrutural.” Florianópolis, 2001.

Amorós, J. L., E. Sánchez, E. Cantavella, e M. Monzó. “Propriedades Mecânicas de los Soportes Cerámicos Crudos.” *Qualicer*, 2000: 59-75.

Andrade, P. M., H. S. N. Neto, e U. C. M. F. Monteiro. “Efeito da Adição de Fonolito na Sinterização de Argila.” *Cerâmica* 51 (2005): 361 - 370.

Bachi, A. “Queima de Corpos Cerâmicos.” 2007.

Barton, C. C. “Variables in fracture energy, toughness of rock.” *Proceedings of the 24th US Symposium On Rock Mechanics*, 1983: 449-62.

Bernucci, L. B., L. M. G. Motta, e J.A. P. Veratti. "Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros." De PETROBRAS, 504. Rio de Janeiro: ABEDA, 2006.

Bitencourt, E. R. *Utilização de Matéria Prima Alternativa na Fabricação de Tijolos de Argila Vermelha e Branca*. Joinville: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2004.

Borlini, M. C, J. L. C Mendonça, D. G. Pinatti, R. A. Conte, e C. M. F. Vieira. "Cerâmica com cinza de bagaço de cana de açúcar: avaliação da influência da cinza e da sua granulometria nas propriedades físicas e mecânicas." *17º CEBCIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 2006.

Branco, J. C. *Argilosminerais*. Departamento de Geologia, Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2007.

Callister Jr, W D. *Ciência e Engenharia dos Materiais. Uma Introdução*. 5ª Edição. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.

Conde, M. C., da G. C. Dinis, e M. G. Lopes. "Correlação entre o Comportamento Mecânico de Agregados e das Rochas Originais." *9º Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro*, 2004.

Cruz, L. O. M. "Pavimentação Intertravada de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento." Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

Donovan, J. G., e M. G. Karfakis. "Adaptation of a simple wedge test for the rapid determination of mode I fracture toughness and the assessment of relative fracture resistance. ." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004: 1-7.

Dowling, N. E. "Mechanical behavior of material engineering methods for deformation, fracture, and fatigue." *Upper Saddle River* (Prentice-Hall), 1999.

Farjallat, J. E. S. "Relatório sobre o Tema: Desagregação do Basalto Compacto Usado no Enrocamento do Aterro da Ponte do Rio de Sucuriú." *I Semana Paulista de Geologia Aplicada, v.3, tema 3*, 1972.

Figueiredo, S. C. *Estudo Exploratório de Incorporação da Lama de Filtros Rotativos à Vácuo (LFRV), Gerada na Millennium Inorganic Chemical, em uma Matriz Cerâmica Vermelha*. Tese de Mestrado, Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2008.

Filho, F. A. "Utilização do Rejeito Industrial Cerâmico - Chamole - Como Fator de Qualidade na fabricação de Elementos Cerâmicos: Estudo Experimental." *Cerâmica* vol. 43 (1997).

Fonseca, M. G., D. R. de Paula, R. A. Teixeira, F. G. Melchades, e A. O. Boschi. "Estudo de Matérias Primas Fundentes." *Anais do 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 1999.

Fookes, P. G, C. S. Gourley, e C. Ohikere. "Rock Weathering in Engineering Time." *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 21, 1983: 33 - 57.

Frazão, E. B., e L. G. Caruso. "Síntese do Conhecimento sobre Alterabilidade de Rochas Basálticas como Materia de Construção em Algumas Barragens da Bacia do Alto Paraná." *Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, ABMS, vol. II A*, 1983: 21 - 33.

Gamble, J. C. "Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks." 232. University of Illinois, 1971.

Garcia, P. D. *Contribuição a Resistência à Compressão de Paredes de Alvenaria de Blocos Cerâmicos*. Dissertação de Mestrado, São Carlos-SP: Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 2000.

Ghosh, S., e et al. "Development of Ceramics Tiles from Common Clay and Blast Furnace Slag." *Ceramics International* vol. 28 (2008).

