

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS.

MATHEUS PIAZZALUNGA NEIVOCK

CONFORMAÇÃO DE PÓS CERÂMICOS:

Estudo comparativo entre laminação e prensagem.

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO.
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA.
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS.

MATHEUS PIAZZALUNGA NEIVOCK

**CONFORMAÇÃO DE PÓS CERÂMICOS:
Estudo comparativo entre laminação e prensagem.**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Márcio Celso Fredel, Dr-Ing.
Co-Orientador: Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, PhD.

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 2008.

MATHEUS PIAZZALUNGA NEIVOCK

CONFORMAÇÃO DE PÓS CERÂMICOS:

Estudo comparativo entre laminação e prensagem.

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia dos Materiais e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Márcio Celso Fredel, Dr.-Ing.
Orientador
EMC/UFSC

Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, PhD.
Co-Orientador
EMC/UFSC

Prof. Ana Maria Maliska, Dr^a.
Coordenadora - PGMAT
EMC/UFSC

Banca examinadora:

Prof. Carlos Renato Rambo, Dr. Eng.
EQA/UFSC

Prof. Orestes Estevam Alarcon, Dr. Eng.
EMC/UFSC

Prof. Márcio Raymundo Morelli, PhD.
MAT/UFSCar

FLORIANÓPOLIS, ABRIL E 2008.

FICHA CATALOGRÁFICA

NEIVOCK, Matheus Piazzalunga

CONFORMAÇÃO DE PÓS CERÂMICOS: Estudo comparativo entre laminação e prensagem., Florianópolis, UFSC, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, 2008.

xiii, 113 p.

Dissertação de Mestrado: Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Márcio Celso Fredel, Dr.-Ing.

Co-Orientador: Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, PhD.

1. Laminação 2. Pós cerâmicos 3. Análise matemática

I. Universidade Federal de Santa Catarina.

II. Título

*"Há homens que lutam um dia e são bons.
Há outros que lutam um ano e são melhores.
Há os que lutam muitos anos e são muito bons.
Porém, há os que lutam toda a vida.
Esses são os imprescindíveis."*

Bertolt Brecht.

AGRADECIMENTOS

A tarefa de listar pessoas, as quais os agradecimentos são merecidos, não é tarefa fácil, afinal, as dificuldades impostas foram muitas e em cada um destes momentos, contou com a participação especial de uma pessoa, seja ela, um professor, ao transmitir-me seus conhecimentos, ou os funcionários da limpeza, que mantinham a organização no ambiente de trabalho.

Gostaria de me desculpar antecipadamente pelo inevitável esquecimento.

Por estas razões, agradeço:

A todos os professores que ao longo destes anos de graduação e pós-graduação ajudaram a me constituir como ser humano.

Ao professor Márcio Celso Fredel, pela orientação e apoio para o desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Hazim Ali Al-Qureshi, pela co-orientação, conselhos e sábios ensinamentos.

Ao professor Orestes E. Alarcon, por tornar possível a realização deste trabalho.

Aos alunos de IC, Débora Moreira de Fúcio, Luis Fernando Zanini e Vanessa Feliciano, pelo companheirismo e ajuda incessante.

Em especial, aos meus pais, pelo apoio incondicional e oportunidades que me deram, nunca poupando esforço para que eu pudesse concretizar minhas vontades.

A minha companheira, Flávia Maria Feroldi Ferreira, pela compreensão, companheirismo e amor.

Obrigado mais uma vez a todos que participaram de maneira direta ou indireta e que permitiram a realização deste trabalho.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE GRÁFICOS.....	11
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	12
RESUMO.....	14
ABSTRACT	15
CAPÍTULO 1: Introdução	16
1.1 – Contextualização.....	17
1.1.1 – Indústria de Revestimento.....	17
1.1.2 – Indústria de Tijolos e Telhas.....	19
1.1.3 – Motivação.....	20
1.1.4 – Panorama econômico.....	21
1.1.5 – Panorama energético.....	22
1.1.6 – Desafio proposto.....	24
1.2 – OBJETIVOS.....	25
1.2.1 – Objetivo geral.....	25
1.2.2 – Objetivos específicos.....	25
CAPÍTULO 2: Fundamentação teórica	26
2.1 – Materiais Cerâmicos.....	27
2.1.1 Matérias-Primas.....	30
2.1.2 Processos de fabricação de materiais cerâmicos.....	31
2.1.2.1 – Prensagem.....	32
2.1.2.2 – Colagem (Casting).....	32
2.1.2.3 – Usinagem.....	33
2.1.2.4 – Conformação Plástica.....	33
2.1.3 – Laminação.....	34
2.1.3.1 – Laminação em cerâmicos.....	36
2.1.4 – Plasticidade.....	38
CAPÍTULO 3: Análise matemática	41
3.1 - Apresentação.....	42
3.2 – Análise matemática do processo de laminação.....	42
3.2.1 – Comprimento do arco de contato.....	43
3.2.2 – Ângulo de contato (α).....	44
3.2.3 – Trabalho plástico na laminação.....	47
CAPÍTULO 4: Metodologia	52
4.1 – Procedimento experimental.....	53
4.1.1 – Considerações experimentais.....	53
4.2 – Construção do laminador de escala laboratorial	54
4.3 – Matéria-prima	59
4.3.1 – Caracterização do pó cerâmico.....	60
4.3.1.1 – Análise mineralógica.....	61
4.3.1.2 – Distribuição granulométrica.....	61
4.3.1.3 – Densidade real dos sólidos.....	61
4.3.1.4 – Determinação dos índices de plasticidade.....	62
4.4 – Confecção dos corpos-de-prova laminados (CPL´s).....	63
4.4.1 – Preparação do pó para laminação.....	63
4.4.2 – Obtenção das placas laminadas.....	64
4.4.3 – Preparação dos corpos-de-prova laminados (CPL´s).....	64

4.4.4 – Caracterização dos corpos-de-prova laminados (CPL´s)	66
4.5 – Análise matemática, procedimento experimental.	70
4.5.1 – Obtenção da curva tensão – densidade aparente	73
4.5.2 – Obtenção da curva absorção de água – densidade aparente	74
4.5.3 – Validação da análise matemática.	75
4.6 – Confecção dos corpos-de-prova prensados (CPP´s).....	75
4.6.1 – Caracterização dos corpos-de-prova prensados (CPP´s).....	76
4.7 – Confecção dos corpos-de-prova prensados – referência (CPP-R´s)	76
4.7.1 – Caracterização dos corpos-de-prova prensados – referência (CPP-R´s) ..	76
4.8 – Projeto do laminador piloto em escala industrial	76
CAPÍTULO 5: Resultados e discussões	78
5.1 – Matéria-prima (pó).....	79
5.1.3 – Densidade real dos sólidos (ρ_{RS}).....	80
5.1.4 – Índices de plasticidade.....	80
5.2 – Matéria-prima (grânulos).....	80
5.2.1 – Umidade real.	81
5.2.2 – Densidade batida (<i>Tap density</i>).....	81
5.3 – Corpos-de-prova laminados (CPL´s).....	82
5.3.1 – Densidade aparente.....	82
5.3.2 – Absorção de água.....	83
5.3.3 – Resistência à flexão.....	84
5.3.5 – Retração linear.	86
5.4 – Análise matemática.	87
5.4.1 – Obtenção da curva tensão – densidade aparente	87
5.4.2 – Obtenção da curva tensão – absorção de água.	89
5.4.3 – Validação da análise matemática.	90
5.5 – Corpos-de-prova prensados (CPP´s).....	94
5.5.1 – Definição da pressão de compactação.....	94
5.5.2 – Densidade aparente.....	95
5.5.3 – Absorção de água.....	95
5.5.4 – Resistência a flexão.....	96
5.5.5 – Retração linear.	97
5.6 – Corpos-de-prova prensados – referência (CPP-R´s)	98
5.6.1 – Densidade aparente.....	98
5.6.2 – Absorção de água.....	98
5.6.3 – Resistência a flexão.....	99
5.6.4 – Retração linear.	99
5.7 – Comparação dos resultados.....	100
5.7.1 – Densidade aparente.....	100
5.7.2 – Absorção de água.....	101
5.7.3 – Resistência a flexão.....	102
5.7.4 – Retração linear.	103
5.8 – Projeto do laminador piloto em escala industrial.	104
CAPÍTULO 6: Conclusões e Sugestões	107
6.1 – Conclusões.....	108
6.2 – Sugestões para trabalho futuros.	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático do processo de laminação.....	35
Figura 2 – Estado de consistência em uma mistura de pó com um líquido ou ligante.	40
Figura 3 – Esquema de deformações adotados.....	42
Figura 4 – Detalhe da região de laminação com ênfase geométrico.....	43
Figura 5 – Detalhe de contato entre os cilindros de laminação em movimento e o corpo a ser laminado.	45
Figura 6 – Esquema do processo de laminação e forças envolvidas.....	48
Figura 7 – Arranjos típicos de cilindros.	55
Figura 8 – Laminador de massas.	56
Figura 9 – Protótipo do laminador laboratorial, vista lateral.....	56
Figura 10 – Protótipo do laminador laboratorial, vista em perspectiva.	57
Figura 11 – Protótipo do laminador laboratorial, vista frontal.	57
Figura 12 – Detalhe dos tensionadores de correia.....	57
Figura 13 – Detalhe do protótipo, bandas de restrição de fluxo lateral.	58
Figura 14 – Detalhe do protótipo, distância entre as bandas de restrição de fluxo lateral.....	59
Figura 15 – Detalhe do protótipo, posicionamento das bandas de restrição de fluxo lateral.....	59
Figura 16 – Moinho torre.	60
Figura 17 – Técnica de picnometria líquida.....	62
Figura 18 – Direções de corte adotadas.	65
Figura 19 – Exemplo de amostras laminadas.	66
Figura 20 – Máquina universal de ensaios Emic, modelo DL-2000.....	67
Figura 21 – Material estudado, sinterizado a 850°C por 10 minutos.	69
Figura 22 – Material estudado, sinterizado a 900°C por 10 minutos.	69
Figura 23 – Material estudado, sinterizado a 950°C por 10 minutos.	69
Figura 24 – Material estudado, sinterizado a 1000°C por 10 minutos.	69
Figura 25 – Material estudado, sinterizado a 1050°C por 10 minutos.	69
Figura 26 – Material estudado, sinterizado a 1100°C por 10 minutos.	69
Figura 27 – Material estudado, sinterizado a 1150°C por 10 minutos.	70
Figura 28 – Comportamento típico das curvas de tensão – deformação	71
Figura 29 – Matriz de compactação utilizada.	74
Figura 30 – Projeto do laminador piloto, vista lateral, frontal e superior.	105
Figura 31 – Projeto em perspectiva.....	106
Figura 32 – Laminador piloto, vista lateral.....	106
Figura 33 – Laminador piloto, vista frontal.	106
Figura 34 – Detalhe, unidade de laminação.....	106
Figura 35 – Detalhe, alimentador.	106
Figura 36 – Detalhe, unidade motriz.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais Produtores de Revestimento Cerâmico – Milhões m ²	18
Tabela 2 – Principais Consumidores de Revestimento Cerâmico – Milhões m ²	19
Tabela 3 – Preço do gás natural praticado nos estados brasileiros [9].	23
Tabela 4 – Setores cerâmicos, matérias-primas e características de processo.....	31
Tabela 5 – Fases mineralógicas.....	79
Tabela 6 – Distribuição do tamanho de partícula (% em peso).....	79
Tabela 7 – Índices de plasticidade.....	80
Tabela 8 – Umidade real.....	81
Tabela 9 – Densidade batida (<i>Tap density</i>).....	81
Tabela 10 – Densidade aparente (CPL's).....	82
Tabela 11 – Absorção de água (CPL's).....	83
Tabela 12 – Parâmetros de Weibull (CPL's).....	85
Tabela 13 – Retração linear (CPL's).....	86
Tabela 14 – Equações obtidas a partir das curvas tensão – densidade aparente a verde.....	88
Tabela 15 – Equações obtidas a partir das curvas tensão – absorção de água (900 °C).	90
Tabela 16 – Coeficientes de atrito interno.....	91
Tabela 17 – Tensões de compactação calculadas.....	94
Tabela 18 – Densidade aparente (CPP's).....	95
Tabela 19 – Absorção de água (CPP's).....	95
Tabela 20 – Parâmetros de Weibull (CPP's).....	97
Tabela 21 – Retração linear (CPP's).....	97
Tabela 22 – Densidade aparente (CPP-R's).....	98
Tabela 23 – Absorção de água (CPP-R's).....	98
Tabela 24 – Parâmetros de Weibull (CPP-R's).....	99
Tabela 25 – Retração linear (CPP-R's).....	99
Tabela 26 – Densidade aparente.....	100
Tabela 27 – Absorção de água.....	101
Tabela 28 – Parâmetros de Weibull.....	102
Tabela 29 – Retração linear.....	103

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução do saldo comercial da indústria de revestimento cerâmico [7].	22
Gráfico 2 – Eficiência energética por forma de uso no setor cerâmico [12].	24
Gráfico 3 – Ciclo térmico utilizado para sinterização dos CPL´s – PARTE A.	67
Gráfico 4 – Ciclo térmico utilizado para sinterização dos CPL´s – PARTE B.	68
Gráfico 5 – Distribuição de Weibull 16% #8 D1 (CPL´s).	84
Gráfico 6 – Distribuição de Weibull 16% #8 D2 (CPL´s).	84
Gráfico 7 – Distribuição de Weibull 16% #18 D1 (CPL´s).	84
Gráfico 8 – Distribuição de Weibull 16% #18 D2 (CPL´s).	84
Gráfico 9 – Distribuição de Weibull 18% #8 D1 (CPL´s).	85
Gráfico 10 – Distribuição de Weibull 18% #8 D2 (CPL´s).	85
Gráfico 11 – Distribuição de Weibull 18% #18 D1 (CPL´s).	85
Gráfico 12 – Distribuição de Weibull 18% #18 D2 (CPL´s).	85
Gráfico 13 – Propriedade mecânica 16% #8.	87
Gráfico 14 – Propriedade mecânica 16% #18.	87
Gráfico 15 – Propriedade mecânica 18% #8.	87
Gráfico 16 – Propriedade mecânica 18% #18.	87
Gráfico 17 – Propriedade mecânica corrigida 16% #8.	88
Gráfico 18 – Propriedade mecânica corrigida 16% #18.	88
Gráfico 19 – Propriedade Mecânica corrigida 18% #8.	88
Gráfico 20 – Propriedade Mecânica corrigida 18% #18.	88
Gráfico 21 – Absorção de água 16% #8.	89
Gráfico 22 – Absorção de água 16% #18.	89
Gráfico 23 – Absorção de água 18% #8.	90
Gráfico 24 – Absorção de água 18% #18.	90
Gráfico 25 – Comparação entre modelagem matemática e dados experimentais variação 16% #8.	92
Gráfico 26 – Comparação entre modelagem matemática e dados experimentais variação 16% #18.	92
Gráfico 27 – Comparação entre modelagem matemática e dados experimentais variação 18% #8.	93
Gráfico 28 – Comparação entre modelagem matemática e dados experimentais variação 18% #18.	93
Gráfico 29 – Distribuição de Weibull 16% #8 (CPP´s).	96
Gráfico 30 – Distribuição de Weibull 16% #18 (CPP´s).	96
Gráfico 31 – Distribuição de Weibull 18% #8 (CPP´s).	96
Gráfico 32 – Distribuição de Weibull 18% #18 (CPP´s).	96
Gráfico 33 – Distribuição de Weibull (CPP-R´s).	99

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- X – Direção cartesiana;
Y – Direção cartesiana;
Z – Direção cartesiana;
 ϵ_x – Deformação na direção x;
 ϵ_y – Deformação na direção y;
 ϵ_z – Deformação na direção z;
O – Ponto de origem;
A – Ponto de entrada;
B – Ponto auxiliar;
C – Ponto de saída;
L – Comprimento do seguimento AB;
F_n – Força normal;
f – Força de atrito;
 Δh – Variação da altura;
h_i – Altura inicial;
h_f – Altura final;
R – Raio do cilindro de laminação;
AO – Segmento, representa a distância do ponto A até o ponto O;
AB – Segmento, representa a distância do ponto A até o ponto B;
BO – Segmento, representa a distância do ponto B até o ponto O;
 α – ângulo de contato;
OC – Segmento, representa a distância do ponto O até o ponto C
 μ – coeficiente de atrito;
U_i – Energia plástica ou energia interna do material;
 σ – Tensão de resistência do material;
e – Deformação do material;
F – Força de laminação;
T – Torque;
 β – Fator de correção;
l_d – Comprimento do arco de contato;
b – Largura do corpo laminado.
a – Distância de atuação da força de laminação;
 σ_{MC} – Tensão de escoamento de Mohr-Coulomb;
 $\sigma_{Mod'}$ – Tensão de escoamento Mohr-Coulomb modificada por Al-Qureshi [39];
 $\sigma_{Mod'}$ – Tensão de escoamento Mohr-Coulomb proposta neste trabalho;
 λ – Fator de forma;
 μ_i – Atrito interno entre as partículas;
 Ψ – Fator de empacotamento máximo permitido;
CPL's – Corpos-de-prova laminados;
CPP's – Corpos-de-prova compactados;
CPP-R's – Corpos-de-prova compactados – referência;
 ρ – Densidade;
M – Massa;
V – Volume;
c – Comprimento;
K – Constante;
 ρ_{RS} – Densidade real dos sólidos;
 ρ_V – Densidade aparente – Peças a verde;

-
- ρ_Q – Densidade aparente – Peças queimadas;
 m – Módulo ou coeficiente de Weibull;
 σ_0 – Parâmetro de normalização, caracteriza a probabilidade de falha = 0,632;
 k_1 – Constante dependente do material;
 k_2 – Constante dependente do material;
 σ_1 – Valor de tensão proveniente da curva tensão – densidade aparente;
 σ_2 – Valor de tensão proveniente da curva tensão – absorção de água (900 °C);

RESUMO

Neste trabalho foi investigado um processo alternativo a prensagem para a fabricação de placas cerâmicas com geometria plana; a laminação de grânulos cerâmicos. Também foi realizada uma análise matemática do processo, a fim de se entender como as diferentes variáveis se relacionavam. Utilizando a mesma composição de uma massa de Porcelanato, empregada industrialmente, o trabalho demonstrou que é possível a obtenção de placas cerâmicas laminadas a partir de grânulos cerâmicos sem a utilização de ligantes ou aditivos de plastificação específicos, unicamente através do controle da umidade incorporada ao sistema. Foi estudada a influência do tamanho de grânulo, percentual de umidade e direção de laminação nas propriedades físicas e mecânicas das placas. Os corpos-de-prova foram caracterizados em relação à densidade aparente, absorção de água, retração linear e resistência à flexão. O processo de laminação apresentou excelentes resultados em relação ao processo de prensagem à mesma faixa de pressões de compactação. As amostras laminadas com 18% de umidade apresentaram em média 34 MPa de resistência mecânica flexural contra 18 MPa das amostras prensadas. Em relação à densidade aparente, retração linear e absorção de água, os resultados foram muito similares, mostrando que o processo de laminação não interfere negativamente nestas propriedades. A metodologia adotada para o desenvolvimento da análise matemática do processo mostrou-se eficaz, com os resultados da simulação matemática bastante próximos aos valores experimentais. O processo de laminação de pós cerâmicos se mostrou uma promissora rota alternativa ao processo de prensagem, podendo vir a preencher uma lacuna deste, a fabricação de peças de grandes dimensões.

ABSTRACT

This work investigates an alternative process for the manufacture of tiles with flat geometry; the lamination of ceramic granules. A mathematical analysis of the process was also made in order to understand how the different variables are related. Using the same composition of a Porcelanato® mass employed in industry, the work demonstrated that it is possible to obtain laminated tiles from ceramic granules without the use of binders or specific additives of plasticity, but only through the control of humidity embedded in the system. The influence of the size of granules, the percentage of humidity and direction of lamination on physical and mechanical properties of the plates were studied. The samples were characterized in relation to the apparent density, absorption of water, linear retraction and flexural strength. The process of lamination showed excellent results with regard to the process of pressing on the same range of compression pressures. Laminated sample with 18% moisture presented on average 34 MPa of flexural mechanical resistance against 18 MPa of samples pressed. Regarding the apparent density, linear retraction and absorption of water, the results were very similar, showing that the process of lamination does not interfere negatively in these properties. The methodology adopted for the development of the mathematical analysis of the process proved to be effective, with the results of the mathematical simulation quite close to the experimental values. The process of lamination ceramic of powders showed to be a promising alternative route to the process of pressing and may be able to fill this gap for the manufacture of large components.

CAPÍTULO 1:

Introdução

1.1 – Contextualização

A cerâmica tem um papel importante para economia do país, com participação no PIB (Produto Interno Bruto) estimado em 1%, correspondendo a cerca de 6 bilhões de dólares [1]. A abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais, fizeram com que as indústrias brasileiras evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial com apreciável quantidade exportada.

O setor industrial da cerâmica é bastante diversificado e pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica e isolantes térmicos [1]. No Brasil existem todos estes segmentos, com maior ou menor grau de desenvolvimento e capacidade de produção. Além disso, existem fabricantes de matérias-primas sintéticas para cerâmica (alumina calcinada, alumina eletrofundida, carbetos de silício e outras), de vidrados e corantes, gesso, equipamento e alguns produtos químicos auxiliares.

1.1.1 – Indústria de Revestimento.

Segundo a ANFACER, (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento), a indústria de revestimento cerâmico no Brasil é um segmento produtivo com capital essencialmente nacional, alinhado com a melhor tecnologia disponível no mundo e, com grande parte de sua produção, em conformidade com as normas internacionais de qualidade ISO [2].

Apesar deste segmento estar disperso pelo país, a produção é concentrada em algumas regiões. A região de Criciúma, em Santa Catarina, que tem reconhecimento como pólo internacional, concentra as maiores empresas brasileiras. Nessa região as empresas produzem com tecnologia via úmida e competem por design e marca, em faixas de preços mais altas. No estado de São Paulo, a produção está distribuída em dois pólos: Mogi-Guaçu e Santa Gertrudes. As empresas da capital e Mogi-Guaçu produzem com tecnologia via úmida, enquanto em Santa Gertrudes a tecnologia utilizada pela maioria das empresas é via

seca. O nordeste brasileiro pode se tornar um pólo em futuro próximo, devido às condições favoráveis de existência de matéria-prima em abundância, energia viável e um mercado consumidor em desenvolvimento, além de boa localização geográfica para exportação.

As informações setoriais indicam que o parque produtivo brasileiro de cerâmica para revestimentos é constituído por 94 empresas ativas e 117 plantas industriais. O setor também é um grande gerador de empregos com cerca de 23 mil postos de trabalho diretos e em torno de 250 mil indiretos, em toda a cadeia produtiva, tendo fechado o ano de 2006 com a produção de 594,2 milhões de m² e a previsão de 653,6 milhões de m² para 2007. O setor é ainda um grande consumidor de energia [2]. A produção brasileira de revestimentos cerâmicos continua em seu processo de expansão.

A tabela 1 mostra a evolução da produção de revestimentos cerâmicos dos principais produtores mundiais [2].

Tabela 1 – Principais Produtores de Revestimento Cerâmico – Milhões m².

PAÍS / ANO	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
China	1.600	1.807	1.810	1.868	1.950	2.200	3.100	4000
Espanha	602	621	638	651	624	625	648	660
Brasil	428	453	473	508	534	566	568	594
Itália	606	632	638	606	603	601	572	570
Índia	85	97	109	150	190	270	303	320
Indonésia	130	200	220	230	260	293	-	-
Turquia	150	175	150	162	189	-	-	-
México	130	138	167	159	171	-	-	-
Tailândia	70	56	63	100	135	-	-	-
Irã	60	71	78	95	120	-	-	-
Demais	980	1.070	1.154	1.211	1.254	2.006	-	-
TOTAL	4.841	5.320	5.500	5.740	6.030	6.300	-	-

Assim, o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de revestimentos cerâmicos, posto atingido em 2006 ao superar a Itália, que migrou e concentrou esforços, em especial, no fabrico do grés porcelanato. Vale a pena ressaltar que o mercado interno é um grande consumidor de revestimentos cerâmicos, e em 2006, absorveu cerca de 81% da produção interna, fazendo do Brasil o segundo consumidor mundial [2], como mostrado na tabela 2.

Tabela 2 – Principais Consumidores de Revestimento Cerâmico – Milhões m².

