



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Doutorado em Engenharia de Processos

Tese de Doutorado

**ESTUDO DO PROCESSAMENTO DE LAMINAÇÃO NA FABRICAÇÃO  
DE PLACAS CERÂMICAS EM COMPARAÇÃO COM OUTROS  
MÉTODOS CONVENCIONAIS**

Vilma Maria Sudério

Campina Grande, PB

Abril - 2005

# Estudo do Processamento de Laminação na Fabricação de Placas Cerâmicas em Comparação com Outros Métodos Convencionais

Vilma Maria Sudério

Tese de Doutorado submetida à Coordenação do curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande – Campus I, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Processos.

Área de Concentração: Materiais

Prof. Hélio de Lucena Lira, Ph.D.

Orientador

Prof<sup>a</sup>. Lisiane Navarro de Lima Santana, Dra.

Orientadora

Campina Grande, PB

Abril – 2005

DIGITALIZAÇÃO:  
SISTEMOTECA - UFCG

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S943e  
2005

Sudério, Vilma Maria

Estudo do processamento de laminação na fabricação de placas cerâmicas em comparação com outros métodos convencionais/Vilma Maria Sudério. — Campina Grande: UFCG, 2005.  
118f.: il. col.

Inclui Bibliografia.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Orientadores: Hélio de Lucena Lira e Lisiane Navarro de Lima Santana

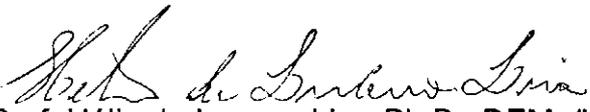
1— Placas cerâmicas 2— Processos de fabricação 3— Parâmetros de processamento I— Título

CDU 666.3-1

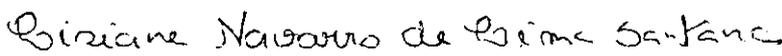
**ESTUDO DO PROCESSAMENTO DE LAMINAÇÃO NA FABRICAÇÃO DE  
PLACAS CERÂMICAS EM COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS  
CONVENCIONAIS**

**Vilma Maria Sudério**

Tese aprovada em: 29/04/2005

  
Prof. Hélio de Lucena Lira, Ph.D., DEMa/UFCG

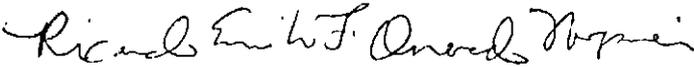
Orientador

  
Prof.<sup>a</sup> Lisiane Navarro de Lima Santana, Dra., DEMa/UFCG

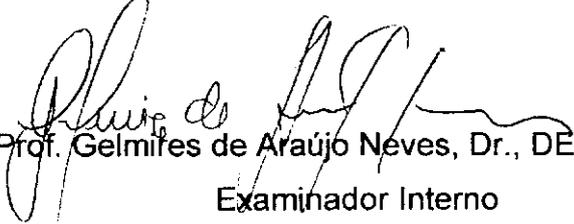
Orientadora

  
Prof. Wilson Acchar, Ph.D., DF/UFRN

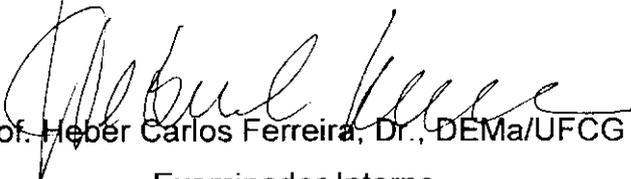
Examinador Externo

  
Prof. Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira, Dr., DEMP/UFC

Examinador Externo

  
Prof. Gelmires de Araújo Neves, Dr., DEMa/UFCG

Examinador Interno

  
Prof. Heber Carlos Ferreira, Dr., DEMa/UFCG

Examinador Interno

*Aos meus pais, Olavo e Carmina  
À minha filha, Nívea Kayle  
Ao meu esposo, Araújo  
Aos meus irmãos, Raildo, Olga, Jeane e Kalina*

***“Nós não precisamos de muita coisa.  
Só precisamos uns dos outros.”***

***Carlito Maia***

## AGRADECIMENTOS

- Agradeço principalmente a Deus, que com seu infinito poder sempre me deu sabedoria, discernimento e forças para enfrentar mais um desafio em minha vida.
- Aos professores orientadores, Dr. Hélio de Lucena Lira e Dra. Lisiane Navarro de Lima Santana a eficiente orientação, compreensão, amizade e generosidade transmitidas durante o período, as quais contribuíram valiosamente para a realização desta tese e para o meu amadurecimento profissional.
- Ao professor Dr. Gelmires de Araújo Neves a atenção e informações prestadas no decorrer deste trabalho.
- Aos professores Dr Heber Carlos Ferreira e Dr. Francisco Valenzuela Diaz às importantes contribuições técnicas no desenvolvimento deste trabalho.
- À professora Dra. Maria Cláudia Silva (in memoriam).
- À Coordenação do Doutorado em Engenharia de Processos na pessoa da coordenadora Odelsia Leonor de Alsina as condições oferecidas para que esta Tese fosse concluída e a secretária Fátima pela atenção.
- As alunas-bolsistas de iniciação científica Joyce, Itamara e Robéria, que contribuíram para a realização deste trabalho.
- A Divanira Ferreira Maia a colaboração, força e amizade.
- Ao senhor Manoel Torquato e família o apoio dado na cidade de Fortaleza.
- Às secretárias do Departamento de Engenharia de Materiais, Violeta e Fátima, que sempre estiveram dispostas ao atendimento.
- À indústria Cerâmica Cordeiro S.A – João Pessoa o fornecimento da matéria-prima utilizada neste trabalho.
- À sociedade brasileira que, através do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), contribuiu financeiramente para o desenvolvimento deste trabalho.
- Ao Instituto Centro de Ensino Tecnológico – CENTEC-CE - na pessoa do diretor presidente, Dr. Antonio Amaury Oriá Fernandes, a liberação das minhas atividades acadêmicas que possibilitou a conclusão desta Tese.
- À professora Núbia Alves e a Heber Savini Júnior, o apoio dado para a realização de alguns ensaios de caracterização.

- À Universidade Federal do Ceará, na pessoa do professor Dr. José Marcos Sasaki, a realização dos ensaios de difração de raios-X e MEV.
- Aos professores e funcionários do CENTEC CARIRI, que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.
- À Coordenação do laboratório de Engenharia de Materiais a colaboração e disposição do laboratório para a realização da pesquisa.
- A todos os professores, funcionários e alunos do laboratório de materiais os momentos de alegria e a amizade.
- A todas as pessoas que não foram mencionadas aqui, mas que de alguma forma contribuíram para a realização desta Tese.

## RESUMO

A limitação de informações sobre os parâmetros de processamento na laminação de massas cerâmicas e seus efeitos nas propriedades de placas laminadas com espessura reduzida motivou o desenvolvimento deste trabalho que tem como objetivo estudar a influência dos parâmetros de processamento sobre as propriedades físicas e mecânicas de placas cerâmicas obtidas através do processo de compactação por rolos (laminação), como também comparar estas propriedades com as apresentadas por placas cerâmicas obtidas através dos métodos convencionais de prensagem e extrusão. Para este propósito foi utilizada uma massa cerâmica adequada para a fabricação de placas cerâmicas para revestimento, produzida industrialmente por via úmida. A umidade da massa foi corrigida para que a mesma apresentasse consistência adequada para os processos de laminação e extrusão. Foi realizada a caracterização física e mineralógica da massa. As propriedades físicas e mecânicas após secagem e queima das placas cerâmicas foram determinadas em função dos seguintes parâmetros de processamento estudados: teor de umidade, tempo de mistura, velocidade de mistura, velocidade de laminação, diâmetro dos rolos e abertura entre os rolos laminadores. Também foi estudado o efeito da adição de aditivo orgânico sobre as propriedades físico-mecânicas das placas cerâmicas laminadas e a influência de uma pré-extrusão seguida de laminação sobre as propriedades físico-mecânicas das placas cerâmicas laminadas. O estudo realizado mostrou que o processo de conformação por rolos é uma técnica promissora na fabricação de placas cerâmicas com espessura reduzida e que a determinação e o controle dos parâmetros de processamento são decisivos para a obtenção de uma placa cerâmica laminada de qualidade.

## ABSTRACT

The lack of information about the processing parameters in the roll pressing process with ceramic paste and its effect on the properties of the laminated ceramic plates is the motivation of this research. The aim of this work is to study the influence of the processing parameters in the mechanical and physical properties of the ceramic plates made by roll pressing (laminating) ceramic processing. Also it was studied the comparison between the properties of the ceramic plate made by laminating with ones from conventional processing, such as, pressing and extrusion. It was used an industrial ceramic paste fit to produce ceramic tile by wet process. The humidity of the paste was adjusted to present appropriate consistence to the laminating and extrusion processes. It was done the physical and mineralogical characterization of the ceramic paste. Also, it was done the physical and mechanical properties of the ceramic plates after dry and firing as a function of the following parameters: humidity content, mixture time, mixture velocity, laminating velocity, rolls diameter and opening between the rolls. In addition, it was studied the effect of the organic additive in the physical and mechanical properties of the laminating ceramic plates and the influence of the pre-extrusion followed by laminating in the properties of the ceramic plates. The results showed that the roll pressing (laminating) is a promise technique to produce ceramic plates with thin thickness and the control of the processing parameters is necessary to obtain a ceramic plate with good quality.

## PUBLICAÇÕES SOBRE O TEMA DA TESE

SUDÉRIO, Vilma Maria; SANTANA, Lisiane Navarro de Lima; NUNES, Robéria Lúcia de Sousa; NEVES, Gelmires de Araújo; LIRA, Hélio de Lucena. **Efeito da velocidade de laminação sobre a compactação de placas cerâmicas (no prelo)**, *In: Revista Matéria*, 2004.

SUDÉRIO, Vilma Maria; SANTANA, Lisiane Navarro de Lima; NEVES, Gelmires de Araújo; LIRA, Hélio de Lucena; AZEVEDO, Joyce Batista; NUNES, Robéria Lúcia de Sousa. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas de placas cerâmicas obtidas através dos processos de laminação, prensagem e extrusão**. *In: Anais do CONEM 2004*.

SUDÉRIO, Vilma Maria; SANTANA, Lisiane Navarro de Lima; NEVES, Gelmires de Araújo; LIRA, Hélio de Lucena, NUNES, Robéria Lúcia de Sousa. **Influência da abertura de Laminação e do diâmetro dos rolos sobre a compactação de placas cerâmicas** *In: Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto Alegre 2004*.

SUDÉRIO, Vilma Maria; SANTANA, Lisiane Navarro de Lima; NUNES, Robéria Lúcia de Sousa; NEVES, Gelmires de Araújo; LIRA, Hélio de Lucena. **Influência da abertura entre os rolos laminadores sobre a compactação de placas cerâmicas**. *In: Anais do 48 Congresso Brasileiro de Cerâmica, Curitiba 2004*.

SUDÉRIO, Vilma Maria; SANTANA, Lisiane Navarro de Lima; AZEVEDO, Joyce Batista; LEITE, Itamara Ferreira; NEVES, Gelmires de Araújo; LIRA, Hélio de Lucena. **Efeito do teor de umidade e do tempo de repouso na preparação de placas cerâmicas laminadas** *In: Anais do 47 Congresso Brasileiro de Cerâmica, João Pessoa 2003*.

SUDÉRIO, Vilma Maria; SANTANA, Lisiane Navarro de Lima; AZEVEDO, Joyce Batista; NEVES, Gelmires de Araújo; LIRA, Hélio de Lucena. **Effect of the process variables on the properties of laminated ceramic plates** *In: Anais do Fourth International Latin-American Conference on Powder Technology, Guarujá 2003.*

SUDÉRIO, Vilma Maria; SANTANA, Lisiane Navarro de Lima; LEITE, Itamara Ferreira; NEVES, Gelmires de Araújo; LIRA, Hélio de Lucena. **Efeito da velocidade de mistura sobre as propriedades de placas cerâmicas laminadas.** *In: Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal 2002.*

SUDÉRIO, Vilma Maria; SANTANA, Lisiane Navarro de Lima; AZEVEDO, Joyce Batista; NEVES, Gelmires de Araújo; LEITE, Itamara Ferreira; LIRA, Hélio de Lucena. **Estudo comparativo entre as propriedades apresentadas por placas cerâmicas obtidas através dos processos de laminação, prensagem e extrusão** *In: Anais do 47 Congresso Brasileiro de Cerâmica, João Pessoa 2003.*

SUDÉRIO, Vilma Maria; SANTANA, Lisiane Navarro de Lima; NEVES, Gelmires de Araújo; LIRA, Hélio de Lucena. **Efeito da velocidade de laminação sobre a compactação de placas cerâmicas.** *In: Anais do Congresso em Ciência de Materiais do Mercosul – SULMAT Joinville 2004.*

SUDÉRIO, Vilma Maria; SANTANA, Lisiane Navarro de Lima; NEVES, Gelmires de Araújo; LIRA, Hélio de Lucena. **Efeito dos parâmetros de processamento sobre as propriedades de placas cerâmicas laminadas.** *In: Revista Cerâmica (no prelo).*

SUDÉRIO, Vilma Maria; SANTANA, Lisiane Navarro de Lima; NEVES, Gelmires de Araújo; LIRA, Hélio de Lucena. **Influência da adição do amido solúvel no processamento e propriedades de placas cerâmicas laminadas.** *In: Anais do 48 Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Pedro, SP 2005 (no prelo).*

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo Geral.....	3
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.2 Organização do Trabalho.....	5
<b>CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1 A indústria brasileira de revestimento cerâmico.....	6
2.2 Placas cerâmicas para revestimento.....	9
2.3 Classificação de placas cerâmicas para revestimento.....	10
2.4 Propriedades de placas cerâmicas.....	12
2.4.1 Absorção de água.....	12
2.4.2 Dimensões.....	13
2.5 Aplicações.....	13
2.6 Matérias-primas para massas de revestimento.....	14
2.7 Preparação da massa.....	16
2.8 Processos de conformação de placas cerâmicas.....	22
2.8.1 Prensagem.....	22
2.8.2 Extrusão.....	25
2.8.3 Processo de Laminação.....	27
2.8.3.1 Parâmetros de processamento.....	28
2.8.3.2 Mecanismos de laminação.....	32
2.8.3.3 Comparação entre o processo de laminação e as tecnologias convencionais de fabricação de placas cerâmicas.....	33
2.8.3.4 Fabricação de placas cerâmicas para revestimento através do processo de laminação.....	35
2.9 Processamento térmico.....	36
2.9.1 Processo de secagem.....	36
2.9.2 Processo de queima.....	39
2.9.3 Comportamento mecânico.....	43
<b>CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>47</b>
3.1 Materiais.....	47

3.1.1 Massa cerâmica.....	47
3.1.2 Aditivo.....	47
3.2 Métodos.....	48
3.2.1 Caracterização física e mineralógica da massa.....	48
3.2.1.1 Análise química.....	48
3.2.1.2 Análises térmicas.....	48
3.2.1.3 Difração de raios-X.....	49
3.2.1.4 Massa específica real.....	49
3.2.1.5 Limites de Atterberg.....	49
3.2.1.6 Distribuição do tamanho de partículas.....	50
3.2.2 Metodologia utilizada na fabricação das placas cerâmicas.....	51
3.2.2.1 Preparação da massa.....	51
3.2.2.2 Processos de conformação das placas cerâmicas.....	52
3.2.2.3 Etapa de secagem.....	53
3.2.2.4 Etapa de queima.....	53
3.2.2.5 Determinação das propriedades físico-mecânicas das placas cerâmicas.....	53
3.2.2.6 Análises da superfície de fratura.....	54
3.3 Metodologia utilizada na determinação dos parâmetros de processamento estudados.....	54
3.3.1 Estudo do teor de umidade da massa.....	54
3.3.2 Estudo do tempo e da velocidade de mistura.....	55
3.3.3 Estudo da velocidade de laminação, diâmetro dos rolos laminadores e abertura entre os rolos laminadores.....	55
3.3.4 Estudo comparativo entre as propriedades apresentadas por placas cerâmicas obtidas através dos processos de prensagem, extrusão e laminação.....	56
3.3.5 Estudo de uma pré-extrusão seguida de laminação.....	56
3.3.6 Estudo da adição do amido solúvel a massa cerâmica.....	56
<b>CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>58</b>
4.1 Introdução.....	58
4.2 Caracterização física e mineralógica da massa.....	58
4.2.1 Análise química.....	58
4.2.2 Análises térmicas.....	59

4.2.3 Distribuição do tamanho de partícula.....	60
4.2.4 Massa específica real.....	60
4.2.5 Limites de Atterberg.....	61
4.2.6 Difração de raios-X.....	61
4.3 Avaliação dos parâmetros de processamento estudados.....	63
4.3.1 Efeito do teor de umidade sobre as propriedades físicas e mecânicas de placas cerâmicas laminadas.....	63
4.3.2 Influência do tempo e velocidade de mistura sobre as propriedades de placas cerâmicas laminadas.....	66
4.3.3 Influência da velocidade de laminação e do diâmetro dos rolos laminadores sobre a compactação de placas cerâmicas.....	70
4.3.4 Influência da abertura entre os rolos laminadores sobre a compactação de placas cerâmicas.....	74
4.3.5 Estudo comparativo entre as propriedades apresentadas por placas cerâmicas obtidas através dos processos de prensagem, extrusão e laminação.....	77
4.3.6 Estudo comparativo entre as propriedades apresentadas por placas cerâmicas laminadas, placas cerâmicas prensadas na indústria e placas cerâmicas prensadas em laboratório.....	83
4.3.7 Efeito de uma pré-extrusão seguida de laminação sobre as propriedades de placas cerâmicas.....	85
4.3.8 Influência da adição do amido solúvel no processamento e propriedades de placas cerâmicas laminadas.....	88
4.3.9 Análises da superfície de fratura de placas cerâmicas prensadas, extrudadas e laminadas.....	91
<b>CAPÍTULO V – CONCLUSÕES.....</b>	<b>95</b>
<b>CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXOS</b>	
Tabelas construídas com base nos resultados dos ensaios laboratoriais.....	110

## LISTA DE ABREVIATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento
- AA – Absorção de Água
- AQ – Análise Química
- ASTM – American Ceramic Society
- ATD – Análise Térmica Diferencial
- ATG – Análise Termogravimétrica
- CCT – Centro de Ciências e Tecnologia
- CTC – Centro de Tecnologia Cerâmica
- DEMa – Departamento de Engenharia de Materiais
- DRX – Difração de Raios-X
- DTP – Distribuição de Tamanho de Partícula
- LL – Limite de Liquidez
- LP – Limite de Plasticidade
- NBR – Norma Brasileira
- MEA – Massa Específica Aparente
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- PA – Porosidade Aparente
- PF – Perda ao Fogo
- PL – Placa Laminada
- PP – Placa Prensada
- PE – Placa Extrudada
- PPI – Placa Prensada na Indústria
- PEL – Placa Extrudada e Laminada
- RL – Retração Linear
- TRF – Tensão de Ruptura à Flexão
- UFCG – Universidade Federal da Paraíba
- UFC – Universidade Federal do Ceará

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Produção brasileira de revestimento cerâmico.....	6
Figura 2.2	Exportações brasileiras de revestimento cerâmico.....	7
Figura 2.3	Principais produtores mundiais.....	8
Figura 2.4	Mecanismos de compactação para pós aglomerados: (a) reordenação de grânulos; (b) deformação e destruição de grânulos e (c) máximo empacotamento das partículas.....	25
Figura 2.5	Esquema do processo de laminação.....	28
Figura 2.6	Sistema esquemático de alimentação dos rolos: (a) alimentação por gravidade e b, c) alimentação por pressão.....	30
Figura 2.7	Representação esquemática de um laminador precedido de uma extrusora.....	30
Figura 2.8	Mecanismos de laminação.....	32
Figura 2.9	Mecanismos da sinterização: (a) partículas de pó após a prensagem; (b) coalescência das partículas e formação de poros que ocorrem quando a sinterização tem início e (c) com a progressão do processo de sinterização, os poros mudam de tamanho e de forma.....	41
Figura 2.10	Diagrama carga-deformação de peças a verde	44
Figura 2.11	Mecanismo de fratura de peças prensadas a verde	45
Figura 3.1	Fluxograma com as etapas dos ensaios de caracterização.....	50
Figura 3.2	Misturador planetário.....	51
Figura 3.3	Cilindro laminador.....	52
Figura 3.4	Fluxograma da metodologia experimental utilizada no desenvolvimento do trabalho.....	57
Figura 4.1	Análise térmica diferencial e termogravimétrica da massa	60
Figura 4.2	Difração de raios-X da massa cerâmica seca a 110°C e sinterizada a 1000°C, 1050°C, 1100°C e 1150°C.....	62
Figura 4.3	(a) Absorção de água e (b) porosidade aparente em função da temperatura e do teor de umidade.....	63
Figura 4.4	(a) Retração linear e (b) massa específica aparente em função da temperatura e do teor de umidade da massa.....	65

Figura 4.5	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do teor de umidade da massa.....	65
Figura 4.6	Absorção de água em função da temperatura, do tempo e da velocidade de mistura.....	66
Figura 4.7	Porosidade aparente em função da temperatura, do tempo e da velocidade de mistura.....	67
Figura 4.8	Retração linear em função da temperatura, do tempo e da velocidade de mistura.....	68
Figura 4.9	Massa específica aparente em função da temperatura, do tempo e da velocidade de mistura.....	68
Figura 4.10	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura, do tempo e da velocidade de mistura.....	69
Figura 4.11	Retração linear em função da temperatura e da velocidade de laminação.....	71
Figura 4.12	Retração linear em função da temperatura e do diâmetro dos rolos.....	71
Figura 4.13	Absorção de água em função da temperatura e da velocidade de laminação.....	71
Figura 4.14	Absorção de água em função da temperatura e do diâmetro dos rolos.....	71
Figura 4.15	Porosidade aparente em função da temperatura e da velocidade de laminação.....	72
Figura 4.16	Porosidade aparente em função da temperatura e do diâmetro dos rolos.....	72
Figura 4.17	Massa específica aparente em função da temperatura e da velocidade de laminação.....	73
Figura 4.18	Massa específica aparente em função da temperatura e do diâmetro dos rolos.....	73
Figura 4.19	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e da velocidade de laminação.....	74
Figura 4.20	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do diâmetro dos rolos.....	74
Figura 4.21	(a) Absorção de água e (b) porosidade aparente dos corpos de	

	provas laminados com espessura de 3,5mm e 2,5mm.....	75
Figura 4.22	Retração linear e massa específica aparente dos corpos de provas laminados com espessura de 3,5mm e 2,5mm.....	76
Figura 4.23	Tensão de ruptura à flexão dos corpos de provas laminados com espessura de 3,5mm e 2,5mm.....	77
Figura 4.24	(a) Absorção de água e (b) porosidade aparente em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).....	78
Figura 4.25	Retração linear em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).....	79
Figura 4.26	Massa específica aparente em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada)...	80
Figura 4.27	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada)...	81
Figura 4.28	Corpos-de-prova: (a) prensados, (b) extrudados e (c) laminados	82
Figura 4.29	Absorção de água em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria).....	83
Figura 4.30	Porosidade aparente em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria) .....	83
Figura 4.31	Retração linear em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria) .....	84
Figura 4.32	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria).....	85
Figura 4.33	(a) Absorção de água e (b) porosidade aparente em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).....	86
Figura 4.34	(a) Retração linear e (b) massa específica aparente em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).....	87
Figura 4.35	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).....	88
Figura 4.36	Retração linear em função da temperatura e do teor de aditivo.....	89

Figura 4.37	Absorção de água em função da temperatura e do teor de aditivo.....	89
Figura 4.38	Porosidade aparente em função da temperatura e do teor de aditivo.....	90
Figura 4.39	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do teor de aditivo.....	91
Figura 4.40	Micrografias das superfícies de fratura das placas cerâmicas: (a) prensadas, (b) extrudadas e (c) laminadas, secas a 110°C....	93
Figura 4.41	Micrografias das superfícies de fratura de placas cerâmicas: (a) prensadas, (b) extrudadas e (c) laminadas, queimadas a 1150°C.....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Classificação de revestimentos cerâmicos.....	11
Tabela 2.2	Classificação segundo módulo de resistência à flexão e absorção de água.....	11
Tabela 2.3	Comparação relativa entre a matéria-prima e parâmetros de processamento na produção de revestimentos de parede por prensagem a seco e por laminação 9%).....	35
Tabela 2.4	Reações físicas e químicas tipicamente envolvidas no tratamento térmico de produtos cerâmicos.....	40
Tabela 3.1	Características físicas e químicas da solução de amido	48
Tabela 4.1	Composição química da massa cerâmica.....	58
Tabela 4.2	Distribuição do tamanho de partícula.....	60
Tabela 4.3	Absorção de água em função da temperatura e do teor de umidade da massa.....	111
Tabela 4.4	Porosidade aparente em função da temperatura e do teor de umidade da massa.....	111
Tabela 4.5	Retração linear de secagem e queima em função da temperatura e do teor de umidade da massa.....	111
Tabela 4.6	Massa específica aparente em função da temperatura e do teor de umidade da massa.....	111
Tabela 4.7	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do teor de umidade da massa.....	112
Tabela 4.8	Absorção de água em função da temperatura do tempo e da velocidade de mistura.....	112
Tabela 4.9	Porosidade aparente em função da temperatura do tempo e da velocidade de mistura.....	112
Tabela 4.10	Retração linear em função da temperatura do tempo e da velocidade de mistura.....	112
Tabela 4.11	Massa específica aparente em função da temperatura do tempo e da velocidade de mistura.....	113
Tabela 4.12	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura do tempo e da velocidade de mistura.....	113

Tabela 4.13	Retração linear em função da temperatura e da velocidade de laminação.....	113
Tabela 4.14	Retração linear em função da temperatura e do diâmetro dos rolos.....	113
Tabela 4.15	Absorção de água em função da temperatura e da velocidade de laminação.....	113
Tabela 4.16	Absorção de água em função da temperatura e do diâmetro dos rolos.....	114
Tabela 4.17	Porosidade aparente em função da temperatura e da velocidade de laminação.....	114
Tabela 4.18	Porosidade aparente em função da temperatura e do diâmetro dos rolos.....	114
Tabela 4.19	Massa específica aparente em função da temperatura e da velocidade de laminação.....	114
Tabela 4.20	Massa específica aparente em função da temperatura e do diâmetro dos rolos.....	114
Tabela 4.21	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e da velocidade de laminação.....	114
Tabela 4.22	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do diâmetro dos rolos laminadores.....	115
Tabela 4.23	Absorção de água em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.....	115
Tabela 4.24	Porosidade aparente em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.....	115
Tabela 4.25	Retração linear em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.....	115
Tabela 4.26	Massa específica aparente em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.....	115
Tabela 4.27	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.....	115
Tabela 4.28	Absorção de água em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).....	115
Tabela 4.29	Porosidade aparente em função da temperatura: PL (placa	

	laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).....	116
Tabela 4.30	Retração linear em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).	116
Tabela 4.31	Massa específica aparente em função da temperatura. PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).	116
Tabela 4.32	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).	116
Tabela 4.33	Absorção de água em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria).....	116
Tabela 4.34	Porosidade aparente em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria).....	116
Tabela 4.35	Retração linear em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria) .....	117
Tabela 4.36	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria) .....	117
Tabela 4.37	Absorção de água em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).....	117
Tabela 4.38	Porosidade aparente em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).....	117
Tabela 4.39	Retração linear em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).....	117
Tabela 4.40	Massa específica aparente em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).....	117
Tabela 4.41	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).....	118
Tabela 4.42	Retração linear em função da temperatura e do teor de aditivo.....	118
Tabela 4.43	Absorção de água em função da temperatura e do teor de aditivo.....	118
Tabela 4.44	Porosidade aparente em função da temperatura e do teor de aditivo.....	118
Tabela 4.45	Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do teor de aditivo.....	118

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

A indústria cerâmica brasileira tem um papel importante para a economia do país e do mundo. O segmento de revestimento cerâmico brasileiro é um dos mais importantes da indústria cerâmica, representado por 127 unidades industriais, produzindo azulejos, pisos e pastilhas no montante de 534 milhões de m<sup>2</sup> em 2003. Apresenta uma grande oportunidade de geração de emprego e renda. São gerados cerca de 23.000 empregos diretos nas indústrias e mais de 325.000 indiretos (ANFACER, 2004). O Brasil ocupa um lugar de destaque na indústria de revestimentos cerâmicos mundial: quarto país em produção, o Brasil responde, ao lado da China, Itália e Espanha, por mais de 50% (1,47 bilhões de m<sup>2</sup>/ano) da cerâmica para revestimento fabricado em todo o mundo (NOGUEIRA, 2002).