Goodman, R. A. *Introduction to Rock Mechanics*. Vol. second edition. New York: Jhon Wiley e Sons, 2989.

Gopinath, T. R., V. C. A. Crus, e J. A. Freire. "Estudo do Comparativo da Composição Química e as Variedades de Argilas Bentoníticas da Região de Boa Vista." *Revista de Geologia* vol. 16 (2003): nº 1.

Grayson, M. "Encyclopedia of Glass, Ceramic and Cement." John Wiley e Sons, 1985.

Griffith, A. A. "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids." *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 1921: 163-193.

Hobbs, P, H Omar, e L J West. "Mini-pressuremeter for measuring the tensile strength of wear rocks." *International Society for Rock Mechanics News Journal*, 1998: 13-17.

ISRM. "Suggested Methods for Determining the Fracture Toughness of Rock, Ouchterlony, F, Coordinator." *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1983: 25:73-96.

Jiménez, A. M. G. "Estudos Experimentais de um Agregado Reciclado de Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para Utilização em Pavimentação." Edição: Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil. Brasília: Universidade de Brasília, 2011.

Machado, A T. *Estudo da Incorporação e Estabilização do Pó de Aciaria Elétrica em Matriz de Cerâmica Vermelha*. São Paulo: Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, 2005.

Maia, P. C. de A. *Avaliação do Comportamento Geomecânico de Alterabilidade de Enrocamento*. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro: Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2001.

Menzes, F. A. C, M. N. Freire, e G. De A. Neves. "Sais Solúveis e Efluorescência em Blocos Cerâmicos e Outros Materiais de Construção - Revisão." *Cerâmica*, 2006: 37 - 49.

Mesquita, M. P. S., e A. C. Artur. "O Granito Branco Ceará e sua Resistência ao Ataque de Substâncias Químicas Agressivas." *I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais*, 2005.

Milani, A. P. de S. *Avaliação Físico-Mecânica de Tijolos de Solo-Cimento e de Solo-Cal Adicionados de Casca de Arroz*. Tese de Mestrado, Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2005.

Milheiro, G. F., M. N. Freire, A. G. P. Silva, e J. N. F. Holanda. "Densification Behaviour of a Red Firing Brazilian Kaolinitic Clay." *Cerâmica Internacional* vol. 31 (2005).

Miller, C. P. *Determinação de Parâmetros Mecânicos e Modelagem Numérica em Alvenaria Estrutural em Blocos Cerâmicos da Indústria de Campos dos Goytacazes*. Tese de Mestrado, Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2008.

Morette, G. F., R. P. R. Paranhos, e J. N. F. Holanda. "Avaliações de Algumas Propriedades Físico-Mecânicas de Corpos Cerâmicos Incorporados com Resíduo de Escória de Soldagem." *Revista Matéria* vol. 11 (2006).

Motta, J. F. M., A. Zanardo, e M. Cabral Jr. "As Matérias Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e seus Produtos." *Cerâmica Industrial* vol. 6 (2001): nº 2.

Motta, J. F. M., M. Cabral Jr, A. Zanardo, e L. C. Tanno. "As Matérias Primas Cerâmicas. Parte II: Os Minerais Industriais e as Massas da Cerâmica Tradicional." *Cerâmica Industrial* vol. 7 (2002): nº 1.

Nair, R. J., e D. M. Wood. "Pressuremeter Testing - Methods and Interpretation Butterworth." 1987.

Olgun, A., Y. Erdogan, e B. Zeybeck. "Development of Ceramic Tiles from Coal Fly Ash and Tincal Ore Waste." *Cerâmica Internacional* vol. 31 (2005).

Oliveira, A. P. N. "Tecnologia de Fabricação de Revestimento Cerâmico." *Cerâmica Industrial* vol. 7 (2000): nº 6.