PAÍS / ANO	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
China	1.300	1.400	1.500	1.600	1.700	1.850	2.500	2460
Brasil	383	395	417	456	421	448	442	486
Espanha	273	290	312	327	332	337	379	393
E.U.A.	195	212	211	245	267	296	319	312
Itália	192	1984	164	144	147	192	-	-
Índia	85	97	102	145	180	-	306	321
Alemanha	192	184	164	144	147	-	-	-
México	87	100	129	141	146	-	-	-
Indonésia	95	164	168	110	130	-	-	-
França	114	122	125	124	125	-	-	-
Demais	1.569	1.571	1.822	1.951	2.093	2.937	-	-
TOTAL	4.485	4.735	5.142	5.426	5.724	6.060	-	-

Como mostrado o Brasil está entre os maiores produtores e consumidores de revestimento cerâmico do mundo. Contudo é perceptível que nos últimos anos não houve um incremento significativo na matriz produtiva, mesmo sendo o Brasil o quarto maior exportador mundial [2].

1.1.2 – Indústria de Tijolos e Telhas.

O número estimado de fábricas de blocos de cerâmica estrutural, blocos de vedação, tijolos e telhas é aproximadamente 5500 fábricas, sendo 63% de blocos e

tijolos e 36% de telhas. Existem, ainda, 20 fabricantes (0,1%) de tubos cerâmicos [3].

A produção mensal é da ordem de 4 bilhões de peças (blocos e tijolos), 1,3 bilhão de peças (telhas) e 465 mil metros de tubos. Esta gigantesca produção consome 7,8 milhões de toneladas de argila na fabricação de blocos e tijolos e 2,5 milhões de toneladas na fabricação de telhas, gerando 400 mil empregos diretos, 1,25 milhões de empregos indiretos, tendo um faturamento anual de R\$ 6 bilhões [3].

No Estado de Santa Catarina existem 742 olarias (oficiais) fabricando blocos, tijolos e telhas, com uma produção média mensal estimada em 100 milhões de unidades, das quais aproximadamente 20 milhões são de telhas. Esse setor é responsável por 11.000 empregos diretos e 30.000 indiretos. O faturamento bruto gira em torno de 250 milhões de reais. Este faturamento poderia facilmente ser acrescido por um fator 4 com a introdução de **novas tecnologias** de processo e design de produtos [4].

Como mostrado acima, de todos os materiais cerâmicos produzidos por mês no estado de Santa Catarina, cerca de 20% são telhas. Telhas essas, fabricadas na maioria das vezes sem um conhecimento técnico específico. Isso se deve em geral à natureza das fábricas, que por serem, em sua grande maioria de micro e pequeno porte ainda se baseiam no trabalho e tradição familiar, não possuindo assim, estrutura para custear pesquisas e buscar melhorias. Isto faz com que essas telhas apresentem um baixo padrão de qualidade e propriedades mecânicas muito pobres, inviabilizando quaisquer tentativas de exportação.

Os dados apresentados evidenciam que este é um setor com grande potencial, contudo muito carente em conhecimento e tecnologia.

1.1.3 – Motivação.

O Brasil é um país com uma tradição ceramista muito grande e que nos últimos anos vem conquistando cada vez mais espaço no mercado mundial. Esse reconhecimento é fruto do trabalho e competência da indústria nacional que se mostrou capaz de atender os rígidos padrões de qualidade impostos pelos mercados internacionais.

Entretanto, como apresentado anteriormente, pode-se concluir que existe uma estagnação no setor cerâmico nacional. Enquanto a indústria de revestimento já é uma forte exportadora e possui um mercado já estabelecido, tanto a nível nacional quanto internacional, a indústria de tijolos e telhas ainda está dando seus primeiros passos, limitada ainda pela falta de conhecimento técnico e carência tecnológica, que resultam em produtos muito aquém dos padrões internacionais, impedindo a abertura do mercado mundial para esse segmento.

Outros fatores que também geram um entrave ao setor de cerâmica vermelha é a questão do baixo valor agregado ao produto e o custo do transporte para este tipo de material, frutos também da falta de conhecimento técnico do setor, fazendo com que estes produtos deixem de oferecer atrativos significantes ao mercado, como maior resistência, um design inovador, cores diversificadas, entre outros.

É visível que existe um obstáculo ao crescimento desses setores. Para a indústria de tijolos e telhas é evidente que uma revolução tecnológica e cultural seja indispensável, como ocorreu com a indústria de revestimento cerca de duas décadas atrás. Já para a indústria de revestimento cerâmico é necessário dar continuidade ao seu crescimento tecnológico, trocando aquisições de tecnologias importadas, muitas vezes já ultrapassadas ao desembarcarem aqui no Brasil, pela criação, desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos processos produtivos com tecnologia e *know-how* nacional.

1.1.4 – Panorama econômico.

A indústria nacional se defronta com uma ameaça estratégica, que poderá comprometer seu desenvolvimento no futuro. A exemplo do que ocorre em numerosos setores, a produção e as exportações da China vêm crescendo de forma muito expressiva, em 2006 a produção chinesa atingiu 42% do total mundial e as exportações foram 21% do total [2,7]. A continuidade da expansão chinesa poderá deslocar o Brasil de seus mercados de exportação e eventualmente significar a penetração no próprio mercado brasileiro. Como mostrado no gráfico 1, o saldo comercial brasileiro é extremamente positivo no segmento de revestimento cerâmico.

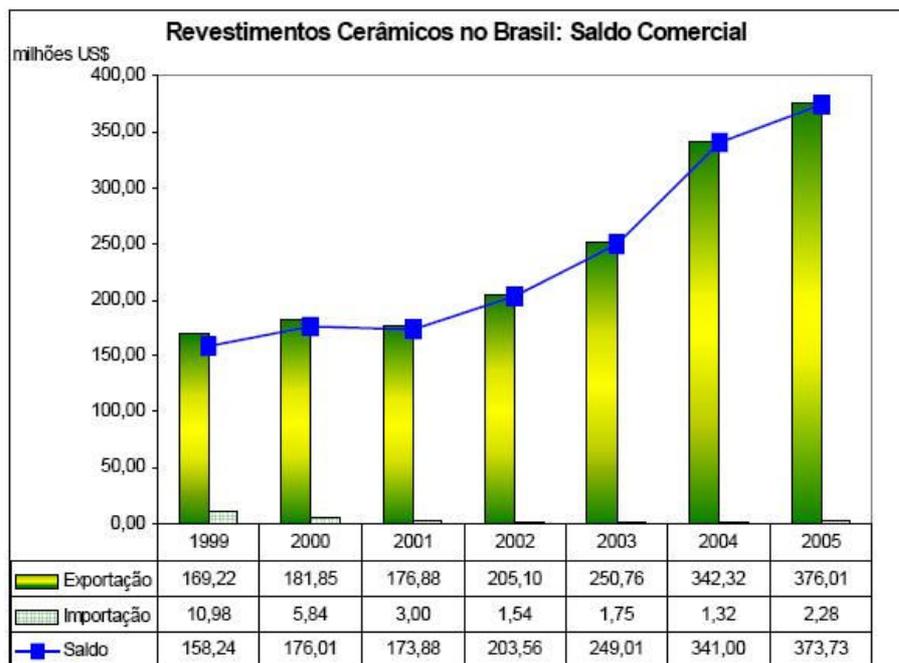


Gráfico 1 – Evolução do saldo comercial da indústria de revestimento cerâmico [7].

Um fator capaz de impulsionar a indústria nacional e torná-la mais uma vez competitiva é a introdução de conhecimento técnico e inovador em nossas linhas produtivas. Conhecimento esse que possibilitará uma maior produção a um custo menor e com um menor consumo de energia.

1.1.5 – Panorama energético.

A partir de 1996, o governo brasileiro passou a adotar medidas que estimularam a utilização do gás natural como matriz energética alternativa para as indústrias nacionais. Essas medidas envolviam incentivos fiscais, liberação de recursos públicos para empréstimos e tarifação diferenciada do produto, o que estimulou ainda mais a opção por esta alternativa energética.

Em 2000, a indústria catarinense investiu cerca de R\$ 20 milhões em infraestrutura para receber o gás natural, e hoje vive a apreensão de perder competitividade devido ao preço do gás natural no estado [8]. Conforme apresentado na tabela 3, o preço do gás natural varia muito de um estado para outro, chegando a quase 56% [9,10].

Tabela 3 – Preço do gás natural praticado nos estados brasileiros [9].

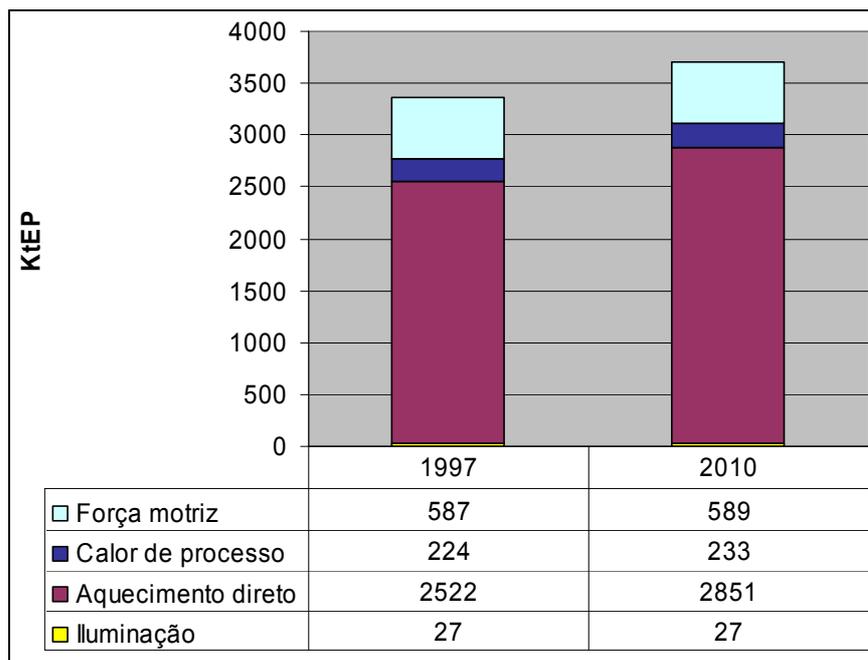
Estados	Tarifa ⁽¹⁾
Santa Catarina	500
Paraná	408
Rio Grande do Sul	387
Minas Gerais	305
Bahia	241
Rio Grande do Norte	225
Espírito Santo	220

⁽¹⁾Para 50 mil m³/dia e em R\$ mil

A outra ameaça é a possível escassez de gás natural, decorrente dos recentes problemas com a Bolívia, afinal a indústria cerâmica baseou fortemente sua matriz energética neste combustível. Na hipótese de haver dificuldades no suprimento de gás, as indústrias seriam forçadas a recorrer a fontes de energia alternativas, que em geral são de menor capacidade calorífica e mais poluentes, isso causaria um impacto negativo à sua competitividade e estratégias futuras, uma vez que a questão ambiental é cada vez mais levada a sério no Brasil.

Segundo a OCDE (Organization for Economic Co-operation and Development) [11, 12] o consumo de energia neste setor se dá principalmente em função do aquecimento direto e geração de força motriz, conforme apresentado no gráfico 2.

Estes gastos, conforme apresentado, estão diretamente ligados ao processo de fabricação e podem ser melhor utilizados com o emprego de tecnologias mais eficientes.



1GJoule = 0,00002388 KtEP.
 1MWh = 0,00008600 / 0,272 KtEP.

Gráfico 2 – Eficiência energética por forma de uso no setor cerâmico [12].

1.1.6 – Desafio proposto.

O desafio proposto por este trabalho é o estudo de um processo alternativo para a fabricação de placas cerâmicas com geometrias planas, a laminação, processo amplamente empregado na conformação de chapas metálicas e freqüentemente utilizado na consolidação de pós cerâmicos para aplicações de alto desempenho e, recentemente, no fabrico de revestimentos cerâmicos [17, 18, 19].

Tendo como referência publicações [17, 18, 19] e patentes internacionais [5, 6], foi projetado e construído um protótipo para conformar corpos cerâmicos a partir de pós, tornando possível uma melhor compreensão do processo e das variáveis envolvidas durante a laminação.

As informações obtidas serão utilizadas para compreender melhor o processo, culminando na elaboração de um equacionamento matemático que mostrará como as diversas variáveis estão relacionadas.

1.2 – OBJETIVOS.

1.2.1 – Objetivo geral.

- Compreender o processo de laminação de pós/grânulos cerâmicos e como as variáveis envolvidas se relacionam.

1.2.2 – Objetivos específicos.

- Projetar um laminador de escala laboratorial para o processamento de granulados cerâmicos;
- Criar uma metodologia para a preparação da matéria-prima para o processamento;
- Definir parâmetros de processamento, confeccionar corpos-de-prova e caracterizá-los;
- Comparar as propriedades mecânicas dos corpos de prova laminados com corpos de prova prensados
- Realizar uma análise matemática que permita, através de um equacionamento simular o processo de laminação de pós cerâmicos;
- Elaborar um projeto para um laminador em escala piloto industrial.

CAPÍTULO 2:

Fundamentação teórica

2.1 – Materiais Cerâmicos.

A definição de materiais cerâmicos é ainda algo um tanto quanto impreciso, de acordo com linha de pensamento moderna, materiais cerâmicos podem ser definidos como compostos sólidos formados pela aplicação de calor, e algumas vezes de calor e pressão, constituídos ao menos por um metal e um sólido elementar não-metálico ou um não-metal, a combinação de ao menos dois sólidos elementares não-metálicos, ou a combinação de ao menos dois sólidos elementares não-metálicos e um não-metal [20].

Já a linha tradicional os define como minerais de composição inconstante e pureza duvidosa, expostos a um tratamento térmico não-mensurável, que dura o suficiente para permitir que reações desconhecidas ocorram de modo incompleto, formando produtos heterogêneos e não-estequiométricos [21].

A verdade é que o setor cerâmico é amplo e heterogêneo, o que induz a dividi-lo em sub-setores ou segmentos, em função de diversos fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização [22]. Em geral, podem ser adotadas as seguintes classificações [13, 14, 20]:

- **Cerâmica Vermelha:** Compreende aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno. As lajotas muitas vezes são enquadradas neste grupo, porém o mais correto é incluí-las em materiais de revestimento;
- **Materiais de Revestimento (placas cerâmicas):** São aqueles materiais, na forma de placas, usados na construção civil para revestimento de paredes, pisos, bancadas e piscinas de ambientes internos e externos. Recebem designações tais como: azulejo, pastilha, porcelanato, *grés*, lajota, piso, etc;
- **Cerâmica Branca:** Este grupo é bastante diversificado, compreendendo materiais constituídos por um corpo branco e em geral recobertos por uma camada vítrea transparente e incolor e que eram assim agrupados pela cor

branca da massa, necessária por razões estéticas e/ou técnicas. Com o advento dos vidrados opacificados, muitos dos produtos enquadrados neste grupo passaram a ser fabricados, sem prejuízo das características para uma dada aplicação, com matérias-primas com certo grau de impurezas, responsáveis pela coloração. Dessa forma é mais adequado subdividir este grupo em: louça sanitária; louça de mesa; isoladores elétricos para alta e baixa tensão; cerâmica artística (decorativa e utilitária); cerâmica técnica para fins diversos, tais como: químico, elétrico, térmico e mecânico;

- **Materiais Refratários:** Este grupo compreende uma diversidade de produtos, que têm como finalidade suportar temperaturas elevadas nas condições específicas de processo e de operação dos equipamentos industriais, que em geral envolvem esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outras solicitações. Para suportar estas solicitações e em função da natureza das mesmas, foram desenvolvidos inúmeros tipos de produtos, a partir de diferentes matérias-primas ou mistura destas. Dessa forma, podemos classificar os produtos refratários quanto à matéria-prima ou componentes químicos principais em: sílica, sílico-aluminoso, aluminoso, mulita, magnésiano-cromítico, cromítico-magnésiano, carbetto de silício, grafita, carbono, zircônia, zirconita, espinélio e outros.

- **Isolantes térmicos:** Os produtos deste segmento podem ser classificados em:
 1. Refratários isolantes, que se enquadram no segmento de refratários;

 2. Isolantes térmicos não refratários, compreendendo produtos como vermiculita expandida, sílica diatomácea, diatomito, silicato de cálcio, lã de vidro e lã de rocha, que são obtidos por processos distintos ao do item anterior e que podem ser utilizados, dependendo do tipo de produto até 1100 °C;

-
-
3. Fibras ou lãs cerâmicas que apresentam características físicas semelhantes às citadas no item anterior, porém apresentam composições tais como sílica, sílica-alumina, alumina e zircônio, que dependendo do tipo, podem chegar a temperaturas de utilização de 2000° C ou mais.
- **Fritas e corantes:** Estes dois produtos são importantes matérias-primas para diversos segmentos cerâmicos que requerem determinados acabamentos, a saber:
 1. Frita (ou vidrado fritado) é um vidro líquido resfriado rapidamente em água, fabricado por indústrias especializadas a partir da fusão da mistura de diferentes matérias-primas. É aplicado na superfície do corpo cerâmico que, após a queima, adquire aspecto vítreo. Este acabamento tem por finalidade aprimorar a estética, tornar a peça impermeável, aumentar a resistência mecânica e melhorar ou proporcionar outras características;
 2. Corantes são constituídos de óxidos puros ou pigmentos inorgânicos sintéticos obtidos a partir da mistura de óxidos ou de seus compostos. Os pigmentos são fabricados por empresas especializadas, inclusive por muitas das que produzem fritas, cuja obtenção envolve a mistura das matérias-primas, calcinação e moagem. Os corantes são adicionados aos esmaltes (vidrados) ou aos corpos cerâmicos para conferir-lhes colorações das mais diversas tonalidades e efeitos especiais.
 - **Abrasivos:** Parte da indústria de abrasivos, por utilizarem matérias-primas e processos semelhantes aos da cerâmica, constituem um segmento cerâmico. Entre os produtos mais conhecidos podemos citar o óxido de alumínio eletrofundido e o carbetto de silício;

-
-
- **Vidro, Cimento e Cal:** São três importantes segmentos cerâmicos que, por suas particularidades, são muitas vezes considerados à parte da cerâmica;
 - **Cerâmica de Alta Tecnologia/Cerâmica Avançada:** O aprofundamento do conhecimento da ciência dos materiais proporcionou ao ser humano o desenvolvimento de novas tecnologias e aprimoramento das existentes nas mais diferentes áreas, como aeroespacial, eletrônica, nuclear entre outras e que passaram a exigir materiais com qualidade excepcionalmente elevada. Tais materiais passaram a serem desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por meio de processos rigorosamente controlados. Estes produtos, que podem apresentar os mais diferentes formatos, são fabricados pelo chamado segmento cerâmico de alta tecnologia ou cerâmica avançada. São classificados, de acordo com suas funções, em: eletroeletrônicos, magnéticos, ópticos, químicos, térmicos, mecânicos, biológicos e nucleares. Os produtos deste segmento são de uso intenso e com forte tendência à expansão. Como alguns exemplos, podemos citar: naves espaciais, satélites, usinas nucleares, materiais para implantes em seres humanos, aparelhos de som e de vídeo, suporte de catalisadores para automóveis, sensores (umidade, gases e outros), ferramentas de corte, brinquedos, acendedor de fogão, etc..

2.1.1 Matérias-Primas.

Os grupos cerâmicos, podem ser classificados com base no emprego dos seus produtos, natureza de seus constituintes, características texturais do biscoito (massa base), além de outras características inerentes aos materiais ou técnico-econômicas.

A tabela 4 relaciona os diversos setores cerâmicos, seus produtos e as respectivas matérias-primas utilizadas, bem como algumas características do processo de fabricação [23].

Tabela 4 – Setores cerâmicos, matérias-primas e características de processo [42].

CLASSIFICAÇÃO		PRODUTO	Matéria-prima								Processo de conformação		Temperatura de Queima (°C)										
Tipo de cerâmica	GRUPO / SETOR		Plástica			Não-plástica					Moagem via úmida	Moagem via seca	Extrusão	Tornearia	Prensagem	Colagem	800	900	1.000	1.100	1.200	>1.200	
		Argila comum	Argila plástica	Caulim	Feldspato	Filito	Talco	Calcário	Quartzo	Outros													
Cerâmica silicática de base argilosa (ou tradicional)	1	Cerâmica	Blocos, lajes	P								P											
		Vermelha	Telha	P			O					P	P										
			Agregado leve	P						O		P											
	2	Cerâmica Branca	Grés sanitário		P S	P	O	S	O	P													
			Porcelana Mesa		P	P				P	P	S	S	O									
			Porcelana Eletr.		P	P				P	P	S	S	O									
			Faiança		P O	S S	S P	S		P				P									
	3	Revestimentos	Pisos rústicos	P	O					O		P											
			Pisos via seca	P							P		P										
			Azulejo		P P			O S S		P			P										
Piso gresificado			O	P S	S P	O		S		P	O	P											
Grés porcelânico				P S	P		O	S	O	P			P										
Outras	4	Refratários			O				O P														
	5	Isolantes				O			O P														
	6	Especiais							O P														
	7	Cimento	S					P S	O	P													
	8	Vidro			S			S P	P														
P	Processo ou composição principal (> 20%)		S	Processo ou composição secundária (< 10%)					O	Processo ou composição ocasional													

2.1.2 Processos de fabricação de materiais cerâmicos.

Os processos de fabricação empregados pelos diversos segmentos cerâmicos assemelham-se parcial ou totalmente. O setor que mais se diferencia quanto a esse aspecto é o do vidro, embora exista um tipo de refratário (eletrofundido), cuja fabricação se dá através de fusão, ou seja, por processo semelhante ao utilizado para a produção de vidro ou de peças metálicas fundidas. Esses processos de fabricação podem diferir de acordo com o tipo de peça ou material desejado. De um modo geral, compreendem as etapas de preparação da matéria-prima e da massa, formação das peças, tratamento térmico e acabamento.

No processo de fabricação muitos produtos são submetidos à esmaltação e decoração [1].

As funções dos produtos cerâmicos são muito dependentes da composição química, estrutura atômica e microestrutura [13], bem como do seu processo de fabricação. Basicamente as propriedades dos materiais cerâmicos irão depender de fatores ligados à matéria-prima e a formação da peça.

Existem vários processos para dar forma a materiais cerâmicos, os quais podem ser divididos em quatro grandes grupos: prensagem, colagem, conformação plástica e usinagem a verde de pré-formados [14].

2.1.2.1 – Prensagem.

Processo pelo qual é possível obter a compactação e a moldagem de um pó ou material granulado em uma matriz rígida ou em um molde flexível. Para operações de prensagem industrial utiliza-se pó na forma de grânulos com tamanho e deformabilidade controladas. O pó granulado geralmente contém aditivos e é comumente obtido por atomização [13].

Prensagem é o processo de conformação mais empregado atualmente por razões de produtividade e capacidade de produzir peças em uma grande faixa de dimensões com tolerâncias controladas, uma vez que praticamente não ocorre retração durante a secagem. Produtos produzidos por prensagem incluem uma grande variedade de cerâmicas magnéticas e dielétricas, ferramentas de corte, pisos e outros [13].

Existem também algumas variantes deste processo que continuam a utilizar o princípio de restringir o escoamento do pó cerâmico, o que confere a forma e a densificação do produto final. São eles: Prensagem a seco, prensagem a úmido, prensagem isostática (prensagem isostática a frio ou a quente) [14].

2.1.2.2 – Colagem (Casting).

O nome do processo vem do termo inglês *casting*, comumente empregado para se referir ao processo de fundição de materiais metálicos. Nos materiais cerâmicos este processo é feito à temperatura ambiente onde partículas cerâmicas em suspensão em um meio líquido, barbotina, é vazada em um molde poroso, que

irá remover o líquido deixando apenas um particulado compactado no molde [14], daí a semelhança com o processo de fundição. Apresenta também algumas variantes que irão depender da viscosidade da barbotina empregada, do molde, dos procedimentos utilizados e produto final desejado.

Através deste processo é possível fabricar peças sólidas (*solid casting*), ocas (*slip casting*), ou fitas cerâmicas (*tape casting*), obviamente o processo escolhido dependerá do produto final desejado.

2.1.2.3 – Usinagem.

As tolerâncias e formas finais nem sempre podem ser obtidas pelos processos citados anteriormente. Em muitos casos a dimensão final é obtida através de um lixamento, polimento ou outra operação de acabamento superficial após a etapa de densificação. Para isso, são necessárias ferramentas de diamante o que pode tornar o processo muito caro [14]. Uma alternativa que fornece um bom acabamento superficial e certo controle dimensional é a usinagem a verde, onde o material passa por um processo de usinagem antes do processo de queima. Contudo é necessário cuidado ao selecionar esse processo de fabricação, visto que os materiais cerâmicos a verde não possuem grande resistência mecânica.