Investindo na pesquisa e no desenvolvimento tecnológico, o setor tem experimentado mudanças significativas nos processos de produção e no desenvolvimento de novos produtos. Na busca do aprimoramento constante, o setor investe na instalação e manutenção de centros de treinamento e desenvolvimento tecnológico. A busca de qualidade também recai sobre as entidades de pesquisa e desenvolvimento, universidades, escolas técnicas, institutos de pesquisa, fazendo-se necessário, entretanto, sua interação como centros de fomento ao desenvolvimento, a fim de estimular e apoiar a indústria nacional e cumprir o seu papel social de incentivo e busca do desenvolvimento nacional.

O crescimento da cerâmica no Brasil foi acompanhado, e, em certos casos, garantido pela indústria de equipamentos, que tem razoavelmente acompanhado a tendência mundial. Com aproximadamente R\$ 100 milhões em investimentos, no ano de 2002, na ampliação e modernização de suas fábricas, o Brasil conta hoje com um dos mais atualizados parques fabris. Novos materiais cerâmicos estão sendo desenvolvidos através de pesquisas cujo desenvolvimento está sendo repassado à cerâmica tradicional que abre perspectivas para um novo e importante estágio qualitativo.

Atualmente a produção de revestimento cerâmico se caracteriza pela diversidade de formas e propriedades decorrentes da tecnologia utilizada, que vem sendo gradativamente ampliada e aperfeiçoada, resultando em uma maior automatização do processo e uma melhor qualidade do produto (BARBA *et al.*, 1997). Para LIPINSKI *et al.*, (1994), esta evolução nas técnicas de processamento foi marcada pela busca e obtenção de tempos de processamento térmico menores, com reduzido consumo de energia no processo de queima e acompanhada por um significativo aumento da resistência dos materiais, permitindo a redução das dimensões das peças, tornando-as menores e mais leves, sem, no entanto, comprometer sua eficiência.

Embora tenha sido observado nos últimos anos um considerável avanço tecnológico relativo à indústria de cerâmica para revestimento, é preciso reconhecer que não foram investigadas técnicas efetivas e econômicas para produzir componentes com peso reduzido e seções com paredes mais finas.

As técnicas de moldagens convencionais oferecem possibilidades limitadas para a produção de peças com espessura fina em larga escala e com custo reduzido. Extrusão e prensagem a seco são processos competitivos para produzir peças similares. A conformação por prensagem a seco é o método mais utilizado para a fabricação de placas cerâmicas devido à maior estabilidade dimensional que se consegue no produto final, porém não pode ser empregada na produção de substratos extremamente finos de materiais cerâmicos. O processo de extrusão também é utilizado na conformação das placas. A vantagem é a capacidade para produzir peças de tamanhos múltiplos com baixo custo. A baixa precisão dimensional dos produtos limita o uso deste método para a produção de peças delgadas.

A competitividade cada vez mais acentuada no mercado globalizado tem forçado as indústrias de revestimentos cerâmicos a desenvolverem novas tecnologias que apresentem vantagens sobre os processos convencionais, sobretudo no que diz respeito à redução de custos de produção e aumento da produtividade.

Neste sentido, pesquisas utilizando o processo de compactação por rolos (laminação) foram desenvolvidas em escala laboratorial na Alemanha (1998) e no Brasil em (2001). Os resultados obtidos por BALZEREIT *et al.*, (1998) e SANTANA

(2002), confirmaram que através do processo de laminação é possível obter placas cerâmicas para revestimentos.

Diante do exposto, a motivação para o desenvolvimento desta tese deve-se à limitação de informações sobre os parâmetros de processamento na laminação de massas cerâmicas e seus efeitos nas propriedades de placas laminadas, no sentido de contribuir para o aperfeiçoamento da técnica como um processo capaz de introduzir inovações tecnológicas na fabricação de placas cerâmicas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é estudar a influência dos parâmetros de processamento sobre as propriedades físico-mecânicas de placas cerâmicas laminadas, como também comparar essas propriedades com as apresentadas por placas cerâmicas obtidas através dos métodos convencionais de prensagem e extrusão.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- 1) Avaliar a influência dos parâmetros de processamento (teor de umidade da massa, tempo de mistura e velocidade de mistura) sobre as propriedades das placas cerâmicas laminadas;
- 2) Estudar a influência da velocidade de laminação, do diâmetro dos rolos e da abertura entre os rolos laminadores sobre as propriedades físico-mecânicas das placas produzidas;
- 3) Comparar as propriedades físicas e mecânicas apresentadas pelas placas produzidas através dos processos de laminação, prensagem e extrusão;
- 4) Fazer um estudo comparativo entre as propriedades apresentadas por placas cerâmicas produzidas na indústria e placas cerâmicas laminadas em laboratório;

- 5) Estudar o efeito combinado de uma pré-extrusão seguido de laminação sobre as propriedades das placas produzidas;
- 6) Verificar o efeito da adição de aditivo orgânico sobre as propriedades de placas cerâmicas laminadas;
- 7) Avaliar a superfície de fratura das placas cerâmicas laminadas, prensadas e extrudadas.

## 1.2 Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado em seis (6) capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma introdução, descrevendo a motivação para a realização deste estudo e os seus objetivos.

No capítulo 2, encontra-se a revisão bibliográfica, que mostra uma breve abordagem sobre a indústria brasileira de revestimentos, enfocando aplicações, classificação, propriedades de placas cerâmicas para revestimento, etapas de processamento, processos de fabricação e os mecanismos e parâmetros de processamento envolvidos no processo de laminação.

No capítulo 3, encontram-se os materiais e a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. A metodologia contém ensaios de caracterização física e mineralógica da massa em estudo, como também todas as etapas de processamento, até a caracterização das placas cerâmicas após secagem e queima.

No capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos quanto aos ensaios de caracterização física e mineralógica da massa, bem como os resultados obtidos através dos diferentes parâmetros de processamento estudados.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

No capítulo 6, são apresentadas as referências bibliográficas e as normas utilizadas para a realização do presente trabalho. Por fim, estão apresentadas em anexos todas as tabelas construídas a partir dos dados experimentais da pesquisa.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma breve abordagem sobre a indústria brasileira de revestimento, mostrando um panorama geral da indústria nacional e enfocando a classificação, propriedades de placas cerâmicas para revestimento, etapas de processamento, processos de fabricação e os mecanismos e parâmetros de processamento envolvidos no processo de laminação.

#### 2.1 A indústria brasileira de revestimento cerâmico

A indústria brasileira de revestimentos cerâmicos se consolidou como uma das principais em todo o mundo ao ultrapassar a cifra de meio bilhão de metros quadrados produzidos ao longo do ano. A produção em 2003 foi de 534 milhões de m<sup>2</sup>. Com esse índice o Brasil continua sendo o quarto maior produtor mundial. Com um mercado interno de 456,3 milhões de m<sup>2</sup> em 2002, o Brasil é hoje o segundo maior mercado consumidor do mundo, depois da China (SEZZI, 2002). A Figura 2.1 apresenta a produção de revestimentos cerâmicos no período de 1992 a 2003. Observa-se um crescente aumento da produção neste período.

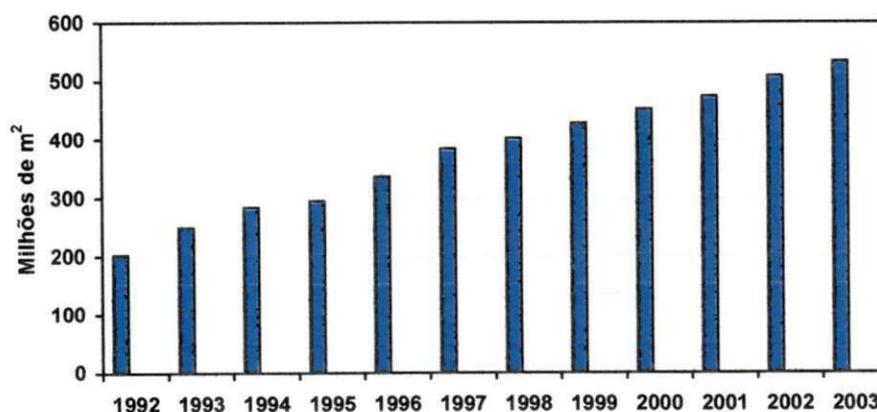


Figura 2.1 – Produção brasileira de revestimento cerâmico (ANFACER, 2003).

Considerando que o Brasil tem hoje uma população de quase 180 milhões de habitantes, pode-se concluir que o consumo por habitante é de 2,34 m<sup>2</sup> por ano, o que deixa considerável margem para o crescimento, principalmente quando se considera o clima, a tradição e as perspectivas de retomada da economia (BOSCHI, 2004).

Quanto ao mercado externo, atualmente o Brasil encontra-se na quarta posição dentre os maiores exportadores mundiais. Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento (ANFACER, 2004), em 2003 as exportações brasileiras alcançaram a cifra de 103 milhões de m<sup>2</sup> da produção, um crescimento de 41% em relação a 2002. A Figura 2.2 evidencia a participação brasileira nas exportações de revestimentos cerâmicos no período de 1992 a 2003.

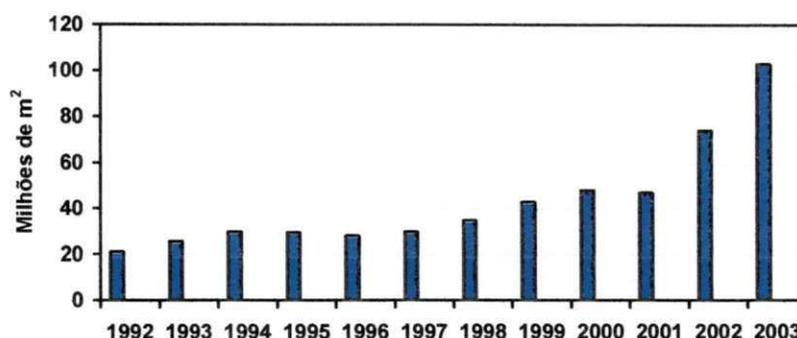


Figura 2.2 – Exportações brasileiras de revestimento cerâmico (ANFACER, 2004).

Segundo BOSCHI (2004), vários são os fatores que possibilitaram o Brasil posicionar-se nesse patamar, dentre os quais: aumento da demanda mundial por revestimentos cerâmicos, tecnologias de ponta incorporadas pelas empresas, programas de qualidade e formação de trabalhadores especializados, melhoria contínua e certificação dos produtos (ISO 13.006), ampliação da competitividade da indústria, além da maior participação das empresas em eventos e feiras internacionais.

De acordo com a ANFACER (2004), até 2001 as exportações brasileiras de revestimentos eram pouco expressivas e se mantinham em um patamar praticamente constante (Figura 2.2). A partir de então, o crescimento da produção juntamente com os fatores mencionados acima provocaram profundas alterações no

setor, resultando em um considerável aumento dos tradicionais níveis de exportação que passaram, em milhões de m<sup>2</sup>, de 47 para 103 em 2001 e 2003, respectivamente.

Ainda segundo BOSCHI (2004), também contribuíram significativamente para esse aumento da participação do Brasil no mercado externo: 1) o fortalecimento do Euro em relação ao dólar americano (US\$), que dificultou as vendas no mercado americano dos produtos de dois dos nossos maiores competidores no mercado externo, Espanha e Itália, e 2) a redução de 8% no mercado interno de 2002 para 2003, que forçou a saída para o mercado externo.

A Figura 2.3 ilustra o potencial de produção dos principais produtores mundiais de cerâmica para revestimento no ano de 2003. Todos os dados fornecidos foram obtidos da Associação Nacional dos Fabricantes de Revestimento Cerâmico, (ANFACER, 2004).

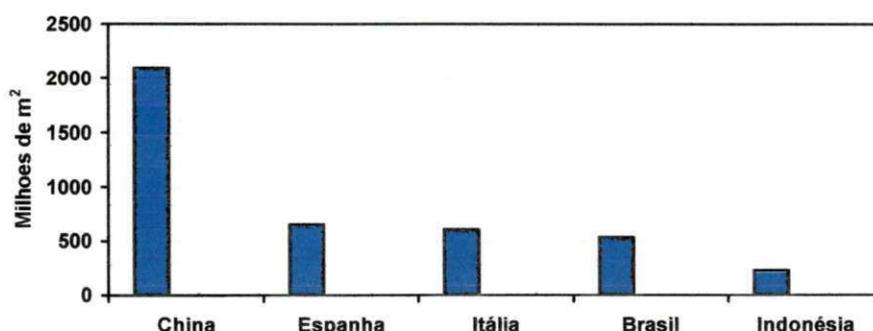


Figura 2.3 – Principais produtores mundiais (ANFACER, 2003).

Com relação a outros países produtores, o Brasil está entre os que reúnem as maiores possibilidades de vir a desempenhar um papel cada vez mais importante no cenário mundial. Segundo BOSCHI (2002), alguns dos aspectos importantes que devem ser destacados com relação à indústria de revestimentos cerâmicos brasileiras são:

- o mercado interno ser hoje, depois da China, o maior do mundo;
- a capacidade instalada ser maior do que a demanda do mercado interno atual e deverá continuar crescendo nos próximos anos;

- a melhoria significativa da qualidade e eficiência dos processos produtivos ocorridos principalmente nos últimos anos;
- praticamente todos os fornecedores internacionais de equipamentos e insumos estarem presentes e interessados no crescimento da produção;
- a adoção nos últimos anos de uma política comercial internacional mais agressiva cujos resultados já podem ser apreciados no significativo crescimento da participação brasileira no mercado norte-americano;
- a modernidade de considerável parte das empresas, assim como os constantes investimentos com essa finalidade;
- a localização geográfica;
- a disponibilidade de matérias-primas.

No que se refere à produção, tendo em vista a capacidade instalada, o Brasil pode crescer consideravelmente se surgirem as oportunidades de mercado. Para que as indústrias brasileiras possam sobreviver e prosperar nessa nova realidade, é fundamental que todo esforço seja feito no sentido de melhorar a competitividade dos nossos produtos, tanto no mercado interno como no externo. Neste sentido é necessário que se desenvolvam estudos e tecnologias aplicados aos nossos produtos e nossas matérias-primas, a fim de que não fiquemos atados à tecnologia externa e possamos garantir uma posição no cenário dos produtores e exportadores mundiais mais fiéis as nossas potencialidades.

## **2.2 Placas cerâmicas para revestimento**

A produção de artefatos a partir da argila –cerâmica– é atividade tão natural e intuitiva para o homem, que até mesmo as civilizações mais antigas já produziam cerâmicas, tal como podemos ver hoje em dia nos grandes museus do mundo.

Porém, as primeiras cerâmicas para revestimento só surgiram por volta de 500 a.C. e permaneceram, por séculos, como materiais de uso restrito devido ao seu elevado custo. Foi somente no século XIX que a cerâmica para revestimento adquiriu maior projeção.

As cerâmicas para revestimento, desde as suas origens, faziam uso dos termos azulejos de faiança para paredes, conhecidos no comércio simplesmente por azulejos e ladrilhos de terracota para pavimentos, geralmente designados por pisos. A partir dos anos 50, ocorreu uma grande revolução tecnológica no setor dos revestimentos cerâmicos, atingindo materiais, processos e execução.

O termo revestimento enfrenta problemas de terminologia, acarretando certa confusão, por apresentar significados distintos para as várias áreas da construção civil. Por isso, torna-se necessária uma conceituação normalizada a fim de se evitarem confusões terminológicas (FERREIRA, 2000).

No Brasil, em 1997, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com base na norma ISO 13006, publicou as normas NBR 13816, 13817 e 13818, que abrangem terminologia, classificação, especificação e métodos de ensaios. A Norma NBR 13816 define revestimento cerâmico como um conjunto formado pelas placas cerâmicas, pela argamassa de assentamento e pelo rejunte. As placas cerâmicas para revestimento são definidas como: material composto de argila e outras matérias-primas inorgânicas, geralmente utilizadas para revestir pisos e paredes, sendo conformadas por extrusão, prensagem, ou outros processos de conformação, podendo ser esmaltadas ou não-esmaltadas. As normas NBR 13816 e 13818 substituíram cerca de 30 normas brasileiras referentes à cerâmica de revestimento que já não atendiam à evolução tecnológica dos materiais cerâmicos para revestimento.

### **2.3 Classificação de placas cerâmicas para revestimento**

A evolução das aplicações dos produtos cerâmicos, acompanhada da evolução nos processos de fabricação dos mesmos, gerou uma vasta gama de produtos, que se diferenciam não somente pelas características estéticas, mas também pelas suas propriedades físico-químicas, gerando a necessidade de uma classificação que melhor disciplinasse a produção e comercialização desses produtos.

A norma ISO 13006 (1995) classifica os revestimentos, segundo o método de conformação, em classes de acordo com os valores para absorção de água. Na

Tabela 2.1 é apresentada à classificação de revestimentos cerâmicos conforme ABNT 13818.

Tabela 2.1 – Classificação de revestimentos cerâmicos\*

Grupos		Absorção (%)	Método de fabricação		
			Extrusão A	Prensagem B	Outros C
I	Ia	$Abs \leq 0,5$		Bla	
	Ib	$Abs 0,5 < Abs \leq 3\%$	AI	Bib	CI
II	IIa	$3\% < Abs \leq 6\%$	AIla	BIIa	
	IIb	$6\% < Abs \leq 10\%$	AIlb	BIIb	CII
III		$Abs > 10$	AIII	BIII	CIII

\*Fonte: Norma ABNT 13818, (1997).

As placas cerâmicas também podem ser classificadas de acordo com uma combinação de valores de absorção de água e módulo de resistência à flexão. A Tabela 2.2 apresenta uma classificação que considera a combinação desses parâmetros.

Tabela 2.2 – Classificação segundo módulo de resistência à flexão e absorção de água\*

Produtos	Absorção de Água (%)	Módulo de Resistência à Flexão (MPa)
Porcelanato	0 – 0,5	35 – 50
Grés	0,5 – 3	30 – 45
Semi-Grés	3 – 6	32 – 35
Semi-Poroso	6 – 10	18 – 30
Poroso	10 – 20	15 – 20

\*Fonte: Centro Cerâmico do Brasil, (1999).

## 2.4 Propriedades de placas cerâmicas

As propriedades dos produtos cerâmicos são fundamentalmente determinadas pelas matérias-primas e pela estrutura sólida gerada durante o processamento, antes da etapa de queima. Assim sendo, qualquer tentativa de controle das propriedades do produto deve passar pelo entendimento e controle das propriedades básicas dos materiais, bem como pelo processo de fabricação durante o qual a microestrutura final se desenvolve.

### 2.4.1 Absorção de água

A capacidade de absorção de água de um revestimento ou pavimento cerâmico fornece um indicativo da porosidade aberta do produto. Um alto valor de absorção de água corresponde a uma estrutura porosa, enquanto que um corpo compacto possui uma baixa absorção de água (MENEGAZZO *et al.*, 1999).

A porosidade em placas cerâmicas de revestimento é uma consequência de diversos fatores. A porosidade interna dos aglomerados que compõem as matérias-primas, a conformação da peça e processos de decomposição e evaporação durante a queima, contribuem para a formação da porosidade do material.

O conhecimento da porosidade de um revestimento cerâmico é fundamental, pois dela dependem diversas propriedades. A porosidade aberta de um revestimento ou pavimento cerâmico depende:

- da composição da massa, variando substancialmente de um produto para outro;
- da densidade a seco, que depende do processo de fabricação da peça, sendo função de outros parâmetros, como: distribuição granulométrica, umidade do pó e pressão de compactação;
- do processo de queima, que está relacionado com o ciclo de queima e com a temperatura.

Por ser uma propriedade de extrema importância e que influencia outras características da placa recomenda-se que a absorção seja o primeiro requisito na hora de especificar um revestimento para determinada solicitação.

#### **2.4.2 Dimensões**

Conforme já mencionado neste trabalho, as normas ISO 13006/NBR 13818 estabelecem uma série de exigências para a certificação de revestimentos cerâmicos. O controle das dimensões e formato dos revestimentos cerâmicos é fundamental para garantir a qualidade do produto.

Suas características dimensionais são: espessura, ortogonalidade, curvatura central, curvatura lateral, empeno dos lados e dimensões.

Não se pode estabelecer um valor sobre a frequência ou causalidade dos defeitos, segundo a tipologia do produto e o processo de fabricação. A única recomendação é que uma placa cerâmica bem classificada antes de sua embalagem e expedição não tem porque apresentar qualquer defeito dimensional fora das tolerâncias admissíveis na norma NBR 13818.

Segundo AMORÓS (1991), um dos parâmetros que afeta a qualidade dos revestimentos é a sua estabilidade dimensional. A compactação a cru dos revestimentos tem uma influência marcante sobre a estabilidade dimensional do produto queimado. As principais variáveis que incidem sobre a compactação das peças prensadas são: as variáveis associadas ao pó atomizado (características físico-morfológicas do granulado: tamanho, forma, umidade, fluidez etc.), e as relacionadas com a operação de prensagem (umidade, comportamento mecânico dos grânulos, pressão de compactação, velocidade de aplicação da carga etc.).

#### **2.5 Aplicações**

A fabricação das placas para revestimentos cerâmicos tem experimentado mudanças consideráveis. Até poucos anos atrás, eram utilizadas apenas para revestimento de paredes e pisos de banheiro e cozinha. Com o progresso da

tecnologia de fabricação, as placas vêm adquirindo melhoria da qualidade dos produtos, maior valor e novas possibilidades de aplicação (BARBA *et al.*, 1997).

Atualmente os usos destes produtos são, entre outros, os seguintes:

- revestimento interior residencial (cozinhas, banheiros etc.);
- revestimento exterior (fachadas, prédios urbanos etc.);
- pavimento interior residencial;
- pavimento exterior;
- pavimentos e revestimentos de locais públicos (hospitais, escolas, aeroportos etc.);
- pavimentos e revestimentos diversos (saunas, piscinas, salas de cirurgia, pavimentos industriais etc.).

As placas cerâmicas para revestimento de pisos e paredes apresentam-se sob uma diversidade de produtos em consequência de uma série de possibilidades de combinações, destacando-se a escolha da massa, forma de preparo, tipo de conformação da peça, tipo de acabamento da superfície, processamento térmico e não somente devido ao aspecto, formato, dimensões, cor ou design da peça final (MOTTA *et al.*, 1998). Elas devem apresentar as seguintes características: impermeabilidade, facilidade de limpeza, resistência, efeito decorativo e conforto térmico.

## 2.6 Matérias-primas para massas de revestimento

No processo produtivo de revestimentos cerâmicos, as matérias-primas são extraídas de minas naturais, as quais apresentam significativo grau de impurezas e de variabilidade física, química e mineralógica. Essas são previamente beneficiadas e processadas. Este processamento envolve essencialmente as etapas de seleção e dosagem das matérias-prima, trituração, moagem, dissolução química, flotação, separação magnética, dispersão, mistura, filtração e atomização (MANFREDINI, 2000).

O processamento cerâmico começa com a escolha das matérias-primas cerâmicas. Segundo RICHERSON (2002), na escolha de um material para a

fabricação de um produto cerâmico devem ser considerados os seguintes fatores: pureza, tamanho de partícula, reatividade, geometria e formas polimórficas do pó.

- Pureza – durante a sinterização, a presença de impurezas pode provocar crescimento anormal de grãos e formar fase líquida, afetando principalmente as propriedades mecânicas do material a altas temperaturas.
- Tamanho de partícula – a distribuição do tamanho de partícula monomodal não produz um bom empacotamento, resultando um maior número de vazios. A adição de partículas de tamanhos equivalente ao espaço livre reduz a porosidade.
- Reatividade – a força motora para a densificação de um pó compactado é a mudança de energia superficial. Partículas muito pequenas, com maior área superficial, possuem maior energia de superfície livre, implicando forte atividade termodinâmica.
- Geometria – a geometria da partícula é importante também na seleção de pós. Quanto mais irregular a partícula, menor será o empacotamento e piores as características de fluidez do pó.
- Formas polimórficas – o polimorfismo é comum em materiais cerâmicos e, em muitos casos, limita diversas aplicações. Antes de selecionar o material, deve-se verificar se ele apresenta transformações polimórficas indesejadas.

A principal matéria-prima utilizada para o processamento de pisos e pavimentos cerâmicos é a argila, que desempenha papel fundamental na aglutinação e processamento a verde, assim como é agente de sinterização responsável pelo desenvolvimento após a queima, de resistência mecânica e de fases estáveis nas condições de uso. Além disso, permite aplicações de técnicas de processamento relativamente simples (ALVES e BALDO, 1997).

As massas cerâmicas adequadas para a produção de revestimentos podem ser distinguidas em vermelhas e brancas. Tal aspecto é evidenciado principalmente após a etapa de queima. Em ambos os casos as matérias-primas utilizadas são constituídas por duas tipologias fundamentais: matérias-primas plásticas e matérias-primas não-plásticas, (OLIVEIRA, 2000).

Segundo MOTTA *et al.*, (2002), as matérias-primas plásticas conferem importantes características na fase de conformação das peças cerâmicas, tais como

trabalhabilidade e resistência mecânica a cru, e no processamento térmico, como estrutura e cor. As matérias-primas não-plásticas também atuam nas fases de conformação e secagem, diminuindo a retração das peças e favorecendo a secagem, e na fase de processamento térmico, quando desempenham o papel mais relevante, controlando a sinterização. Dentre as matérias-primas não-plásticas destacam-se o feldspato, quartzo e carbonatos. Os feldspatos desempenham o papel de fundentes, proporcionando as primeiras fases líquidas que aparecem durante a queima, melhorando a densificação e as propriedades após queima. A presença do quartzo origina a redução da plasticidade, diminuição da contração de secagem e queima, aumento da permeabilidade, diminuição do tempo de secagem e aumento do coeficiente de dilatação. A adição de carbonatos em uma mistura de matérias-primas argilosas diminui a expansão por umidade e melhora a estabilidade dimensional (BARBA *et al.*, 1997).

Para TEIXEIRA *et al.*, (2002), o grande desafio da fabricação de produtos cerâmicos é produzir uma grande quantidade de peças praticamente idênticas, ou seja, com as mesmas características técnicas e estéticas, a partir de matérias-primas naturais com características variáveis.