Oliveira, A. P. N., O. R. K. Monteiro, J. Pizete, e M. Casagrande. "Matérias Primas Empregadas na Fabricação de Tijolos e Blocos de Construção: Características e Influência sobre as Propriedades do Produto Final." *Cerâmica*, 2000: 57 - 65.

Pauling, L. *The Structure of the Micas and related Mineral*. Vol. 16. Proc. Nat. Acab. Sci. U. S., 1930.

Petrucci, E. G. R. "Materiais de Construção." 1999.

Ramos, I. de S. *Os depósitos Silte-Argilosos da Planície de Imundação do Rio Paraíba do Sul em Campos dos Goytacazes-RJ, como Fonte de Materiais para Indústria de Cerâmica Vermelha*. Tese de Doutorado, Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2006.

Raupp-Pereira, F, e et al. "Extrusion and Property Characterisation of Waste-Based Ceramic Formulations." *Journal of the European Ceramic Society* vol. 27 (2007).

Ribeiro, M. J. *Aspectos Fundamentais Sobre a Extrusão da Massa cerâmica Vermelha*. Vol. 1. 2003.

Ribeiro, S., C. C. D. Exposito, e J. A. Rodrigues. "Projeto, Adaptação, Instalação e Testes Preliminares para um Sistema de Medida de Energia de Fratura de Materiais Cerâmicos pelo Método de Cunha." *Cerâmica*, 54, 2008: 418 - 426.

Richerson, D. W. "Modern Ceramic Engineering. Properties, Processing and Design." New York, 1992.

Romano, R. C. O. "Obtenção e propriedades de Cerâmicas porosas pela Técnica de Incorporação de Espuma." *Cerâmica*, 52, 2006: 213 - 219.

Salles, R. O. "Durabilidade de geossintéticos em equipamento de Degradação em Laboratório." Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2006.

Salles, R. O, e P. C. de A. Maia. "Avaliação Experimental da Alterabilidade de Rochas Ornamentais do Norte do Estado do Rio de Janeiro." São Carlos-SP, 2004.

Sánchez-Muñoz, L, S. da S Cava, C. A. Paskicimas, E. Cerisuelo, E. Longo, e J. B. Carda. "Seleção de Matéria Prima no Desenvolvimento de Formulação de Massa Cerâmica, nº 306." *Cerâmica* vol. 48 (2002).

Santos, P. S. *Ciência e Tecnologia das Argilas*. Vol. 1. São Paulo: EDUSP, 1989.

Smith, W. F. "Princípio de Ciência e Engenharia dos Materiais, 3ª edição." Gran-Hill, 1998.

Tanno, L. C, e J. F. M. Motta. "Panorama Setorial - Minerais Industriais." *Cerâmica Industrial* vol. 5 (2000): nº 3.

Teixeira, R. A. "A Variação das Características das Argilas eo Processo Cerâmico." *Cerâmica Industrial* vol. 3 (2002): nº 7.

Vieira, C. M .F, T. M. Soares, e S. N. Monteiro. "Massas Cerâmicas para Telhas: Características e Comportamento de queima." *Cerâmica* vol. 49 (2003).

Vieira, C. M. F., T. M. Soares, R. Sánchez, e S. N Monteiro. "Efeito da Incorporação de Resíduo de Serragem de Granito em Massa Cerâmica Vermelha." *Vértices* nº 3 (2003).

Wentworth, C. K. *Methods of Mechanical Analysis of Sediments*. 1920. www.people.uncw.edu (acesso em 14 de janeiro de 2010).

Whittaker, B. N., R. N. Singh, e G. Sun. "Rock fracture mechanics principles, design and applications." (Elsevier) 1922.

Xavier, G. de C. *Utilização de Resíduos da Serragem do Mármore e Granito na Confecção de Peças Cerâmicas Vermelhas*. Tese de Doutorado, Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2001.

Zanotto, E. D., e A. R Migliore Jr. "Propriedades Mecânicas de Materiais Cerâmicos: Uma Introdução." *Cerâmica*, 1991.