2.1.2.4 – Conformação Plástica.

Conformação plástica está relacionada à produção de peças a partir de uma mistura de pós e aditivos deformáveis sobre pressão. Tal mistura pode ser obtida em sistemas contendo argilo-minerais com adição de água e pequenas quantidades de floculante, ligantes e lubrificantes. Em sistemas que não contem argilo-minerais, como óxidos puros, carbetos e nitretos, um material orgânico que substitui a água ou é misturado a ela ou outro fluido para promover a plasticidade do sistema. É necessária uma adição de 25 a 50% em volume de aditivo orgânico para se atingir plasticidade adequada à conformação.

Uma grande dificuldade no processo de conformação plástica é a remoção do material plastificante antes da queima. Em sistemas baseados em argilas e água ocorre uma substancial retração durante a secagem, o que aumenta o risco de surgimento de trincas. Em sistema com aditivos orgânicos este problema é ainda

mais grave, uma vez que se a extração se der muito rápida irá causar aparecimento de trincas e uma distorção dimensional, outro agravante é que se não retirados completamente antes da etapa da queima, estes plastificantes irão se transformar em inclusões, causando defeitos, diminuindo então a qualidade final do produto acabado.

Processos de conformação plástica são intensivamente usados na fabricação de cerâmicas vermelhas e louças. A composição contém argila e se torna trabalhável com a adição de água. Cerâmicas avançadas em sua maioria, não contém argilas e, portanto, necessitam de materiais orgânicos para atingir a plasticidade desejada.

Processos típicos que utilizam esse modo de conformação são [14]:

1. Extrusão: consiste em forçar um material com alta viscosidade por uma matriz, pode ocorrer por meio de uma rosca sem fim ou com o uso de um êmbolo.
2. Moldagem por injeção: como o próprio nome diz, baseia-se em um processo comum aos materiais poliméricos onde uma mistura de um pó cerâmico com polímero termoplástico mais um plastificante e ligante é aquecida para aumentar sua fluidez e então forçada para o interior de um molde metálico.
3. Moldagem por compressão: processo análogo ao forjamento de materiais metálicos. Um bloco de uma mistura cerâmica plástica é colocado entre as duas metades de uma matriz, e uma pressão uniaxial é aplicada até que o bloco se deforme assumindo a forma da cavidade. Pode ser realizado a frio ou a quente, dependendo dos ligantes empregados.

2.1.3 – Laminação.

É o processo de conformação mecânica que consiste em modificar a seção transversal de um corpo na forma de barra, lingote, placa, fio, ou tira, etc., pela passagem entre dois cilindros com geratriz retilínea (laminação de produtos planos) ou contendo canais entalhados de forma mais ou menos complexa (laminação de produtos não planos), sendo que a distância entre os dois cilindros deve ser menor que a espessura inicial da peça [26]. O material é submetido a tensões

compressivas elevadas, resultantes da ação de prensagem dos rolos e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do atrito entre os rolos e o material. As forças de atrito atuantes são de extrema importância, são também responsáveis pelo ato de "puxar" o material para dentro dos cilindros. A figura 1 apresenta um esquema das forças e variáveis envolvidas no processo.

É o processo de transformação mecânica de metais mais utilizado, pois apresenta alta produtividade e um controle dimensional do produto acabado que pode ser bastante preciso.

Nos metais a redução ou desbaste inicial dos lingotes em blocos, tarugos ou placas é realizada normalmente por laminação a quente. Após essa fase, segue-se uma nova etapa de laminação a quente para transformar o produto em chapas grossas, tiras a quente, vergalhões, barras, tubos, trilhos ou perfis estruturais. A laminação a frio ocorre após a laminação de tiras a quente e produz tiras de excelente acabamento superficial, com boas propriedades mecânicas e controle dimensional do produto final bastante rigoroso.

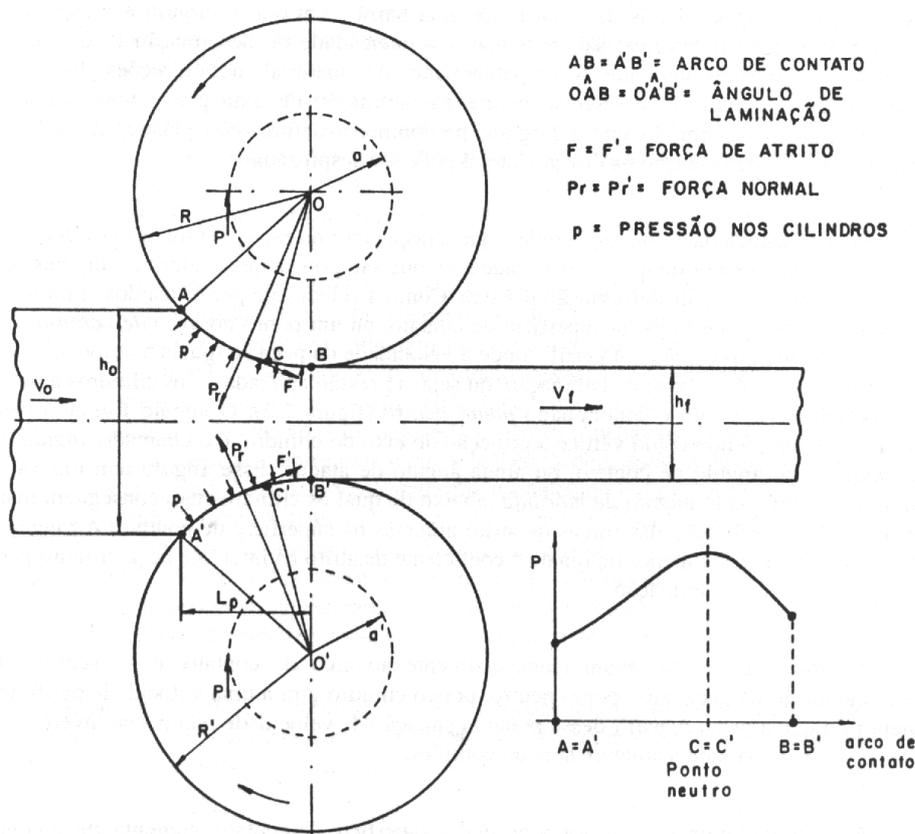


Figura 1 – Diagrama esquemático do processo de laminação [1].

2.1.3.1 – Laminação em cerâmicos.

Enquanto os corpos produzidos por colagem de folhas (tape casting) se encontram no limite inferior dos produtos de parede fina, os pisos cobrem a região superior de espessura. Na faixa intermediária de espessuras, falta uma possibilidade especial de fabricação. Com este processo podem ser conformados produtos numa faixa de espessura de 1,0 a 10,0 mm, com a colagem de folhas de em uma extremidade e a fabricação de pisos na outra [15].

O processo de laminação está relacionado com o processo de prensagem a seco no que se refere ao material da alimentação, pois este também pode utilizar pós atomizados. A principal diferença é o conteúdo de ligante/plastificante, sendo consideravelmente maior para as massas que serão submetidas ao processo de laminação [16].

Uma característica importante deste processo é a possibilidade de selecionar e ajustar alguns parâmetros como: mistura dos componentes, ajustes no alimentador, escolha dos parâmetros ótimos para os rolos [17].

Este processo é caracterizado pelas seguintes propriedades [18]:

- Produção de placas cerâmicas finas, com espessura na faixa de 1,0 a 10,0 mm;
- Compressão e conformação contínua em uma única etapa de processamento;
- Possibilidade de obtenção de várias geometrias de seção constante;
- Manuseio simples e aplicação em escala industrial;
- Definição específica das propriedades dos materiais mediante a seleção adequada da composição e parâmetros de laminação;
- Quantidade de água e ligante para pós finos menor que 10% da massa total;
- Quantidade de água e ligante para pós grossos menor que 5% da massa total;
- Processo econômico em comparação com outros processos de conformação [19].

Este processo permite também um modo de operação em vários estágios, de maneira que vários procedimentos ou estágios de laminação são programados um após o outro, e dessa forma o grau de densificação é aumentado [15].

Embora este método possa ser empregado para qualquer corpo cerâmico, é desejável que a massa não possua grandes aglomerados e que os pós apresentem boa escoabilidade [25].

Além disso, o conteúdo de umidade do material deverá ser mantido dentro de uma faixa relativamente estreita, normalmente entre 8 a 15% em peso [18].

Os aditivos deverão ser misturados com o pó cerâmico para se obter uma massa que apresente características apropriadas para o processo de conformação por rolos, os quais, além de melhorarem a resistência e a flexibilidade, freqüentemente também reduzem a aderência da composição cerâmica aos rolos. [18].

Os materiais cerâmicos modernos estão tão resistentes que uma grande quantidade de massa não é mais necessária para garantir a vida útil. Em outras palavras, os produtos podem ser menores, e assim mais leves, mas permanecendo confiáveis quanto ao comportamento mecânico. A espessura de parede de um componente cerâmico pode ser assim reduzida proporcionalmente. A importância deste fato pode ser mais bem ilustrada, por exemplo, pela mobília de um forno. Esse componente é aquecido junto com os produtos a serem queimados no forno, a energia consumida pela mobília não onera consideravelmente o balanço de energia do forno, mas a quantidade de energia requerida para aquecer a mobília pode ser minimizada pelo uso de produtos com espessura de parede mais finas [42].

Técnicas de moldagem convencionais oferecem possibilidades limitadas para produção de componentes de parede delgada em grande escala e a custos razoáveis. Para a produção de placas cerâmicas finas, porém de pequenas dimensões, em grande escala, a técnica de *tape casting* é empregada no momento praticamente com exclusividade. Já se os componentes possuem uma geometria mais complicada são produzidos pelo processo de colagem de barbotina ou prensagem.

No entanto, nestes processos grandes quantidades de água ou outro líquido (até 40%) são necessários para a preparação da barbotina. Os constituintes líquidos têm que ser extraídos do corpo moldado em um estágio posterior, aumentando

consideravelmente os custos de secagem. Quando se opta pelo processamento por prensagem, este tipo de processo apresenta limitações, tais como a dificuldade de se obter uma distribuição homogênea do pó dentro da matriz. Uma outra limitação é a capacidade das prensas, que para atingirem cargas tão altas, quanto necessárias, teriam um alto custo de implantação [42].

Por esta razão o desenvolvimento de novos processos de fabricação de materiais cerâmicos, é um tema que está ganhando importância e tem sido um dos principais assuntos em muitos centros de pesquisa. Esse exemplo mostra que o desenvolvimento e a introdução de novas técnicas industriais de moldagem será fator decisivo no que diz respeito ao futuro progresso no campo da tecnologia para processamento de materiais cerâmicos [42].

2.1.4 – Plasticidade.

A plasticidade no processamento dos materiais é uma propriedade fundamental já que define os parâmetros técnicos necessários para converter, mediante aplicação de pressão, uma massa genérica em um componente com uma dada geometria. A plasticidade, neste caso, e em particular em sistemas argilosos, é definida como uma propriedade que se manifesta na mudança de forma sem ruptura de uma massa feita com argila e água por aplicação de uma força externa e pela retenção da forma quando a força é removida ou reduzida abaixo de um certo valor correspondente à tensão de escoamento [13, 18].

Cada sistema de processamento particular, usado para conformar um produto será constituído por: pó inorgânico específico, material granular, e/ou coloidal e algumas combinações de aditivos de processamento [13]. O sistema utilizado deve apresentar características reológicas específicas, que são proporcionadas pela mistura dos pós e aditivos.

Um pó seco geralmente comporta-se como um material friccional, existindo uma correlação entre as tensões normais e as tensões de cisalhamento, algumas vezes de forma linear.

Quando o líquido é adicionado ao pó, assumindo que as partículas são não porosas, este será primeiro adsorvido pelos sólidos. Quando mais líquido é adicionado este é mantido nos espaços intersticiais, formando inicialmente ligações

em volta dos pontos de contato sólido-sólido [27]. Quando os vazios estão completamente preenchidos, a incorporação de mais líquido provoca a separação das partículas, mas, com um pequeno excesso de líquido, a rede de partículas faz o material manter sua forma sob baixas pressões. Quando o material é mais diluído, a viscosidade da suspensão diminui até finalmente aproximar-se de um líquido puro e o comportamento Newtoniano é encontrado.

As misturas de pós e líquidos comportam-se como pasta quando os vazios são preenchidos por líquidos. Os conteúdos de líquidos encontrados nesse caso variam geralmente de 35 a 50% em volume. Entretanto, os limites acima ou abaixo são dependentes de muitos fatores, tais como, tamanho, distribuição de tamanho e forma das partículas [27].

As partículas sólidas individuais podem ser elásticas se pequenas tensões são aplicadas ou comportar-se plasticamente se altas tensões são impostas. Na prática, muitas propriedades mecânicas podem ser encontradas na fase sólida da pasta. Estas podem exibir comportamento elástico, viscoso ou viscoelástico, mas as deformações geralmente serão pequenas comparadas com a da fase líquida. O comportamento de escoamento da massa pode variar consideravelmente em função das características das partículas, da fração de sólidos e da taxa de cisalhamento utilizada.

Sistemas cerâmicos geralmente contêm pó cerâmico e aditivos de processamento. É importante que a massa pó-ligante satisfaça vários critérios reológicos que permitam a mistura e a moldagem de peças sem defeitos, ou seja, que possuam uma consistência adequada ao processamento escolhido.

Como visto, o processamento de materiais cerâmicos pode ser muito complexo. Uma pequena mudança em um dos parâmetros mencionados anteriormente, produzida por uma alteração na composição, temperatura, pressão ou agitação mecânica, pode alterar significativamente a consistência e a conformabilidade do corpo [13].

Cinco estados de consistência podem ser identificados quando são misturados um líquido ou uma solução ligante em um pó [13]:

1. Pó solto (sem líquido);
2. Aglomerados (grânulos);
3. Corpo plástico;

4. Pasta;
5. Barbotina.

Estes estados de consistência são representados na figura 2 [13].

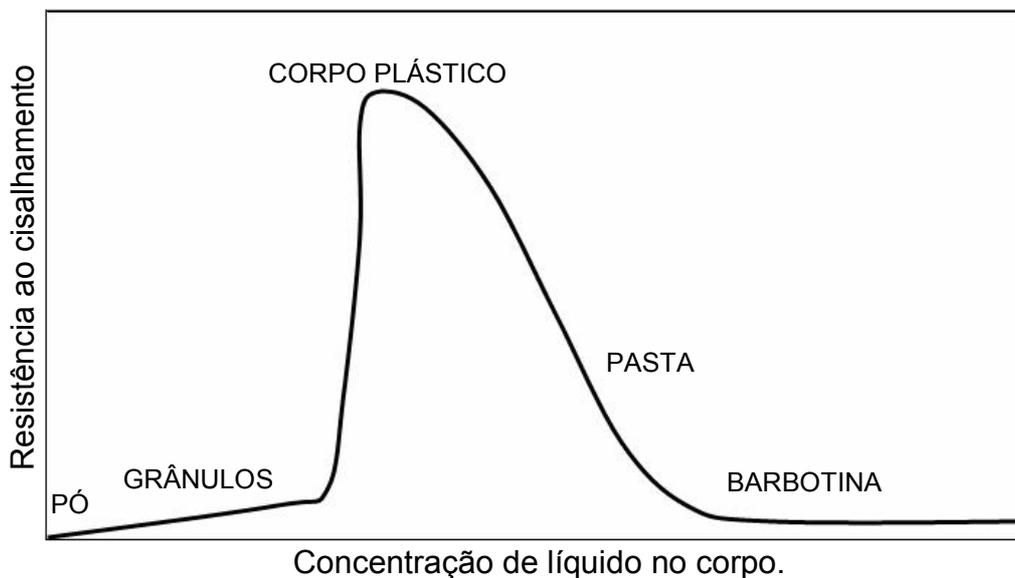


Figura 2 – Estado de consistência em uma mistura de pó com um líquido ou ligante.

O termo plasticidade se refere a um modo particular de comportamento mecânico. Um material cerâmico irá apresentar deformação permanente sem ruptura quando a carga de compressão aplicada produzir uma tensão de cisalhamento maior do que a tensão de escoamento do material. Nestes materiais, como no caso das argilas, é observado um comportamento elástico mensurável, antes que o escoamento ocorra. O comportamento real é então uma combinação das parcelas elástica e plástica, recebendo o nome de viscoplasticidade.

CAPÍTULO 3:

Análise matemática

3.1 - Apresentação

Análise matemática de um fenômeno é um conjunto de símbolos e relações matemáticas que traduzem de alguma forma, o fenômeno em questão [28]. Os modelos de simulação são atualmente um instrumento de gestão indispensável para conhecer o comportamento dos sistemas, estabelecer diagnósticos de funcionamento e decidir ações no âmbito do planejamento do projeto, da operação e da reabilitação.

A análise realizada pode simular a força necessária para a laminação de pós cerâmicos, permitindo ainda calcular algumas variáveis de processo, como o diâmetro dos rolos de laminação, torque, potência necessária aos motores e percentual de redução.

Baseia-se no processo clássico de laminação de materiais metálicos e respectivo equacionamento matemático, incluindo algumas considerações e modificações que permitem descrever o comportamento viscoplástico característico de pós cerâmicos sobre aplicação de uma carga dinâmica.

3.2 – Análise matemática do processo de laminação.

Existem algumas orientações (fig. 3) e relações geométricas (fig. 4) que devem ser estabelecidas, antes que a modelagem seja iniciada. Será assumido um estado de deformação plana.

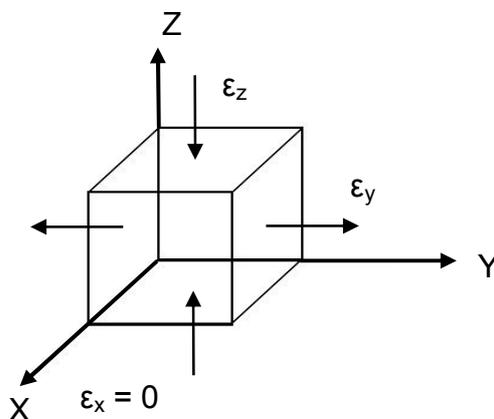


Figura 3 – Esquema de deformações adotados.

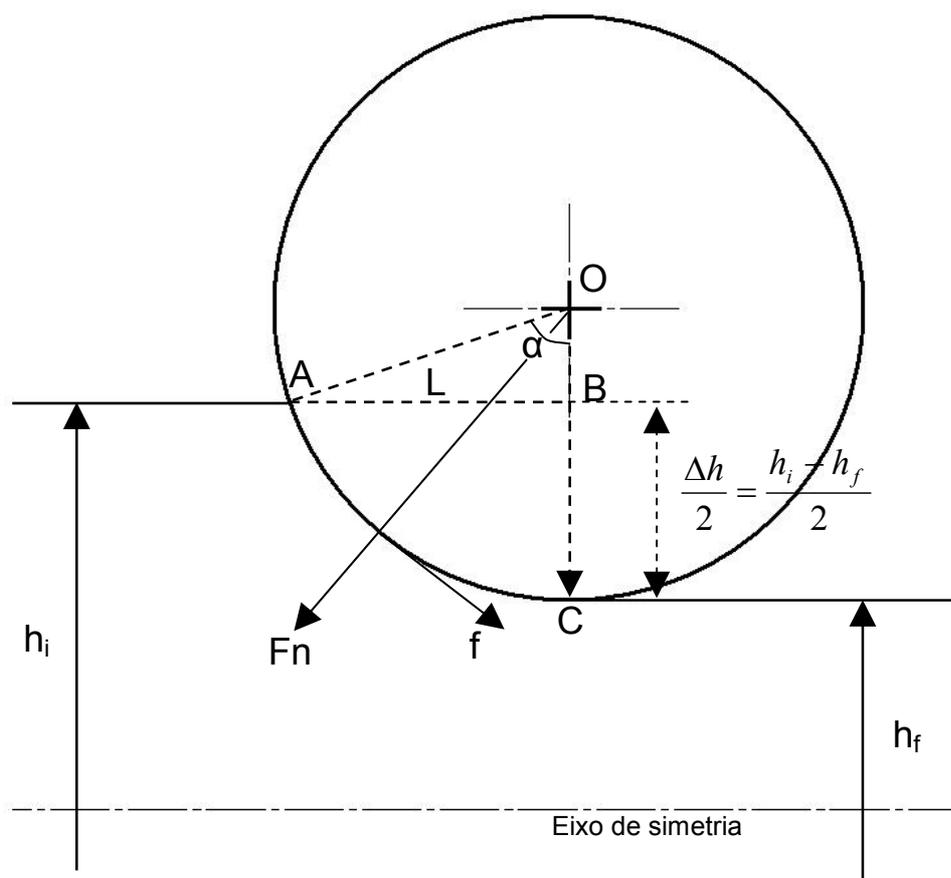


Figura 4 – Detalhe da região de laminação com ênfase geométrico.

3.2.1 – Comprimento do arco de contato

É o arco de contato medido sobre o cilindro de laminação compreendido entre os pontos limites do contato entre o cilindro e o corpo laminado. Estes pontos são caracterizados segundo a direção de laminação:

A – Ponto de entrada.

C – Ponto de saída.

Os raios dos cilindros de laminação são muito maiores que a espessura do corpo a ser laminado, ($R \gg h_i$), fig. 4, sendo assim, pode-se substituir o arco AC por sua projeção horizontal, o segmento AB.

Assim sendo, analisando o triângulo AOB, tem-se:

$$AO^2 = AB^2 + BO^2 \quad (01)$$

$$AB^2 = AO^2 - BO^2 \quad (02)$$

Utilizando as relação apresentadas na fig. 4:

$$AB^2 = R^2 - \left(R - \frac{h_i - h_f}{2} \right)^2 \quad (03)$$

$$AB^2 = R(h_i - h_f) - \left(\frac{h_i - h_f}{2} \right)^2 \quad (04)$$

A redução, $h_i - h_f$, é muito pequena em relação ao raio dos cilindros de laminação, por esta razão será desprezado o último termo da eq. 04, assim:

$$AB = \sqrt{R(h_i - h_f)} \quad (5)$$

3.2.2 – Ângulo de contato (α).

É o ângulo limitado pelos segmentos OC e AO.

Seguindo os princípios da laminação em metais, se o corpo a ser laminado é movimentado com o objetivo de fazer contato com os cilindros em movimento, duas possibilidades podem ocorrer:

- 1- Os cilindros puxam a chapa e o processo de laminação é iniciado (fig. 5, a);
- 2- A extremidade da corpo desliza entre os cilindros, não havendo o início da laminação (fig. 5, b).

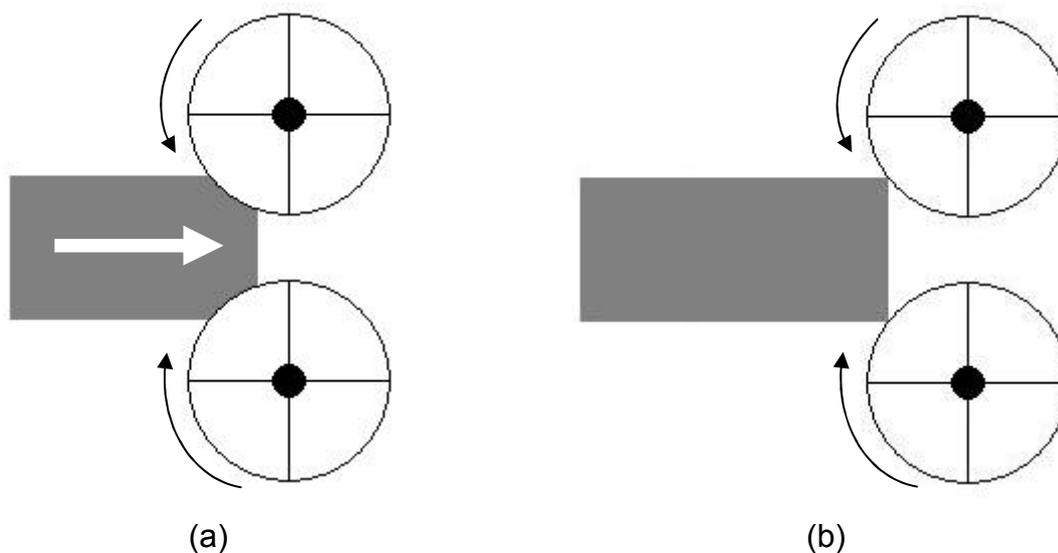


Figura 5 – Detalhe de contato entre os cilindros de laminação em movimento e o corpo a ser laminado.