Para que as características do produto final permaneçam constantes é necessária a caracterização prévia das matérias-primas, o ajuste da formulação e o controle nos parâmetros de processamento.

Na fabricação de revestimentos cerâmicos é inevitável que haja, ao longo do tempo, variações das características das matérias-primas utilizadas na massa, do teor de umidade, da pressão de compactação e das condições de secagem e queima (MELCHIADES, 1997).

## 2.7 Preparação da massa

A etapa de preparação da massa é muito importante no processamento de placas cerâmicas, pois confere à massa granulada determinadas características, que influenciam nas outras etapas do processamento, como também nas propriedades finais dos produtos. Uma massa cerâmica deve possuir características

necessárias para possibilitar uma adequada trabalhabilidade durante o processamento e para a obtenção das propriedades finais requeridas.

Segundo SANCHEZ *et al.*, (1996), as características das composições utilizadas para fabricar placas cerâmicas estão mudando com o tempo, devido às mudanças tecnológicas do processo de fabricação. Dessa forma, ao longo dos últimos trinta anos, estas mudanças adaptaram-se sucessivamente a ciclos de queima rápida e à fabricação por monoqueima e biqueima. As composições químicas têm acompanhado uma evolução paralela às mudanças tecnológicas, adaptando-se aos ciclos de queima rápida e a fabricação por monoqueima.

As placas de cerâmica para revestimento apresentam grande diversidade de produtos em consequência de uma série de possibilidades de combinações, destacando-se a escolha da massa. Essa escolha consiste em combinação balanceada de várias matérias-primas, para que ela apresente comportamento adequado em cada uma das etapas do processo de fabricação, visando um produto com propriedades desejadas.

Para QUINTEIRO (1996), a etapa de preparação da massa é constituída normalmente por um processo de moagem e homogeneização das matérias-primas, tendo como objetivos:

- obter uma granulometria fina e boa homogeneidade da composição química da mistura;
- obter um granulado com características adequadas para otimização do processo.

O objetivo de qualquer processo de moagem é diminuir o tamanho de partícula de um material sólido, tendo em vista o aumento da superfície específica para melhorar a velocidade de reação de determinada matéria-prima e misturar de um modo mais uniforme vários materiais, além de permitir a obtenção de um pó com as características ideais de utilização. Sabe-se também que o tamanho das partículas exerce uma influência determinante nas propriedades e comportamento dos materiais ao longo do processo de fabricação, como, por exemplo, no comportamento reológico, na conformação, na queima e nas características finais dos produtos (RIBEIRO e ABRANTES, 2001).

A etapa de mistura durante o processamento de fabricação dos materiais cerâmicos é essencial para que se obtenha, na massa processada, uma melhoria na uniformidade química e física, resultando em influências significativas nas propriedades do produto final.

Segundo SANTANA (2002), para se alcançar uma massa homogênea é necessário um adequado sistema de mistura, que inclui: a otimização das condições de mistura, a determinação dos fatores que afetam o desempenho do misturador, a identificação das causas de segregação na massa para a qual se faz necessário o conhecimento dos componentes da mistura e das variáveis que influenciam a taxa e o grau de mistura e a determinação dos fatores que afetam o desempenho do misturador. Para tanto, é preciso que se possua um projeto para o misturador, o conhecimento da consistência da massa, da energia utilizada na mistura; a identificação das causas de segregação da mistura, que é influenciada pelo tamanho, forma e densidade das partículas; e a confirmação de que uma massa homogênea é obtida após avaliação da mistura. É importante a obtenção de uma massa de boa qualidade, já que as deficiências não podem ser corrigidas nas subseqüentes etapas do processamento.

A heterogeneidade em uma massa pode ser causada pela distribuição não uniforme do ligante no pó e segregação de acordo com o tamanho, forma e densidade das partículas. A separação das partículas por tamanho, forma ou densidade conduz a diferentes densidades de empacotamento e distorção do produto final (GERMAN, 1989).

Os mecanismos de transporte, associados a qualquer processo de mistura, podem ser agrupados em três categorias: mistura difusiva, na qual as partículas individuais movem-se umas em relação às outras de maneira análoga à difusão molecular em fluidos; mistura convectiva, na qual os grupos de partículas são deslocados; mistura cisalhante, na qual os componentes são cisalhados uns sobre os outros dentro da massa (LIN e MESSER, 1987).

A importância relativa de cada mecanismo depende do misturador, da consistência da massa e da energia utilizada na mistura. Tensões de cisalhamento intensas podem dispersar os aglomerados e misturar materiais viscosos em uma

microescala. O fluxo turbulento e o impacto podem dispersar os aglomerados e acelerar a mistura difusiva (REED, 1995).

Para a seleção adequada dos misturadores considera-se que a maioria deles foi desenvolvida para processar materiais não tão duros ou abrasivos quanto as cerâmicas, portanto é necessário o conhecimento das propriedades reológicas da massa, da quantidade de material, do estado de consistência da massa, da facilidade de limpeza e dos custos envolvidos.

A consistência da massa de um sistema de processamento é comumente descrita através dos termos como: pó solto, pó aglomerado, massa plástica, pasta viscosa e barbotina. Esta característica é determinada em função de alguns parâmetros como: quantidade, distribuição e propriedades da fase líquida; quantidade, tamanho e empacotamento das partículas; tipo, quantidade e distribuição dos aditivos adsorvidos na superfície das partículas e forças interpartículas, as quais podem ser atrativas ou repulsivas (REED, 1995).

As massas que alimentam as prensas nas fábricas de revestimentos podem ser preparadas por via seca ou úmida. Segundo a ANFACER (2003), 47% da produção brasileira é realizada pelo processo via úmida.

As indústrias que utilizam o processo de via úmida produzem revestimentos a partir das seguintes etapas:

- mistura de várias matérias-primas (argilas, materiais fundentes, talco, carbonatos etc.), que são incorporadas e homogeneizadas em moinhos de bola em meio aquoso;
- secagem e granulação da massa em “spray dryer” (atomizador);
- conformação, decoração e queima.

Para as massas obtidas através de secagem por atomização de uma suspensão de matérias-primas (via úmida), se adicionam normalmente defloculantes, ligantes, plastificantes e, em alguns casos, lubrificantes. Desta forma, os aditivos a serem utilizados, bem como a proporção com que são adicionados à massa deverão ser definidos tendo em vista o efeito que possam exercer sobre o comportamento mecânico, tanto dos grânulos como da peça conformada. A definição dos aditivos a serem utilizados é uma operação complicada, uma vez que

um determinado aditivo pode ser bastante adequado a uma determinada fase da operação de conformação, e, ao mesmo tempo, apresentar sérios inconvenientes para a execução de outras etapas, ou mesmo para as características mecânicas da peça conformada a verde (AMORÓS, 2000).

Os processos cerâmicos que utilizam ligantes orgânicos incluem: prensagem, extrusão, colagem de fita, conformação com rolos, colagem de barbotina e moldagem por injeção (ONODA, 1978).

Os ligantes orgânicos têm a função de conferir ao grânulo e à peça conformada uma suficiente resistência mecânica a seco para permitir o manuseio antes da densificação pela queima. Os plastificantes são aditivos usados para aumentar a deformabilidade do ligante. O lubrificante tem como funções reduzir a fricção entre os grânulos da massa e a parede do molde durante a etapa de compactação e também reduzir o atrito entre a peça conformada e a parede do molde durante a etapa de extração da peça.

Os produtos fabricados pelo processo via úmida são considerados de melhor qualidade, todavia a custos mais elevados, aproximadamente duas vezes maior que os fabricados pelo processo via seca (ARAÚJO *et al.*, 2001).

As vantagens do processo via úmida em relação à via seca são (NEGRE e SANCHEZ, 1998):

- quebra do material argiloso contido na barbotina ao submeter a suspensão a processos de dispersão energéticos;
- redução do tamanho de partículas, principalmente das impurezas;
- mistura íntima dos constituintes da massa, principalmente dos constituintes minoritários;
- maior reatividade do pó;
- melhor fluidez do pó e facilidade de manuseio do pó granulado;
- comportamento adequado do pó granulado sob compressão.

O processo via seca está atravessando uma fase de evolução, na qual, alguns produtos já podem ser comparados com os fabricados por via úmida (LOLLI *et al.*, 2000).

Segundo LOLLI *et al.*, (2000), os fatores que determinaram um notável melhoramento na tecnologia de preparação de massas cerâmicas, via seco foram:

- a adoção de um moinho de elevada eficiência, dotado de rolos moedores pressionáveis, de um secador de matérias-primas na entrada do moinho e de um separador granulométrico;
- a eventual granulação dos pós finamente moídos, através de um granulador de ação aglomerante por umidificação.

O melhoramento do ponto de vista tecnológico do processo de moagem a seco está ligado ao fato de que, com este tipo de moinho, é possível alcançar granulometrias consideravelmente menores que as obtidas com os sistemas tradicionais, comparáveis com aqueles provenientes dos moinhos cilíndricos a úmido, além de apresentar uma elevada produtividade.

Esta granulometria mais fina permite reduzir as dimensões das impurezas contidas nas massas. A sucessiva granulação dos pós moídos a seco proporciona a obtenção de aglomerados de forma e granulometria semelhantes àquelas obtidas com a moagem a úmido e atomização, e assim, procede-se à fase de prensagem sem problemas. Além disto, a maior compacidade dos grãos obtidos por aglomeração resulta nas seguintes vantagens: a obtenção de uma maior densidade do suporte prensado a verde e uma menor retração de queima em relação aos produtos conformados com pós atomizados (LOLLI *et al.*, 2000).

As vantagens da preparação da massa via seca em relação à via úmida são:

- menores custos energéticos, sobretudo de energia térmica;
- eliminação dos custos referentes aos defloculantes e aditivos;
- menores custos de manutenção;
- menor impacto ambiental.

Apesar de todos os investimentos em tecnologias, principalmente em moinhos de altíssima eficiência, o pó produzido por via seca possui alguns limites tecnológicos, pois não processa uma mistura com vários componentes de natureza diversa simultaneamente, porque a desagregação das partículas ocorre de maneira

diferente em relação ao pó atomizado, em particular porque tem menor fluidez (GORINI E CORREA, 1999).

## **2.8 Processos de conformação de placas cerâmicas**

Existem diversos processos de conformação para dar forma às peças cerâmicas. A seleção de um deles depende fundamentalmente de fatores econômicos, da geometria e das características do produto.

A etapa de conformação é o processo através do qual se obtém, a partir da massa, variados tipos de produtos nas espécies, dimensões e formas variadas.

A conformação de peças cerâmicas para revestimentos realiza-se principalmente mediante os processos de prensagem e extrusão.

### **2.8.1 Prensagem**

Os objetivos da operação de prensagem, de forma idêntica a qualquer operação de conformação, são: obter peças uniformes, de acordo com as dimensões e a geometria pré-estabelecida, bem como contribuir na obtenção de uma microestrutura adequada às características finais desejadas.

A prensagem a seco é a operação de conformação baseada na compactação de um pó granulado (massa) contida no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível, através da aplicação de pressão. Segundo ÁLBARO (2000), este é o processo mais utilizado para a fabricação de revestimentos, devido a sua maior estabilidade dimensional, elevada produtividade, facilidade de automação e capacidade de produzir peças de tamanhos e formas variadas.

Distinguem-se duas grandes modalidades de prensagem: a prensagem uniaxial e a prensagem isostática. Na primeira, a compactação do pó se realiza em uma matriz rígida, por aplicação de pressão na direção axial, através de punções rígidos. É utilizada para conformar peças que não apresentem relevo superficial na direção de prensagem. Neste processo, a fricção entre as partículas do pó e também a fricção entre elas e a superfície do molde impedem que a pressão, aplicada a uma ou mais das superfícies da peça, seja integralmente transmitida e de forma uniforme

a todas as regiões da peça, o que provoca a existência de gradientes de densidade nos corpos conformados.

Ainda segundo ÁLBARO (2001), os defeitos mais freqüentes que aparecem ao longo do processo de fabricação de peças cerâmicas conformadas por prensagem uniaxial, devidos a uma inadequada realização desta operação são:

- compactidade inadequada da peça, que pode estar relacionada a uma falta de controle na preparação da massa: a variação no teor de umidade da massa, provocada por alterações nas condições de operação do secador – atomizador ou granulador – modifica sensivelmente a compactidade da peça prensada;
- desgaste do molde por abrasão, que provoca uma mudança progressiva nas dimensões da peça e um deterioramento de sua textura superficial;
- formação de trincas, que pode estar relacionado com o desenho inadequado do molde, o excesso de ar aprisionado durante a fase de compactação, a excessiva expansão da peça durante sua extração do molde e a fricção elevada entre a peça e a parede do molde durante a extração.

Na prensagem isostática, a compactação do pó se dá no interior de um molde flexível, sobre o qual atua um fluido pressurizado. Este procedimento assegura uma distribuição homogênea da pressão sobre a superfície do molde. É empregada na fabricação de peças de formas complexas, que apresentem relevos em duas ou mais direções, ou em peças em que uma das dimensões é muito maior que as demais, como no caso de tubos e barras. As principais vantagens desta técnica são: a obtenção de peças com uma distribuição de compactidade praticamente homogênea, grande versatilidade de formas e baixo custo do molde. As principais desvantagens são: a excessiva duração do ciclo de prensagem, a dificuldade de se automatizar a operação e o elevado custo de mão-de-obra.

A seleção e dosagem das matérias-primas a serem empregadas como as condições de operação envolvidas em todas as etapas do processo de fabricação devem ser consideradas como uma seqüência de etapas integradas, que transformam uma determinada formulação em um produto acabado.

A técnica de preparação empregada na obtenção da massa (granulação ou atomização) irá influenciar as características da massa resultante, como sua distribuição de tamanho de partículas, a forma e textura dos grânulos (atomização)

ou aglomerados (granulação), que por sua vez irão influenciar a etapa de prensagem e as características microestruturais da peça a verde obtida.

Segundo NEGRE (2000), a operação de prensagem e a microestrutura do compacto prensado dependem consideravelmente das propriedades das partículas (tipo, tamanho, formato etc.), das características dos aglomerados dessas partículas (formato, distribuição de tamanho etc.) e dos aditivos de prensagem (umidade, ligantes, plastificantes etc.).

Segundo GARCIA *et al.*, (1999) e ÁLBARO (2001), a distribuição do tamanho de partícula, distribuição do tamanho e forma dos aglomerados e a composição, exercem um efeito marcante sobre a compactação e propriedades do produto final.

Pode-se distinguir três etapas na prensagem: preenchimento do molde, compactação da massa e extração da peça. Destas três etapas, o preenchimento e a compactação definem as características da microestrutura do compacto verde.

Na compactação de um material granular (massa), a diminuição de volume dos poros e de seus tamanhos se dá através de três mecanismos, que podem ser descritos como (ÁLBARO, 2000):

- reordenação de grânulos – redução do volume ocupado pelos poros intergranulares e de seu volume através do deslocamento e rearranjo dos grânulos;
- deformação e destruição de grânulos – redução do volume e tamanho dos espaços intergranulares por deformação plástica e/ou destruição dos grânulos, dependendo das características mecânicas do grânulo (dureza, deformabilidade, resistência mecânica). Neste mecanismo se incluem o esmagamento de grânulos ocos, geralmente presentes nas massas cerâmicas;
- reordenação das partículas no interior dos grânulos – diminuição de volume e tamanho dos poros intragranulares pelo deslizamento e reordenação das partículas buscando alcançar um máximo empacotamento. A Figura 2.4 mostra os mecanismos de compactação para pós aglomerados.

A prensagem é hoje o processo mais utilizado para a conformação de revestimento. A massa que possui aproximadamente 6% de umidade, é submetida a altas pressões, para assegurar ruptura dos grânulos e compactação uniforme. Devido ao baixo conteúdo de umidade na massa, uma alta precisão dimensional é alcançada nos produtos quando se utiliza este processo. O alto custo da ferramenta,

desgaste da matriz, fissuração do pré-compactado, variação de densidade e a baixa eficiência do processo são as desvantagens.

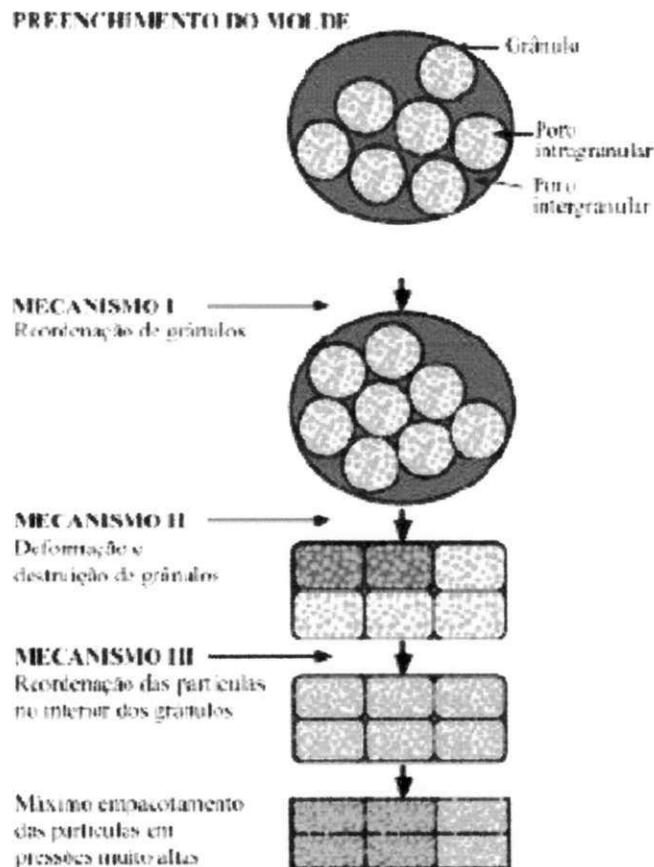


Figura 2.4 – Mecanismos de compactação para pós aglomerados: (a) reordenação de grânulos; (b) deformação e destruição de grânulos; e (c) máximo empacotamento das partículas (ÁLBARO, 2000).

### 2.8.2 Extrusão

A conformação por extrusão é a técnica mais utilizada no campo da cerâmica vermelha. A obtenção de produtos pelo processo de extrusão consiste em compactar uma massa plástica numa câmara de alta pressão equipada com um sistema de desaeração (vácuo). Esse método de conformação pode ser utilizado

para a produção de peças de dimensões grandes e pequenas, como tubos, blocos cerâmicos para fornos e outros produtos de formato regular (REED, 1995).

As etapas do processo de extrusão são: britagem, moagem, formulação e mistura da massa, extrusão, secagem, queima e controle de qualidade. Como em outros processos de conformação, o tamanho, a forma da partícula e o grau de aglomeração são extremamente importantes.

Segundo RIBEIRO *et al.*, (2003), a primeira condição para se obter um bom resultado na extrusão é garantir que o material a ser conformado apresente as mínimas variações possíveis, na massa cerâmica a ser extrudada em termos de: composição, grau de moagem e teor de umidade. O comportamento da mistura cerâmica durante o processamento é influenciado pelas características do pó e pelo teor de umidade da mistura. O comportamento plástico é resultante do uso de argilas, ligantes orgânicos poliméricos ou da mistura dos dois tipos.

A principal característica do processo de extrusão é a orientação preferencial que as partículas do pó assumem quando submetidas à força de cisalhamento do pistão da extrusora. O grau desta orientação é proporcional à tensão de cisalhamento: quanto maior a taxa de cisalhamento, maior é o grau de orientação das partículas.

Na extrusão, as partículas que estão em contato com a boquilha sofrem uma tensão de cisalhamento muito maior do que a tensão que atua sobre as partículas no centro do material. Como resultado, podem ser originadas duas regiões distintas na peça: a região externa, onde as partículas encontram-se altamente orientadas, e a região interna, onde as partículas estão pouco orientadas. Na primeira, as partículas ocupam melhor o espaço disponível, estão melhor empacotadas e o corpo a verde é menos poroso. Na segunda, a densidade local é menor e a densidade do compacto é maior. Por este motivo, a retração nestas regiões durante a secagem e posterior sinterização do compacto será diferenciada.

Durante a extrusão ocorre também orientação preferencial dos poros, sendo este um aspecto importante, pois a direção desta orientação é que determina a direção da retração que ocorre no compacto cujo volume é função do formato dos poros.

Segundo SANTANA *apud* RICHERSON (1992), a qualidade dos produtos cerâmicos extrudados, pode ser melhorada através do processamento visco-plástico (PVP), que é uma técnica desenvolvida para eliminar boa parte dos defeitos microestruturais, como a aglomeração, que ocorre espontaneamente em pós cerâmicos finos.

Os problemas no processo de extrusão também são originados durante a secagem, na remoção do ligante e na etapa de queima. O ligante e o solvente que foram adicionados à mistura devem ser removidos durante a secagem. Esta remoção pode ser conseguida numa ampla faixa de temperatura, dependendo das características do ligante antes da etapa de queima. Geralmente a remoção de solvente e ligante pode resultar na formação de fissuras e outras imperfeições. Uma contração pode ocorrer, provocando instabilidade dimensional e causando empenamentos no corpo extrudado. Problemas na queima também podem causar defeitos semelhantes àqueles encontrados na secagem.

O processo de extrusão praticamente não apresenta limites dimensionais, mas a baixa precisão dimensional dos produtos limita o uso deste processo para a produção de peças delgadas.

### 2.8.3 Processo de laminação

Um dos processos que vem sendo desenvolvido como uma alternativa para a produção de placas cerâmicas para revestimento com espessura reduzida é a técnica de conformação por rolos "roll pressing". Esta técnica permite a conformação de peças com várias geometrias, como colunas contínuas, materiais multicamadas, estruturas ocas e também em canais. Apresenta uma alta produtividade e um controle dimensional do produto acabado bastante preciso (LIPINSKI *et al.*, 1994).

Devido à simplicidade conceitual e ao baixo custo operacional, o processo de compactação por rolos vem sendo usado por diferentes indústrias (química, metalúrgica, farmacêutica etc.), para a fabricação de uma variedade de produtos (ROMAN *et al.*, 2003).

Ainda segundo ROMAN *et al.*, (2003), uma operação de compactação por rolos tem sucesso quando produz compactos com propriedades físicas e mecânicas

desejadas a uma taxa de produção especificada e custo unitário. Este sucesso depende da combinação das propriedades do pó a ser processado, do *design* do projeto e do controle dos parâmetros de processamento.

No processo de laminação o material é introduzido através de uma abertura entre os rolos laminadores em que é submetido a tensões compressivas elevadas, resultantes da ação de prensagem dos rolos e a tensões cisalhantes superficiais, ocasionadas pela fricção entre os rolos e o material. As forças de fricção são também responsáveis pelo ato de puxar o material para dentro da abertura entre os rolos. Essas tensões conduzem à formação do material compactado. A Figura 2.5 apresenta o esquema do processo de laminação.

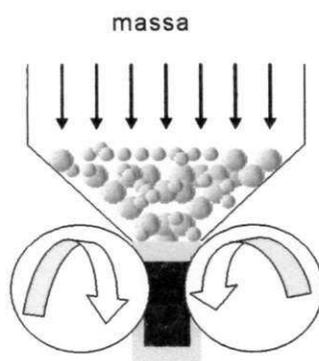


Figura 2.5 – Esquema do processo de laminação

### 2.8.3.1 Parâmetros de processamento

O processo de laminação depende de uma série de parâmetros que adequadamente determinados e controlados resultam em uma peça laminada de qualidade.

Segundo GUIGON e SIMON (2003), para que se tenha adequadas propriedades do produto, é necessário o conhecimento e o controle dos parâmetros básicos do processo e das características do material granular.

Segundo ROMAN *et al.*, (2003), os principais parâmetros envolvidos no processo são: i) preparação da massa; ii) sistema de alimentação; iii) velocidade de

laminação; iv) diâmetro dos rolos laminadores e v) abertura entre os rolos laminadores.

Independentemente do processo a ser utilizado, parte-se de uma mistura de matérias-primas que devem apresentar as menores variações possíveis em termos de composição, grau de moagem, teor de umidade e características estruturais das partículas (forma, tamanho e distribuição) que formam os grânulos. Estes fatores influem consideravelmente durante o processamento, exercendo um efeito marcante tanto na evolução da compacidade como sobre a microestrutura da peça resultante (SIMON e GUIGON, 2003).

Segundo BALZEREIT *et al.*, (1998), uma característica importante deste processo é a possibilidade de selecionar e ajustar alguns parâmetros como: sistema de alimentação dos rolos e escolha dos parâmetros adequados de compactação (abertura entre os rolos, diâmetro dos rolos e velocidade de laminação).

O sistema de alimentação é a chave para um satisfatório processo de compactação. O material utilizado na compactação deve fluir facilmente no espaço entre os rolos, necessitando-se, portanto, preparar a massa para que esta apresente boa escoabilidade e características apropriadas para o processo de conformação. A taxa de alimentação deve permanecer uniforme e contínua de modo a preencher suficientemente a abertura entre os rolos, para a obtenção de uma compactação homogênea.

JOHANSON (1984) verificou que as propriedades da massa, a fricção superficial e a compressibilidade dependem da composição química, tamanho e forma das partículas e da quantidade de ligante adicionado.

No processo de laminação, dependendo das propriedades do fluxo, da densidade do pó e da densificação necessária para produzir compactos de qualidade, dois diferentes tipos de sistema de alimentação são usados:

- i) um sistema de alimentação por gravidade, para fluxo livre de partículas;
- ii) um sistema de alimentação por pressão, em que o pó é empurrado através de um ou de vários parafusos.

Independentemente do sistema de alimentação, a velocidade de alimentação e a quantidade de material que alimenta os rolos deve permanecer constante para a obtenção de uma compactação uniforme.

A Figura 2.6 apresenta o sistema esquemático de alimentação dos rolos.

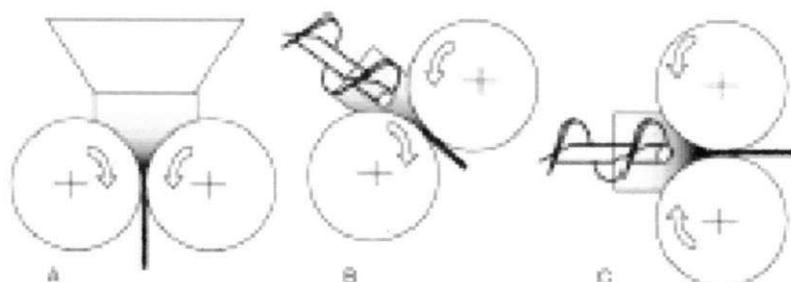


Figura 2.6 – Sistema esquemático de alimentação dos rolos. a) alimentação por gravidade; b e c) alimentação por pressão (GUIGON e SIMON, 2003).

Segundo GOERENTZ *et al.*, (1996), é possível extrudar a massa cerâmica antes da laminação, sendo que a extrusão serve para misturar a massa e conduzi-la até a abertura de laminação. Desta forma, o processo de laminação representa o processo de compactação final. A Figura 2.7 apresenta, de forma esquemática, o processo de extrusão seguido de laminação.