Essas possibilidades estão diretamente ligadas ao atrito entre o corpo a ser laminado e os cilindros de laminação.

Ou seja, aplicando-se a condição de equilíbrio na entrada dos cilindros, tem-se:

$$\sum F_x = A.f.\cos\alpha - F.\sen\alpha.A = 0 \quad (06)$$

Onde A é a área e F_x representa as forças na direção x.

As condições friccionais permitem que a lei de Coulomb para o atrito seja obedecida, logo:

$$\frac{f}{F} = \mu \quad (07)$$

Onde, f é a força de atrito, F é a força normal e μ é o coeficiente de atrito.

Substituindo a eq. 07 na eq. 06, tem-se:

$$A.f.\cos\alpha = F.\sen\alpha.A \quad (08)$$

$$\frac{f}{F} = \frac{\text{sen}\alpha}{\text{cos}\alpha} = \text{tg}\alpha = \mu \quad (09)$$

$$\text{tg}\alpha = \mu \quad (10)$$

Da fig. 4 o máximo valor de α é dado por:

$$\text{tg}\alpha = \mu = \frac{AB}{OB} = \frac{\sqrt{R \cdot (h_i - h_f)}}{R - \left(\frac{h_i - h_f}{2}\right)} \quad (11)$$

Mas se α é pequeno, pode-se admitir que a redução por passe é pequena em relação a R . Logo a condição para que a chapa penetre entre os cilindros é dada por:

$$\mu = \sqrt{\frac{h_i - h_f}{R}} \quad (12)$$

Logo, como o atrito é função da redução da espessura e do raio dos cilindros, o ângulo de contato, que é essencial para a laminação de metais, passa a ter um papel secundário na laminação de pós cerâmicos.

Como este trabalho utiliza pós cerâmicos e não corpos sólidos, como chapas metálicas, estes princípios não se aplicam da mesma maneira. Afinal o pó cerâmico, por se tratar de inúmeras partículas sem ligação física entre elas, não possui uma estrutura rígida o suficiente, para, através de um movimento relativo entre o pó e os cilindros dar início a laminação. Por esta razão existe a necessidade de introduzir este movimento relativo entre o pó e os cilindros laminadores, tarefa esta, executada com o auxílio de esteiras transportadoras, cuja velocidade está atrelada ao movimento dos cilindros laminadores.

3.2.3 – Trabalho plástico na laminação.

A energia plástica pode ser usada para calcular a carga aproximada de laminação [32]. A expressão dessa energia por unidade de volume (energia específica) é dada por:

$$U_i = \int_0^e \sigma . de \quad (13)$$

Onde σ é a tensão de resistência do material e e a deformação.

A largura do corpo laminado é constante, conforme apresentado anteriormente (fig. 3), logo, a deformação verdadeira nesse sentido é zero, ou:

$$de_x = 0 \quad (14)$$

Sabendo que o volume do material é constante, tem-se que:

$$de_x + de_y + de_z = 0 \quad (15)$$

Com base nas equações 14 e 15, tem-se:

$$de_y = -de_z \quad (16)$$

A deformação efetiva ou verdadeira do sistema é dada por:

$$de = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{2} [(de_x - de_y)^2 + (de_y - de_z)^2 + (de_z - de_x)^2]} \quad (17)$$

Substituindo a eq. 16 na eq. 17 tem-se:

$$de = \frac{2}{\sqrt{3}} de_y \quad (18)$$

A figura 6 apresenta um esquema do processo de laminação e variáveis envolvidas.

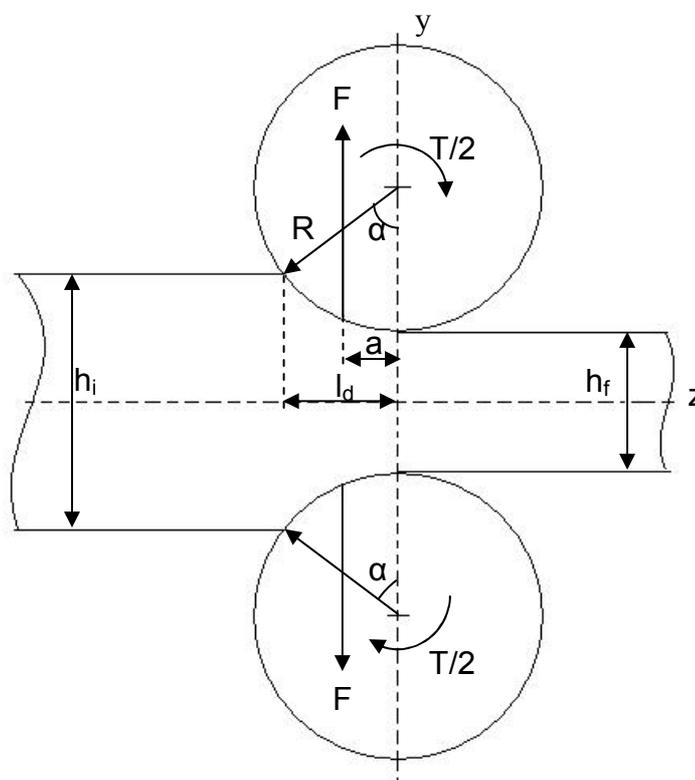


Figura 6 – Esquema do processo de laminação e forças envolvidas.

Supondo que as deformações são uniformes e que as razões das tensões são constantes durante o processo de laminação e não existindo encruamento, uma vez que o material é um pó cerâmico, tem-se:

$$U_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma \cdot \ln \frac{h_i}{h_f} \quad (19)$$

É importante mencionar que a eq. 19 deve ser corrigida pela introdução de um fator de correção, β , que compense as perdas internas de cisalhamento e atrito, tornando-se:

$$U_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot \sigma \cdot \ln \frac{h_i}{h_f} \quad (20)$$

Considerando a energia externa necessária para deformar a peça, e assumindo que o torque do cilindro, T, fornece essa energia, então:

$$U_e = \frac{T\alpha}{\left[\frac{(h_i + h_f)}{2} \right] l_d \cdot b} \quad (21)$$

Onde U_e é a energia externa por unidade de volume laminado, l_d é o comprimento de contato e b é a largura do corpo.

Supondo que não há perdas, como por exemplo, devido ao atrito, a energia deve ser igual a energia externa, ou igualando as eqs. 20 e 21, tem-se:

$$T = \frac{\beta \cdot (h_i + h_f) l_d \cdot \sigma \cdot b \cdot \ln \left(\frac{h_i}{h_f} \right)}{\sqrt{3} \cdot \alpha} \quad (22)$$

A força ou carga para laminação, F, está atuando na distância, a do centro da rotação dos cilindros, e essa é responsável pelo torque, T, é possível determinar a carga de laminação como:

$$F = \frac{T}{2a} \quad (23)$$

Para uma pequena redução na espessura é razoável assumir que:

$$a = \frac{l_d}{2} \quad (24)$$

A área de contato, A , pode ser calculada:

$$A = l_d \cdot b \quad (25)$$

Agora o arco de contato é determinado da geometria, eq. 05:

$$l_d = AB = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (26)$$

Onde $\Delta h = h_i - h_f$.

Então a carga de laminação é determinada através da eq. 22, ou através da relação:

$$F = \sigma \cdot A \quad (27)$$

Substituindo as eqs. 25 e 26 na eq. 27, tem-se:

$$F = \sigma \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (28)$$

Para compensar as perdas devido ao cisalhamento interno e atrito, a eq. 28, poder ser corrigida por um fator β , tornando-se:

$$F = \sigma \cdot \beta \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (29)$$

Todo o equacionamento apresentado é baseado na laminação de chapas metálicas, onde o material é considerado um corpo contínuo que exhibe comportamento plástico.

É necessário adequar esse equacionamento a materiais particulados.

Utilizando o critério de escoamento Mohr-Coulomb modificado por Al-Qureshi, onde o escoamento do material é dependente do atrito interno [38] e da geometria das partículas [39], uma vez que este está sob a forma de pó, tem-se:

$$\sigma_{Mod'} = \sigma \cdot \lambda^{-1} \cdot \left(\frac{1 - \mu_i}{1 + \mu_i} \right) \quad (30)$$

Onde $\sigma_{Mod'}$ é a tensão de resistência modificada pelo critério de Al-Qureshi, μ_i é o atrito interno entre as partículas e λ é um fator de forma [39], que é a razão entre a área média das partículas pela área do menor quadrilátero que as contenha.

Contudo este trabalho propõe uma modificação ao critério apresentado garantindo uma melhor adequação aos resultados experimentais, uma vez que leva em conta o empacotamento máximo permitido para o sistema, ψ , logo:

$$\sigma_{Mod''} = \sigma \cdot \exp \left[\lambda^{-1} \cdot \left(\frac{1 - \mu_i}{1 + \mu_i} \right) \cdot \psi \right] \quad (31)$$

Sendo,

$$\psi = \frac{\rho_{RS} - \rho_{Tap}}{\rho_{Tap}} \quad (32)$$

Onde ρ_{RS} é a densidade real dos sólidos e ρ_{Tap} é a densidade batida (*tap density*).

Logo a eq. 29 pode ser reescrita como:

$$F = \sigma_{Mod''} \cdot \beta \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (33)$$

Substituindo a eq. 31 na eq. 33, tem-se:

$$F = \sigma \cdot \exp \left[\lambda^{-1} \cdot \left(\frac{1 - \mu_i}{1 + \mu_i} \right) \cdot \psi \right] \cdot \beta \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (34)$$

A eq. 34 apresenta um arranjo matemático que permite simular a força de laminação em função das variáveis de processo.

CAPÍTULO 4:

Metodologia

4.1 – Procedimento experimental

Conforme apresentado, o objetivo deste trabalho é compreender o processo de laminação de pós cerâmicos e como que as variáveis envolvidas neste processo se relacionam.

Para dar início ao estudo foi necessário construir, um laminador. Tenso como base conceitos apresentados em publicações internacionais [5, 6] sobre laminação de materiais cerâmicos e também nos fundamentos da laminação clássica de metais, foi construído um laminador de escala laboratorial.

Com este laminador foi possível, após alguns testes, compreender melhor o processo de laminação e os requisitos mínimos necessários às matérias-primas para possibilitar a conformação, permitindo dessa forma, formular uma abordagem sistemática do problema, encontrando os pontos críticos do processamento e variáveis de controle.

Por se tratar de um processo baseado em mecanismos de compactação ainda pouco estudados - como a prensagem -, fez-se necessário um estudo preliminar, com o intuito de determinar as características necessárias ao pó cerâmico, para permitir seu processamento.

Foi então escolhida uma matéria-prima cerâmica, esta foi caracterizada e testada para definir a rota de preparação para conformação. Foram confeccionados e caracterizados corpos-de-prova pelos processos de laminação e também através de prensagem. Essa abordagem se fez necessária para a obtenção de dados experimentais para a análise matemática.

Em paralelo a este estudo, também foi projetado e construído um segundo laminador de pós cerâmicos, um protótipo em escala industrial.

4.1.1 – Considerações experimentais.

As medições dimensionais dos corpos-de-prova foram realizadas utilizando um paquímetro de 150,0 mm Mitutoyo, modelo CD-6” CSX-B. As pesagens de controle foram realizadas em duas balanças analíticas com precisão de 0,0001 g, Marca Gehaka, modelo AG 200 e marca Shangping, modelo FA 1604.

4.2 – Construção do laminador de escala laboratorial

Os conceitos envolvidos no projeto deste laminador foram revisados e adaptados à realidade deste trabalho, afinal, as fontes de informação utilizadas tratam de grandes equipamentos, com controladores eletrônicos e hidráulica pesada. Contudo, dois conceitos importantes presentes nestas publicações devem ser ressaltados:

1. A laminação clássica de metais se baseia no atrito para promover a conformação, já que a chapa metálica precisa ser inicialmente puxada pelos cilindros. É importante ressaltar que pós cerâmicos, não possuem a resistência necessária para serem puxados pelos cilindros de laminação, por esta razão é de fundamental importância prover ao sistema o movimento relativo entre o pó e os elementos de laminação, isso se dá com o uso de esteiras transportadoras [5, 6];
2. Como os pós cerâmicos, não possuem um volume definido, podendo ocupar o volume em função do recipiente que os contém, é necessária a introdução de barreiras laterais, para impedir que o pó escoe antes de passar pelos cilindros [5, 6].

Com esta linha de pensamento, algumas necessidades de projeto foram determinadas:

1. Permitir o processamento de matérias-primas a partir de pós;
2. Promover o movimento relativo entre o pó e os elementos conformadores;
3. Controlar o escoamento do pó antes e durante o processo de laminação;
4. Dimensões máximas, 2,0 m x 1,0 m x 1,0 m;
5. Custo inferior a R\$ 3.000,00;
6. Controlar percentuais de redução de espessura;
7. Permitir vários passes de laminação;
8. Fácil manutenção;

9. Estrutura rígida para evitar vibrações.

Por se tratar de um equipamento para fins didáticos, experimentação prática, baixo custo e tamanho reduzido, foi selecionado um conceito relativamente simples com dois cilindros de trabalho: o laminador tipo duo reversível, figura 7(b).

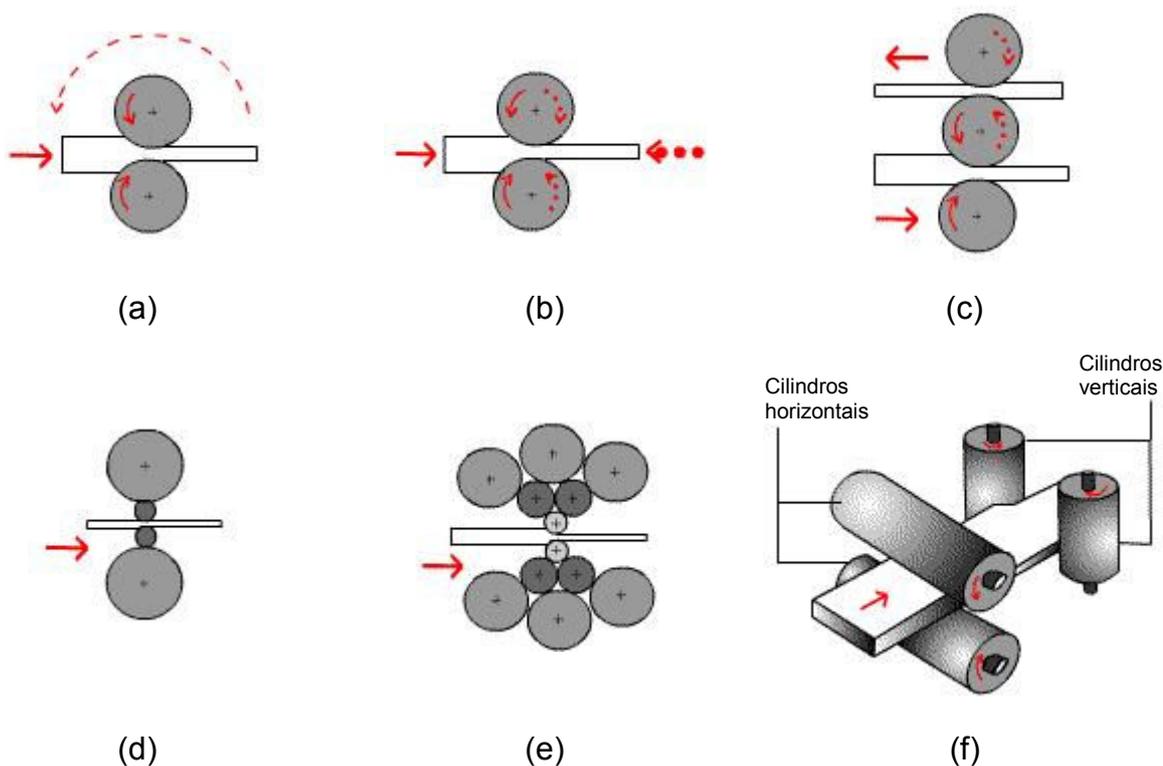


Figura 7 – Arranjos típicos de cilindros.

(a) laminador duo, (b) laminador duo reversível, (c) laminador trio, (d) laminador quádruplo, (e) laminador Sendzimir e (f) laminador universal.

O laboratório já dispunha em seu patrimônio um cilindro de laminação de massas e pães, da marca Lieme, modelo CS – 400S, figura 8, utilizado anteriormente em outros trabalhos [18]. Este equipamento foi utilizado como base para construção, recebendo algumas modificações para atender as necessidades estabelecidas.



Figura 8 – Laminador de massas.

Foi construída uma estrutura rígida com perfis quadrados de aço ABNT 1020. Sobre esta estrutura foi montada uma mesa horizontal, na qual foram fixados mancais, guias e eixos, sobre os quais foi adaptada uma esteira. Os cilindros de laminação foram re-posicionados e alinhados com a mesa, permitindo o movimento horizontal do corpo a ser laminado através deles. O projeto contempla também uma chave inversora de rotação, bandas de restrição de fluxo lateral e tensionadores para a esteira transportadora. O protótipo montado é apresentado nas figuras 9 a 13.



Figura 9 – Protótipo do laminador laboratorial, vista lateral.



Figura 10 – Protótipo do laminador laboratorial, vista em perspectiva.



Figura 11 – Protótipo do laminador laboratorial, vista frontal.

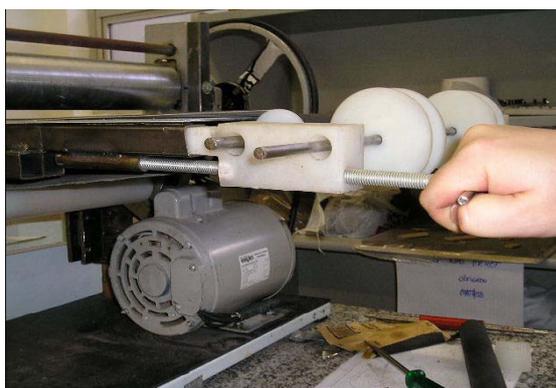


Figura 12 – Detalhe dos tensionadores de correia.

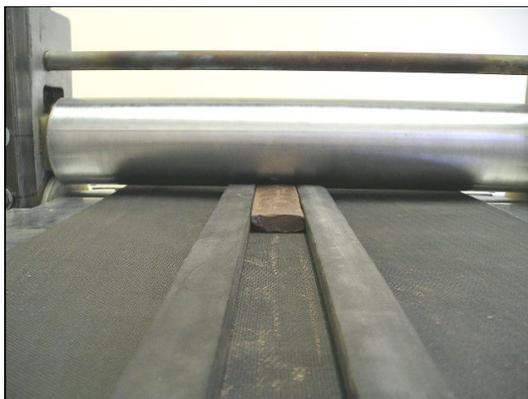


Figura 13 – Detalhe do protótipo, bandas de restrição de fluxo lateral.

O equipamento construído opera com um motor Kohlbach, 1 CV, 60 Hertz e alimentação bi-volt (110/220V), sendo que um sistema de engrenagens efetua a redução.

A velocidade final do sistema é $0,32 \pm 0,05$ m/s.

A redução da espessura, variável fundamental do processo, também pode ser controlada. Através de um manete é possível controlar a abertura entre os cilindros. O curso total da abertura varia entre 3,6 mm a 45,0 mm. Contudo a altura máxima depende da espessura da banda de restrição de fluxo, como mencionado anteriormente, tem a função de evitar o escoamento lateral do pó. Por esta razão o curso útil de abertura varia entre 3,6 mm e 10,2 mm (espessura da banda de restrição). As reduções de espessura inferiores a 10,2 mm são obtidas com o esmagamento da banda de restrição de fluxo, que por ser de borracha natural suporta tais deformações.

O equipamento permite também o controle da largura do corpo a ser laminado. Como apresentado na figura 14, alterando a posição das roldanas onde estão as bandas de restrição de fluxo, é possível obter laminados com largura mínima de 10,0 mm e máxima de x 250,0 mm.



(a)



(b)

Figura 14 – Detalhe do protótipo, distância entre as bandas de restrição de fluxo lateral, (a) largura mínima e (b) largura máxima.

Outro aspecto importante, que também pode ser controlado é o posicionamento do corpo laminado em relação aos cilindros, figura 15.



(a)



(b)

Figura 15 – Detalhe do protótipo, posicionamento das bandas de restrição de fluxo lateral.

4.3 – Matéria-prima

A matéria-prima cerâmica utilizada neste estudo foi fornecida pela empresa Eliane Revestimentos Cerâmicos de Criciúma/SC. A massa apresentava os mesmos componentes e as quantidades utilizadas pela empresa em sua linha de produção.

Contudo, devido ao fato da unidade fabril desta empresa utilizar o método de moagem a úmido para cominuir os componentes da massa, e o foco deste trabalho é obter placas laminadas a partir de pó, optou-se por uma rota alternativa para a cominuição da massa. É importante salientar que a dosagem dos componentes permaneceu a mesma, apenas a rota de moagem foi alterada, para a obtenção de pós e não barbotina, o que evitou a necessidade de secagem e re-moagem da matéria-prima.

A moagem dos componentes foi realizada a seco em um moinho tipo torre, cedido pela empresa ICON S.A. – Industrial Conventos S.A.. A figura 16 apresenta o moinho utilizado.



Figura 16 – Moinho torre.

4.3.1 – Caracterização do pó cerâmico.

Após a etapa de moagem, uma amostra foi enviada ao SENAI - CTCMat (Centro de Tecnologia Cerâmica – Criciúma/SC) para a sua caracterização.

4.3.1.1 – Análise mineralógica.

A composição do material é fundamental, afinal é um dos parâmetros que permite um controle das propriedades finais do produto.

O equipamento utilizado no ensaio foi um difratômetro de raio X Bruker – D8 com goniômetro theta – theta. A radiação é CuK α em tubo de cobre nas condições de 40kV e 40mA. A velocidade e o intervalo de varredura do goniômetro são: 1 grama de pó a 1 segundo para 0,02° do goniômetro de 2° a 72° 2 theta, respectivamente.

A quantificação das fases mineralógicas presentes nas amostras é orientativa e foi feita levando-se em conta a intensidade dos picos das fases cristalinas presentes nas mesmas.

4.3.1.2 – Distribuição granulométrica.

A distribuição do tamanho de partícula, assim como a forma das partículas e estado de aglutinação, tem uma grande influência sobre o processamento e características do produto final.

A determinação desta distribuição foi realizada com um difratômetro a laser utilizando como meio suspensor água deionizada. A técnica consiste em colocar a amostra num equipamento composto de duas partes: um sistema de dispersão e um sistema focal. A amostra é dispersa, um raio laser emitido sofre difração, que varia conforme o tamanho das partículas.

4.3.1.3 – Densidade real dos sólidos.

A densidade real da matéria-prima foi determinada por picnometria. Esta técnica consiste na utilização de um picnômetro, um recipiente com volume constante e pesagens controladas. A figura 17 ilustra o procedimento:

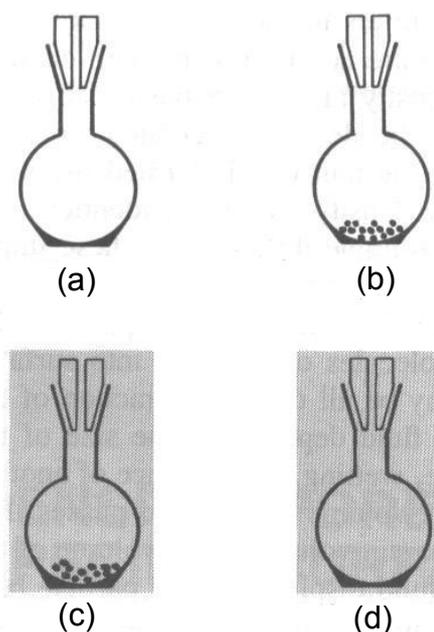


Figura 17 – Técnica de picnometria líquida.

(a) Picnômetro vazio, (b) Picnômetro vazio + Pó,
(c) Picnômetro + Líquido + Pó e (d) Picnômetro + Líquido.

A equação 35 demonstra as relações para a determinação da densidade.

$$\rho_{Pic} = \frac{(m_1 - m_0)}{m_3 - m_0 + m_1 - m_2} \rho_{Liq} \quad (35)$$

Onde ρ_{Pic} é a densidade obtida por picnometria (densidade real dos sólidos), m_0 é a massa do picnômetro vazio, m_1 é a massa do picnômetro vazio + pó, m_2 é a massa do picnômetro + pó + líquido, m_3 é a massa do picnômetro + líquido e ρ_{Liq} é a densidade do líquido utilizado.

4.3.1.4 – Determinação dos índices de plasticidade.

O estado de consistência do material é um parâmetro fundamental, afinal influenciará o comportamento do material durante o processo de conformação. É

possível mensurar a quantidade de líquido presente no material durante as transições de consistência. As duas transições de importância são:

- 1 – Grânulo para corpo plástico, limite plástico;
- 2 – Corpo plástico para barbotina, limite líquido.

Ensaio realizado conforme NBR7180 [36].

4.4 – Confeção dos corpos-de-prova laminados (CPL's)

4.4.1 – Preparação do pó para laminação

Para se obter placa laminada a partir de pós cerâmicos, é necessário fornecer um ligante ao sistema, neste trabalho optou-se pelo uso apenas da água.

Como apresentado anteriormente existem cinco estados de consistência, que variam em função da quantidade de líquido presente na mistura (pó + líquido). Por esta razão um dos parâmetros estudados é a influência da umidade no processo.

Toda matéria-prima cerâmica antes de ser introduzida no processo foi seca por 24 horas em uma estufa a temperatura de $110 \pm 10^{\circ}\text{C}$, em seguida a matéria-prima foi acondicionada em recipientes plásticos vedados.

Com a umidade inicial controlada foi então realizada a incorporação de água em quantidades conhecidas e previamente estipuladas. Inicialmente foram estabelecidos quatro percentuais para estudo 14, 16, 18 e 20% em peso. Esses valores foram escolhidos baseados em experimentação prévia. Contudo apenas as umidade de 16 e 18% foram efetivamente estudadas. Com 14% de umidade o material não apresentou plasticidade suficiente para etapa de conformação, enquanto que a umidade de 20% apresentou plasticidade em demasia, aderindo aos rolos de laminação e inviabilizando o processo. Logo esses dois parâmetros de umidade foram descartados ao longo do estudo.

A incorporação da água foi realizada manualmente com o uso de um borrifador e uma espátula para revolver o material. O produto desta etapa eram grânulos de tamanho irregular.

Os grânulos obtidos na etapa de incorporação de água eram então submetidos a um processo manual de peneiramento em malhas controladas. Foram escolhidas duas granulometrias ASTM #8 (2,5 mm) e ASTM #18 (1,02 mm).

Posteriormente, o material com tamanho granular uniforme, foi acondicionado novamente em recipientes plásticos vedados por no mínimo 24 horas, para assegurar a homogeneização da umidade no sistema.

Após estas etapas, o material foi considerado pronto para a etapa de laminação.

4.4.2 – Obtenção das placas laminadas

Com o material cerâmico pronto para o processamento, foi coletada uma amostra. Esta era imediatamente pesada e seca em estufa por 24 horas a temperatura de $110 \pm 10^{\circ}\text{C}$. O objetivo era conhecer a umidade real de processamento.

Outro parâmetro avaliado chama-se *tap density*, ou densidade batida. Este ensaio consiste em colocar uma massa conhecida do pó a ser estudado em uma proveta, em seguida bater n vezes esta proveta contra uma placa de borracha a partir de uma altura média de 3 cm. O ensaio finda quando não houver mais nenhuma alteração significativa no volume da proveta [33].

Após estes controles, o material obtido foi disposto alinhado ao centro dos cilindros entre as bandas de restrição de escoamento e nivelado segundo a altura destas. Os parâmetros de laminação foram fixados e mantidos constantes durante o estudo.

São eles:

- 1- Espessura inicial (material granulado): **10,2 mm**;
- 2- Largura das bandas de restrição: **80,0 mm**;
- 3- Espessura final (regulagem mínima dos rolos de laminação): **3,6 mm**.

As placas foram obtidas em apenas um passe.

4.4.3 – Preparação dos corpos-de-prova laminados (CPL's).

Logo em seguida à laminação, as placas compactadas e ainda a verde foram submetidas a uma etapa de corte. O corte foi realizado manualmente, utilizando-se uma lâmina metálica comum e um gabarito com dimensões de 20 x 60 mm, para padronizar as dimensões finais dos CPL's.

Foram confeccionados corpos-de-prova em duas direções, D1 e D2. Uma acompanhando o sentido de laminação e outra formando 90° com este. A figura 18 exemplifica os as direções de corte.

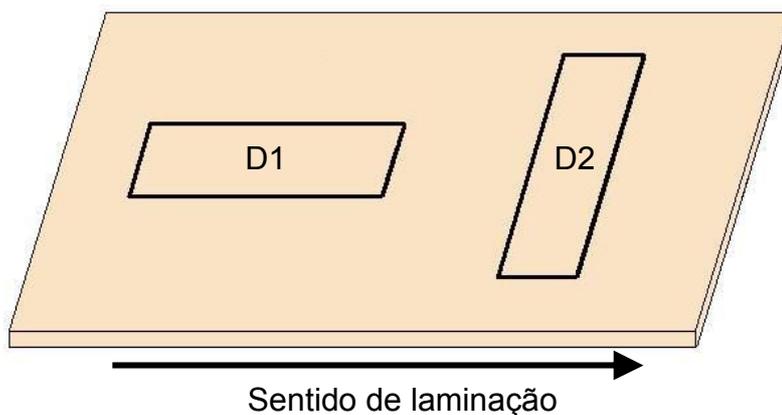


Figura 18 – Direções de corte adotadas.

Para cada uma das variações estudada foi preparado um lote com aproximadamente 50 CPL's.

Após o corte, as amostras (fig. 19) foram identificadas, pesadas, medidas e secas em estufa por um tempo mínimo 24 horas à temperatura de $110 \pm 10^{\circ}\text{C}$.

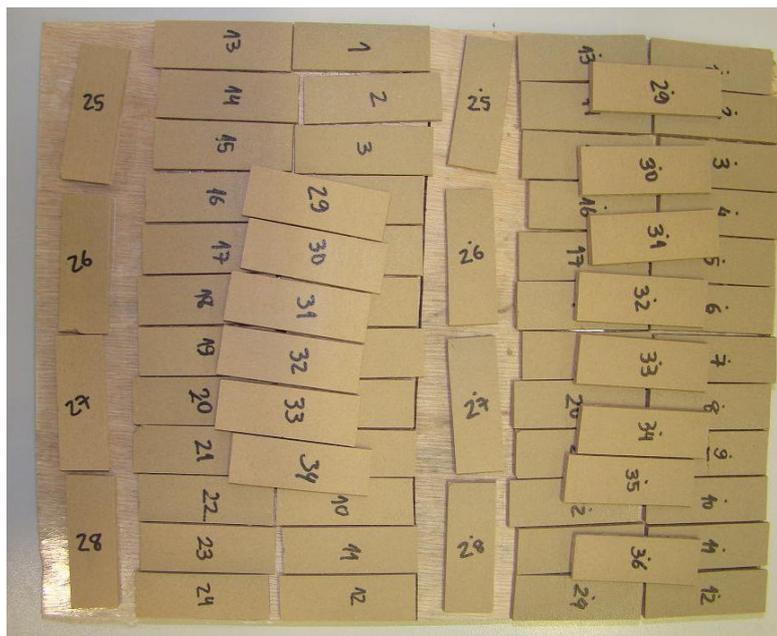


Figura 19 – Exemplo de amostras laminadas.

4.4.4 – Caracterização dos corpos-de-prova laminados (CPL's).

Após a secagem todos os lotes foram separados aleatoriamente em duas partes, A e B.

Parte A

A parte A continha sempre 30 CPL's. Estes foram submetidos a uma etapa de sinterização em forno elétrico Schaly, modelo LAB. 18SR. Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10°C/min até a temperatura de 1150°C com patamar de 10 minutos, e resfriamento ao forno. O gráfico 3 ilustra o ciclo térmico empregado, sendo este ciclo térmico foi mantido para todas as variações estudadas.

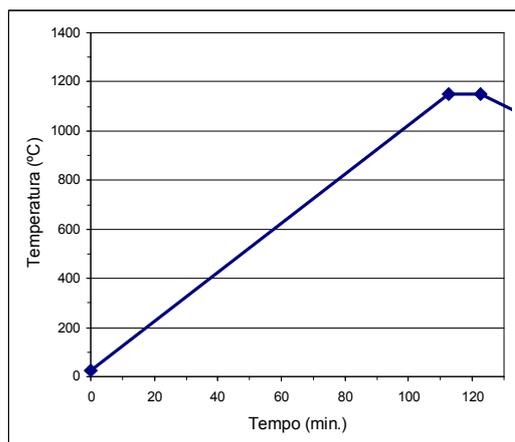


Gráfico 3 – Ciclo térmico utilizado para sinterização dos CPL's – PARTE A.

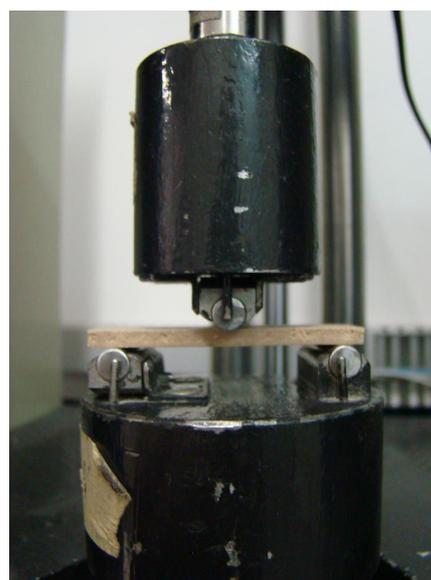
Após a sinterização as amostras foram novamente medidas. Com essas medições foi possível determinar as retrações lineares em cada uma das etapas de processamento.

Foram realizados testes de densidade aparente por imersão em mercúrio através do princípio de Arquimedes e absorção de água [34].

Os CPL's foram submetidos ao ensaio de resistência à flexão a três pontos, sendo realizados em uma máquina universal de ensaios da marca Emic, modelo DL2000, figura 20, equipada com célula de carga de 2000 N. A velocidade de ensaio foi fixada em 0,1 mm/minuto para todas as variações estudadas.



(a)



(b)

Figura 20 – Máquina universal de ensaios Emic, modelo DL-2000.

(a) vista frontal e (b) detalhe do dispositivo de ensaio.

Os resultados foram analisados com ferramentas estatísticas e apresentados segundo a distribuição probabilística de Weibull [15].

Parte B

Os CPL's restantes, quantidade nunca inferior a 10 unidades, ainda a verde, foram submetidos a testes de densidade aparente por imersão em mercúrio através do princípio de Arquimedes [34]. Em seguida foram sinterizados temperatura de 900°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min em patamar de 10 minutos, seguido de resfriamento ao forno). O ciclo de sinterização foi mantido constante para todas as variações estudadas. O gráfico 4 ilustra o ciclo térmico empregado.

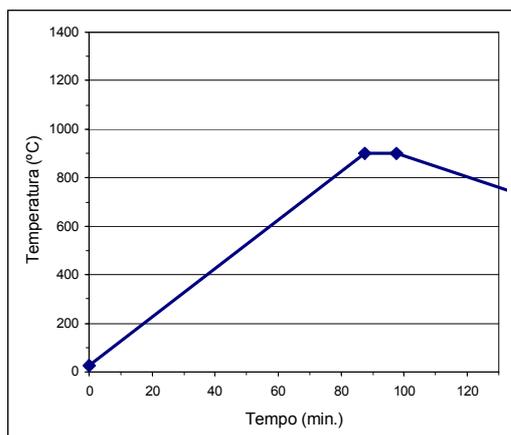


Gráfico 4 – Ciclo térmico utilizado para sinterização dos CPL's – PARTE B.

O objetivo desta sinterização a baixa temperatura era preparar os CPL's para o ensaio de absorção de água. Este procedimento foi adotado porque os CPL's não poderiam ser analisados a verde e a baixa temperatura e tempo utilizados, asseguram que a morfologia e distribuição da porosidade interna não sejam alteradas significativamente [35]. As figuras 21 a 27 apresentam micrografias que demonstram a evolução da microestrutura em função do aumento da temperatura. Apenas a partir de 1000°C ocorrem alterações significativas na microestrutura do material estudado. Reforçando a hipótese de que os resultados de absorção de água obtidos a 900°C são próximos aos que seriam encontrados se o ensaio pudesse ser realizado com os CPL's a verde.

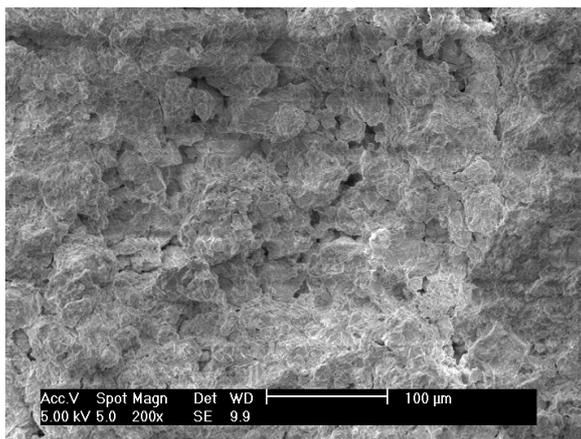


Figura 21 – Material estudado, sinterizado a 850°C por 10 minutos.

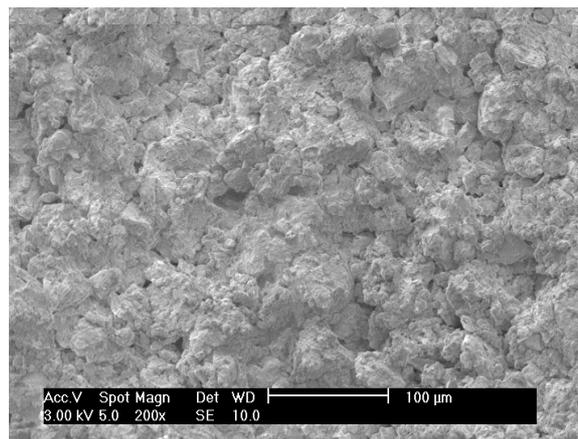


Figura 22 – Material estudado, sinterizado a 900°C por 10 minutos.

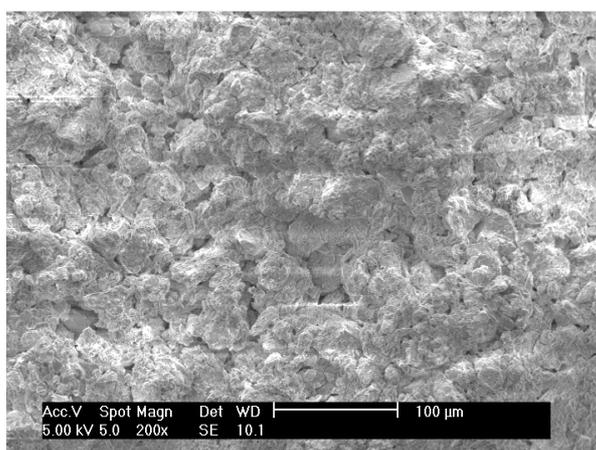


Figura 23 – Material estudado, sinterizado a 950°C por 10 minutos.

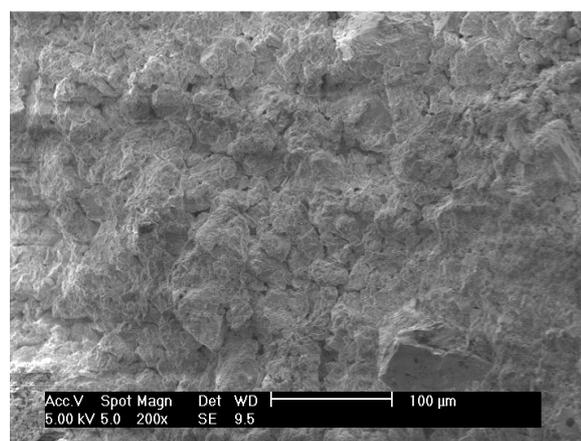


Figura 24 – Material estudado, sinterizado a 1000°C por 10 minutos.

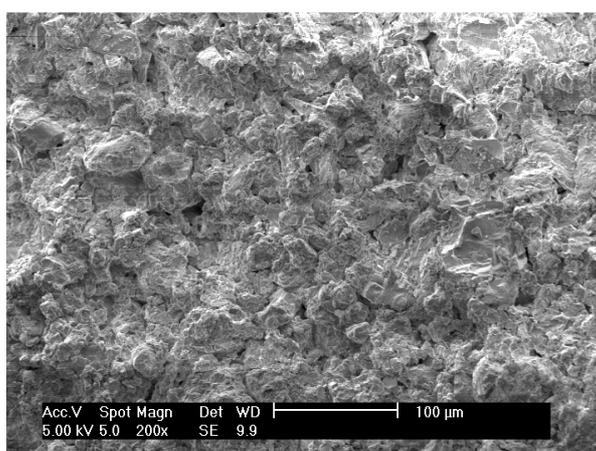


Figura 25 – Material estudado, sinterizado a 1050°C por 10 minutos.

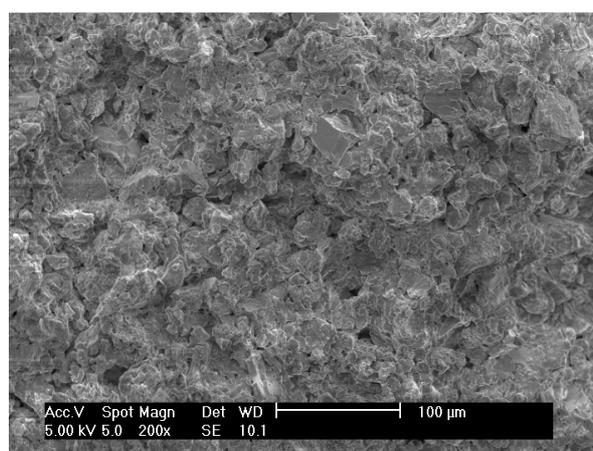


Figura 26 – Material estudado, sinterizado a 1100°C por 10 minutos.

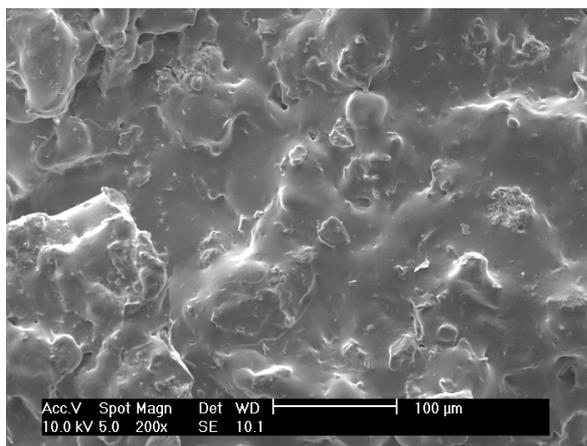


Figura 27 – Material estudado, sinterizado a 1150°C por 10 minutos.

4.5 – Análise matemática, procedimento experimental.

Conforme apresentado no capítulo 3, a análise matemática proposta necessita das propriedades mecânicas do material em questão.

Determinar as propriedades mecânicas de pós cerâmicos, não é uma tarefa simples, afinal, inúmeras variáveis estão envolvidas, como geometria, tamanho, distribuição de tamanho de partículas, percentual de umidade, composição química, entre outros fatores [31].

Este desafio foi superado através de um postulado simples. As propriedades mecânicas dos materiais podem ser representadas através de uma curva de tensão – deformação [30]. A figura 28 apresenta o comportamento típico de materiais, demonstrados através de curvas de tensão (σ) em função da deformação (ϵ).

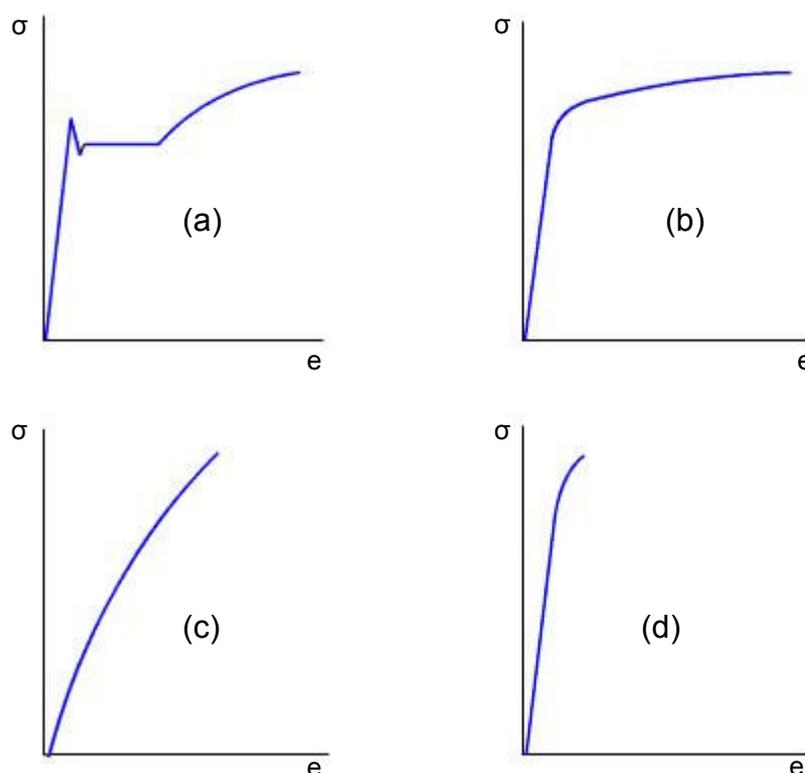


Figura 28 – Comportamento típico das curvas de tensão – deformação. (a) Material dúctil com patamar de escoamento, (b) Material dúctil sem patamar de escoamento definido, (c) Material não linear-elástico e (d) Material frágil.

Algumas considerações se fazem necessárias sobre a metodologia adotada para explicar a maneira de obtenção das propriedades mecânicas dos materiais estudados.

Existem autores que modelaram o comportamento mecânico de argilas [31], estes trabalhos apresentam relações de tensão – deformação obtidas através de ensaios de compressão.

Um procedimento similar foi adotado neste trabalho, contudo no lugar de corpos plásticos previamente compactados, o material utilizado encontrava-se na forma de grânulos, simulando a aspecto real do material utilizado no processo de laminação.

Sabe-se neste caso, que deformação pode ser expressa como a variação de uma altura inicial (h_0) em relação a uma altura final (h_f).

$$e = \frac{h_i - h_f}{h_i} = 1 - \frac{h_f}{h_i} \quad (36)$$

Também pode-se afirmar que:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (37)$$

Onde ρ é a densidade, M a massa e V o volume de um corpo.

Genericamente o volume de um corpo pode ser expresso como:

$$V = cbh \quad (38)$$

Onde c é o comprimento, b a largura e h a altura.

Ou seja:

$$\rho = \frac{M}{cbh} \quad (39)$$

Permanecendo a igualdade é correto afirmar que:

$$h = \frac{M}{\rho cb} \quad (40)$$

Como a massa, o comprimento e a largura não se alteram durante o ensaio de compressão se o material estiver confinado em uma matriz, podem então, ser consideradas constantes (K):

$$\frac{M}{cb} = K \quad (41)$$

Logo:

$$h = \frac{K}{\rho} \quad (42)$$

Substituindo a eq. 42 na eq. 36, tem-se:

$$e = \frac{\frac{K}{\rho_f} - \frac{K}{\rho_i}}{\frac{K}{\rho_f}} = \frac{K \left(\frac{1}{\rho_f} - \frac{1}{\rho_i} \right)}{K \frac{1}{\rho_f}} = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_i} \quad (43)$$

Ou seja, é correto afirmar que é possível relacionar a deformação com variações na densidade. Este princípio dá credibilidade à metodologia utilizada neste trabalho para a determinação das propriedades mecânicas do material estudado.

4.5.1 – Obtenção da curva tensão – densidade aparente

Para a obtenção da referida curva, foi utilizada a máquina de ensaios universais descrita anteriormente (fig. 20 a) e uma matriz para compactação (com cavidade) de 60 x 20 x 45 mm, figura 29. A velocidade de compactação foi fixada em 0,5 mm / minuto. Esta velocidade foi escolhida para minimizar problemas durante a compactação, permitindo a interrupção desta a qualquer momento, sem prejudicar os equipamentos.

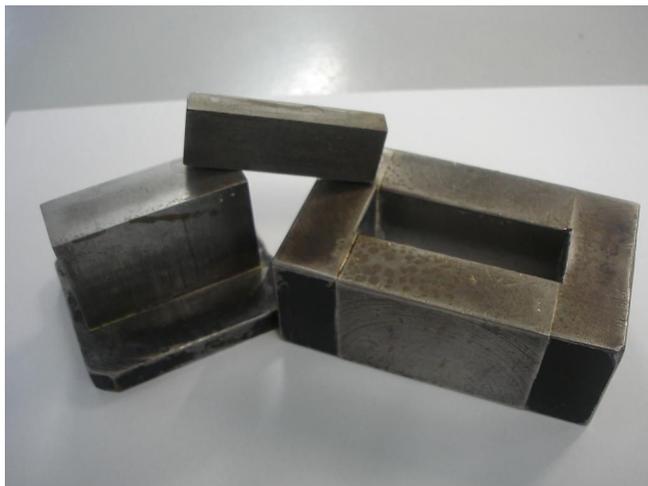


Figura 29 – Matriz de compactação utilizada.