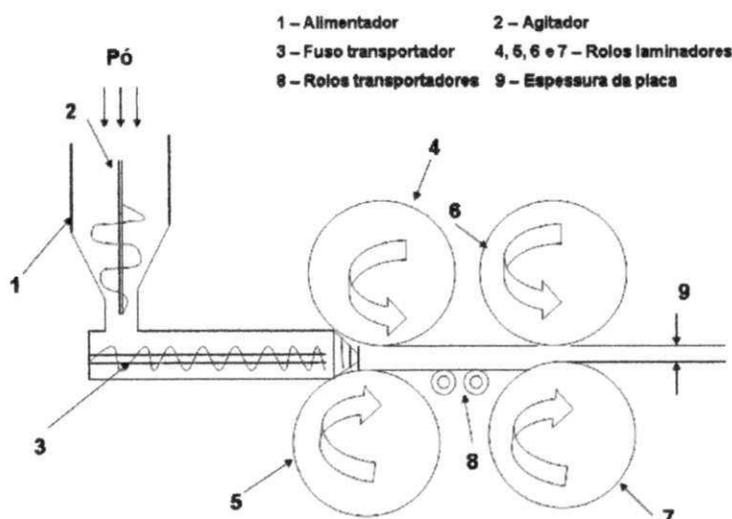


Figura 2.7 – Representação esquemática de um laminador precedido de uma extrusora (SANTANA, 2002).

Segundo GUIGON e SIMON (2003), durante a alimentação, alguma quantidade de ar pode ser comprimido dentro do compactado, sendo este um fator limitante na passagem do material produzido por compactação e na qualidade do compacto. O uso da desaeração a vácuo durante a alimentação é eficiente na otimização da compactação e na minimização de defeitos no compactado. De acordo com MANTLE *et al.*, (2003), a fragilidade estrutural do compactado pode ser controlada pelo uso de uma desaeração no processo durante a etapa de alimentação dos rolos.

Além do controle na preparação da massa e sistema de alimentação, outro importante parâmetro a ser cuidadosamente controlado é a velocidade com que os rolos se movimentam. Segundo JOHANSON (1984), a velocidade de laminação exerce influência sobre a pressão de compactação e conseqüentemente sobre o material compactado. Geralmente uma compactação de qualidade inferior ocorre quando da aplicação de uma alta velocidade de laminação.

SIMON e GUIGON (2003) investigaram a influência da velocidade dos rolos laminadores na formação de um material compactado, a fim de determinar o maior e o menor limite de velocidade dos rolos que possibilitassem uma melhor compactação. Eles observaram que a baixas velocidades ocorreu uma compactação excessiva e a altas velocidades o material não foi compactado.

No processo de laminação a espessura da peça depende da abertura entre os rolos laminadores. Com aberturas menores conseguem-se placas de menor espessura, podendo esta ser variada através do afastamento ou aproximação dos rolos. Segundo RAMBALI *et al.*, (2001), o diâmetro do rolo e a abertura entre os rolos laminadores influenciam significativamente a tensão de compactação.

Para GOERENTZ *et al.*, (1996), através do processo de laminação se exerce influência sobre a formação da microestrutura da massa cerâmica. Através dos típicos movimentos de laminação, podem ser obtidas texturas nas massas cerâmicas, que têm efeito positivo sobre as propriedades mecânicas, térmicas e elétricas dos produtos a serem fabricados. Assim, ao se definirem as condições de trabalho de um determinado processo é muito importante controlar os parâmetros de processamento nas várias fases do processo, visto que as características finais de um produto dependem fortemente dos parâmetros tecnológicos adotados durante o processo produtivo.

### 2.8.3.2 Mecanismos de laminação

O processo de laminação prensa continuamente a massa entre rolos de aço que giram em sentidos opostos com a mesma velocidade periférica. Segundo JOHANSON (1984), durante a etapa de conformação, o material passa através de três regiões distintas em que mecanismos diferentes acontecem:

1 - a região de escorregamento ou zona de alimentação, que ocorre na parte superior da prensa, sendo caracterizada por deslizamento na superfície dos rolos e pela deformação plástica do volume sólido sendo laminado. O aumento na pressão de contato nos sólidos, gerada nesta região é causada pela superfície dos rolos, transmitindo um movimento descendente; sua eficiência é dependente do coeficiente de fricção entre os rolos e o material;

2 - a região de compactação (“nip”) é caracterizada por compressão pura do sólido. O aumento da pressão nesta região é controlado pela compressibilidade do material: quanto maior a compressibilidade melhor a distribuição da pressão;

3 - a região de liberação (“release”) é muito pequena, começando no ponto de maior pressão aplicada pelos rolos.

A Figura 2.8 ilustra de forma esquemática os mecanismos de laminação.

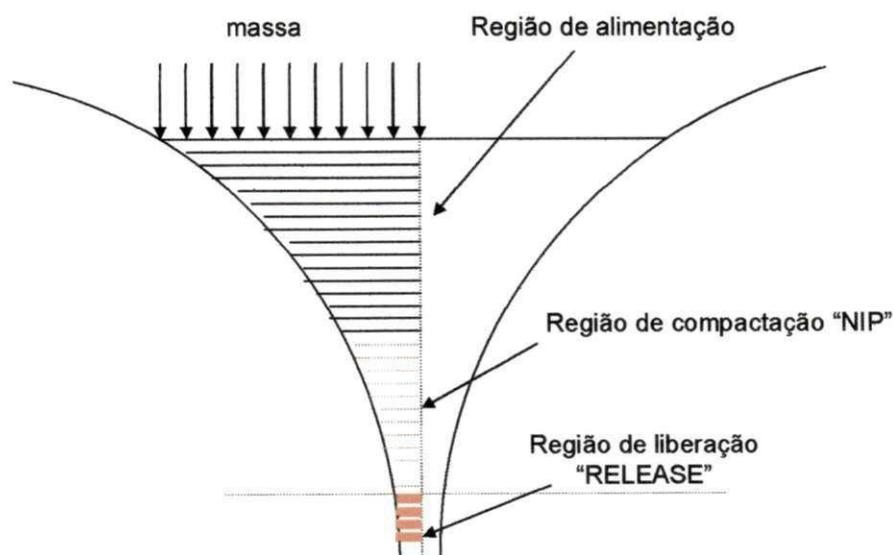


Figura 2.8 – Mecanismos de laminação

Após a compactação, a peça pode ser cortada e manuseada e posteriormente submetida à secagem e queima, resultando em um processo de fabricação com vantagens econômicas em termos energéticos, pois o processo de secagem pode ser realizado de maneira menos dispendiosa e o processo de queima é bastante minimizado, já que pode ser realizado com temperaturas menores e em um tempo mais curto (RAGAN, 1963).

### **2.8.3.3 Comparação entre o processo de laminação e as tecnologias convencionais de fabricação de placas cerâmicas**

A colagem de fita é uma técnica de fabricação de peças cerâmicas de espessura fina (0,025mm a 1mm) e grande área superficial. Os corpos produzidos por este processo se encontram no limite inferior de parede fina e os processos de prensagem e extrusão cobrem a região superior de espessura, apresentando limitações quanto à espessura das peças.

Segundo GOERENZ *et al.*, (1996), o processo de laminação oferece uma possibilidade especial de fabricação de substratos cerâmicos numa faixa de difícil obtenção (1,0mm a 5mm), região intermediária entre a colagem de fita e a fabricação de pisos cerâmicos.

Segundo MISTLER (1991), o processo de laminação está relacionado com o processo de prensagem a seco no que se refere ao material de alimentação, pois este pode utilizar pós atomizados. A principal diferença é o conteúdo de ligante/plastificante, que é consideravelmente maior para as massas submetidas ao processo de laminação.

Segundo RAGAN (1963), placas para revestimento fabricadas normalmente por prensagem a seco apresentam limitações definidas quanto a espessura mínima da peça. Como resultado elas são relativamente espessas, pesadas e devem ser assentadas individualmente.

As vantagens do processo de laminação, comparadas com a prensagem a seco são:

- i) pode ser incorporada na mesma linha de produção do processo de prensagem a seco;
- ii) produz placas com espessura reduzida e retração mais uniforme.

Segundo RAGAN (1961), para que o processo de laminação possa ser empregado para a fabricação de corpos cerâmicos, é desejável que a massa não possua grandes aglomerados e que os pós apresentem boa escoabilidade.

Segundo SANTANA (2002), o conteúdo de umidade do material deve ser mantido numa faixa que evite tanto os teores de umidade da prensagem como os da extrusão. Os aditivos deverão ser misturados ao 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, frequentemente também reduzem a aderência da massa cerâmica aos rolos.

Segundo BALZEREIT *et al.*, (1998), o processo de laminação é caracterizado pelas seguintes propriedades:

- produção de placas cerâmicas finas, tendo espessura na faixa de 0,5. a 10 mm;
- compressão e conformação contínua em uma única etapa de processamento, permitindo alta capacidade de produção;
- produção de componentes cerâmicos tendo várias geometrias;
- manuseio simples e aplicação em larga escala industrial;
- definição específica das propriedades dos materiais através da seleção adequada da composição e parâmetros dos rolos;
- processo econômico em comparação com outros processos de conformação. Os custos de compactação são baixos, o consumo de energia está limitado pela força para alimentar e movimentar os rolos.

### 2.8.3.4 Fabricação de placas cerâmicas para revestimento através do processo de laminação

Pesquisas utilizando o processo de laminação para a obtenção de placas cerâmicas para revestimentos foram realizadas em escala laboratorial na Alemanha. Os resultados preliminares confirmaram as vantagens encontradas na fabricação de placas cerâmicas através do processo de laminação em comparação com o processo de prensagem a seco. BALZEREIT *et al.*, (1998) verificaram que é possível obter placas cerâmicas para revestimento com considerável redução no custo da produção. As vantagens da aplicação do processo são esclarecidas quando se compara o consumo de matéria-prima e de energia nas várias etapas de processamento, conforme mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Comparação relativa entre a matéria-prima e parâmetros de processamento na produção de revestimentos de parede por prensagem a seco e por laminação (%).

Descrição	Observações	Prensagem a seco	Laminação
Matéria - prima		100	33
Preparação	Custo de energia para a produção da composição, baseada na quantidade de matéria-prima.	100	30
Conformação	Energia necessária para produzir 1,0 m <sup>2</sup> de placas cerâmicas	100	60
Secagem	Baseadas em 1,0 m <sup>2</sup>	100	75
Queima	Energia necessária para 1,0 m <sup>2</sup>	100	33

(BALZEREIT *et al.*, 1998).

No Brasil, SANTANA (2001) empregou o processo de laminação na obtenção de placas cerâmicas para revestimento, com o objetivo principal do domínio da tecnologia de fabricação de placas cerâmicas, utilizando o conceito de mistura visco-plástica. Os resultados obtidos confirmaram que através do processo de laminação é

possível obter placas cerâmicas para revestimento apresentando espessura mais fina que as placas produzidas pelos métodos convencionais sem comprometimento da qualidade do produto. No entanto, estudos mais detalhados sobre os parâmetros de laminação, tais como, velocidade de laminação, abertura entre os rolos e diâmetro dos rolos laminadores não foram avaliados. Portanto, pretende-se neste trabalho contribuir para o estudo dos parâmetros de processamento de laminação (velocidade de laminação, abertura entre os rolos e diâmetro dos rolos laminadores), empregando uma massa industrial utilizada na fabricação de revestimento cerâmico.

## **2.9 Processamento térmico**

O processamento térmico é de fundamental importância para a obtenção de produtos cerâmicos, pois dele depende o desenvolvimento das propriedades finais destes produtos. O tratamento compreende as etapas de secagem e queima. É durante estas operações que acontecem as transformações de estrutura e composição responsáveis pela obtenção de propriedades finais, como brilho, cor, porosidade, resistência à flexão, resistência ao ataque de agentes químicos etc.

Segundo CALLISTER (1999), as etapas de secagem e queima são críticas no sentido de que defeitos que ordinariamente tornam a peça imprestável (por exemplo, empenamento, distorções e trincas) podem ser introduzidos durante estas operações.

### **2.9.1 Processo de secagem**

O processo de secagem é fundamental na fabricação de peças cerâmicas. Ele pode ser definido como a eliminação da água de conformação dos produtos cerâmicos, através do ar aquecido, com a finalidade de eliminar o líquido por evaporação superficial. É considerada uma das fases mais delicadas do processo produtivo.

Quando um produto passa por um processo de conformação, ele geralmente contém pequenas quantidades de água que devem ser eliminadas. A água, que está distribuída quase que homogeneamente entre as partículas de argila e outros

componentes da massa cerâmica, precisa ser retirada homogêaneamente, já que sua saída faz com que as partículas se aproximem, diminuindo o tamanho da peça. Nos estágios iniciais do processo de secagem, as partículas de argila estão virtualmente envolvidas e separadas umas das outras por uma fina película de água. Com o progresso da secagem e a remoção da água, a separação interpartículas diminui, o que é manifestado na forma de uma contração de volume. Durante a secagem, torna-se crítico controlar a taxa de remoção de água. A secagem nas regiões internas de um corpo é realizada através da difusão das moléculas de água para a superfície, onde ocorre a evaporação (KINGERY, 1976).

A secagem deve ser cuidadosamente controlada, devido às tensões produzidas pela contração diferencial que pode causar defeitos no produto. Um processo de secagem mal realizado e não uniforme pode provocar a retração excessiva e descontínua da peça, com posterior fissuração. A retração da superfície é devida à evaporação da água que a submete a uma tensão elevada, dada à natureza incompressível do interior ainda molhado.

Segundo CHIARA *et al.*, (2000), a taxa de evaporação da superfície pode ser influenciada:

- pela umidade relativa do ar; quanto mais seco é o ar e, portanto, mais distante do seu ponto de saturação, mais fácil e rapidamente ocorrerá a evaporação da água;
- pela temperatura do ar; quanto mais quente é o ar, maior será a quantidade de água necessária a sua saturação;
- pela velocidade do ar; o movimento do ar permite que se tenha quantidade muito maior de ar em contato com a superfície das peças e o aumento da troca de calor com o material.

Durante o processo de secagem podem-se distinguir três fases (CHIARA *et al.*, 2000):

1. evaporação da água superficial: o mecanismo e as velocidades são iguais àqueles que se verificam na superfície de um líquido. A água evaporada da superfície é progressivamente substituída pela água interna, que migra para o exterior, estabelecendo um fluxo contínuo que mantém úmida a superfície. Se a

velocidade de evaporação superficial é maior do que a velocidade de migração do interior para o exterior, a continuidade se interrompe e, enquanto a superfície está completamente seca, o interior permanece úmido: criam-se, conseqüentemente, contrações de volume diferenciadas que podem provocar fissuras e rupturas. Nesta primeira fase, a migração da água do interior à superfície permite uma compactação das partículas que entram em contato entre si: o volume da peça diminui proporcionalmente à água eliminada e torna-se necessário um cuidadoso controle do processo para manter a retração o mais uniforme possível e igualmente distribuída em toda a massa;

2. a retração continua, mas não é mais proporcional à perda de peso;

3. as partículas atingem a máxima compactação e, então, é eliminada somente a água de porosidade. Não se tem mais variação de volume, mas somente formação de poros. A água é eliminada com menores velocidades pela dificuldade que encontra para fluir através dos poros, é necessário o aumento da temperatura do ar para ocorrer a evaporação.

Ainda segundo CHIARA *et al.*, (2000), outros fatores também influenciam a contração de volume durante a secagem. Um desses fatores é a espessura do corpo; uma contração de volume não-uniforme e a formação de defeitos são mais pronunciadas em peças mais grossas do que em peças mais finas. O teor de água no corpo conformado também é crítico: quanto maior o teor de água, mais intensa é a contração de volume. Conseqüentemente, o teor de água é mantido normalmente tão baixo quanto possível. O tamanho das partículas de argila e a distribuição de tamanho também possuem influência; a contração de volume é aumentada na medida em que o tamanho das partículas é diminuído. Para minimizar a contração de volume, o tamanho das partículas pode ser aumentado, ou materiais não-plásticos que possuam partículas relativamente grandes podem ser adicionados à argila.

### 2.9.2 Processo de queima

A queima é uma etapa importante na fabricação da maioria dos produtos cerâmicos moldados tendo como principal finalidade desencadear todo um conjunto

de complexas reações químicas e físicas, que vão conferir ao produto final as características e propriedades determinantes na sua função e no seu desempenho em serviço. Durante a queima pode ocorrer a formação de uma fase líquida viscosa que preenche a porosidade entre as partículas, conferindo densificação a peça (KINGERY, 1976).

Na queima, estabelece-se um ciclo para o tratamento térmico das peças conformadas e secas em atmosfera controlada, a mais homogênea possível. As características finais do produto são fundamentalmente decorrentes dos fenômenos físicos e químicos que se desenvolvem ao longo do ciclo de queima, principalmente na região de mais alta temperatura (LECHNER *apud* SANTANA 2002). Durante o processo de queima, toda a água é eliminada, ocorrendo uma mudança na estrutura da argila. Por isso a marcha de aquecimento e resfriamento das peças deve ser controlada: uma queima mais rápida é mais econômica, porém uma queima mais lenta gera produtos de melhor qualidade.

Ainda durante a etapa de queima, as peças são submetidas a variações de tamanho, que ocorrem em consequência das reações que se processam em seu interior. Se uma mesma peça apresenta retrações de diferentes magnitudes ao longo de sua extensão, o produto acabado pode apresentar desvios de seu formato original, gerando problemas no produto final (MELCHIADES *et al.*, 2001).

A Tabela 2.4 mostra as principais reações físicas e químicas tipicamente envolvidas no tratamento térmico de produtos cerâmicos.

Tabela 2.4 – Reações físicas e químicas tipicamente envolvidas no tratamento térmico de produtos cerâmicos a base de argilas

Temperatura (°C)	Reações
100-200	Secagem final do material, perda de água
110-200	Separação da água (zeolítica) que acompanha alguns minerais argilosos (ex: haloisita e montmorilonita)
350-600	Decomposição da matéria orgânica ou componentes carbonosos do corpo (liberação de CO <sub>2</sub> )
≈500	Separação da água de cristalização (ex. água estrutural da caulinita)
573	Transformação alotrópica do quartzo ( $\alpha - \beta$ ) com variação de volume
> 600	Liberação de fluor (dependendo da composição mineralógica da pasta)
800-950	Decomposição dos carbonatos (liberação do CO <sub>2</sub> )
800-1100	Decomposição dos sulfetos e sulfatos
700-T <sub>max</sub>	Reações químicas e físicas - variações dimensionais - redução de porosidade (absorção de água) - aumento da resistência mecânica
T <sub>max</sub> - 900	Arrefecimento rápido
573	Transformação alotrópica do quartzo ( $\beta - \alpha$ ) com variação de volume (influência das tensões de arrefecimento)

(CAMPANTE e SEABRA – CTCV, 2002)

Durante o processo de sinterização podem-se distinguir três estágios: (1) reações preliminares a sinterização, que inclui extração dos aditivos orgânicos e a eliminação dos produtos gasosos da decomposição e oxidação; (2) sinterização e (3) resfriamento.

Os mecanismos de transporte de massa que surgem durante a sinterização podem ocorrer na fase vapor, ao longo da superfície sólida, no volume de partículas, ou ao longo dos contornos de grão. A Figura 2.9 ilustra de forma esquemática o mecanismo da sinterização. Durante o estágio inicial da sinterização, ocorre a formação de empescoamento ao longo das regiões de contato entre as partículas (b), além disso, forma-se um contorno de grão dentro de cada pescoço, e cada interstício entre partículas se torna um poro. À medida que o processo de sinterização progride (c), os poros se tornam menores e adquirem formas mais esféricas.

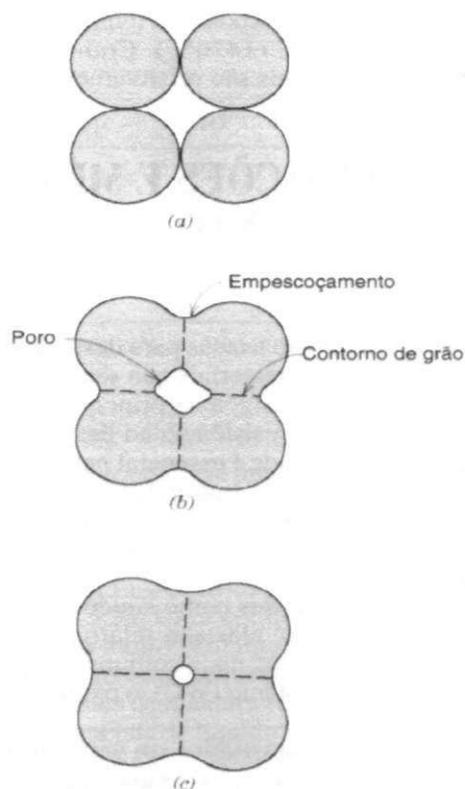


Figura 2.9 – Mecanismo da sinterização: (a) partículas de pó após a prensagem; (b) coalescência das partículas e formação de poros que ocorrem quando a sinterização tem início e (c) com a progressão do processo de sinterização, os poros mudam de tamanho e de forma (CALLISTER, 1999).

Na produção de revestimentos cerâmicos a etapa de queima, até algumas décadas era realizada pelo método da biqueima, em que o produto ia ao forno por duas vezes. Neste processo, o corpo conformado é queimado para formar o substrato e subsequente um vidrado é aplicado em cima deste o qual é mais uma vez queimado para se obter o produto final.

Para evitar todo este trabalho de manipulação do produto, surgiu a monoqueima, que, com o desenvolvimento dos fornos, proporcionou um melhor conhecimento das transformações que ocorrem com a massa durante a queima.

No processo de monoqueima, o esmalte é aplicado diretamente no corpo prensado a seco, ambos são aquecidos simultaneamente. Neste processo, a escolha do ciclo de queima deve levar em consideração as características do produto que se deseja obter, bem como as transformações químicas e estruturais que ocorrem no corpo verde durante a queima, que, por sua vez, depende da composição da massa e do processo de conformação utilizado (MARINHO, 1999).

Para QUINTERO (1999), a consolidação da indústria de revestimentos cerâmicos deve-se muito as inovações tecnológicas introduzidas no setor nas últimas décadas. Entre as inovações, a introdução dos fornos rápidos de monoqueima em uma única camada foi a que causou maiores transformações no processo de produção, sendo muitas vezes o alvo da atenção para resolução de problemas, tais como os defeitos presentes no produto final. A correlação destes defeitos com etapas do processo anteriores à queima tem sido muitas vezes ignorada.

A introdução do processo monoqueima na fabricação de revestimentos, em substituição ao tradicional processo biqueima, não apresenta unanimidade quanto à sua eficiência na manutenção das características de qualidade do produto final, sendo ainda objeto de diferentes avaliações pelos países tradicionalmente tidos como inovadores.

Todavia, de acordo com AMBORI (1999), os principais problemas associados à tecnologia biqueima são os seguintes:

- grau de porosidade do corpo cerâmico, que deve ficar abaixo de um certo nível para não prejudicar a esmaltação;
- dificuldade em criar uma forte ligação entre o corpo da cerâmica e o esmalte, quando queimada em vários estágios.

Estas são as principais razões pelas quais o processo de biqueima não é mais adequado para fornecer um produto com certas características.

Da mesma forma que o processo biqueima, o monoqueima também apresenta os seguintes problemas:

- para esmaltação de um corpo não queimado, que apresenta baixa resistência mecânica sendo solúvel em água, são necessários o aumento da espessura do produto e a limitação da aplicação de esmaltes impermeabilizantes;

- com a queima simultânea do substrato e do esmalte ocorre a liberação de gás do corpo da cerâmica no pré-aquecimento e nos estágios da queima. Tornou-se necessário usar esmaltes especiais e matérias-primas para o biscoito que apresenta pouca emissão de gás;
- dificuldade de oxidação das impurezas e substâncias oxidáveis contidas na cerâmica. Isto é particularmente significativo na superfície em contato com o esmalte, havendo a necessidade de redução do número de matérias-primas utilizadas na cerâmica e de utilização da via líquida para a moagem, garantindo homogeneidade da cerâmica e dispersão das impurezas.

### 2.9.3 Comportamento mecânico

Uma das propriedades mais importantes na fabricação de placas cerâmicas é a sua resistência mecânica a seco. Sua importância se deve ao fato de que as placas devem suportar os esforços a que serão submetidas durante as sucessivas etapas do processamento.

O comportamento mecânico de corpos cerâmicos a verde é analisado através da resistência mecânica. Deste modo, as placas devem apresentar alta resistência a verde, para resistir às tensões a que serão submetidas durante as etapas de secagem e esmaltação e nas sucessivas operações de transporte, armazenamento e tratamento térmico. Desde a etapa de secagem até a saída do forno as placas estão submetidas a esforços mecânicos e térmicos.

O módulo de resistência à flexão a verde é uma característica do material e não da placa, propiciando a medida da coesão interna do material. O módulo de ruptura está relacionado tanto com a porosidade total do corpo cerâmico, como com a distribuição, quantidade de fases cristalinas presentes e da microestrutura do mesmo. Composição, densidade a verde e após queima são parâmetros que determinam o valor final da resistência à flexão.

Segundo SANDOVAL *et al.*, (2000), teoricamente a resistência à fratura de um material cerâmico deveria ser igual à tensão necessária para separar dois planos atômicos adjacentes. Na realidade, a resistência à fratura que este tipo de material apresenta é muito menor que a teórica. A diferença entre os valores teóricos e

experimentais se deve a inevitável presença de defeitos, que atuam como concentradores de tensão.

De uma maneira geral, os materiais cerâmicos são frágeis, porque apresentam deformações em temperatura ambiente que raramente excedem 1%. Foi comprovado de forma experimental que normalmente a fratura se inicia a partir de trincas existentes dentro do material, que podem ter sido geradas durante a realização de ensaios ou etapas de processamento.

De acordo com o tipo de fratura presente, os materiais podem ser classificados em (AMORÓS, 2001):

- frágil puro – a fratura se origina a partir de trincas preexistentes na peça. A deformação máxima antes da ruptura é de aproximadamente 0,1%;
- semi-frágil – A fratura se origina a partir de trincas produzidas ou ampliadas durante o ensaio, existindo uma deformação crítica na faixa de 0,1 a 1,0%;
- dúctil – Neste caso a deformação crítica é superior a 1%, produzindo um fluxo plástico, seguido de uma fratura do tipo frágil.

Em consequência, a origem da ruptura dos materiais cerâmicos se deve à presença de trincas inerentes, microplasticidade, ou ambos os defeitos.

A Figura 2.10 apresenta o diagrama carga-deformação de peças a verde (AMORÓS, 2001).

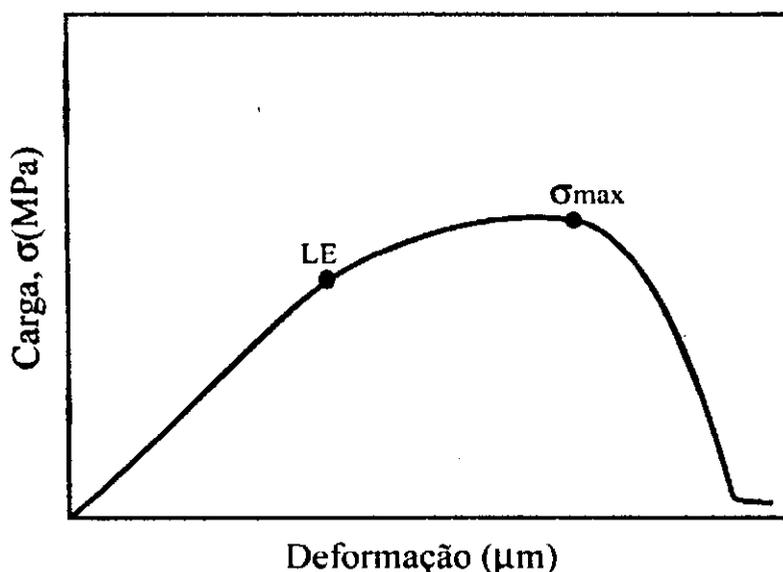


Figura 2.10 – Diagrama carga-deformação de peças prensadas a verde (AMORÓS, 2001).

Analisando a Figura 2.10, observa-se a relação entre carga e deformação de peças prensadas a verde (antes da secagem). Percebe-se uma primeira região linear, na qual o comportamento do material é elástico e a deformação da peça é reversível e proporcional à carga aplicada. O ponto em que começa a desfigurar-se esta proporcionalidade define o limite elástico do material, LE. Uma vez ultrapassado este limite, qualquer deformação imposta ao corpo será permanente.

A Figura 2.11 apresenta o mecanismo de fratura de peças prensadas a verde. O limite elástico indica o estado de tensões em que se inicia o aparecimento e propagação de trincas, desde a superfície até o interior da peça. Como mostra a Figura 2.11, a trinca se inicia em algum dos defeitos superficiais da peça (interface entre grânulos) de tamanho  $C_0$ , que atua como um ponto de concentração de tensões. Esta trinca pode inclusive ramificar-se, provavelmente ao longo dos contornos de grãos, que, apesar de muito deformados, estão presentes na peça, dando origem a múltiplas trincas. Finalmente, quando o sistema de trincas atinge um tamanho crítico,  $C$ , ocorre a fratura catastrófica da peça. Efetivamente, este material apresenta um comportamento semifrágil, uma vez que sua fratura necessita da propagação e do crescimento de trincas pré-existentes, (AMORÓS, 2001).

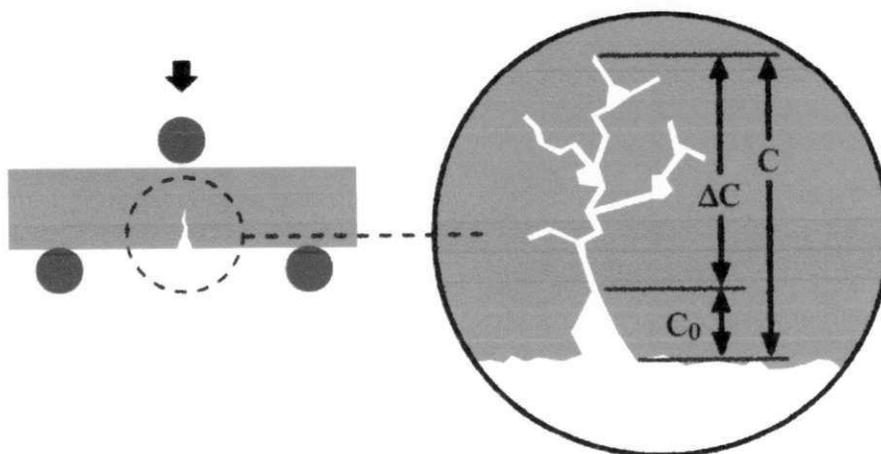


Figura 2.11 – Mecanismo de fratura de peças prensadas a verde (AMORÓS, 2001).

Neste capítulo foi apresentada uma breve abordagem sobre a indústria brasileira de revestimento, enfocando a classificação, propriedades de placas cerâmicas para revestimento, etapas de processamento e processos de fabricação. Após as análises contidas na revisão bibliográfica podemos concluir que o processo de fabricação de placas cerâmicas começa com a seleção das matérias-primas, preparação da massa, conformação, secagem e queima. Nos últimos anos a utilização de sistemas automatizados e o controle dos processos de fabricação e parâmetros de processamento têm resultado em processos mais eficientes e econômicos. A indústria brasileira de revestimentos cerâmicos vem incorporando mudanças significativas nos processos de produção e no desenvolvimento de novos produtos. No entanto, faz-se necessária a aquisição de novas tecnologias de produtos e de processos que tragam vantagens sobre os processos convencionais, sobretudo no que diz respeito à diminuição nos custos e aumento da produtividade. Neste capítulo também, foram descritas informações básicas sobre o processo de laminação, visando aprofundar os conhecimentos para o desenvolvimento e aplicação do processo na fabricação de placas cerâmicas. Foram apresentados os principais parâmetros de processamento envolvidos no processo, os mecanismos de compactação, como também foram avaliados os resultados obtidos por pesquisas anteriores que serviram de base e conduziram à realização deste trabalho.

## CAPÍTULO III

### MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos de ensaios utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Massa cerâmica

Para o desenvolvimento do presente trabalho utilizou-se uma massa cerâmica utilizada na fabricação de placas cerâmicas para revestimento, fornecida pela Indústria Cerâmica Cordeiro S.A., João Pessoa – PB. A massa cerâmica atomizada produzida industrialmente, por via úmida, possuía umidade de aproximadamente 7% e apresentava composição adequada para a produção de placas cerâmicas para revestimento utilizando o processo de prensagem. A umidade da massa foi corrigida com adição de água e/ou aditivos para que a mesma apresentasse consistência adequada para os processos de laminação e extrusão.

##### 3.1.2 Aditivo

O aditivo orgânico utilizado no trabalho foi o amido, o qual foi adicionado na massa com o objetivo de proporcionar uma melhoria nas condições de processamento e consistência da massa, como também fornecer ao corpo a verde uma suficiente resistência mecânica para o manuseio da peça.

A Tabela 3.1 apresenta algumas das características físico-químicas da solução de amido, que foi utilizada como aditivo orgânico neste trabalho.

Tabela 3.1 - Características físicas e químicas da solução de amido.

Aspecto	pH (20 °C)	Sólidos (%)	Viscosidade (20 rpm- 20°C)
Líquido homogêneo viscoso	9 – 10	17 – 19	4500 - 5500 cP

(SANTANA, 2002)

### 3.2 Métodos

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho constitui as etapas descritas a seguir:

#### 3.2.1 Caracterização física e mineralógica da massa

##### 3.2.1.1 Análise química

A análise química fornece dados fundamentais de grande utilidade industrial e científica, apesar de não permitir uma avaliação completa da composição mineralógica e das propriedades físico-químicas e tecnológicas.

A composição química da massa cerâmica foi determinada no CTCmat – Centro de Tecnologia em Materiais (Criciúma SC), por fluorescência de raios-X (FRX) em um equipamento Phillips, modelo PW2400, com tubo de 3KW e alvo de ródio.

##### 3.2.1.2 Análises térmicas

As análises térmicas desempenham grande relevância na caracterização das argilas. A natureza dos picos (endotérmicos e exotérmicos) e as temperaturas nas quais as reações ocorrem são bases para esta caracterização.

A caracterização térmica foi realizada em um equipamento de análise térmica da BP Engenharia, modelo RB 3000, operando com taxa de aquecimento de 12,5 °C/min. A temperatura máxima utilizada para ATD e ATG foi de 1000°C e o padrão utilizado nos ensaios de ATD foi o óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) calcinado.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa do CCT/UFCG, Campina Grande, PB.

### **3.2.1.3 Difração de raios-X**

O método de difração de raios-X é de grande importância na análise das fases cristalinas presentes na amostra. A técnica foi utilizada para identificar as fases presentes na massa após secagem e queima em diferentes temperaturas.

O equipamento utilizado para caracterizar o pó foi um difratômetro Philips, modelo X Pert Pro com tubo de cobre ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ), tensão de 40kV e corrente de 40mA.

As análises de difração de raios-X foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Difração de Raios-X, do Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção da Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, CE.

### **3.2.1.4 Massa específica real**

A determinação da massa específica real da massa foi realizada segundo o método de picnometria. O ensaio foi realizado no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa do CCT/UFCG, Campina Grande, PB.

### **3.2.1.5 Limites de Atterberg**

A plasticidade tem uma importância fundamental nas propriedades tecnológicas, pois define o ponto ótimo de trabalhabilidade da massa para conformação.

Os limites de Atterberg foram determinados segundo as Normas da ABNT NBR-6459 (1984) e NBR-7180 (1984). O ensaio foi realizado no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa do CCT/UFCG, Campina Grande, PB.

### 3.2.1.6 Distribuição do tamanho de partículas

É de fundamental importância determinar a distribuição do tamanho de partículas das matérias-primas para controlar o comportamento da massa durante o processo de fabricação e as propriedades do produto final.

O método de ensaio utilizado para determinar a distribuição do tamanho de partículas foi o granulômetro por difração a laser Cilas 1064L. O ensaio foi realizado no Laboratório do Centro de Tecnologia em Materiais (CTCmat), Criciúma, SC.

Na figura 3.1, está apresentado o fluxograma das etapas de caracterização física e mineralógica da massa.

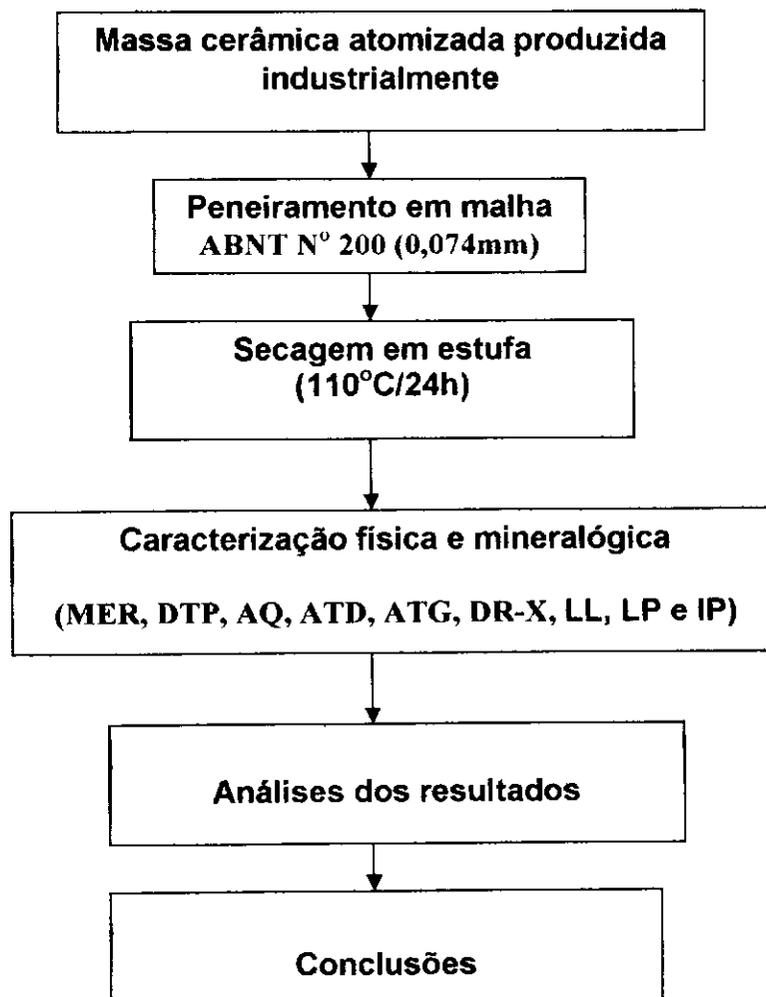


Figura 3.1 – Fluxograma com as etapas dos ensaios de caracterização.

### 3.2.2 Metodologia utilizada na fabricação das placas cerâmicas

#### 3.2.2.1 Preparação da massa

A massa cerâmica atomizada produzida industrialmente teve a sua umidade corrigida para que apresentasse consistência adequada para os diferentes processos de conformação estudados. Inicialmente a massa cerâmica foi submetida à etapa de mistura. Nesta etapa foi utilizado um misturador do tipo planetário para a realização da mistura a frio. Em seguida as massas foram acondicionadas em sacos plásticos por 24 horas para uma melhor distribuição da umidade e plasticidade. O ensaio foi realizado no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa do CCT/UFCG, Campina Grande, PB. A Figura 3.2 apresenta o misturador utilizado na etapa de mistura.



Figura 3.2 – Misturador Planetário (FONTE: METVISA)

### 3.2.2.2 Processos de conformação das placas cerâmicas

Após a etapa de mistura a massa cerâmica foi conformada através dos processos de prensagem, laminação e extrusão.

A massa cerâmica com teor de 7% de umidade foi submetida ao processo de prensagem. Foram prensados uniaxialmente corpos de provas nas dimensões de aproximadamente  $(6,0 \times 2,0 \times 0,5)\text{cm}^3$  em uma prensa de laboratório modelo Losenhausen com pressão de 20MPa.

A massa cerâmica com teor de umidade adequado ao processo de laminação foi submetida ao processo de conformação. Nesta etapa a massa cerâmica foi introduzida através de uma abertura de laminação e assim compactada. Foram laminados corpos de provas nas dimensões de aproximadamente  $(8,5 \times 5,0 \times 0,35)\text{cm}^3$  em um cilindro laminador profissional, com velocidade controlada, modelo G.Paniz, conforme mostrado na Figura 3.3.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa do CCT/UFCG, Campina Grande, PB.



Figura 3.3 – Cilindro laminador (FONTE: G.PANIZ)

A massa cerâmica com teor de 21% foi submetida ao processo de extrusão. Foram extrudados corpos de prova nas dimensões de aproximadamente (10,0 x 6,0 x 1,0)cm<sup>3</sup> em uma maromba de laboratório modelo 51 da marca VERDÉS.

### **3.2.2.3 Etapa de secagem**

Após a conformação as placas cerâmicas, foram mantidas em repouso à temperatura ambiente por um período de 24 horas e em seguida foram secas em estufa de laboratório a 110°C durante 24 horas.

### **3.2.2.4 Etapa de queima**

Após a secagem as placas cerâmicas, foram sinterizadas a diferentes temperaturas (1000°C, 1050°C, 1100°C e 1150°C) em forno elétrico de laboratório, com taxa de aquecimento de 12 °C/min sem patamar para que se obtivesse as condições de queima da indústria. O resfriamento ocorreu naturalmente dentro do forno até temperatura ambiente.

### **3.2.2.5 Determinação das propriedades físico-mecânicas das placas cerâmicas**

Após secagem a 110°C e queima a 1000°C, 1050°C, 1100°C e 1150°C, os corpos de prova foram submetidos aos seguintes ensaios cerâmicos: retração linear (RL), tensão de ruptura à flexão (TRF), absorção de água (AA), massa específica aparente (MEA) e porosidade aparente (PA). Os valores obtidos resultam da média aritmética de 10 corpos de prova.

As características físicas das amostras, como absorção de água e massa específica aparente, foram determinadas através da Norma ISO 10545/NBR 13818 e do método de imersão. A retração linear foi avaliada mediante a variação dimensional com a temperatura. A tensão de ruptura à flexão foi determinada pelo ensaio de flexão em três pontos, utilizando uma máquina universal de ensaios Testometric Micro 350, modelo Goodbrand, operando a uma velocidade de 0,7mm/min, segundo o método proposto pela ASTM D790/1986. Os ensaios foram

realizados no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais do CCT/UFCG, Campina Grande, PB.

### **3.2.2.6 Análises da superfície de fratura**

Após o ensaio de resistência à flexão em três pontos, a superfície de fratura de algumas amostras prensadas, laminadas e extrudadas foram analisadas através da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). O equipamento utilizado para o ensaio foi um microscópio Philips, modelo XL-30.

As análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Difração de Raios-X, do Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção da Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, CE.

## **3.3 Metodologia utilizada na determinação dos parâmetros de processamento estudados**

A realização deste trabalho incluiu diferentes etapas do estudo em que vários parâmetros de processamento foram avaliados. A seguir será apresentado todo o procedimento utilizado na determinação dos parâmetros de processamento estudados.

### **3.3.1 Estudo do teor de umidade da massa**

A massa cerâmica utilizada, produzida industrialmente por via úmida (atomizada), possuía uma umidade de aproximadamente 7%. A massa foi umedecida com adição de água até atingir os teores de umidades desejados (15%, 16%, 17%, 18%, 19%, 20% e 21%). Essa faixa de umidade foi estudada para que se conhecesse o teor mais adequado para o processo de laminação. As massas com os diferentes teores de umidade foram submetidas à etapa de mistura. A mistura foi realizada em um misturador planetário, por um período de 30 minutos, com velocidade de 120rpm. Após 24 horas em repouso, a massa foi conformada através do processo de laminação. Durante o processamento foram mantidos constantes o

diâmetro dos rolos, a velocidade de laminação e a quantidade de massa. Foram obtidas placas cerâmicas com dimensões de aproximadamente  $(8,5 \times 5,0 \times 0,35)$  cm<sup>3</sup>. Em seguida, determinaram-se às propriedades físico-mecânicas após secagem e queima das placas cerâmicas laminadas.

### 3.3.2 Estudo do tempo e da velocidade de mistura

A massa cerâmica com umidade adequada para o processo de laminação (19%) foi submetida à etapa de mistura. Foram estudados três tempos de mistura (15, 30 e 60 minutos) e duas velocidades de mistura (60 e 120 rpm). Estes parâmetros foram escolhidos para que se conhecesse o tempo e a velocidade mais adequados para a obtenção de uma massa mais homogênea. As massas foram conformadas através do processo de laminação. Durante o processamento foram mantidos constantes o diâmetro dos rolos, a velocidade de laminação e a quantidade de massa. Foram obtidas placas cerâmicas com dimensões de aproximadamente  $(8,5 \times 5,0 \times 0,35)$ cm<sup>3</sup>. Em seguida, foram determinadas as propriedades físico-mecânicas, após secagem e queima das placas cerâmicas laminadas.

### 3.3.3 Estudo da velocidade de laminação, diâmetro dos rolos laminadores e abertura entre os rolos laminadores

A massa com umidade de 19% foi submetida à etapa de homogeneização. Nesta etapa foi utilizado um misturador planetário para a realização da mistura a frio com velocidade de 120 rpm por 600 minutos. Após a etapa de mistura, a massa foi mantida em repouso por 24 horas e em seguida conformada em um cilindro laminador. Foram avaliadas duas velocidades de laminação (10rpm – 6,55 cm/s e 110 rpm – 72,0 cm/s) com cilindros de 12,5 cm de diâmetro. Também foram laminadas placas cerâmicas com cilindros laminadores de 6,0 cm e 12,5cm de diâmetros com a mesma velocidade de laminação, como também foram obtidas placas com espessura de 3,5mm e 2,5mm, tendo sido mantidos constantes a velocidade de laminação e o diâmetro dos rolos laminadores. A avaliação dos

parâmetros estudados foi feita através das propriedades obtidas após secagem e queima das placas cerâmicas laminadas, como uma função da velocidade de laminação, do diâmetro dos rolos e da abertura entre os rolos laminadores.

### **3.3.4 Estudo comparativo entre as propriedades apresentadas por placas cerâmicas obtidas através dos processos de prensagem, extrusão e laminação**

A massa cerâmica foi preparada de modo que apresentasse umidade adequada para os processos de prensagem, laminação e extrusão. Após conformação descrita no item 3.2.2.2, foram determinadas as propriedades físico-mecânicas após secagem e queima das amostras. Também foram comparadas as propriedades de placas cerâmicas laminadas em laboratório e prensadas na indústria.

### **3.3.5 Estudo de uma pré-extrusão seguida de laminação**

A massa cerâmica com umidade de 21% foi submetida ao processo de extrusão e em seguida ao processo de laminação. As propriedades obtidas com as placas nestas condições foram comparadas com propriedades de placas cerâmicas obtidas através do processo de laminação.

### **3.3.6 Estudo da adição do amido solúvel à massa cerâmica**

Foram preparadas massas cerâmicas com adição de 0,5%, 1,0% e 1,5% de amido solúvel. As massas foram homogeneizadas por 60 minutos com velocidade de mistura de 120 rpm. Foram laminadas placas cerâmicas com dimensões de aproximadamente  $(8,5 \times 5,0 \times 0,35)\text{cm}^3$ . A avaliação dos teores de amido estudados foi feita através da determinação das propriedades físico-mecânicas obtidas pelas placas cerâmicas laminadas após secagem e queima, conforme metodologia descrita anteriormente.

A Figura 3.4 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho.

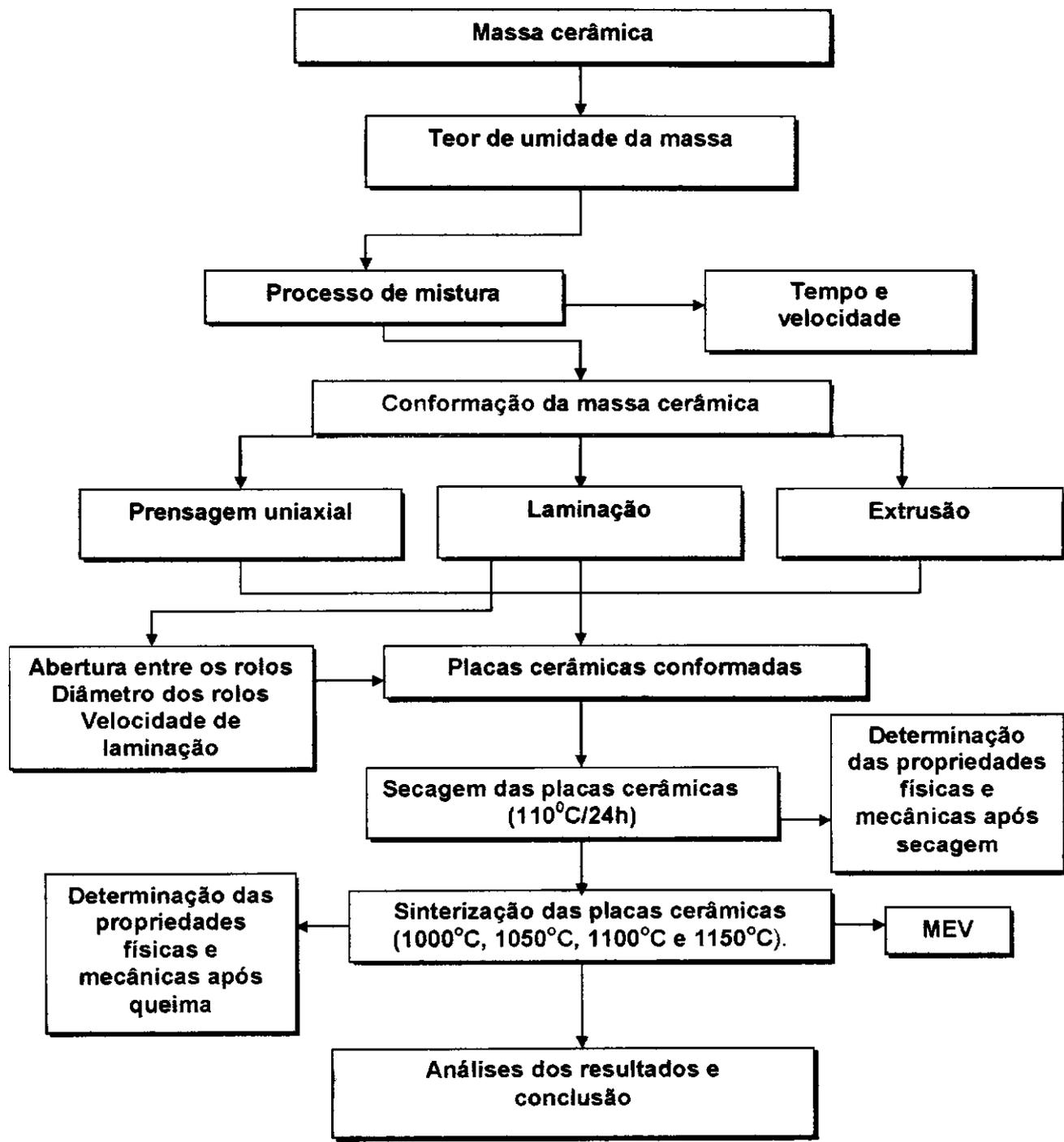


Figura 3.4 – Fluxograma da metodologia experimental utilizada no desenvolvimento do trabalho.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos quanto à caracterização física e mineralógica da massa, análises dos parâmetros de processamento, determinação das propriedades físico-mecânicas das placas cerâmicas obtidas através dos processos de laminação, prensagem e extrusão e análises microestrutural da superfície da fratura das placas cerâmicas.

#### 4.2 Caracterização física e mineralógica da massa

##### 4.2.1 Análise química

Na Tabela 4.1 está apresentada a composição química da massa cerâmica utilizada neste trabalho.

Tabela 4.1 - Composição química da massa cerâmica

Componentes	Porcentagem (%)
SiO <sub>2</sub>	61,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,02
CaO	2,96
MgO	4,12
Na <sub>2</sub> O	1,98
K <sub>2</sub> O	1,56
P.F	8,67
Total	100

Observando os valores da composição química verifica-se que a massa apresenta um elevado teor de  $\text{SiO}_2$  (61,41%), proveniente dos minerais argilosos e da sílica livre presentes na massa. Segundo BARBA *et al.* (1997), a presença da sílica origina uma redução na plasticidade, aumenta a permeabilidade e o coeficiente de expansão térmica melhorando a estabilidade. O teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13,02%) está relacionado com a proporção do mineral argiloso. O óxido de cálcio e óxido de magnésio ( $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ ) encontrados na massa agem como fundentes. Estes óxidos reagem com fases amorfas e formam fases cristalinas que são mais estáveis frente à ação da umidade. O  $\text{Na}_2\text{O}$  e o  $\text{K}_2\text{O}$  são fundentes indispensáveis para a queima. A percentagem de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (6,28%) atua na coloração da massa após a queima e diminui a refratariedade e a perda ao fogo é proveniente da decomposição dos minerais argilosos, dos diversos tipos de água presentes nas argilas, dos carbonatos e da combustão da matéria orgânica.

#### 4.2.2 Análises térmicas

Na Figura 4.1 estão apresentadas as curvas da análise termodiferencial e termogravimétrica da massa.

Analisando a curva de ATD da Figura 4.1, verifica-se que a massa apresenta: pico endotérmico de média intensidade a  $110^\circ\text{C}$ , o que indica a presença de água livre e água adsorvida; pico endotérmico de pequena intensidade a  $573^\circ\text{C}$ , correspondente à presença de hidroxilas e à transformação da fase do quartzo- $\alpha$  para o quartzo- $\beta$ ; pico endotérmico de pequena intensidade à  $857^\circ\text{C}$ , correspondente à presença de carbonatos.

Analisando a curva de ATG da Figura 4.1, verifica-se que a perda total de massa foi de 13,51% durante queima até  $1000^\circ\text{C}$ . No intervalo de temperatura entre  $25^\circ\text{C}$  e  $200^\circ\text{C}$  ocorreu uma redução de peso na massa correspondente a 5,80%, proveniente da perda de água livre. No intervalo entre  $322-615^\circ\text{C}$  observou-se uma perda de peso na massa de 3,97% correspondente à perda de hidroxilas. Entre  $615-896^\circ\text{C}$  a perda de peso na massa foi de 3,43%, correspondente à decomposição do  $\text{CaCO}_3$ .