O material utilizado foi o mesmo preparado para a confecção dos corpos-de-prova laminados.

A técnica consiste em submeter massas iguais do material granulado a pressões de compactação conhecidas. Para cada pressão escolhida foram confeccionados três corpos-de-prova. Em seguida estes corpos-de-prova foram pesados, medidos e identificados, e secos em estufa por um tempo mínimo de 24 horas a temperatura de $110 \pm 10^\circ\text{C}$.

Após a secagem, esses corpos-de-prova ainda a verde, foram submetidos a testes de densidade aparente por imersão em mercúrio através do princípio de Arquimedes. Foi então realizada a média aritmética dos valores encontrados de densidade aparente para a obtenção dos pontos para a construção da curva tensão – densidade aparente.

Não foi estudada a influência da direção no processo de prensagem, uma vez que este processo não apresenta essa possibilidade.

4.5.2 – Obtenção da curva absorção de água – densidade aparente

Os corpos-de-prova, também foram submetidos ao mesmo procedimento de tratamento térmico adotado na parte B dos CPL's, item 4.4 deste capítulo, para tornar possível a realização dos ensaios de absorção de água.

Novamente, obteve-se uma média dos valores de absorção de água encontrados para a construção desta curva.

4.5.3 – Validação da análise matemática.

Com a obtenção dos dados experimentais, a análise matemática, apresentada no capítulo 3, foi utilizada para simular o comportamento dos materiais laminados. Os resultados matemáticos foram comparados com os experimentais.

4.6 – Confeção dos corpos-de-prova prensados (CPP's)

A compactação foi realizada com a máquina de ensaios universais e a matriz utilizadas anteriormente, figuras 20 (a) e 29 respectivamente. A velocidade de compactação foi 0,5 mm/min. O material utilizado para a confecção dos CPP's foi preparado da mesma maneira apresentada no item 4.1, deste capítulo.

Em função da cronologia dos eventos, não foi possível utilizar a modelagem matemática proposta para o cálculo da pressão de compactação utilizada para a fabricação dos CPP's, uma vez que esta ainda não estava concluída.

Por esta razão a pressão de compactação escolhida para cada variação estudada, foi baseada nos resultados experimentais, através das curvas de tensão – densidade aparente e absorção de água – densidade aparente, respectivamente, descritas nos itens 5.1 e 5.2 deste capítulo.

Para cada uma das variações estudadas foram preparados aproximadamente 50 CPP's.

Apesar de não terem sido efetivamente utilizados neste trabalho, serão apresentados os valores das pressões de compactação obtidos através da modelagem proposta para permitir uma comparação com os resultados industriais.

4.6.1 – Caracterização dos corpos-de-prova prensados (CPP's).

A metodologia adotada para a caracterização dos CPP's foi a mesma descrita no item 4.4 deste capítulo.

4.7 – Confeção dos corpos-de-prova prensados – referência (CPP-R's)

O escopo deste trabalho não é encontrar uma rota ideal de processamento para obtenção de produtos laminados a partir de pós, e sim discutir o processo de laminação, apresentando as variáveis de processo e como estas se relacionam.

Contudo, é importante objetivar a realidade demandada pela indústria. Por esta razão foram confeccionados aproximadamente cinquenta corpos-de-prova prensados, com parâmetros de processamento usualmente empregados na indústria de revestimento cerâmico para servir de referência ao estudo.

A compactação foi realizada com máquina de ensaios universal de ensaios, marca EMIC, modelo DL20000. A matriz utilizada já foi apresentada anteriormente, figura 29. A pressão de compactação adotada foi 60 MPa.

O material usado para a confecção dos CPP-R's foi preparado de maneira análoga à apresentada no item 4.1, deste capítulo. Entretanto, o teor de umidade adotado foi 6,5% em peso. O processo de peneiramento foi realizado apenas com a menor granulometria (ASTM #18), uma vez que a baixa umidade incorporada não provocava grande aglutinação do pó.

4.7.1 – Caracterização dos corpos-de-prova prensados – referência (CPP-R's).

A metodologia adotada para a caracterização dos CPP-R's foi a mesma descrita no item 4.4 deste capítulo.

4.8 – Projeto do laminador piloto em escala industrial

Com o conhecimento adquirido ao longo deste trabalho, foi possível a elaboração de um projeto de um laminador para pós cerâmicos em escala industrial.

As necessidades de projeto listadas para o laminador de laboratório foram refinadas e transformadas em requisitos de projeto.

O laminador piloto foi construído pela empresa ICON S.A. de Criciúma/SC.

Foi realizado um teste de funcionamento utilizando o mesmo material e condições de processamento empregados e discutidos no item 4 deste capítulo.

As placas obtidas foram enviadas ao SENAI – CTCMat (Centro de Tecnologia Cerâmica) para a caracterização.

CAPÍTULO 5:

Resultados e discussões

5.1 – Matéria-prima (pó).

5.1.1 – Análise mineralógica.

A composição da matéria-prima utilizada é de relevância na seleção dos parâmetros de processamento e nas propriedades do produto final, a tabela 5 apresenta o resultado da análise mineralógica.

Tabela 5 – Fases mineralógicas.

Fases identificadas	Proporção (%)
Quartzo	34,39
Microclínio	28,89
Illita	9,36
Talco	9,12
Montmorilonita	8,24
Caolinita	6,24
Hematita	3,76

5.1.2 – Distribuição granulométrica.

A tabela 6 apresenta a distribuição granulométrica da matéria-prima.

Tabela 6 – Distribuição do tamanho de partícula (% em massa).

Quantidade	% em massa
10% das partículas abaixo de	0,78 μm
50% das partículas abaixo de	3,34 μm
90% das partículas abaixo de	18,68 μm
100% das partículas abaixo de	45,00 μm

5.1.3 – Densidade real dos sólidos (ρ_{RS}).

O líquido utilizado para a determinação da densidade foi água deionizada, a temperatura do ensaio foi $22,0 \pm 1,0$ °C.

A densidade real dos sólidos foi determinada como sendo $2,55 \text{ g/cm}^3$.

5.1.4 – Índices de plasticidade.

Os índices de plasticidade são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Índices de plasticidade.

Índices de plasticidade	Valor
Limite Plástico	15,3%
Limite Líquido	33,4%

Os resultados demonstram que abaixo de 15,3% de umidade, o material está sob a forma de pó ou grânulos e acima deste valor é considerado um corpo plástico. Acima de 33,4% de umidade o material é considerado uma barbotina.

5.2 – Matéria-prima (grânulos).

O pó cerâmico precisa ser preparado para a etapa de laminação e por esta razão é fundamental conhecer as características deste material granulado antes de seu processamento.

Nesta etapa foram controlados dois parâmetros a umidade deste material granular instantes antes do processamento, chamada neste trabalho de umidade real, e a densidade batida (*tap density*).

5.2.1 – Umidade real.

A tabela 8 apresenta os resultados obtidos após secagem das amostras.

Tabela 8 – Umidade real.

Umidade original	Umidade após secagem	Variação
16% ASTM #8	14,70 %	-1,3 %
16% ASTM #18	14,80 %	1,2 %
18% ASTM #8	17,05 %	-0,95 %
18% ASTM #18	17,20 %	-0,8 %

A variação encontrada entre os valores teóricos e experimentais é esperada e aceitável uma vez que o processo é realizado manualmente e em ambiente não controlado.

5.2.2 – Densidade batida (*Tap density*).

A densidade batida é um parâmetro muito utilizado na metalurgia do pó. É considerada como a densidade inicial do material antes do seu processamento [33].

Os resultados apresentados foram obtidos através da média aritmética de três ensaios, tabela 9.

Tabela 9 – Densidade batida (*Tap density*).

Umidade original	Densidade batida (ρ_{Tap}) g/cm ³	Desvio padrão
16% ASTM #8	1,10	$\pm 0,01$
16% ASTM #18	1,13	$\pm 0,01$
18% ASTM #8	1,20	$\pm 0,01$
18% ASTM #18	1,23	$\pm 0,01$

Os resultados apresentados, como esperado, mostram valores maiores de densidade para materiais com tamanho de partículas menores, devido ao maior empacotamento das partículas.

5.3 – Corpos-de-prova laminados (CPL's).

Os resultados de densidade aparente para as peças a verde e queimadas, absorção de água para as peças queimadas a 900 e 1150 °C e resistência flexural a três pontos são apresentadas abaixo.

Ao longo de todas as etapas do processo também foi acompanhada a retração linear dos CPL's.

Para facilitar a compreensão os CPL's serão identificados seguindo o seguinte padrão:

XX% #Y DZ

Onde **XX%** representa o percentual de umidade, **#Y** representa o tamanho do grânulo inicial e **DZ** a direção de laminação.

5.3.1 – Densidade aparente.

A tabela 10 apresenta os valores de densidade aparente dos CPL's.

Tabela 10 – Densidade aparente (CPL's).

Variação estudada	Densidade aparente	
	Peças a verde (ρ_v) g/cm ³	Peças queimadas (ρ_q) g/cm ³
16% #8 D1	1,66 ± 0,03	2,34 ± 0,01
16% #8 D2	1,65 ± 0,02	2,34 ± 0,02
16% #18 D1	1,65 ± 0,02	2,34 ± 0,01
16% #18 D2	1,65 ± 0,03	2,35 ± 0,02
18% #8 D1	1,70 ± 0,04	2,36 ± 0,02
18% #8 D2	1,71 ± 0,04	2,36 ± 0,02
18% #18 D1	1,71 ± 0,03	2,35 ± 0,03
18% #18 D2	1,72 ± 0,02	2,35 ± 0,02

Os resultados mostram que ocorre uma maior compactação com o aumento do teor de umidade, isso ocorre porque a água atua também como um lubrificante melhorando o escoamento entre as partículas, explicando o aumento da densidade a verde.

O tamanho inicial dos grânulos e a direção de laminação não influenciaram os resultados.

5.3.2 – Absorção de água.

A tabela 11 apresenta os valores de absorção de água dos CPL's.

Tabela 11 – Absorção de água (CPL's).

Variação estudada	% de água absorvida	
	900 °C	1150 °C
16% #8 D1	23,11 ± 0,24	2,57 ± 0,17
16% #8 D2	23,09 ± 0,13	2,21 ± 0,21
16% #18 D1	23,39 ± 0,18	2,34 ± 0,12
16% #18 D2	23,25 ± 0,88	2,49 ± 0,23
18% #8 D1	21,91 ± 0,38	2,17 ± 0,18
18% #8 D2	21,89 ± 0,17	2,14 ± 0,11
18% #18 D1	18,20 ± 0,40	1,79 ± 0,31
18% #18 D2	18,17 ± 0,29	1,67 ± 0,29

Os valores de absorção de água nas peças com 16% de umidade não sofrem influência do tamanho inicial dos grânulos ou direção de laminação.

As amostras com 18% de umidade apresentam um menor valor de absorção de água, pois como apresentado no item 1.4 deste capítulo, já estão no estado de corpos plásticos possuindo assim uma menor resistência ao cisalhamento, que conseqüentemente propicia uma melhor compactação, explicando os valores mais baixos. O tamanho dos grânulos iniciais também exerce influência, afinal quanto menor o seu tamanho, melhor empacotamento favorecendo o escoamento.

5.3.3 – Resistência à flexão.

Segundo a parametrização estatística utilizada, e por se tratar de materiais cerâmicos, a comparação entre os resultados pode ser feita com o uso de apenas dois parâmetros [14], são eles:

1 – m , chamado de módulo ou coeficiente de Weibull, que descreve a distribuição do tamanho dos defeitos e logo a dispersão dos dados;

2 – σ_0 , que é um parâmetro de normalização, também escolhido como tensão característica onde a probabilidade de falha é 0,632.

Os resultados foram tratados segundo a distribuição probabilística de Weibull e são apresentados nos gráficos 5 a 12.

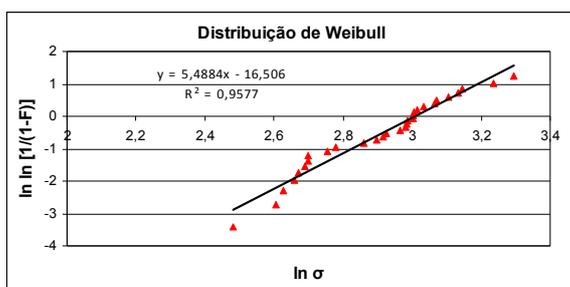


Gráfico 5 – Distribuição de Weibull
16% #8 D1 (CPL's).

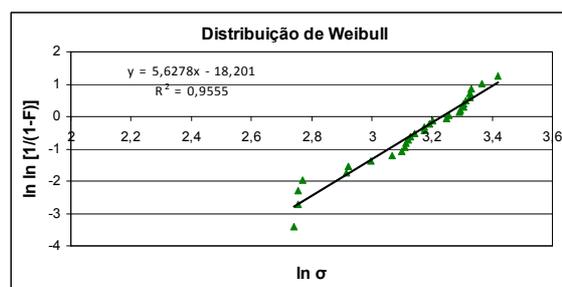


Gráfico 6 – Distribuição de Weibull
16% #8 D2 (CPL's).

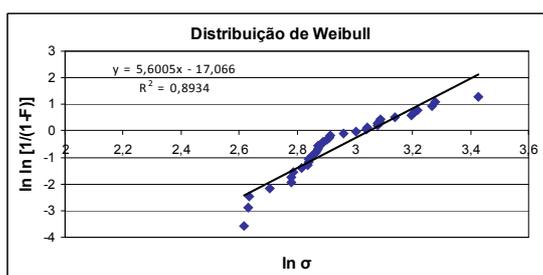


Gráfico 7 – Distribuição de Weibull
16% #18 D1 (CPL's).

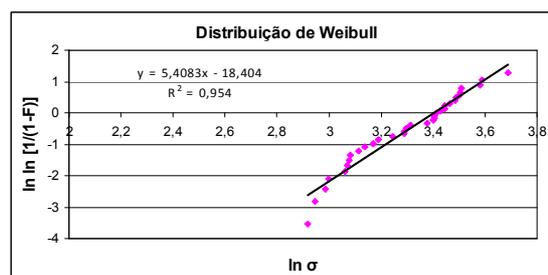


Gráfico 8 – Distribuição de Weibull
16% #18 D2 (CPL's).

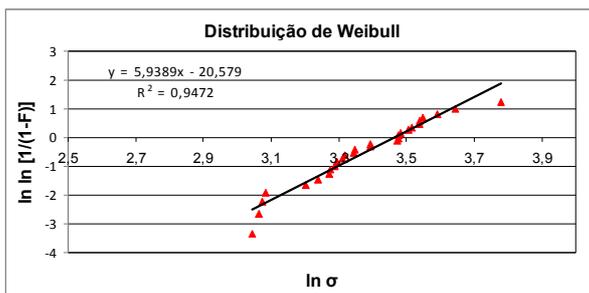


Gráfico 9 – Distribuição de Weibull
18% #8 D1 (CPL's).

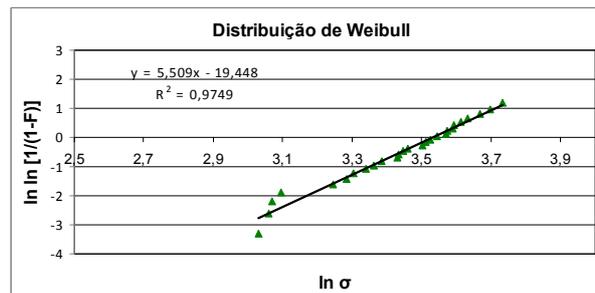


Gráfico 10 – Distribuição de Weibull
18% #8 D2 (CPL's).

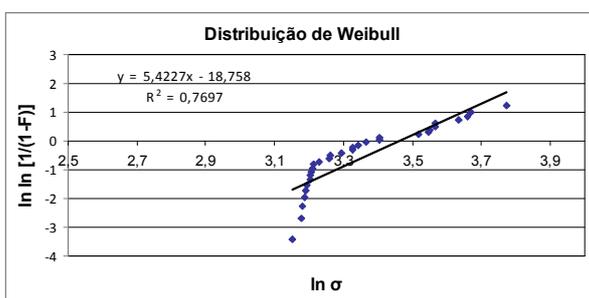


Gráfico 11 – Distribuição de Weibull
18% #18 D1 (CPL's).

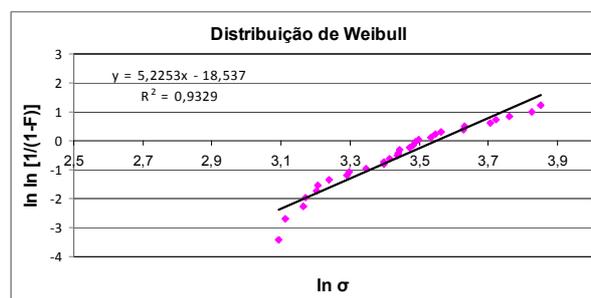


Gráfico 12 – Distribuição de Weibull
18% #18 D2 (CPL's).

Para facilitar a compreensão, os resultados dos parâmetros característicos foram agrupados e estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros de Weibull (CPL's).

Varição estudada	σ_0 (MPa)	m
16% #8 D1	20,25 ± 0,86	5,49
16% #8 D2	25,40 ± 1,07	5,63
16% #18 D1	21,10 ± 1,46	5,60
16% #18 D2	30,08 ± 1,41	5,41
18% #8 D1	32,01 ± 1,45	5,94
18% #8 D2	34,15 ± 1,10	5,51
18% #18 D1	32,74 ± 1,66	5,42
18% #18 D2	34,45 ± 1,93	5,22

O coeficiente de Weibull, m, apresenta um valor baixo, típico de materiais cerâmicos utilizados para revestimento, indicando que o processo ainda apresenta

uma grande dispersão, contudo a rota adotada é homogênea, pois não houve uma grande variação entre os resultados.

A direção de laminação influencia a resistência mecânica, afinal os defeitos presentes tendem a se alinhar na direção de laminação [32], gerando uma anisotropia característica ao processo.

A umidade também exerce efeito sobre a resistência a flexão, conforme apresentado anteriormente, as amostras preparadas com 18% de umidade apresentam uma maior densificação o que conseqüentemente diminui a probabilidade de se encontrar um defeito crítico que ocasione a ruptura.

O tamanho do grânulo inicial parece não exercer grande influência.

5.3.5 – Retração linear.

A tabela 13 apresenta os valores de retração linear dos CPL's.

Tabela 13 – Retração linear (CPL's).

Variação estudada	Após secagem	Após queima	Após queima
		900 °C	1150 °C
16% #8 D1	0,63 ± 0,18	0,33 ± 0,12	12,38 ± 0,53
16% #8 D2	0,72 ± 0,10	0,39 ± 0,09	12,48 ± 0,81
16% #18 D1	0,61 ± 0,14	0,28 ± 0,17	12,26 ± 0,52
16% #18 D2	0,64 ± 0,17	0,32 ± 0,15	12,43 ± 0,60
18% #8 D1	2,14 ± 0,20	0,41 ± 0,12	11,46 ± 0,32
18% #8 D2	2,28 ± 0,20	0,37 ± 0,18	11,49 ± 0,24
18% #18 D1	2,27 ± 0,20	0,34 ± 0,15	11,42 ± 0,40
18% #18 D2	2,31 ± 0,11	0,38 ± 0,22	11,33 ± 0,34

A retração linear após secagem, mostrou que as peças com maior teor de umidade apresentam uma maior retração, devido ao maior teor de água em sua composição.

As amostras queimadas a 900 °C, apresentaram retração linear muito baixa, o que colabora para a validação da hipótese anterior de que a esta temperatura, a morfologia e distribuição dos poros não é significativamente afetada, logo os ensaios

de absorção de água dos CPL's queimados a esta temperatura expressam satisfatoriamente o comportamento que seria encontrado nas peças ainda a verde.

Após a queima, a retração linear foi ligeiramente maior nas amostras com 16% de umidade, o que ajuda a explicar os resultados de densidade aparente, afinal uma maior retração compensaria a mesma densificação, mesmo estas apresentando uma menor densidade a verde.

5.4 – Análise matemática.

5.4.1 – Obtenção da curva tensão – densidade aparente

As curvas são construídas a partir dos valores obtidos na medição da densidade aparente a verde em função da tensão de compactação, gráficos 13 a 16.

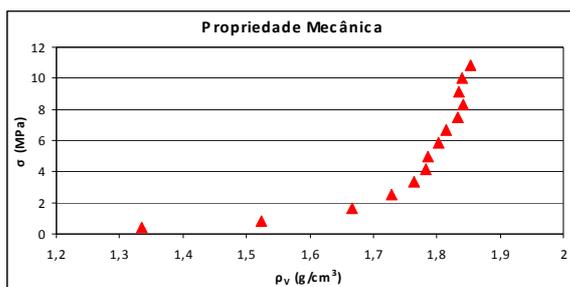


Gráfico 13 – Propriedade mecânica 16% #8.

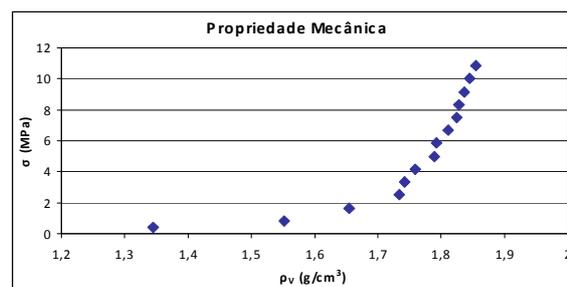


Gráfico 14 – Propriedade mecânica 16% #18.

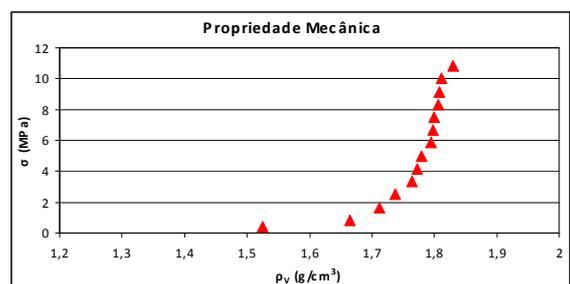


Gráfico 15 – Propriedade mecânica 18% #8.

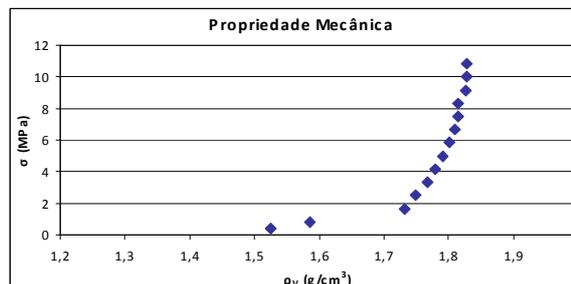


Gráfico 16 – Propriedade mecânica 18% #18.

Devido a uma dificuldade experimental, não foi possível realizar medições de densidade aparente a verde logo em seguida ao processamento, portanto as curvas apresentadas anteriormente não representam a realidade, pois não consideram a

presença da água no sistema e nem a variação que a sua falta representa no volume. Por esta razão, as curvas foram corrigidas, utilizando dois resultados já apresentados:

- 1 – A umidade real, item 2.1 deste capítulo;
- 2 – Retração linear, item 3.5 deste capítulo;

Com esses valores é possível estimar a massa e volume originais das amostras, corrigindo matematicamente os valores de densidade aparente encontrados.

Os gráficos 17, 18, 19 e 20, apresentam as curvas corrigidas.

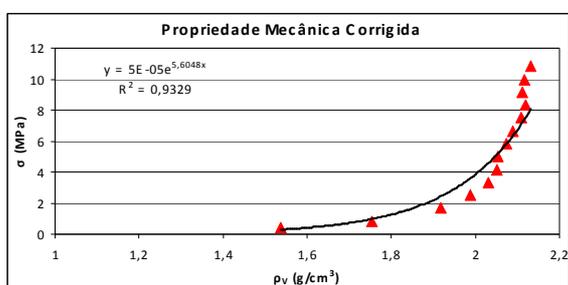


Gráfico 17 – Propriedade mecânica corrigida 16% #8.

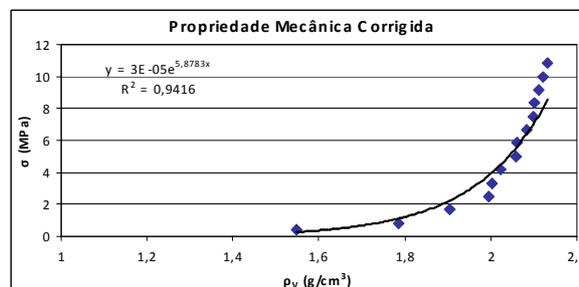


Gráfico 18 – Propriedade mecânica corrigida 16% #18.

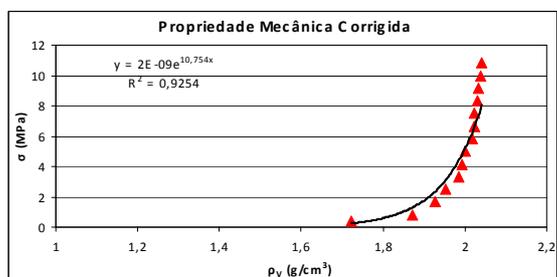


Gráfico 19 – Propriedade Mecânica corrigida 18% #8.

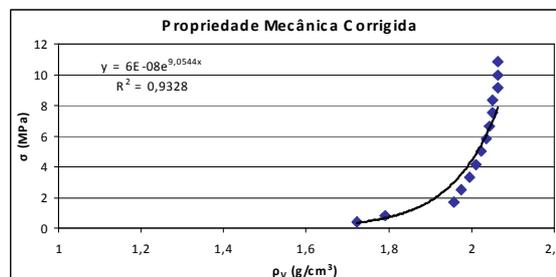


Gráfico 20 – Propriedade Mecânica corrigida 18% #18.

A tabela 14 apresenta as equações provenientes das curvas de tensão – densidade aparente a verde corrigida. Estas equações representam o comportamento mecânico do material granulado para cada condição estudada.

Tabela 14 – Equações obtidas a partir das curvas tensão – densidade aparente a verde.

Varição sob análise	Equações
16% #8	$\sigma = 5.10^{-5} \cdot \exp(5,6048 \cdot \rho_V)$
16% #18	$\sigma = 3.10^{-5} \cdot \exp(5,8783 \cdot \rho_V)$
18% #8	$\sigma = 2.10^{-9} \cdot \exp(10,754 \cdot \rho_V)$
18% #18	$\sigma = 5.10^{-8} \cdot \exp(9,0544 \cdot \rho_V)$

Com estas equações será possível prover dados para o equacionamento matemático e prever as forças de compactação a serem utilizadas na preparação dos CPP's.

Nota-se também que as equações podem ser generalizadas como:

$$\sigma = k_1 \cdot \exp(k_2 \cdot \rho_V) \quad (44)$$

Onde k_1 e k_2 são constantes dependentes do material.

5.4.2 – Obtenção da curva tensão – absorção de água.

Pode-se relacionar com a medida de absorção de água das amostras a verde secas com as amostras queimadas a 900 °C. Os gráficos 21 a 24, apresentam as curvas obtidas.

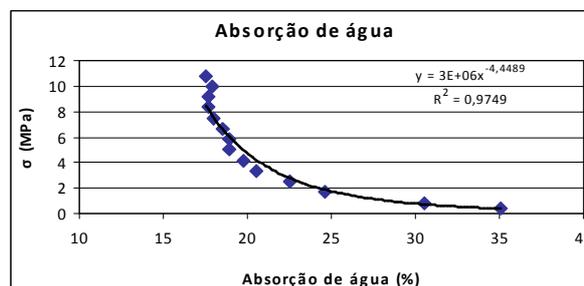
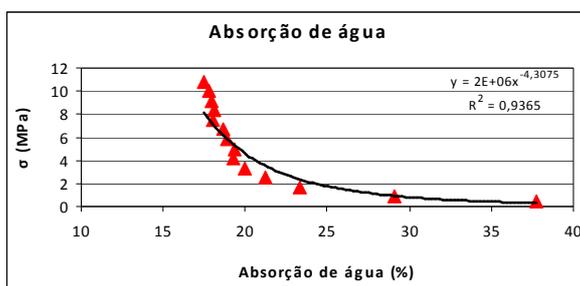


Gráfico 21 – Absorção de água 16% #8. Gráfico 22 – Absorção de água 16% #18.

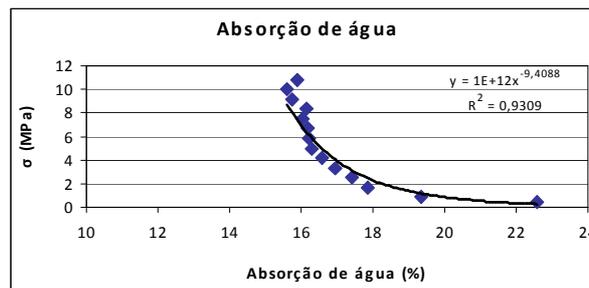
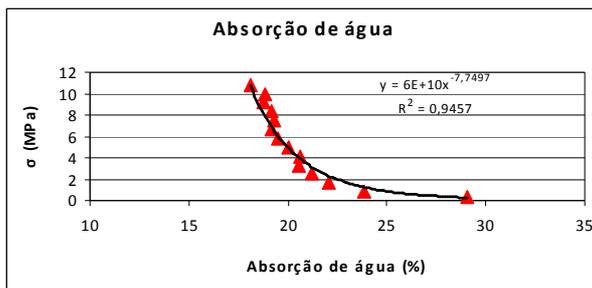


Gráfico 23 – Absorção de água 18% #8. Gráfico 24 – Absorção de água 18% #18.

A tabela 15 apresenta as equações provenientes das curvas de tensão – absorção de água das peças queimadas a 900 °C.

Tabela 15 – Equações obtidas a partir das curvas tensão – absorção de água (900 °C).

Variação sob análise	Equações
16% #8	$\sigma = 2.10^6 \cdot (\text{Absorção de água})^{-4,3075}$
16% #18	$\sigma = 3.10^6 \cdot (\text{Absorção de água})^{-4,4489}$
18% #8	$\sigma = 2.10^{10} \cdot (\text{Absorção de água})^{-7,7497}$
18% #18	$\sigma = 1.10^{12} \cdot (\text{Absorção de água})^{-9,4088}$

Com estas equações e utilizando os valores de absorção de água (900 °C) obtidos nos CPL's, é possível também estimar os valores das forças de compactação a serem utilizadas para a fabricação dos CPP's.

5.4.3 – Validação da análise matemática.

Com as propriedades mecânicas definidas é possível utilizar o equacionamento matemático proposto para simular o processo utilizado.

A força de laminação obedece a igualdade apresentada na equação 34:

$$F = \sigma \cdot \exp \left[\lambda^{-1} \cdot \left(\frac{1 - \mu_i}{1 + \mu_i} \right) \cdot \psi \right] \cdot \beta \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (34)$$

Ou seja, genericamente poderia ser descrita como:

$$F = k_1 \cdot \exp(k_2 \cdot \rho_V) \cdot \exp \left[\lambda^{-1} \cdot \left(\frac{1 - \mu_i}{1 + \mu_i} \right) \cdot \psi \right] \cdot \beta \cdot b \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (45)$$

Utilizando a eq. 45, e substituindo as variáveis de processo, existem ainda dois parâmetros que não foram mensurados neste trabalho, β e μ_i .

β é um valor empírico de correção associado às incertezas de processamento e considerações matemáticas, como o atrito externo, folgas, variações da máquina, simplificações e arredondamentos matemáticas. Segundo a literatura [32] este valor pode oscilar entre 1,15 a 1,35. Será fixado o valor de 1,2 neste trabalho.

O atrito interno entre as partículas, μ_i , pode variar em função da composição do material, da presença e quantidade de lubrificantes e da forma e tamanhos de partículas e grânulos. A literatura [38, 39] apresenta variações entre 0,01 a 0,4. Para as variações estudadas os valores que melhor se adequaram ao resultados foram:

Tabela 16 – Coeficientes de atrito interno.

Variação sob análise	Atrito interno (μ_i)
16% #8	0,30
16% #18	0,28
18% #8	0,21
18% #18	0,19

A variação apresentada pelo atrito interno está associada a porcentagem de umidade presente, pois esta também atua como lubrificante. O tamanho dos grânulos iniciais, também causa alteração do atrito interno, visto que partículas menores escoam com mais facilidade que partículas maiores [35].

Como os resultados experimentais foram obtidos apenas para baixas tensões de compactação, foram utilizadas as equações apresentadas na tabela 15, para as respectivas extrapolações e aproximar os resultados para pressões usualmente empregadas pela indústria, em todo de 20 a 70 MPa. Os gráficos 25, 26, 27 e 28, apresentam a comparação entre os resultados experimentais encontrados e suas extrapolações com a modelagem matemática proposta.

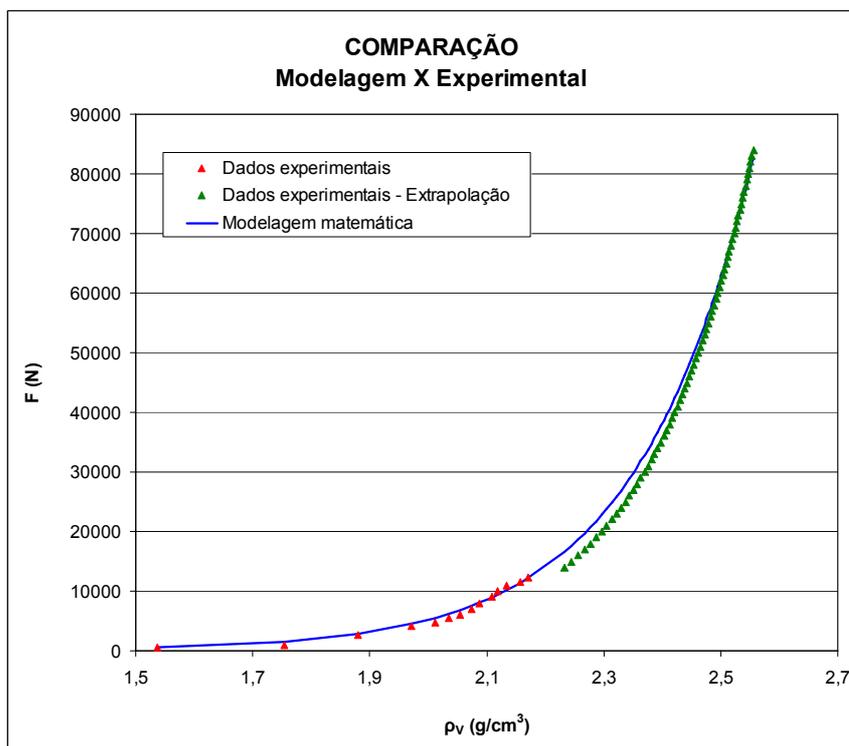


Gráfico 25 – Comparação entre modelagem matemática e dados experimentais
variação 16% #8.

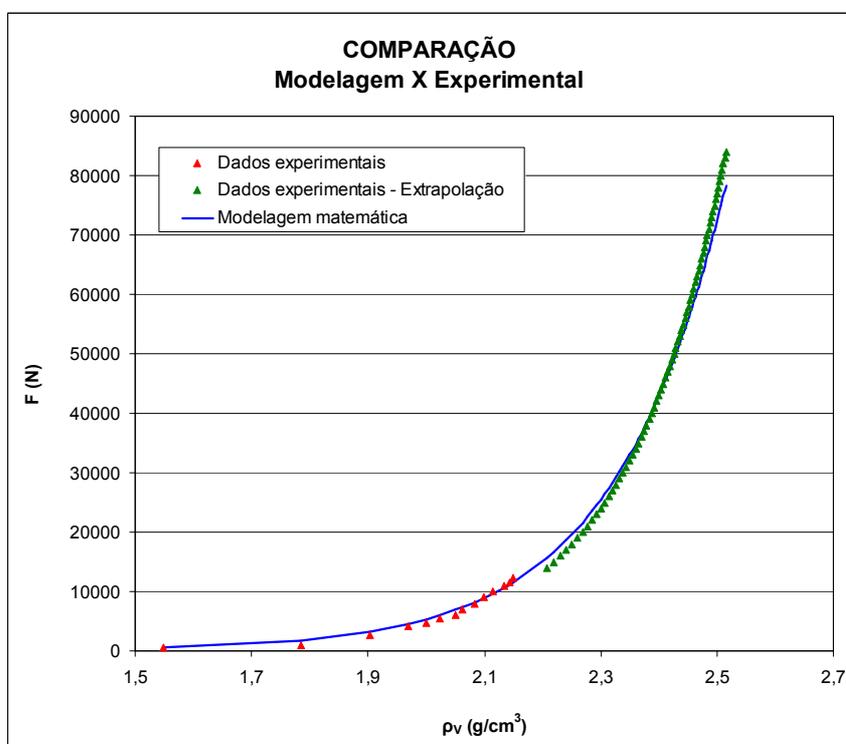


Gráfico 26 – Comparação entre modelagem matemática e dados experimentais
variação 16% #18.

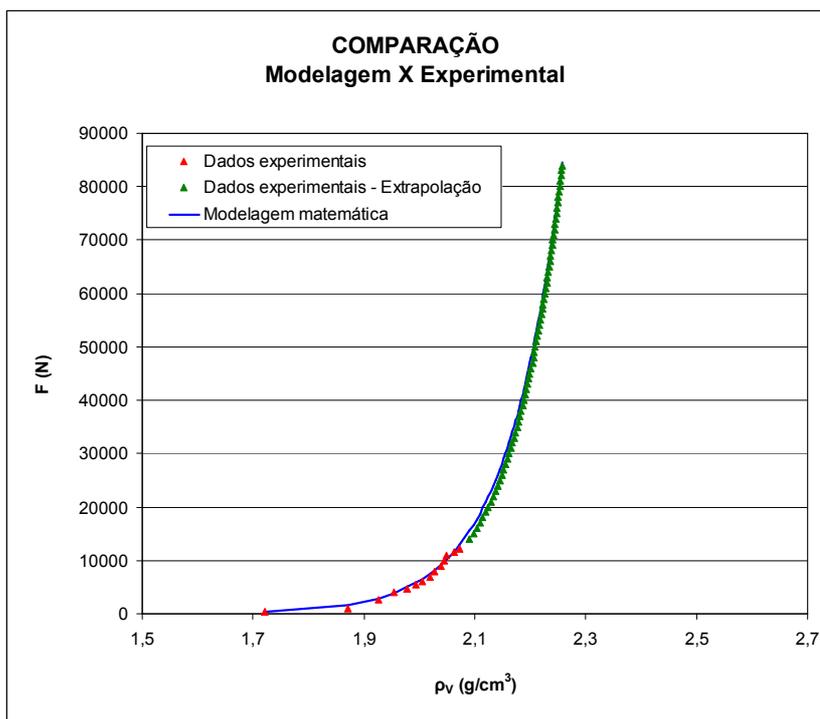


Gráfico 27 – Comparação entre modelagem matemática e dados experimentais
variação 18% #8.

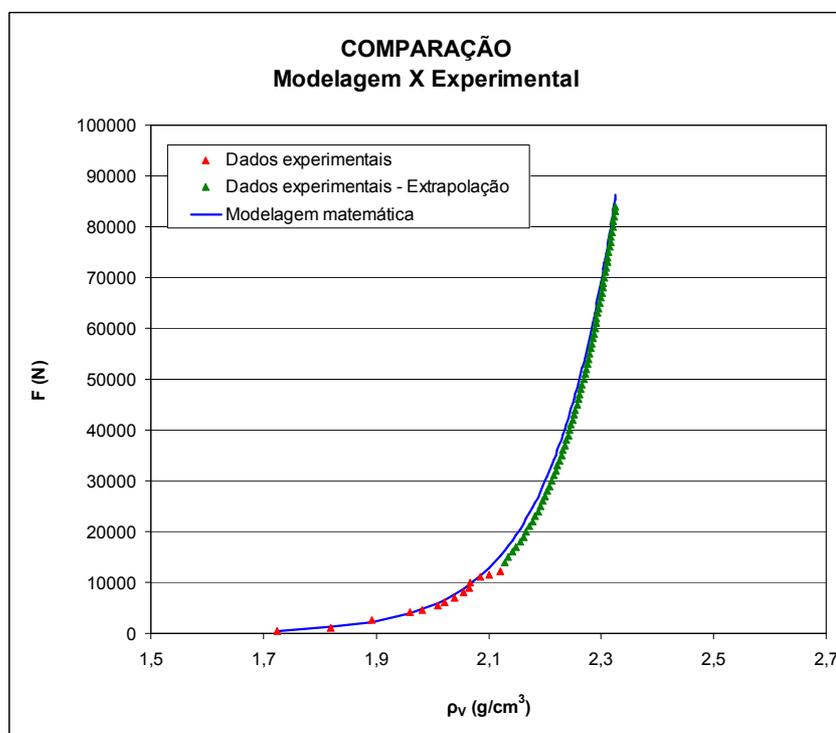


Gráfico 28 – Comparação entre modelagem matemática e dados experimentais
variação 18% #18.

Não existe diferença significativa entre os resultados experimentais e a modelagem proposta para todas as variações estudadas, o que valida o equacionamento proposto.

5.5 – Corpos-de-prova prensados (CPP's).

Serão apresentados os resultados de densidade aparente para as peças a verde e queimadas, absorção de água para as peças queimadas a 900 e 1150 °C e resistência flexural a três pontos.

Ao longo de todas as etapas do processo também foi acompanhada a retração linear dos CPL's.

5.5.1 – Definição da pressão de compactação.

As pressões de compactação foram obtidas através das curvas de tensão – densidade aparente e tensão – absorção de água.

Com as equações apresentadas nas tabelas 14 e 15, e utilizando os respectivos valores de densidade a verde e absorção de água (900 °C) obtidos para os CPL's (tabelas 9 e 10), foi possível calcular os valores de tensão, para todas as variações estudadas. São obtidos dois valores de tensão, σ_1 , proveniente da curva tensão – densidade aparente e σ_2 , proveniente da curva tensão – absorção de água (900 °C). Foi utilizada a média entre estes valores para fabricar os CPP's.

A tabela 17 apresenta os valores de tensão de compactação calculadas para os CPP's.

Tabela 17 – Tensões de compactação calculadas.

Varição sob análise	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	Média da tensões (MPa)
16% #8	2,26	2,27	2,27
16% #18	2,10	2,02	2,06
18% #8	2,30	2,41	2,35
18% #18	2,35	2,27	2,31

5.5.2 – Densidade aparente.

A tabela 18 apresenta os valores de densidade aparente dos CPP's.

Tabela 18 – Densidade aparente (CPP's).

Variação	Densidade aparente	Densidade aparente
	Peças a verde (ρ_v) g/cm ³	Peças queimadas (ρ_q) g/cm ³
16% #8	1,65 ± 0,01	2,37 ± 0,01
16% #18	1,65 ± 0,01	2,35 ± 0,03
18% #8	1,71 ± 0,01	2,35 ± 0,01
18% #18	1,72 ± 0,01	2,36 ± 0,02

Os resultados das peças a verde demonstram uma maior densificação com o aumento da umidade, isto é esperado uma vez água atua como um lubrificante melhorando o empacotamento das partículas.

O tamanho do grânulo inicial não influencia nos resultados.

5.5.3 – Absorção de água.

A tabela 19 apresenta os valores de absorção de água dos CPP's.

Tabela 19 – Absorção de água (CPP's).

Variação	% de água absorvida	% de água absorvida
	900 °C	1150 °C
16% #8	23,77 ± 0,19	2,37 ± 0,54
16% #18	23,45 ± 0,23	2,55 ± 0,89
18% #8	21,17 ± 0,19	2,08 ± 0,60
18% #18	17,83 ± 0,29	1,97 ± 0,28

As amostras com 18% de umidade apresentam um menor valor de absorção de água, pois como estão no estado de corpos plásticos apresentam uma menor

resistência ao cisalhamento, que conseqüentemente permite uma melhor compactação, explicando os valores mais baixos.

O tamanho dos grânulos iniciais também exerce influência, afinal quanto menor o seu tamanho, melhor empacotamento favorecendo o escoamento.

5.5.4 – Resistência a flexão.

Foi utilizada a parametrização estatística de Weibull para apresentação dos resultados. Os gráfico 29, 30, 31 e 32 mostram os resultados obtidos a partir dos ensaios de flexão a três pontos.

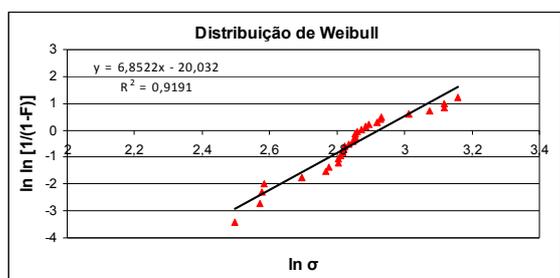


Gráfico 29 – Distribuição de Weibull
16% #8 (CPP's).

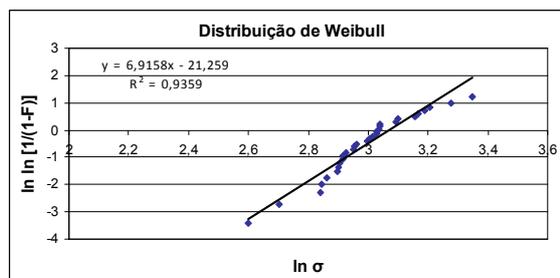


Gráfico 30 – Distribuição de Weibull
16% #18 (CPP's).

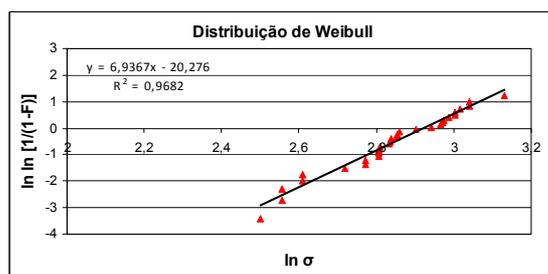


Gráfico 31 – Distribuição de Weibull
18% #8 (CPP's).

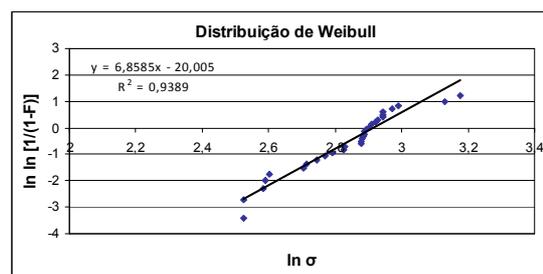


Gráfico 32 – Distribuição de Weibull
18% #18 (CPP's).

A tabela 20 reúne resultados obtidos para facilitar a compreensão e análise.

Tabela 20 – Parâmetros de Weibull (CPP's).

Varição	σ_0 (MPa)	m
16% #8	19,25 \pm 1,10	6,92
16% #18	18,62 \pm 0,88	6,85
18% #8	18,50 \pm 0,76	6,86
18% #18	18,60 \pm 0,54	6,94

O coeficiente de Weibull, m, apresenta um valor baixo, típico de materiais cerâmicos utilizados para revestimento, indicando que o processo ainda apresenta uma grande dispersão, contudo a rota adotada é homogênea, pois não houve uma grande variação entre os resultados.

A umidade e o tamanho do grânulo inicial parecem não exercer influência sobre os resultados.

5.5.5 – Retração linear.

A tabela 21 apresenta os valores de retração linear dos CPP's.

Tabela 21 – Retração linear (CPP's).

Varição	Após secagem	Após queima 900 °C	Após queima 1150 °C
16% #8	0,53 \pm 0,25	0,37 \pm 0,15	12,11 \pm 0,23
16% #18	0,60 \pm 0,17	0,32 \pm 0,11	12,31 \pm 0,38
18% #8	2,09 \pm 0,24	0,41 \pm 0,20	11,29 \pm 0,36
18% #18	2,43 \pm 0,20	0,38 \pm 0,20	11,78 \pm 0,26

A retração linear após secagem, mostrou que as peças com maior teor de umidade apresentam uma maior retração, afinal possuem mais água em sua composição.

Após a queima, a retração linear foi ligeiramente maior nas amostras com 16% de umidade, o que ajuda a explicar os resultados de densidade aparente, afinal uma maior retração compensaria a mesma densificação, mesmo estas apresentando uma menor densidade a verde.

5.6 – Corpos-de-prova prensados – referência (CPP-R's).

Os valores encontrados são apenas referenciais, visam apresentar a realidade industrial e o resultado final a ser alcançado.