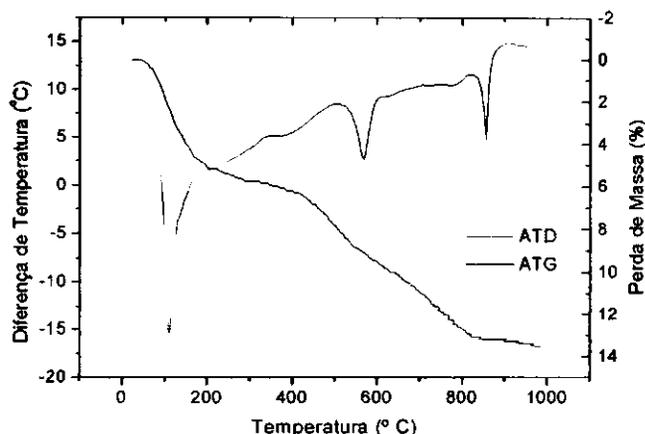


Figura 4.1 – Análise térmica diferencial e termogravimétrica da massa

#### 4.2.3 Distribuição de tamanho de partícula

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores referentes aos tamanhos de partículas da massa utilizada neste trabalho. Observa-se que os valores estão dentro da faixa adequada para a fabricação de revestimentos, com 90% das partículas apresentando tamanho médio abaixo de 62,73  $\mu\text{m}$  (BARBA et al., 1997).

Tabela 4.2 – Distribuição do tamanho de partícula (% em peso)

10% das partículas abaixo de	3,61	$\mu\text{m}$
50% das partículas abaixo de	20,88	$\mu\text{m}$
90% das partículas abaixo de	62,73	$\mu\text{m}$
100% das partículas abaixo de	140,00	$\mu\text{m}$

#### 4.2.4 Massa específica real

A massa cerâmica estudada apresentou valor de massa específica real de 2,43  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Este resultado mostra que a massa apresenta valor típico para composições empregadas na fabricação de placas cerâmicas para revestimentos (BARBA et al., 1997).

#### 4.2.5 Limites de Atterberg

Os limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) foram determinados com o objetivo de verificar para a composição estudada a faixa apropriada à moldagem por extrusão. Observou-se que a massa cerâmica apresentou LL=29,56 %, LP=20,05 % e IP=9,51%. Segundo VIEIRA et al., (2000) a composição encontra-se na faixa apropriada à moldagem por extrusão, cujo limite de plasticidade está compreendido entre 15-30%, podendo ser classificada como medianamente plástica por apresentar IP na faixa de  $7 < IP < 15$ .

#### 4.2.6 Difração de raios-X

Na Figura 4.2 estão apresentados os difratogramas de raios-X da massa cerâmica utilizada neste trabalho.

Pode-se observar para a massa cerâmica seca a 110°C, picos característicos da presença de caulinita, quartzo, ilita, calcita e dolomita. A presença dessas fases é de fundamental importância na composição da massa cerâmica empregada na fabricação de revestimentos cerâmicos. Elas exercem funções ao longo de todo o processamento cerâmico, influenciando nas características finais destes produtos.

Analisando o difratograma da massa sinterizada a 1000°C, observa-se a presença de picos característicos do quartzo, anortita e ghelenita. As reações entre o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), a sílica e a alumina procedentes da decomposição dos minerais argilosos constituem as fases anortita ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) e ghelenita ( $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ). Para a massa cerâmica sinterizada na faixa de 1050°C e 1150°C, além do quartzo, anortita e ghelenita, observa-se o aparecimento de picos característicos da mulita. Segundo BARBA et al., (1997), quando se utilizam argilas para fabricar produtos cerâmicos, a presença de mulita no produto final indica que este foi queimado de maneira adequada. A mulita é quimicamente resistente e sua estrutura cristalina proporciona uma melhoria na resistência mecânica das peças cerâmicas.

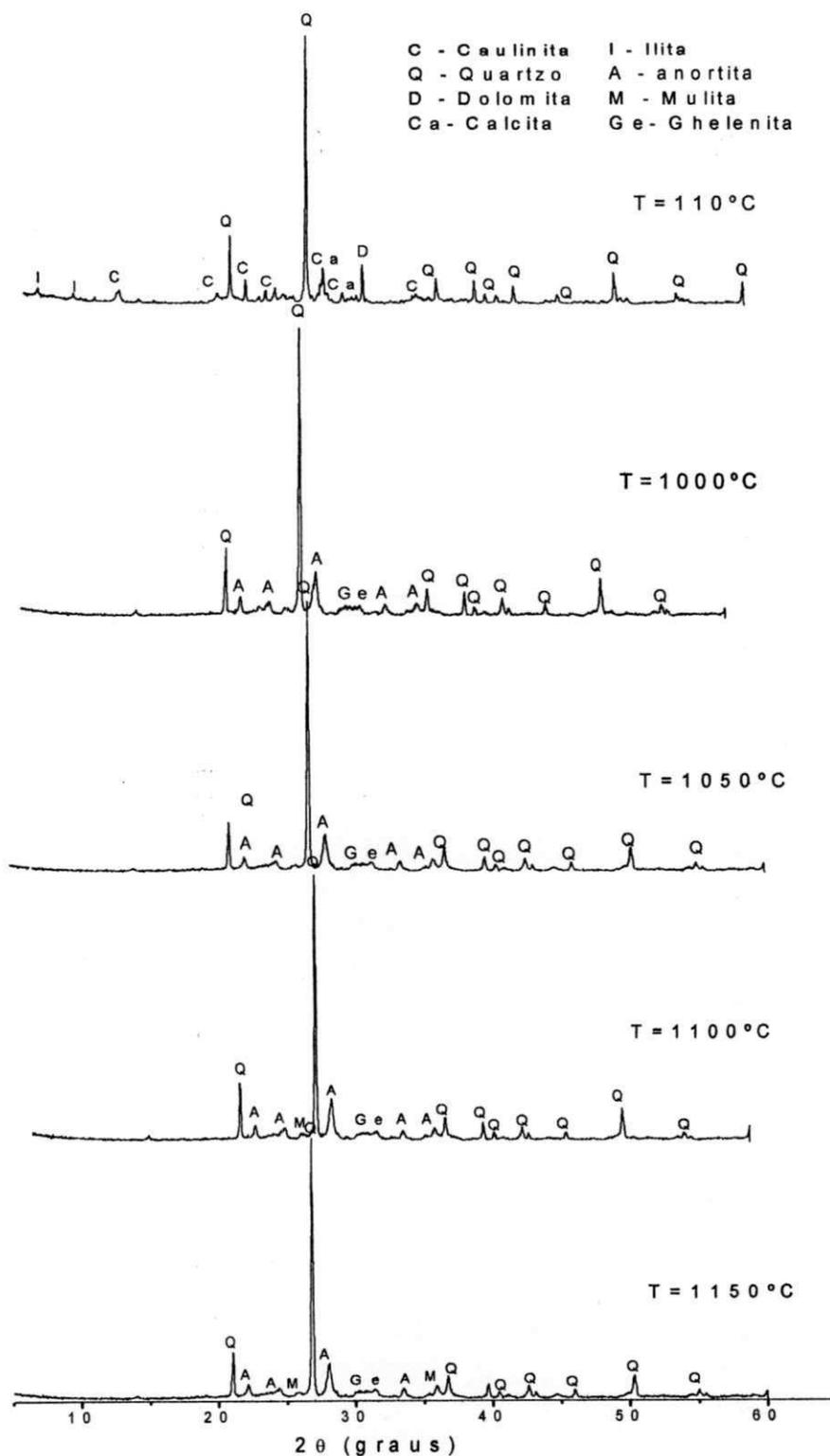


Figura 4.2 – Difração de raios-X da massa cerâmica seca 110°C e sinterizada a 1000°C, 1050°C, 1100°C e 1150°C.

### 4.3 Avaliação dos parâmetros de processamento estudados

#### 4.3.1 Efeito do teor de umidade sobre as propriedades físico-mecânicas de placas cerâmicas laminadas

Na Figura 4.3 (Tabelas 4.3 e 4.4 anexas), estão apresentados os resultados da absorção de água e porosidade aparente em função da temperatura e do teor de umidade da massa.

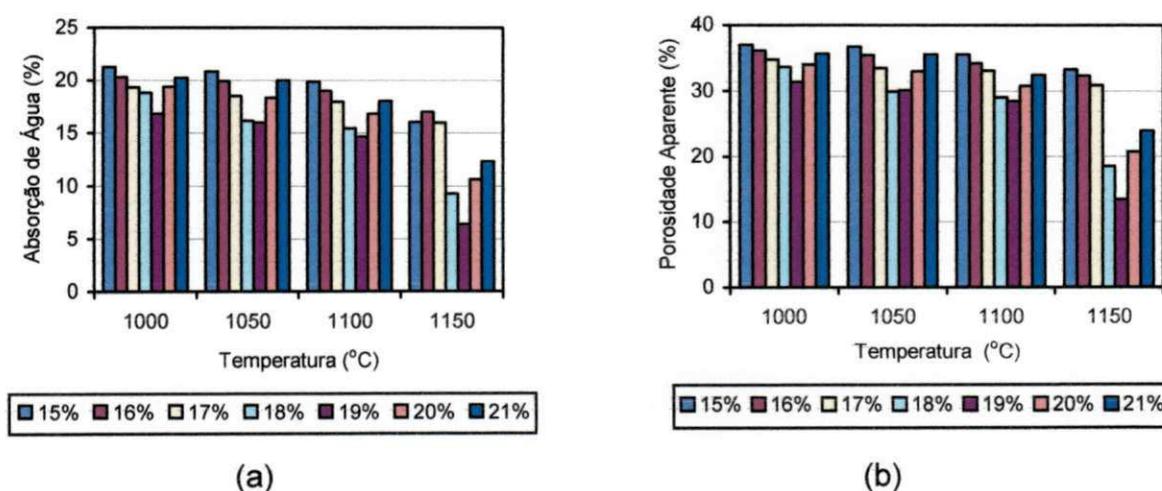


Figura 4.3 – (a) Absorção de água e (b) porosidade aparente em função da temperatura e do teor de umidade da massa.

Mediante a análise dos resultados, observa-se uma diminuição da absorção de água e da porosidade aparente para os teores de umidade inferiores a 19% e um aumento para teores de umidade superiores a 19%. Este fato pode ser atribuído à deformação plástica dos grânulos, que exercem influência sobre o comportamento mecânico dos aglomerados, provocando melhorias no processo de compactação. Segundo BOSCHI (2000), a água atua como plastificante/lubrificante da argila, facilitando a reordenação das partículas favorecendo maior empacotamento, fatores que tendem a reduzir a quantidade de poros. Por outro lado, com o aumento excessivo do teor de umidade, aumenta a relação volume de líquido/volume de

poros também chamado grau de saturação, fato que reduz o grau de avanço da compactação.

Outra importante propriedade analisada foi a retração linear de queima. Ela é fundamental na determinação das dimensões do produto final. Na Figura 4.4 (Tabelas 4.5 e 4.6 anexas), estão apresentados os resultados da retração linear e da massa específica aparente em função da temperatura e do teor de umidade da massa. Como se pode observar, os resultados obtidos mostram que houve um pequeno aumento da retração seguida de um decréscimo na faixa entre 18 e 19% de umidade. Acima de 19% observa-se um aumento na retração linear, devido ao excesso de água após o teor ótimo.

Também foi observado um discreto aumento da massa específica aparente com o aumento do teor de umidade, atingindo um valor máximo com 19% de umidade, seguida de um decréscimo com o aumento do teor de umidade. Segundo AMORÓS (2001), o aumento da densidade durante a compactação é uma decorrência da deformação plástica dos grânulos que ao se deformarem passam a ocupar os espaços vazios que havia entre eles, resultando em um maior empacotamento das partículas e conseqüentemente em uma maior densificação.

Na Figura 4.5 (Tabela 4.7 anexa), estão apresentados os resultados do módulo de resistência à flexão em função da temperatura e do teor de umidade da massa. Mediante os resultados, observa-se que o aumento do teor de umidade também exerceu influência sobre a resistência mecânica das placas cerâmicas laminadas, em que a tensão de ruptura à flexão atingiu o valor máximo com 19% de umidade, o que está de acordo com os resultados obtidos para a porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente. Segundo AMORÓS (2001), a água também atua como lubrificante, reduzindo a fricção entre as partículas, resultando em uma compactação mais uniforme. Além dos fatores mencionados anteriormente, o aumento da área de contato entre os grânulos durante o processamento, provavelmente, favoreceu uma maior compactação. De acordo com BATTISTA *et al.*, (1999) quanto maior o teor de umidade, menor é a resistência à flexão, visto que a presença de água tende a separar as partículas e diminuir a força de ligação entre as mesmas. Este comportamento foi observado para as placas laminadas com umidades acima do teor ótimo de 19%.

Comparando esses resultados com as especificações da ABNT NBR 13818, observa-se que as placas laminadas com teores de umidade entre 18% e 19% podem ser classificadas para a temperatura de 1150°C como material semi-poroso (Grupo CII), por apresentarem absorção de água entre 6% e 10% e tensão de ruptura a flexão entre 18MPa e 30MPa.

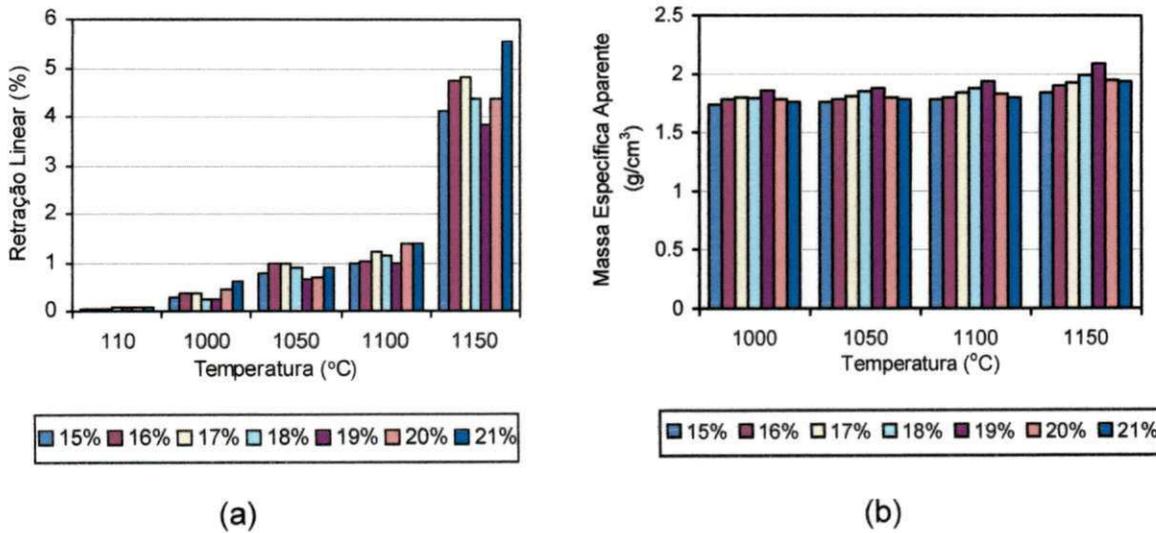


Figura 4.4 – (a) Retração linear e (b) massa específica aparente em função da temperatura e do teor de umidade da massa.

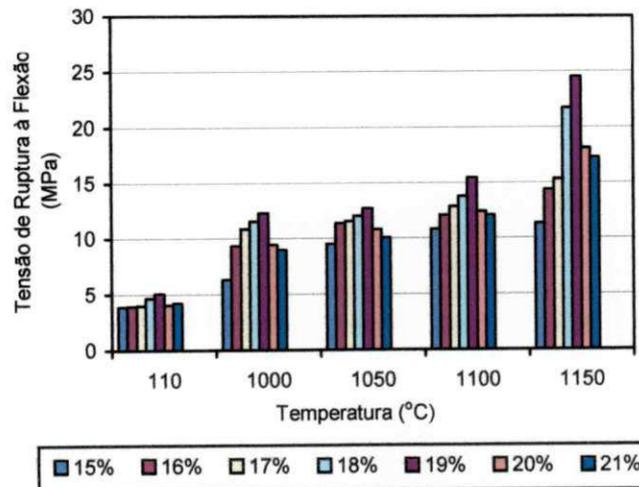


Figura 4.5 – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do teor de umidade da massa.

### 4.3.2 Influência do tempo e velocidade de mistura sobre as propriedades de placas cerâmicas laminadas

Nas Figuras 4.6 e 4.7 (Tabelas 4.8 e 4.9 anexas), estão apresentados os valores referentes à absorção de água e porosidade aparente em função do tempo de mistura (15, 30 e 60 minutos) e da velocidade de mistura (60 e 120 rpm). Os resultados revelam que as placas obtidas com as massas submetidas aos maiores tempos (60 minutos) e velocidades (120 rpm) de mistura apresentaram melhores propriedades. Provavelmente, a aplicação de uma maior taxa de cisalhamento favoreceu a redução dos aglomerados e uma melhor distribuição destes através da massa, gerando após queima, uma distribuição mais uniforme dos poros e, conseqüentemente, uma menor absorção de água. Segundo SUPATI *et al.*, (2000), quanto maior a taxa de cisalhamento, melhor a dispersão dos aglomerados através da massa e maior a uniformidade da massa. De acordo com SANTANA (2002), o aumento no tempo de mistura associado à aplicação de uma alta taxa de cisalhamento favorece a dispersão dos aglomerados através da massa e a obtenção de uma massa mais homogênea.

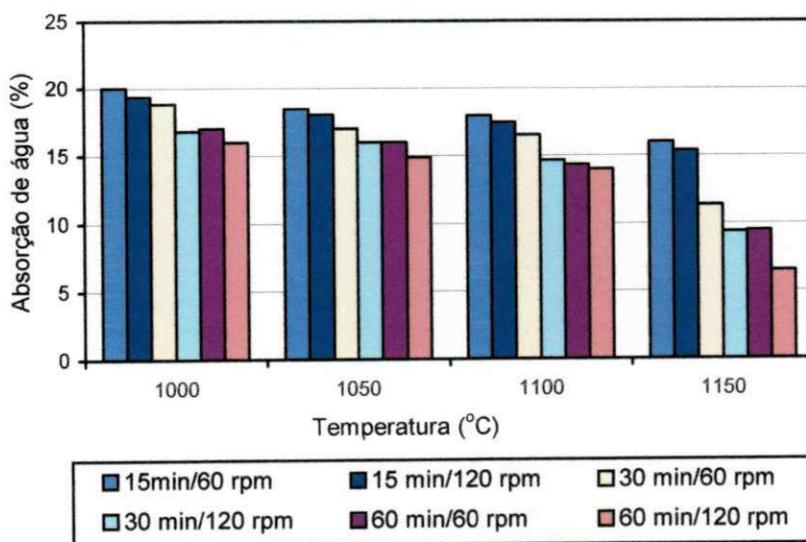


Figura 4.6 – Absorção de água em função da temperatura e do tempo e velocidade de mistura.

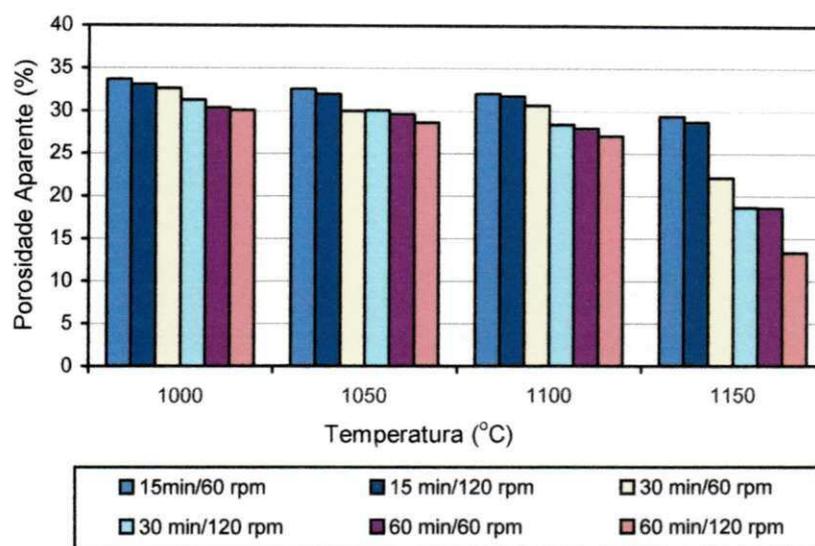


Figura 4.7 – Porosidade aparente em função da temperatura e do tempo e velocidade de mistura.

Nas Figuras 4.8 e 4.9 (Tabelas 4.10 e 4.11 anexas), estão apresentados os resultados da retração linear de queima e da massa específica aparente em função da temperatura, do tempo e da velocidade de mistura. Pode-se observar um discreto aumento da massa específica aparente com o aumento do tempo e da velocidade de mistura. Provavelmente o aumento da velocidade ocasionou a quebra dos aglomerados, favorecendo um maior empacotamento das partículas e em consequência uma maior densificação. Também foi observada uma diminuição da retração linear das placas laminadas com o aumento do tempo e da velocidade de mistura.

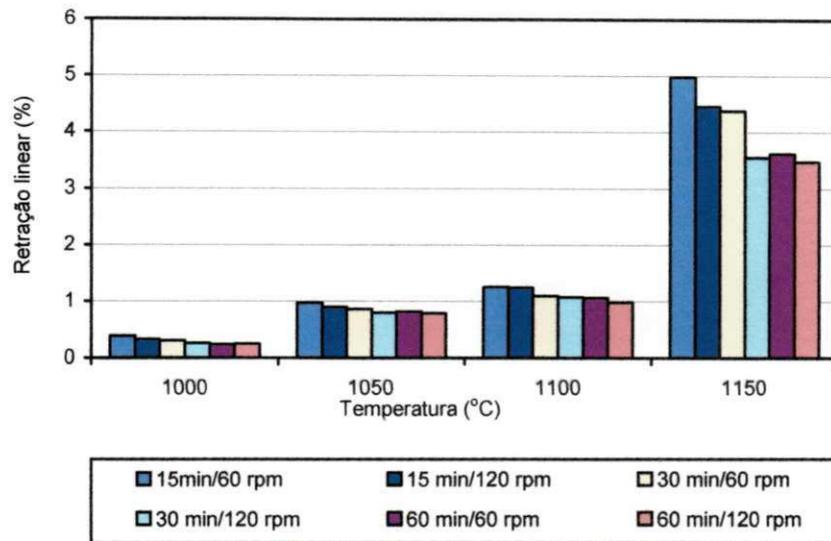


Figura 4.8 – Retração linear em função da temperatura, do tempo e da velocidade de mistura.

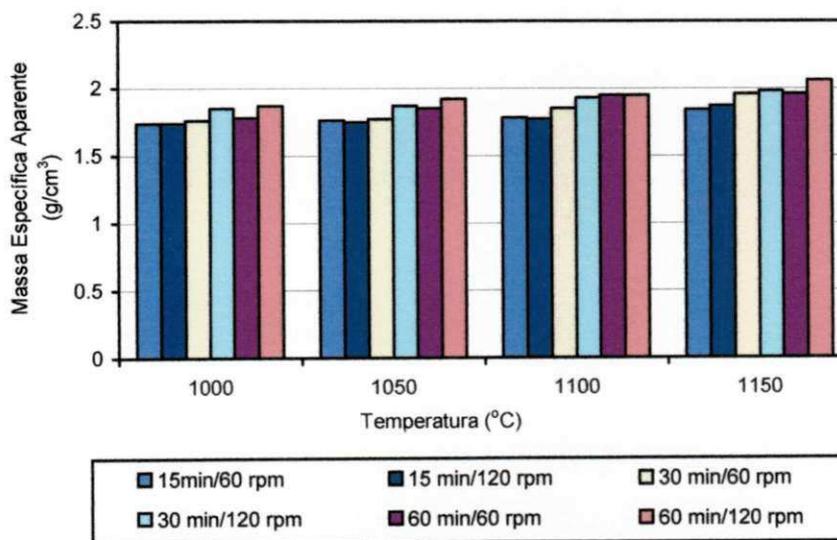


Figura 4.9 – Massa específica aparente em função da temperatura, do tempo e da velocidade de mistura.

Na Figura 4.10 (Tabela 4.12 anexa), estão apresentados os resultados do módulo de resistência à flexão em função da temperatura e do tempo e velocidade de mistura. Através dos resultados pode-se observar um pequeno aumento da resistência mecânica com o aumento do tempo e velocidade de mistura em toda a faixa de temperatura estudada. Além dos fatores mencionados anteriormente, o aumento na velocidade e no tempo de mistura, possibilitou a obtenção de uma massa mais homogênea, contribuindo para a conformação de placas com uma distribuição mais uniforme de tamanho e da quantidade de poros e fissuras, fatos que contribuem para o aumento da resistência mecânica.

Uma análise conjunta dos resultados apresentados mostra que as diferenças nos valores obtidos são mais acentuadas para as placas sinterizadas a temperaturas acima de 1150°C, devido ao maior grau de sinterização, responsável pelo fechamento dos poros.

Comparando esses resultados com as especificações da ABNT NBR 13818, observa-se que as placas laminadas com as massas submetidas aos maiores tempos e velocidades de mistura podem ser classificadas para a temperatura de 1150°C como material semi-poroso (Grupo CII), por apresentarem valores da tensão de ruptura a flexão entre 18MPa e 30MPa e absorção de água entre 6% e 10%.

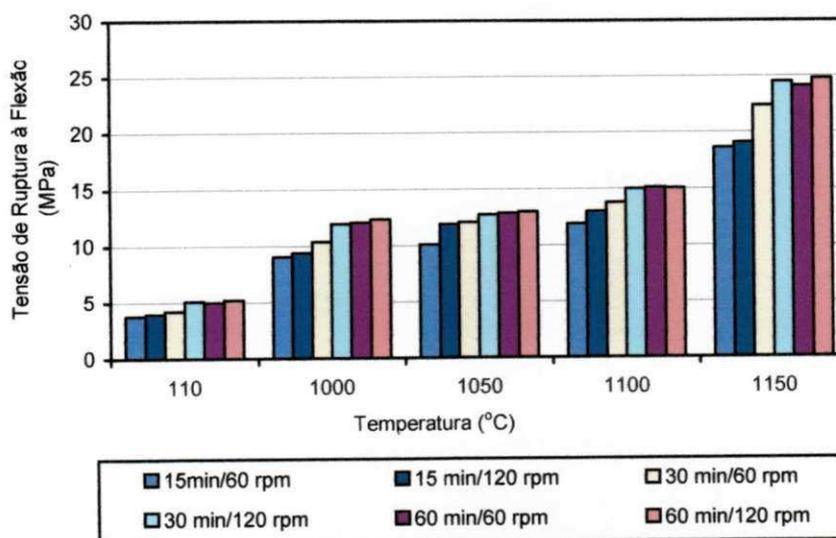


Figura 4.10 – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do tempo e velocidade de mistura.

### 4.3.3 Influência da velocidade de laminação e do diâmetro dos rolos laminadores sobre a compactação de placas cerâmicas

Na Figura 4.11 (Tabela 4.13 anexas), estão apresentados os resultados da retração linear de queima em função da temperatura para as diferentes velocidades de laminação estudadas (10rpm e 110rpm). Observa-se que para cada temperatura de queima houve uma menor retração linear para as placas compactadas com menor velocidade de laminação. Este comportamento pode ser atribuído ao maior tempo de aplicação da pressão, o que provavelmente favoreceu um maior empacotamento das partículas, que alcançaram posições mais estáveis, influenciando positivamente sobre a estabilidade dimensional.

Na Figura 4.12 (Tabela 4.14 anexa), são mostrados os valores da retração linear de queima em função da temperatura para os diâmetros estudados (12,5 cm e 6,0 cm). Observa-se uma discreta diminuição da retração linear para as placas compactadas com o maior diâmetro. Cilindros com maior diâmetro provavelmente permitem uma maior área de contato na região do “NIP”, proporcionando à massa uma maior pressão, favorecendo uma maior compactação .