5.6.1 – Densidade aparente.

A tabela 22 apresenta os valores de densidade aparente dos CPP-R's.

Tabela 22 – Densidade aparente (CPP-R's).

Variação	Densidade aparente	Densidade aparente
	Peças a verde (ρ_v) g/cm ³	Peças queimadas (ρ_q) g/cm ³
6,5% #18 Referência	2,12 ± 0,01	2,43 ± 0,01

5.6.2 – Absorção de água.

A tabela 23 apresenta os valores de absorção de água dos CPP-R's.

Tabela 23 – Absorção de água (CPP-R's).

Variação	% de água absorvida	% de água absorvida
	900 °C	1150 °C
6,5% #18 Referência	9,20 ± 0,05	0,09 ± 0,04

5.6.3 – Resistência a flexão.

O gráfico 33 apresenta os resultados de resistência flexão dos CPP-R's.

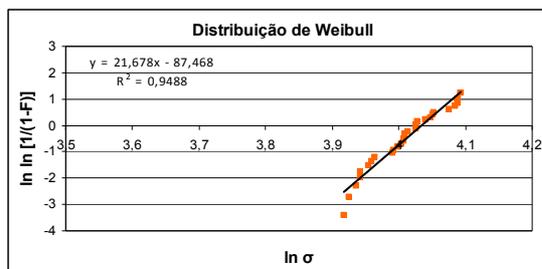


Gráfico 33 – Distribuição de Weibull (CPP-R's).

A tabela 24 reúne os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica dos CPP-R's, para facilitar a compreensão.

Tabela 24 – Parâmetros de Weibull (CPP-R's).

Variação	σ_0 (MPa)	m
6,5% #18 Referência	$56,54 \pm 0,67$	21,67

5.6.4 – Retração linear.

A tabela 25, apresenta os resultados de retração linear dos CPP-R's.

Tabela 25 – Retração linear (CPP-R's).

Variação	Após secagem	Após queima 900 °C	Após queima 1150 °C
6,5% Referência	$0,20 \pm 0,16$	$0,31 \pm 0,08$	$5,41 \pm 0,29$

5.7 – Comparação dos resultados.

5.7.1 – Densidade aparente.

A tabela 26 apresenta os resultados de densidade aparente de todos os corpos-de-prova estudados.

Tabela 26 – Densidade aparente.

	Variação	Densidade aparente	Densidade aparente
		Peças a verde (ρ_v) g/cm ³	Peças queimadas (ρ_q) g/cm ³
LAMINADOS	16% #8 D1	1,66 ± 0,03	2,34 ± 0,01
	16% #8 D2	1,65 ± 0,02	2,34 ± 0,02
	16% #18 D1	1,65 ± 0,02	2,34 ± 0,01
	16% #18 D2	1,65 ± 0,03	2,35 ± 0,02
	18% #8 D1	1,70 ± 0,04	2,36 ± 0,02
	18% #8 D2	1,71 ± 0,04	2,36 ± 0,02
	18% #18 D1	1,71 ± 0,03	2,35 ± 0,03
	18% #18 D2	1,72 ± 0,02	2,35 ± 0,02
PRENSADOS	16% #8	1,65 ± 0,01	2,37 ± 0,01
	16% #18	1,65 ± 0,01	2,35 ± 0,03
	18% #8	1,71 ± 0,01	2,35 ± 0,01
	18% #18	1,72 ± 0,01	2,36 ± 0,02
	6,5% #18 Referência	2,12 ± 0,01	2,43 ± 0,01

Apesar dos resultados ainda estarem distantes dos valores obtidos na indústria, não existem diferenças significativas entre os resultados de laminação e prensagem, ou seja, a densificação conseguida em ambos os processos foi similar e demonstrando o mesmo comportamento nas variações estudadas.

A maior densificação apresentada pelas amostras referências se deve ao fato da pressão efetiva de compactação ser muito maior do que as utilizadas na compactação e laminação.

5.7.2 – Absorção de água.

A tabela 27 apresenta os resultados de absorção de água de todos os corpos-de-prova estudados.

Tabela 27 – Absorção de água.

	Variação	% de água absorvida	% de água absorvida
		900 °C	1150 °C
LAMINADOS	16% #8 D1	23,11 ± 0,24	2,57 ± 0,17
	16% #8 D2	23,09 ± 0,13	2,21 ± 0,21
	16% #18 D1	23,39 ± 0,18	2,34 ± 0,12
	16% #18 D2	23,25 ± 0,88	2,49 ± 0,23
	18% #8 D1	21,91 ± 0,38	2,17 ± 0,18
	18% #8 D2	21,89 ± 0,17	2,14 ± 0,11
	18% #18 D1	18,20 ± 0,40	1,79 ± 0,31
	18% #18 D2	18,17 ± 0,29	1,67 ± 0,29
PRENSADOS	16% #8	23,77 ± 0,19	2,37 ± 0,54
	16% #18	23,45 ± 0,23	2,55 ± 0,89
	18% #8	21,17 ± 0,19	2,08 ± 0,60
	18% #18	17,83 ± 0,29	1,97 ± 0,28
	6,5% #18 Referência	9,20 ± 0,05	0,09 ± 0,04

O mesmo comportamento em relação à absorção de água é notado para ambos os processos avaliados. Os valores encontrados não apresentam diferenças significativas, demonstrando mais uma vez a compatibilidade dos processos.

Como esperado os valores referência são inferiores aos obtidos para laminação e prensagem, o que se deve novamente a utilização de uma maior pressão de compactação.

5.7.3 – Resistência a flexão.

A tabela 28 apresenta os resultados de resistência à flexão de todos os corpos-de-prova estudados.

Tabela 28 – Parâmetros de Weibull.

	Variação	σ_0 (MPa)	m
LAMINADOS	16% #8 D1	20,25 ± 0,86	5,49
	16% #8 D2	25,40 ± 1,07	5,63
	16% #18 D1	21,10 ± 1,46	5,60
	16% #18 D2	30,08 ± 1,41	5,41
	18% #8 D1	32,01 ± 1,45	5,94
	18% #8 D2	34,15 ± 1,10	5,51
	18% #18 D1	32,74 ± 1,66	5,42
	18% #18 D2	34,45 ± 1,93	5,22
PRENSADOS	16% #8	19,25 ± 1,10	6,92
	16% #18	18,62 ± 0,88	6,85
	18% #8	18,50 ± 0,76	6,86
	18% #18	18,60 ± 0,54	6,94
	6,5% #18 Referência	56,54 ± 0,67	21,67

Os produtos laminados apresentaram um melhor desempenho quando comparado com os produtos prensados em condições similares. Os produtos obtidos por laminação apresentam melhor uniformidade, com poucas fissuras, aglomerados, poros grandes ou outros defeitos [40], quando comparados àqueles produzidos por técnicas convencionais.

Outro fator que influencia nos resultados é a homogeneidade da pressão de compactação. No processo de laminação a pressão exercida pelos cilindros é distribuída de maneira homogênea ao longo de uma linha de compactação, já no processo de prensagem a pressão é distribuída por uma área e é muito influenciada pela lubrificação do sistema e atritos [41], o que causa o surgimento de vários

gradientes de densificação, interferindo negativamente nas propriedades mecânicas do material.

O coeficiente de Weibull, m , que indica a reprodutibilidade do processo, apesar de apresentar valores ligeiramente mais elevados para as amostras prensadas, não indica uma melhora significativa.

5.7.4 – Retração linear.

A tabela 29 apresenta os resultados de retração linear de todos os corpos-de-prova estudados.

Tabela 29 – Retração linear.

	Varição	Após secagem	Após queima 900 °C	Após queima 1150 °C
LAMINADOS	16% #8 D1	0,63 ± 0,18	0,33 ± 0,12	12,38 ± 0,53
	16% #8 D2	0,72 ± 0,10	0,39 ± 0,09	12,48 ± 0,81
	16% #18 D1	0,61 ± 0,14	0,28 ± 0,17	12,26 ± 0,52
	16% #18 D2	0,64 ± 0,17	0,32 ± 0,15	12,43 ± 1,30
	18% #8 D1	2,14 ± 0,20	0,41 ± 0,12	11,46 ± 0,32
	18% #8 D2	2,28 ± 0,20	0,37 ± 0,18	11,49 ± 0,24
	18% #18 D1	2,27 ± 0,20	0,34 ± 0,15	11,42 ± 0,40
	18% #18 D2	2,31 ± 0,11	0,38 ± 0,22	11,33 ± 0,34
PRENSADOS	16% #8	0,53 ± 0,25	0,37 ± 0,15	12,11 ± 0,23
	16% #18	0,60 ± 0,17	0,32 ± 0,11	12,31 ± 0,38
	18% #8	2,09 ± 0,24	0,41 ± 0,20	11,29 ± 0,36
	18% #18	2,43 ± 0,20	0,38 ± 0,20	11,78 ± 0,26
	6,5% #18 Referência	0,20 ± 0,16	0,31 ± 0,08	5,41 ± 0,29

Os processos de laminação e prensagem apresentaram comportamento e valores similares de retração linear.

Como esperado, a amostra referência mais uma vez apresentou valores inferiores, novamente devido a pressão de compactação mais elevada.

5.8 – Projeto do laminador piloto em escala industrial.

Após o primeiro contato com a tecnologia de laminação de produtos cerâmicos através do laminador de laboratório, uma série de parâmetros de processos foram determinados como pontos críticos:

- Alimentação do sistema (matéria-prima);
- Rigidez do sistema;
- Vibração;
- Diferentes coeficientes de atrito;
- Potência do motor;
- Aderência do corpo laminado ao rolo;
- Quantidade de redução por passe;
- Trincas nas extremidades;
- Construção do equipamento (folgas);
- Materiais para esteira e cintas de retenção do fluxo lateral;
- Alinhamento das esteiras;
- Falta de segurança ao operador;
- Controle da porcentagem de redução entre passes;
- Dificuldade em realizar vários passes;

Levando em conta esses pontos críticos, foram definidos os requisitos do projeto do laminador piloto:

- Dosador para os pós cerâmicos (Alimentador);
- Estrutura reforçada;
- Amortecedores para minimizar vibrações;
- Largura útil de 250mm;
- Motor mais potente, 5 a 10 CV;
- Controle da redução por passe;
- Controle do número de passes;
- Duas esteiras, uma inferior de transporte e outra superior para auxiliar na passagem do material e manter o atrito constante;

- Esteiras de borracha natural vulcanizadas sem linhas de costura;
- Guias para as esteiras, para garantir o alinhamento destas;
- Possibilidade de realizar uma possível descompressão se for necessário;
- Tolerâncias dimensionais de seus componentes controladas, para evitar folgas;
- Permitir a visualização do processo;
- Permitir troca dos elementos conformadores;
- Proteções nos componentes dinâmicos, para garantir a segurança do operador;
- Botões de parada de emergência;
- Controle da velocidade de laminação;
- Cilindros retificados e reforçados, para evitar flambagem e variação dimensional do produto final;
- Fácil manutenção;
- Não utilizar componentes hidráulicos;
- Permitir futuras modificações sem grande custo de adaptação.

O projeto detalhado não será discutido para proteger a tecnologia desenvolvida. Serão apresentadas algumas figuras apenas para permitir a visualização do maquinário projetado.

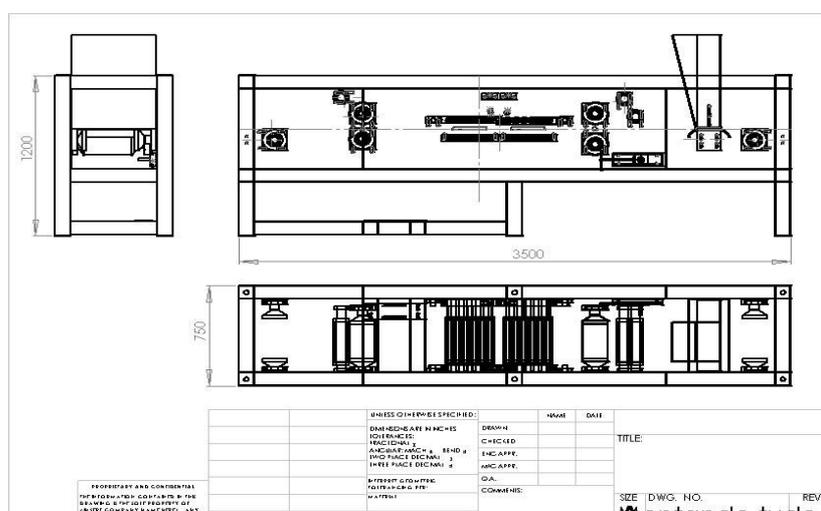


Figura 30 – Projeto do laminador piloto, vista lateral, frontal e superior.

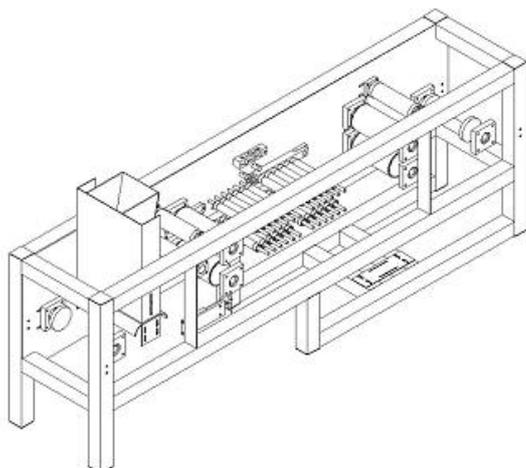


Figura 31 – Projeto em perspectiva.



Figura 32 – Laminador piloto, vista lateral.



Figura 33 – Laminador piloto, vista frontal.

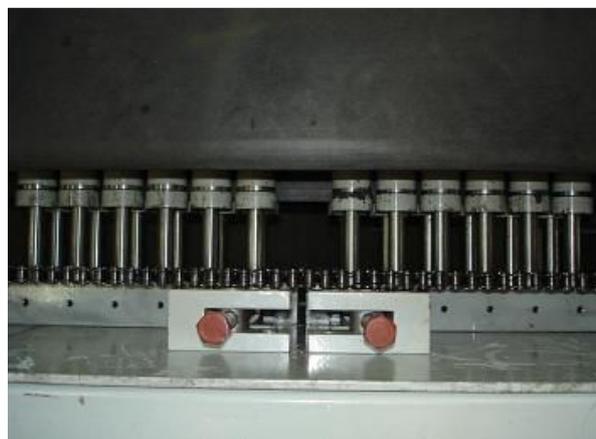


Figura 34 – Detalhe, unidade de laminação.



Figura 35 – Detalhe, alimentador.



Figura 36 – Detalhe, unidade motriz.

CAPÍTULO 6:

Conclusões e Sugestões

6.1 – Conclusões.

Este trabalho demonstrou que é possível a obtenção de placas cerâmicas laminadas a partir de pós cerâmicos sem a utilização de ligantes ou aditivos de plastificação especiais, apenas com o controle da umidade incorporada ao sistema.

O projeto e construção do laminador em escala laboratorial, mostrou-se como etapa chave para a construção de conhecimento sobre o processo de laminação de pós cerâmicos, afinal, foi através deste protótipo que as primeiras observações e constatações sobre o processo foram realizadas.

A metodologia adotada para o desenvolvimento da análise matemática mostrou-se eficaz, pois a simulação matemática ficou muito próxima aos valores experimentais. Existem ainda dois fatores, β e σ (perdas de processo e atrito interno respectivamente) que precisam ser melhor estudados para garantir que a modelagem proposta, possa ser generalizada para quaisquer materiais.

O processo de laminação apresentou excelentes resultados quando comparado com o processo de prensagem à mesma faixa de pressões de compactação.

As amostras laminadas com 18% de umidade apresentaram em média 34 MPa de resistência mecânica contra 18 MPa das amostras prensadas. Por esta razão, é possível concluir que o processo de laminação permite a obtenção de peças com espessuras reduzidas sem comprometer sua resistência estrutural.

Em relação à densidade aparente, retração linear e absorção de água, os resultados foram muito similares, mostrando que o processo de laminação não interfere negativamente nestas propriedades, sugerindo que a laminação a partir de pós cerâmicos pode ser utilizada no mesmo leque produtivo que a prensagem.

A umidade é um parâmetro muito importante para ambos os processos, porém não é desejável uma grande presença de água no sistema, uma vez que esta deverá obrigatoriamente ser retirada em etapas posteriores, significando custos com secagem. Como apresentado o processo de laminação necessita de um alto teor de água, cerca de 15% quando comparado com a prensagem convencional, em torno de 6,5%.

No entanto, isto não é um aspecto negativo, pois a laminação é um processo contínuo que permite a fabricação de placas com dimensões superiores. É

necessário também levar em conta a planta fabril, e o tipo de moagem adotada, a úmido ou a seco. Em cada um destes casos os custos seriam diferenciados e até mesmo atrativos, como no caso da rota a úmido, onde os gastos com a retirada da água seriam menores.

No contexto geral o processo de laminação de pós cerâmicos se mostrou uma rota alternativa ao processo de prensagem, vindo preencher uma lacuna deste, a fabricação de peças com grandes dimensões.

É uma rota de processamento nova e que necessita de aprimoramento e maiores estudos, contudo possui um potencial de crescimento muito elevado.

6.2 – Sugestões para trabalho futuros.

Adequação do equipamento para produção de placas laminadas com mesmas propriedades dos produtos atualmente disponíveis.

Estudo da influência da velocidade de laminação x trabalhabilidade nas propriedades dos produtos finais.

A análise matemática apresentada necessita do atrito interno como variável, por esta razão seria interessante desenvolver uma metodologia para a medição desta propriedade do material.

Estudo das características reológicas das massas utilizadas para laminação e desenvolvimento de uma massa adequada para a laminação.

Utilização de aditivos plastificantes, com o intuito de reduzir a quantidade de água presente no sistema.

Reproduzir os experimentos deste trabalho no laminador piloto.

Validação da modelagem proposta através da utilização de diferentes materiais.

Utilização de pós atomizados, como matéria-prima do processo de laminação.

Fabricação componentes multicamadas ou reforçados com fibras.

Fabricação de placas de aquecimento para fornos (cooktops) a partir de pós vitrocerâmicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica. Site: www.abceram.org.br, acesso em 07/11/2007.
2. ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento. Site: www.anfacer.org.br, acesso em 07/11/2007.
3. ANICER – Associação Nacional de Indústria Cerâmica. Site: www.anicer.com.br, acesso em 07/11/2007.
4. Projeto em andamento: Desenvolvimento de tecnologia para utilização de gás natural na queima de cerâmica vermelha em fornos a rolos. – UFSC/PETROBRÁS/SCGÁS – 2005/2006 (Renovado 2006/2007).
5. MX PA03003502 A – Método y planta para fomar losetas o tejas cerâmica. IMPI – Instituto mexicano de la propiedad industrial. 14/02/2005.
6. WO 2004/065085 A1 – Method and plant for forming ceramic slabs or tiles. WIPO – World Intellectual Property Organization. 05/08/2004.
7. Panorama do setor de revestimento cerâmico – Área industrial – Departamento de bens de consumo. BNDS – Banco nacional para o desenvolvimento econômico e social. Setembro de 2006. Site: www.bndes.gov.br, acesso em 05/08/2007.
8. SINDICERAM – Sindicato das Indústrias cerâmicas de Criciúma e Região Sul. Site: www.sindiceram.com.br, acesso em 08/11/2007.
9. Percalços do gás natural na indústria – Política de preços, tarifa de transporte, infra-estrutura de distribuição, assistência técnica, equipamentos e informação vão determinar o futuro do gás natural no segmento industrial. Revista Brasil Energia. Site: www.dep.fem.unicamp.br, acesso em 08/11/2007.
10. ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Site: www.anp.gov.br, acesso em 08/11/2007.
11. MONTES, P. M. F. – Dissertação de mestrado – O potencial de consumo de gás natural pelo setor industrial no Brasil — UFRJ – Rio de Janeiro/RJ, Março 2000.
12. OECD – Organization for Economic Co-operation and Development. www.oecd.org, acesso em 15/12/2007.

-
13. REED, J. S. – Principles of ceramics processing. 2. ed., Wiley, New York, 1995.
 14. RICHERSON, D. W. – Modern ceramic engineering – Properties, processing and use in design. 2. ed., Marcel Dekker, New York, 1992.
 15. GOERENZ, E., RYMON-LIPINSKY, T. – European Patent 0 497 151 B1, 1996.
 16. MISTLER, R. E. – Tape casting. Ceramic and Glasses, Engineered Materials Handbook, ASM International, 1991.
 17. BALZEREIT, J., RYMON-LIPINSKY, T., RASS, I. – Roll-Pressing: A New Variation for Shaping Tiles. Journal Info Ceramic Forum International, 75 (3), 111-114, 1998.
 18. SANTANA, L. N. L. – Tese de doutorado – Aplicação do processamento viscoplástico para a obtenção de placas cerâmicas laminadas – POSMEC – UFSC – Florianópolis/SC, 2002.
 19. RYMON-LIPINSKY, T., GEBHARDT, F. – Roll-Pressing of Ceramic Bodies. Journal Info Ceramic Forum International, 71 (8), 467-469, 1994.
 20. BARSOUM, M. W. – Fundamentals of ceramics. 1. ed., McGraw-Hill, U.S.A., 1997.
 21. CLAUSSEN, N. – Technologie keramischer Werkstoffe. Hamburg, TUHH, 1995.
 22. IEL SC – Instituto Euvaldo Lodi – Diagnóstico setorial da cerâmica para revestimento catarinense. Florianópolis, Outubro de 2005.
 23. MOTTA, J.F.M., Zanardo, A., Cabral Jr., M. – As matérias-primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. Cerâmica Industrial, v.6, n.2, p.28-39, 2001.
 24. ASULCER – Associação Sul Brasileira da Indústria de Cerâmica de Revestimento. Site: www.asulcer.org.br.
 25. RAGAN, R. C. – Method for Continuous Manufacture of Ceramic Sheathing. United States Patent Office. 3.097.929, July, 1963.
 26. INFOMET – Informações britadas, fundidas e laminadas. Site: www.infomet.com.br, acesso em 09/11/2007.
 27. BENBOW, J., BRIDGWATER, J. – Paste Flow and Extrusion. Oxford University Press Inc., New York, 1993.

-
-
28. BASSANEZI, R. C. . Modelagem Matemática. *Dynamis – Revista Técnico-Científica*, Blumenau - Brasil, v. 1, n. 7, p. 55-83, 1994.
 29. GOMES, C. F. – *Argilas: O que são e para que servem*. Fundação Calouste Gulbekian, Lisboa, 1986.
 30. CIMM – Cento de Informação Metal Mecânico – Site: www.cimm.com.br, acesso em 11/11/2007.
 31. FLORES, O. J. U., MENDES, L., OLIVEIRA, A. P. N., FREDEL, M. C., AL-QURESHI, H. A., HOTZA, D. – Modelo matemático aplicado à avaliação da plasticidade de argilas. *Anais do 50º. Congresso Brasileiro de Cerâmica*. Blumenau/SC. 22 a 25 de maio de 2006.
 32. AL-QURESHI, H. A. – *Processos e Mecanismos da Conformação dos Metais*. Vol 2. I.T.A., São José dos Campos, 1991.
 33. *Powder Metallurgy – MNC Metallnormcentralen, Handbook 6E/1978*;
 34. NBR6220 – *Materiais refratários densos conformados - Determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida*.
 35. GERMAN, R. M. – *Sintering Theory and Practice*. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A., 1996.
 36. NBR7180 – *Solos – Determinação do limite de plasticidade*.
 37. GREEN, R. J., – *Plasticity theory for porous solids*. *International Journal of Mechanical Sciences*. nº. 14, pág. 215–225, 1972.
 38. AL-QURESHI, H. A., Galiotto, A., Klein, A.N. – *On the mechanics of cold die compaction for powder metallurgy*. *J. Mater. Process. Technol.* nº.166, pág. 135 – 143, 2005.
 39. AL-QURESHI, H. A., Soares, M. R. F., Hotza, D., Alves, M. C., Klein, A. N. – *Analyses of the fundamental parameters of cold die compaction of powder metallurgy*. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007.
 40. SAUNDERS, J. R. – *Shaping the future with viscous plastic processing*. *Ceramic Industry*, 35-37, 1989.
 41. MCENTIRE, B. J. – *Dry Pressing*. *Engineering Materials Handbook, Vol. 4 - Ceramic and Glasses*, ASM International. The Materials Information Society, (1991).

42. HOHEMBERGER, J. M., – Conformação de massas cerâmicas por laminação: Estudo de Aditivos e Variáveis Processuais. Porto Alegre, UFRGS, 1996.