Na Figura 4.13 (Tabela 4.15 anexa), são apresentados os valores da absorção de água em função da temperatura para as velocidades estudadas. Com o aumento da velocidade de laminação, verificou-se um sensível aumento da absorção de água que pode estar relacionado com a menor compactação, ou seja, o tempo de aplicação da pressão foi insuficiente para ocasionar um melhor reordenamento e empacotamento das partículas e favorecer o escape do ar presente na massa. Segundo JOHANSON (1984), a velocidade de laminação pode afetar significativamente a interação entre a pressão de compactação e o material compactado. Geralmente uma compactação de qualidade inferior ocorre quando da aplicação de uma elevada velocidade de laminação. Segundo AMORÓS (2001), a velocidade com que a carga é aplicada, bem como o tempo de permanência da carga, exerce um grande efeito na saída dos gases durante a compactação.

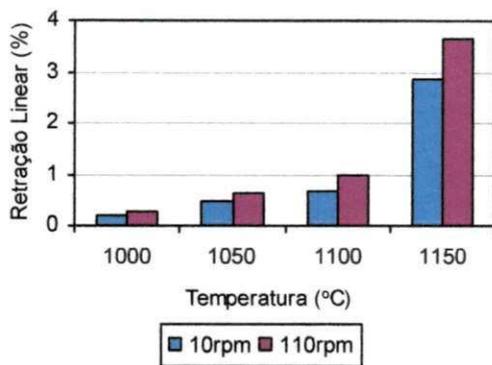


Figura 4.11 - Retração linear em função da temperatura e da velocidade de laminação.

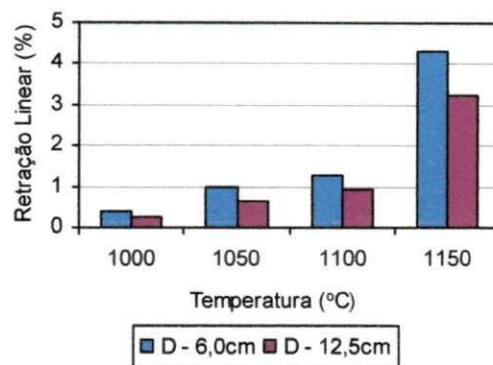


Figura 4.12 - Retração linear em função da temperatura e do diâmetro dos rolos laminadores.

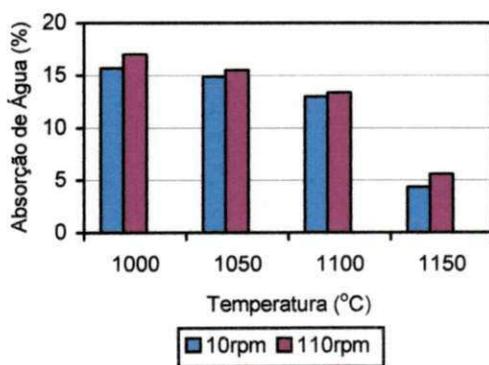


Figura 4.13 - Absorção de água em função da temperatura e da velocidade de laminação.

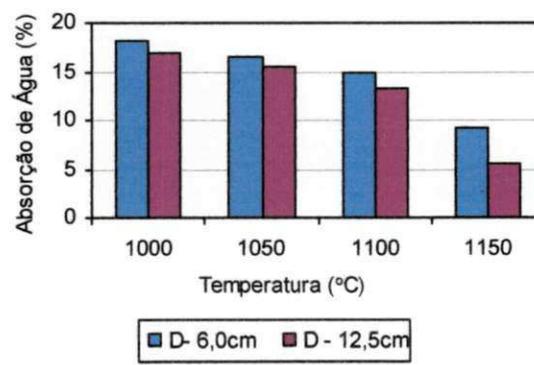


Figura 4.14 - Absorção de água em função da temperatura e do diâmetro dos rolos laminadores.

Na Figura 4.14 acima, (Tabela 4.16 anexa), são apresentados os valores da absorção de água em função da temperatura para os diâmetros estudados. Para o diâmetro de 12,5cm, foi observada uma diminuição da absorção de água, que pode ser atribuída a maior área de contato da superfície do cilindro sobre o compactado, o que provavelmente favoreceu uma melhor distribuição da pressão e, conseqüentemente, uma maior compactação.

Na Figura 4.15 (Tabela 4.17 anexa), são apresentados os resultados da porosidade aparente em função da temperatura de queima para as velocidades estudadas. Da mesma maneira como observado para a absorção de água, as amostras laminadas com a menor velocidade (10rpm) apresentaram menor porosidade aparente, provavelmente devido aos fatores mencionados anteriormente, como maior tempo de aplicação de pressão, que favoreceu um maior empacotamento das partículas durante o processamento.

Na Figura 4.16 (Tabela 4.18 anexa), estão mostrados os valores da porosidade aparente em função da temperatura para os diâmetros estudados. Verificou-se também que as placas laminadas com o maior diâmetro apresentaram uma redução na porosidade aparente, devido aos fatores citados anteriormente, como maior área de contato da superfície do cilindro sobre o compactado, o que favoreceu um maior alinhamento e empacotamento das partículas durante o processamento e, conseqüentemente, uma diminuição da porosidade.

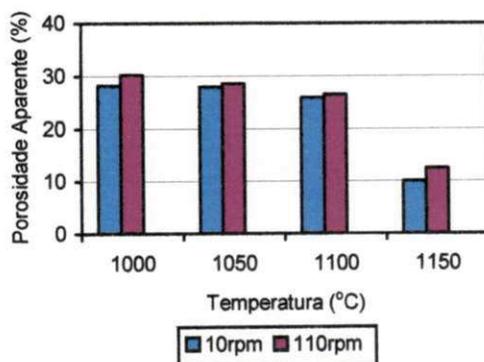


Figura 4.15 - Porosidade aparente em função da temperatura e da velocidade de laminação.

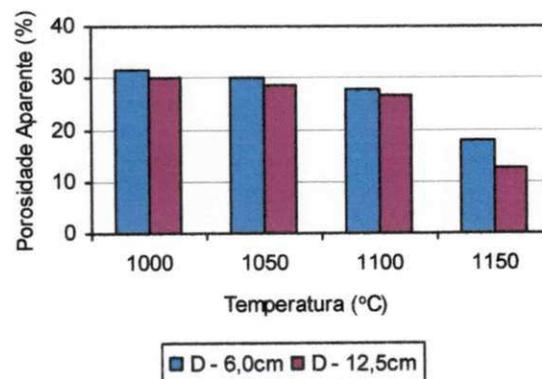


Figura 4.16 - Porosidade aparente em função da temperatura e do diâmetro dos rolos laminadores

Nas Figuras 4.17 e 4.18 (Tabelas 4.19 e 4.20 anexas), são apresentados os valores da massa específica aparente em função da temperatura para as velocidades e diâmetros estudados. Os resultados também indicam acréscimos nos valores da massa específica aparente, o que igualmente pode ser atribuída à

diminuição da presença de porosidade nas placas laminadas com o maior diâmetro e a menor velocidade de laminação.

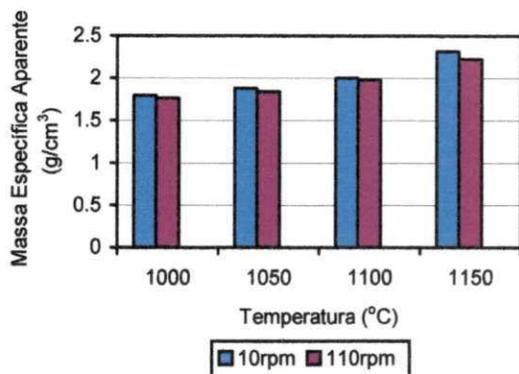


Figura 4.17 - Massa específica aparente em função da temperatura e da velocidade de laminação.

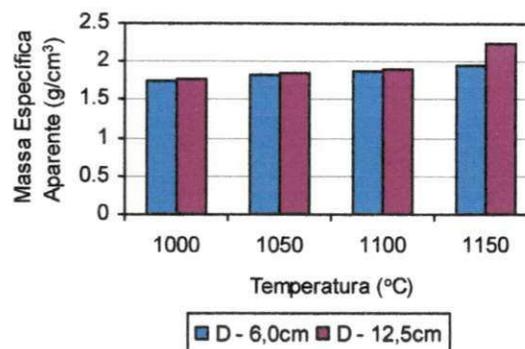


Figura 4.18 - Massa específica aparente em função da temperatura e do diâmetro dos rolos laminadores.

Na Figura 4.19 (Tabela 4.21 anexa), são apresentados os resultados da tensão de ruptura à flexão em função da temperatura para as velocidades estudadas. Verificou-se um aumento na resistência mecânica devido à diminuição da porosidade e ao maior grau de sinterização para maiores temperaturas. As placas laminadas com menor velocidade de laminação apresentaram resistências mais elevadas. Provavelmente, a diminuição da velocidade favoreceu uma melhor distribuição da pressão de compactação sobre a superfície do compacto e facilitou a reordenação das partículas, favorecendo um maior empacotamento e, conseqüentemente, a redução da porosidade e um maior grau de sinterização, provocando melhorias sobre as propriedades físico-mecânicas das placas.

Na Figura 4.20 (Tabela 4.22 anexas), são mostrados os valores da tensão de ruptura à flexão em função da temperatura para os diâmetros estudados. As placas laminadas com maior diâmetro apresentaram resistência mais elevadas. Provavelmente, a maior área de atuação da superfície do cilindro sobre o compactado favoreceu um maior empacotamento das partículas e, conseqüentemente, a redução da porosidade e maior grau de compactação. A orientação preferencial que as partículas assumem durante a conformação e as

características dos típicos movimentos de laminação provocaram melhorias sobre as propriedades mecânicas das placas.

Comparando esses resultados com as especificações da ABNT NBR 13818, observa-se que as placas laminadas podem ser classificadas para a temperatura de 1150°C como material semi-poroso (Grupo CII), por apresentarem valores da tensão de ruptura à flexão entre 18MPa e 30MPa e absorção de água entre 6% e 10%.

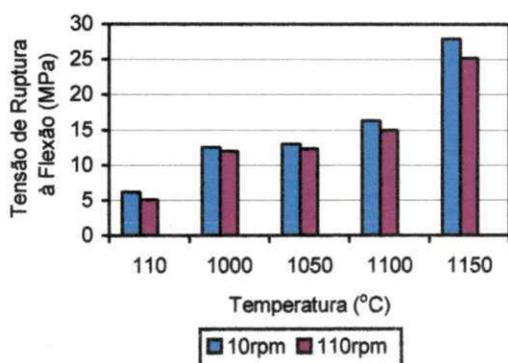


Figura 4.19 - Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e da velocidade de laminação.

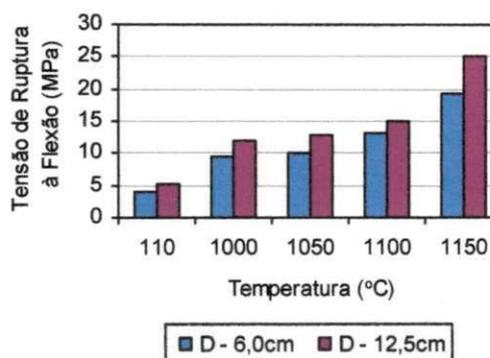


Figura 4.20 - Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do diâmetro dos rolos laminadores.

#### 4.3.4 Influência da abertura entre os rolos laminadores sobre a compactação de placas cerâmicas

Na Figura 4.21 (Tabelas 4.23 e 4.24 anexas), estão apresentados os resultados da absorção de água e da porosidade aparente em função da temperatura para diferentes aberturas de laminação estudadas (3,5 mm e 2,5 mm). As placas produzidas com a massa, submetida a menor abertura de laminação, apresentaram uma diminuição na absorção de água e, conseqüentemente, na porosidade aparente. Isto pode ser atribuído ao aumento da pressão aplicada pelos rolos, que provavelmente favoreceu maior área de contato entre as partículas e provocou a diminuição do volume e tamanho dos poros, tornando a peça mais compacta. Segundo SIMON e GUIGON (2003), a abertura entre os rolos afeta significativamente a tensão de compactação. As tensões aplicadas nos rolos durante

o processo de compactação são influenciadas pelas propriedades do pó, sistema de alimentação e abertura entre os rolos laminadores.

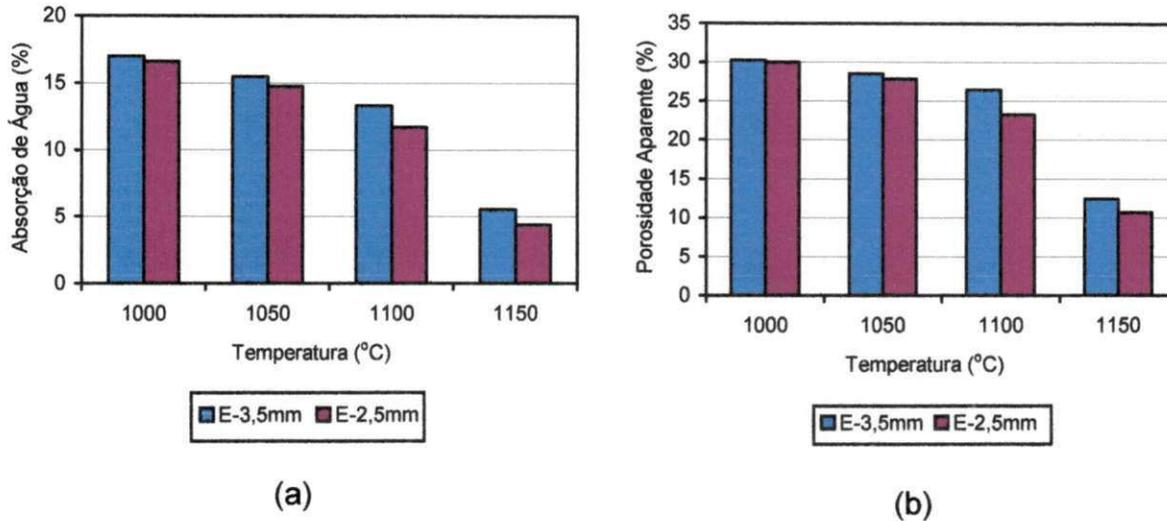


Figura 4.21 – (a) Absorção de água e (b) porosidade aparente em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.

Na Figura 4.22 (Tabela 4.25 e 4.26 anexas), estão apresentados os resultados da retração linear de queima e da massa específica aparente em função da temperatura para as aberturas estudadas. Foi observada uma pequena variação na retração linear para as placas obtidas, a partir das diferentes aberturas de laminação. Provavelmente, a faixa de abertura estudada exerceu pouca influência sobre a estabilidade dimensional das placas. As placas obtidas com as diferentes aberturas de laminação e sinterizadas na temperatura de 1150°C apresentaram uma maior densificação. Isto pode ser atribuído à formação da fase líquida nesta temperatura, que diminui a porosidade e aumenta o grau de densificação da peça.

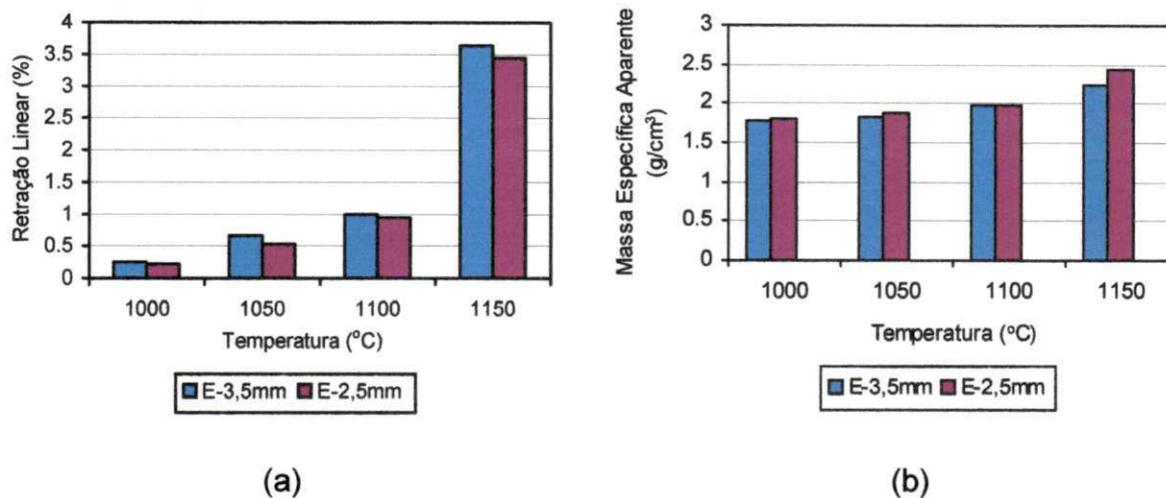


Figura 4.22 – (a) Retração linear e (b) massa específica aparente em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.

Na Figura 4.23 (Tabela 4.27 anexa), estão apresentados os resultados da tensão de ruptura à flexão em função da temperatura para as aberturas estudadas. Observa-se um aumento da resistência mecânica com o aumento da temperatura para as placas obtidas com as diferentes aberturas de laminação estudadas. Observa-se também que as placas obtidas com a abertura de 2,5mm apresentaram um discreto aumento na resistência mecânica. Este comportamento pode estar relacionado a uma maior densificação obtida devido a uma maior pressão aplicada. À medida que se aumenta a compactação com o aumento da pressão, aumenta-se também a coesão entre as partículas, fato que se traduz em um maior grau de densificação e, conseqüentemente, no aumento da resistência mecânica da peça. Comparando esses resultados com as especificações da ABNT NBR 13818, observa-se que as placas laminadas podem ser classificadas para a temperatura de 1150°C como material semi-poroso (Grupo CII), por apresentarem valores da tensão de ruptura à flexão entre 18MPa e 30MPa e absorção de água entre 6% e 10%.

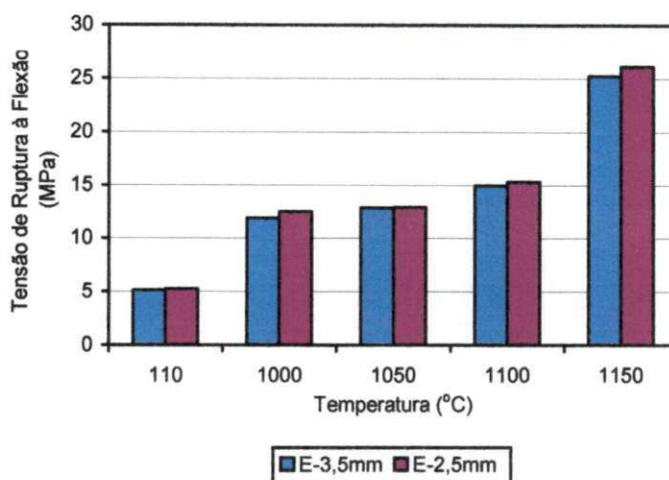


Figura 4.23 – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.

#### 4.3.5 Estudo comparativo entre as propriedades apresentadas por placas cerâmicas obtidas através dos processos de laminação, prensagem e extrusão

Os resultados obtidos através da caracterização físico-mecânica das placas cerâmicas laminadas, prensadas e extrudadas, após as etapas de secagem e queima, serão apresentados a seguir.

Na Figura 4.24 (Tabelas 4.28 e 4.29 anexas), estão apresentados os resultados da absorção de água e porosidade aparente das placas laminadas (PL), extrudadas (PE) e prensadas (PP), em função da temperatura de queima. Uma análise conjunta dos resultados mostra uma diminuição significativa da absorção da água das placas cerâmicas laminadas, quando comparadas com as prensadas e extrudadas em toda a faixa de temperatura estudada. As variáveis da operação (pressão de compactação, teor de umidade) dos diferentes processos exerceram influência sobre esta propriedade. Observa-se que as placas obtidas pelo processo de laminação apresentam menor porosidade. As massas utilizadas no processo de laminação foram submetidas a altas velocidades de mistura. De acordo com SANTANA (2002), a aplicação de uma alta taxa de cisalhamento durante a etapa de mistura favorece a quebra dos aglomerados e a distribuição destes através da massa, ocasionando,

após queima, uma melhor distribuição dos poros e uma redução na quantidade de defeitos e, conseqüentemente, a diminuição na porosidade e absorção de água.

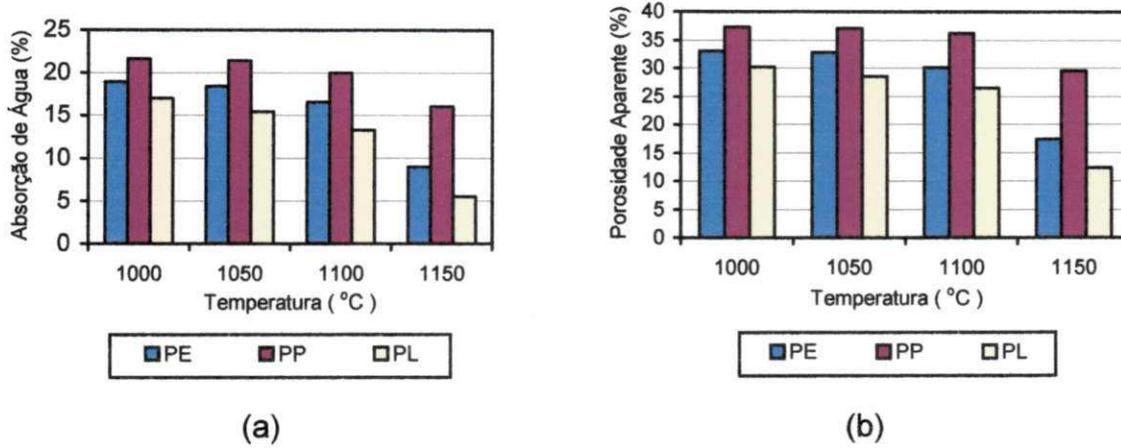


Figura 4.24 – (a) Absorção de água e (b) porosidade aparente em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).

Na Figura 4.25 (Tabela 4.30 anexa), estão apresentados os resultados da retração linear em função da temperatura de queima. Observa-se um aumento na retração com o acréscimo da temperatura para todos os processos estudados. A retração linear depende da densidade, composição da massa e das condições de queima. Observa-se que as placas prensadas apresentaram uma menor retração quando comparadas com as placas laminadas e extrudadas. O baixo teor de umidade de conformação utilizado neste processo favoreceu este comportamento.

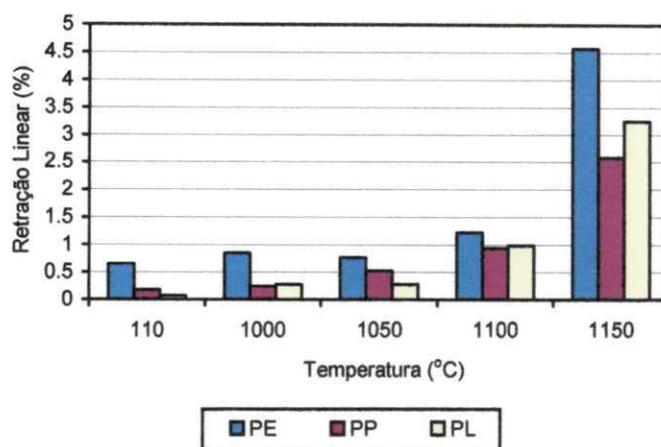


Figura 4.25 – Retração linear em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).

Na Figura 4.26 (Tabela 4.31 anexa), estão apresentados os resultados da massa específica aparente, após queima das placas obtidas pelos processos de laminação, extrusão e prensagem. Observa-se que as placas apresentaram valores crescentes para os processos de prensagem, extrusão e laminação respectivamente. Uma melhor densificação é obtida quando se aplica uma adequada pressão de compactação, a baixa densidade das placas prensadas pode ser atribuída à heterogeneidade na compactação. As placas laminadas apresentaram uma maior densificação, que pode ser atribuída provavelmente à aplicação de uma pressão de compactação uniforme, o que favoreceu uma melhor reordenação e deformação dos aglomerados através da massa, aumentando a área efetiva de contato entre eles, favorecendo a conformação e o empacotamento das partículas. É interessante notar que, apesar dos resultados mostrarem uma maior retração linear para as placas extrudadas, verifica-se que as placas laminadas apresentaram maior massa específica aparente, o que justifica a hipótese de uma maior compactação.

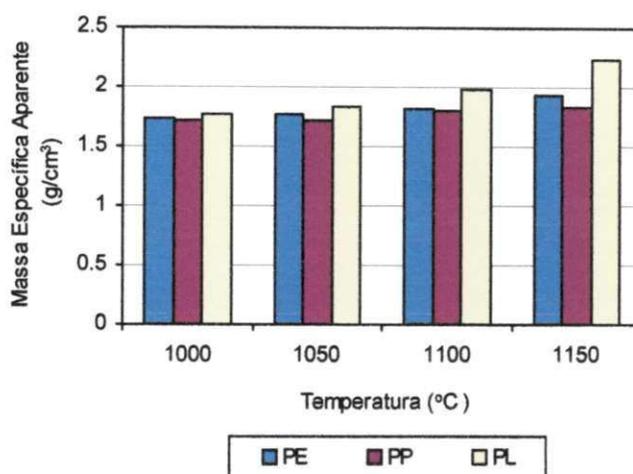


Figura 4.26 – Massa específica aparente em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).

Na Figura 4.27 (Tabela 4.32 anexa), estão apresentados os valores da resistência à flexão em função da temperatura. As placas laminadas e extrudadas apresentaram valores de resistência mecânica a seco, superiores aos das placas prensadas. Foi observado um aumento na resistência, com o acréscimo da temperatura, o que está relacionado com a diminuição da porosidade e maior grau de densificação. As placas laminadas e extrudadas apresentaram resistências mais elevadas. A orientação preferencial das partículas do pó exerceu influências sobre o deslizamento, alinhamento, e empacotamento das partículas, provocando melhorias sobre as propriedades físico-mecânicas das placas laminadas. Segundo GOERENZ *et al.*, (1996), durante o processamento, os típicos movimentos de laminação exercem influência sobre a formação da microestrutura na massa cerâmica, e, mediante estes, podem ser obtidas texturas, que têm efeito positivo sobre as propriedades mecânicas dos produtos a serem fabricados.

Comparando os resultados obtidos com as especificações da ABNT NBR 13818 (1997), observa-se que as placas laminadas e extrudadas podem ser classificadas para a temperatura de 1150°C como material semi-poroso, por apresentarem valores da tensão de ruptura à flexão entre 18MPa e 30MPa e

absorção de água entre 6% e 10%. As placas prensadas podem ser classificadas para a temperatura de 1150°C como material poroso, por apresentarem absorção de água entre 10% e 20% e tensão de ruptura à flexão entre 15MPa e 20MPa.

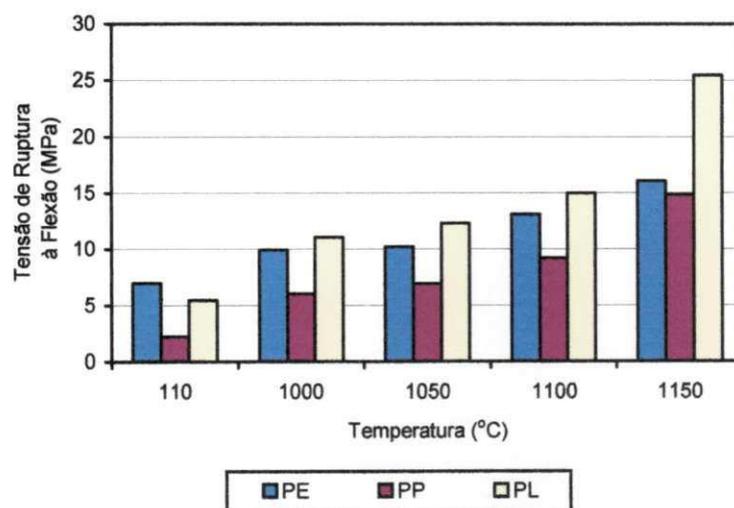


Figura 4.27 – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).

Na Figura 4.28 estão mostrados os corpos-de-prova prensados, extrudados e laminados.

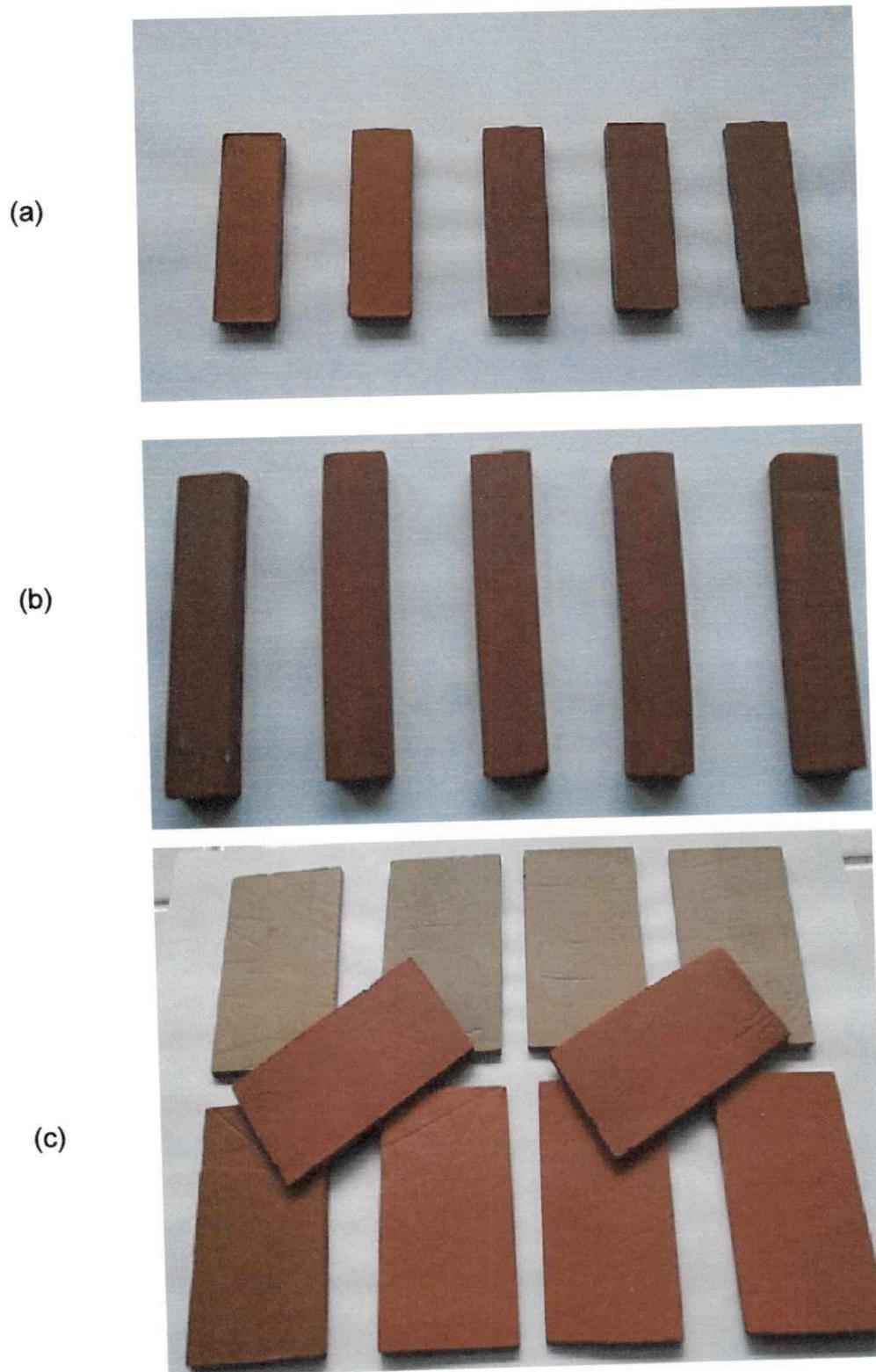


Figura 4.28 – Corpos-de-prova: (a) prensados, (b) extrudados e (c) laminados.

#### 4.3.6 Estudo comparativo entre as propriedades apresentadas por placas cerâmicas laminadas e placas cerâmicas prensadas na indústria

Nas Figuras 4.29 e 4.30 (Tabelas 4.33 e 4.34 anexas), estão apresentados os resultados da absorção de água e porosidade aparente em função da temperatura das placas prensadas na indústria (PPI) e laminadas (PL). As placas laminadas apresentaram menor absorção em toda a faixa de temperatura estudada. Este fato pode ser atribuído a uma distribuição de pressão mais uniforme o que favoreceu uma maior compactação e, conseqüentemente, a diminuição da porosidade.

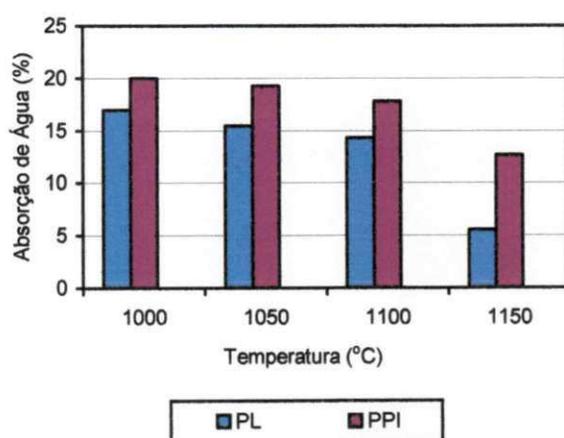


Figura 4.29 – Absorção de água em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria).

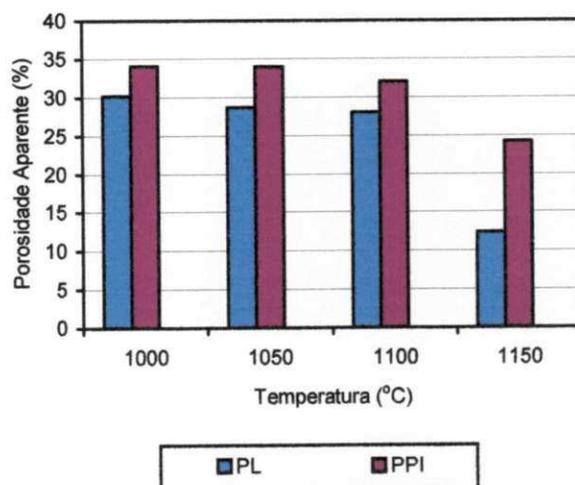


Figura 4.30 – Porosidade aparente em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria).

Na Figura 4.31 (Tabela 4.35 anexa), estão apresentados os resultados da retração linear de queima em função da temperatura das placas prensadas na indústria e laminadas. Um aumento na retração linear é verificado com o aumento da temperatura. As placas prensadas apresentaram uma menor retração quando comparadas com as placas laminadas. Isso pode ser atribuído ao menor grau de sinterização, o que se reflete em redução da retração. O baixo teor de umidade de conformação utilizado neste processo também favoreceu este comportamento.

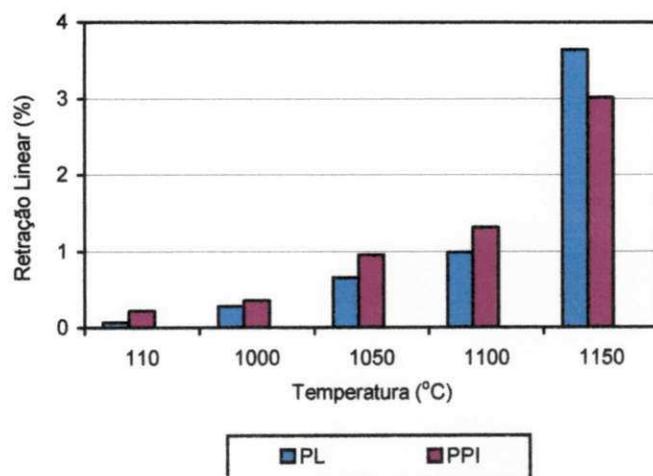


Figura 4.31 – Retração linear em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria).

Na Figura 4.32 (Tabela 4.36 anexa), estão apresentados os resultados da resistência à flexão das placas prensadas na indústria e laminadas. As placas laminadas apresentaram uma maior resistência em toda a faixa de temperatura estudada provavelmente devido aos fatores mencionados anteriormente como as características dos típicos movimentos de laminação que exerceram influências sobre o deslizamento, alinhamento e empacotamento das partículas, provocando melhorias sobre as propriedades físico-mecânicas das placas laminadas. O aumento na resistência da ordem de 30% para as placas laminadas também se deve ao alinhamento das partículas, poros e fissuras no sentido transversal em relação à aplicação da tensão de ruptura à flexão.

Comparando os resultados obtidos com as especificações da ABNT NBR 13818 (1997), observa-se que as placas laminadas podem ser classificadas para a temperatura de 1150°C como material semi-poroso, por apresentarem valores da tensão de ruptura à flexão entre 18MPa e 30MPa e absorção de água entre 6% e 10%. As placas prensadas podem ser classificadas para a temperatura de 1150°C como material poroso, por apresentarem absorção de água entre 10% e 20% e tensão de ruptura à flexão entre 15MPa e 20MPa.

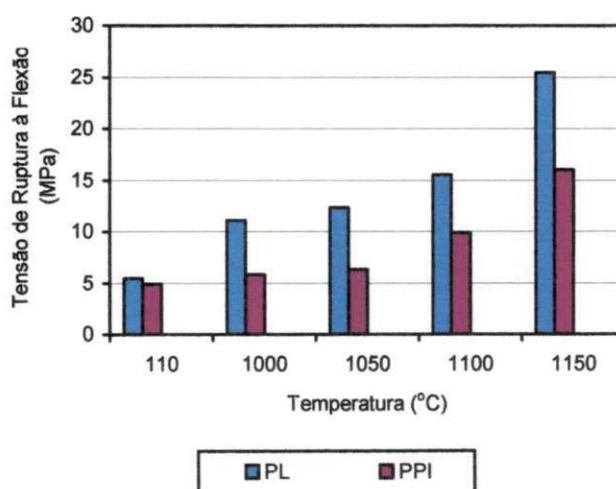


Figura 4.32 – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria).

#### 4.3.7 Efeito de uma pré-extrusão seguida de laminação sobre as propriedades de placas cerâmicas

Neste etapa do trabalho foram produzidas placas cerâmicas laminadas com massas submetidas a uma extrusão seguida de laminação. Os resultados obtidos através da caracterização física e mecânica das placas cerâmicas serão apresentados a seguir.

Na Figura 4.33 (Tabelas 4.37 e 4.38 anexas), estão apresentados os resultados da absorção de água e porosidade aparente em função da temperatura. A comparação dos resultados indica uma diminuição da porosidade para as placas obtidas com as massas submetidas a uma pré-extrusão seguida de laminação. A extrusão foi feita sobre vácuo e esse comportamento pode ser atribuído à

desaeração obtida durante a etapa de extrusão. Segundo CHIARA *et al.*, (2000), durante toda a fase de preparação da massa muito ar permanece aprisionado entre as várias partículas, o que implica irregularidades na peça. A desaeração confere uma maior coesão e uma maior aderência da água às partículas, melhorando a plasticidade e a homogeneização da massa.

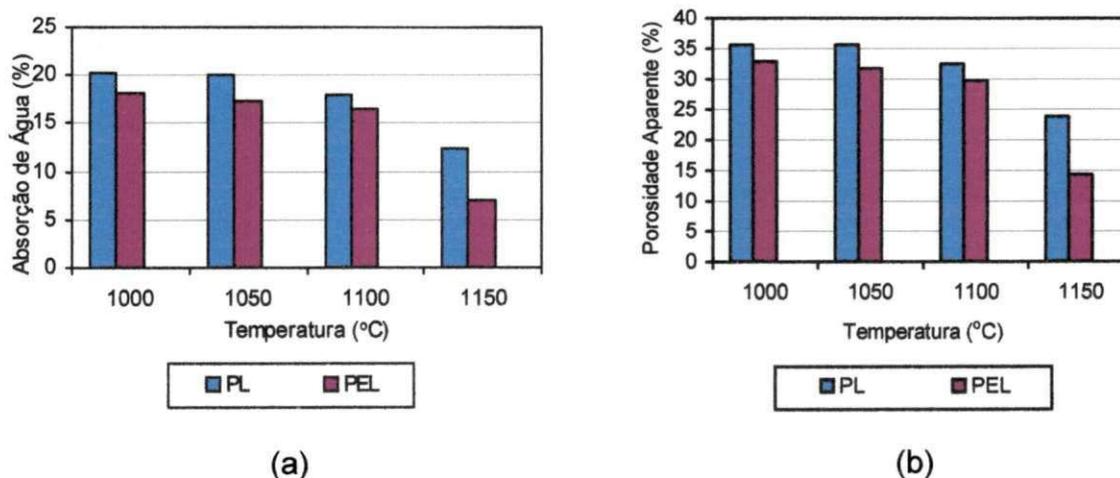


Figura 4.33 – (a) Absorção de água e (b) porosidade aparente em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).

Na Figura 4.34 (Tabela 4.39 e 4.40 anexas), estão apresentados os resultados da retração linear e da massa específica aparente em função da temperatura. Analisando os resultados, observa-se que a melhoria da plasticidade e homogeneidade da massa favoreceu um maior empacotamento das partículas e uma maior densificação. Este parâmetro não afetou significativamente a estabilidade dimensional das placas. É interessante observar que apesar das placas só laminadas apresentarem uma maior retração linear, verifica-se que as placas obtidas com as massas extrudadas e depois laminadas apresentaram uma maior massa específica aparente, o que confirma uma maior compactação para estas últimas, inclusive com menor absorção de água e porosidade aparente.

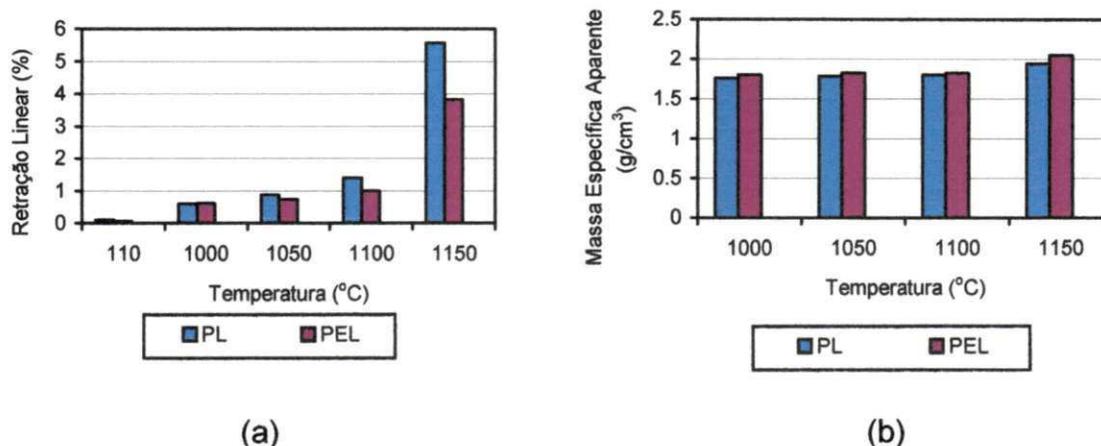


Figura 4.34 - (a) Retração linear e (b) massa específica aparente em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placas extrudada e laminada).

Na Figura 4.35 (Tabela 4.41 anexa), estão mostrados os resultados da tensão de ruptura à flexão em função da temperatura. Mediante os resultados obtidos, observa-se um aumento significativo na resistência mecânica das placas obtidas com as massas pré-extrudadas, quando comparadas com as placas obtidas com as massas laminadas. De acordo com MANTLE *et al.*, (2003), a fragilidade estrutural do compactado pode ser controlada pelo uso de um desaeração no processo, durante a etapa de alimentação dos rolos. A orientação preferencial que as partículas do pó assumem durante a extrusão devido a maior coesão e aderência da água às partículas e às características dos típicos movimentos de laminação exerceu influências sobre o deslizamento, alinhamento, e empacotamento das partículas e sobre a formação da microestrutura, provocando melhorias sobre as propriedades físico-mecânicas das placas.

Comparando esses resultados com as especificações da ABNT NBR 13818 (1997), observa-se que as placas obtidas com as massas extrudadas e laminadas podem ser classificadas para a temperatura de 1150°C como material semi-poroso (Grupo CII), por apresentarem valores da tensão de ruptura à flexão entre 18MPa e 30MPa e absorção de água ente 6% e 10%.

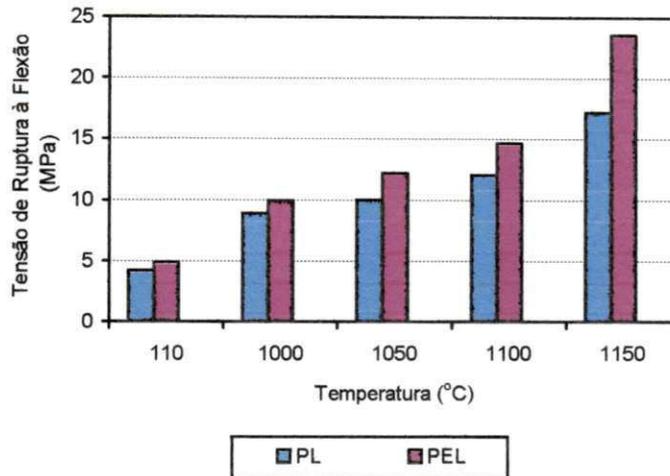


Figura 4.35 – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).

#### 4.3.8 Influência da adição de amido solúvel no processamento e propriedades de placas cerâmicas laminadas

A Figura 4.36 (Tabela 4.42 anexa) apresenta os resultados da retração linear em função da temperatura para as formulações estudadas. Observa-se uma diminuição da retração linear com a adição do aditivo, para todas as formulações estudadas. Esta redução pode ser atribuída à diminuição da água utilizada para conformação e ao melhor empacotamento das partículas, favorecendo uma melhor estabilidade dimensional às placas.

Os resultados da absorção de água e da porosidade aparente em função da temperatura para as formulações estudadas estão apresentados nas Figuras 4.37 e 4.38 (Tabelas 4.43 e 4.44 anexas). Observa-se que ocorreu um aumento dos valores da absorção de água e da porosidade aparente com o aumento do teor de aditivo adicionado à massa cerâmica. Isso pode ser atribuído a uma distribuição não homogênea do aditivo através da massa, favorecendo, durante a queima, um aumento na quantidade de poros e uma distribuição de porosidade não homogênea, favorecendo o aumento da porosidade aparente e da absorção de água. Segundo SANTANA (2002), a aplicação de um adequado sistema de mistura e o controle no

tempo e velocidade de mistura favorece uma melhor dispersão dos aditivos de processamento e dos aglomerados através da massa e uma maior uniformidade da composição. Conseqüentemente, o produto queimado apresentará melhor homogeneidade na distribuição dos poros e, portanto, melhores propriedades físicas e mecânicas.

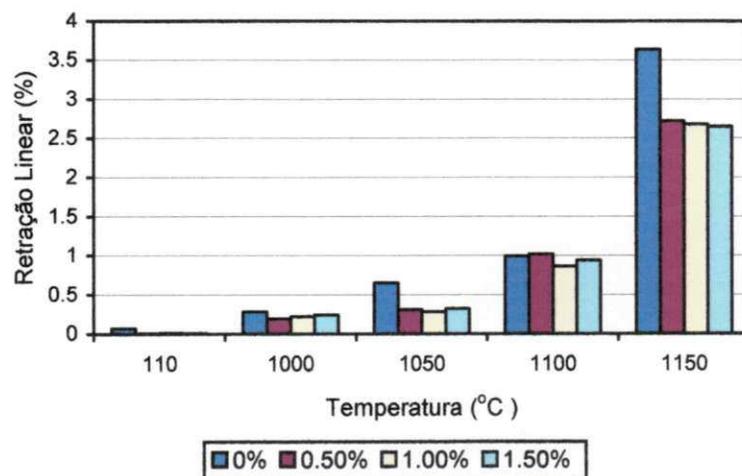


Figura 4.36 - Retração linear em função da temperatura e do teor de aditivo.

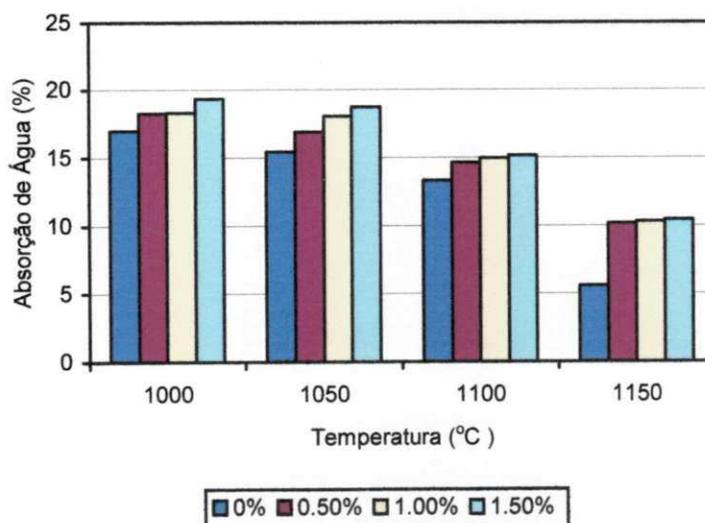


Figura 4.37 – Absorção de água em função da temperatura e do teor de aditivo.

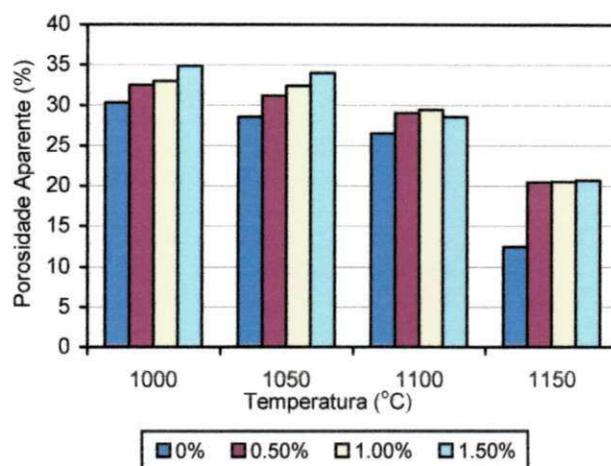


Figura 4.38 – Porosidade aparente em função da temperatura e do teor de aditivo.

A Figura 4.39 (Tabela 4.45 anexa) apresenta os resultados da tensão de ruptura à flexão em função da temperatura para as formulações estudadas. Analisando os resultados, observa-se que a presença do aditivo contribuiu para um aumento na resistência mecânica a seco das placas cerâmicas em até 60%, em comparação com a resistência a seco na ausência de aditivo. Porém, após queima, observa-se uma diminuição da resistência mecânica. Este fato pode estar relacionado com o aumento da porosidade gerada com o aumento da quantidade de aditivo adicionado a massa. Segundo DUTRA *et al.*, (2003), com o aumento da quantidade do material orgânico a massa, aumenta a quantidade de poros no material, diminuindo a densidade aparente e a resistência do material.

Comparando esses resultados com as especificações da ABNT NBR 13818, observa-se que as placas laminadas podem ser classificadas para a temperatura de 1150°C como material semi-poroso (Grupo CII), por apresentarem valores da tensão de ruptura à flexão entre 18MPa e 30MPa. Com relação à absorção de água, as placas cerâmicas podem ser classificadas para a temperatura de 1150°C como material poroso (Grupo CIII), por apresentarem valores maiores do que 10%.

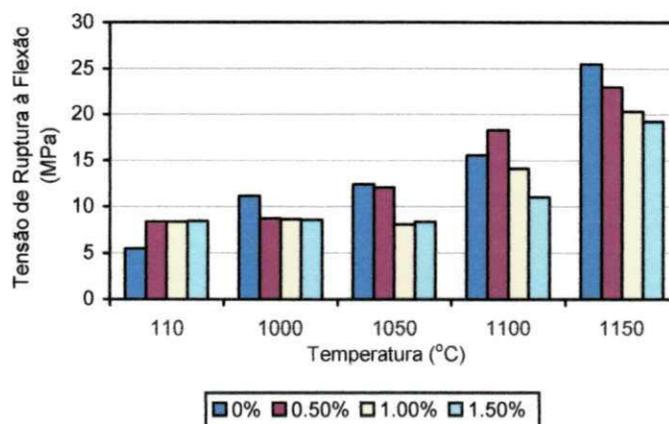


Figura 4.39 – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do teor de aditivo.

#### 4.3.9 Análises da superfície de fratura de placas cerâmicas prensadas, extrudadas e laminadas

No estudo dos materiais cerâmicos, a análise da microestrutura é empregada para explicar diferentes propriedades e diferentes aplicações para os materiais. A microestrutura das peças cerâmicas depende da composição química e mineralógica das matérias-primas e do processo de fabricação. As microestruturas podem ser caracterizadas pelo tipo, proporção e composição das fases presentes e pela forma, tamanho, distribuição e orientação dos grãos.

A análise da superfície de fratura é muito importante na determinação dos fatores que podem ter proporcionado o rompimento de uma determinada peça. Segundo VARNER *apud* SANTANA (2002), através da análise da superfície de fratura, pode-se localizar a origem da fratura, determinar a direção da propagação de trincas, deduzir o estado de tensão no momento da fratura, como também observar interações entre trincas, inclusões, grãos, e assim por diante.

Na Figura 4.40 são apresentadas as micrografias da superfície da fratura de placas cerâmicas prensadas, extrudadas e laminadas submetidas à secagem a 110°C. De um modo geral, as micrografias revelam a presença de poros e trincas responsáveis pela fratura das placas. O aspecto da superfície de fratura da placa laminada revela a presença de trincas com orientação preferencial, provavelmente

causada pela atividade dos rolos, que influenciam no deslizamento das camadas do material durante o processo de compactação, favorecendo o alongamento dos poros.

Na Figura 4.41 são apresentadas as micrografias da superfície de fratura de placas cerâmicas prensadas, extrudadas e laminadas, queimadas a 1150°C. De um modo geral, as micrografias também revelam a presença de poros e trincas. A superfície de fratura da placa obtida através do processo de laminação apresenta canais de poros alongados e direcionados. Esse comportamento pode ser atribuído aos típicos movimentos de laminação que influenciam no deslizamento das camadas do material durante o processamento, favorecendo a orientação preferencial dos poros. Segundo AMORÓS et al., (1996) a origem da ruptura dos materiais cerâmicos pode ser devido à presença de trincas que são originadas durante as etapas de processamento ou durante a realização do teste de resistência mecânica. A redução do tamanho e quantidade destes defeitos é fundamental para promover um aumento na resistência à fratura das placas cerâmicas o que sugere um maior controle no processo de conformação.

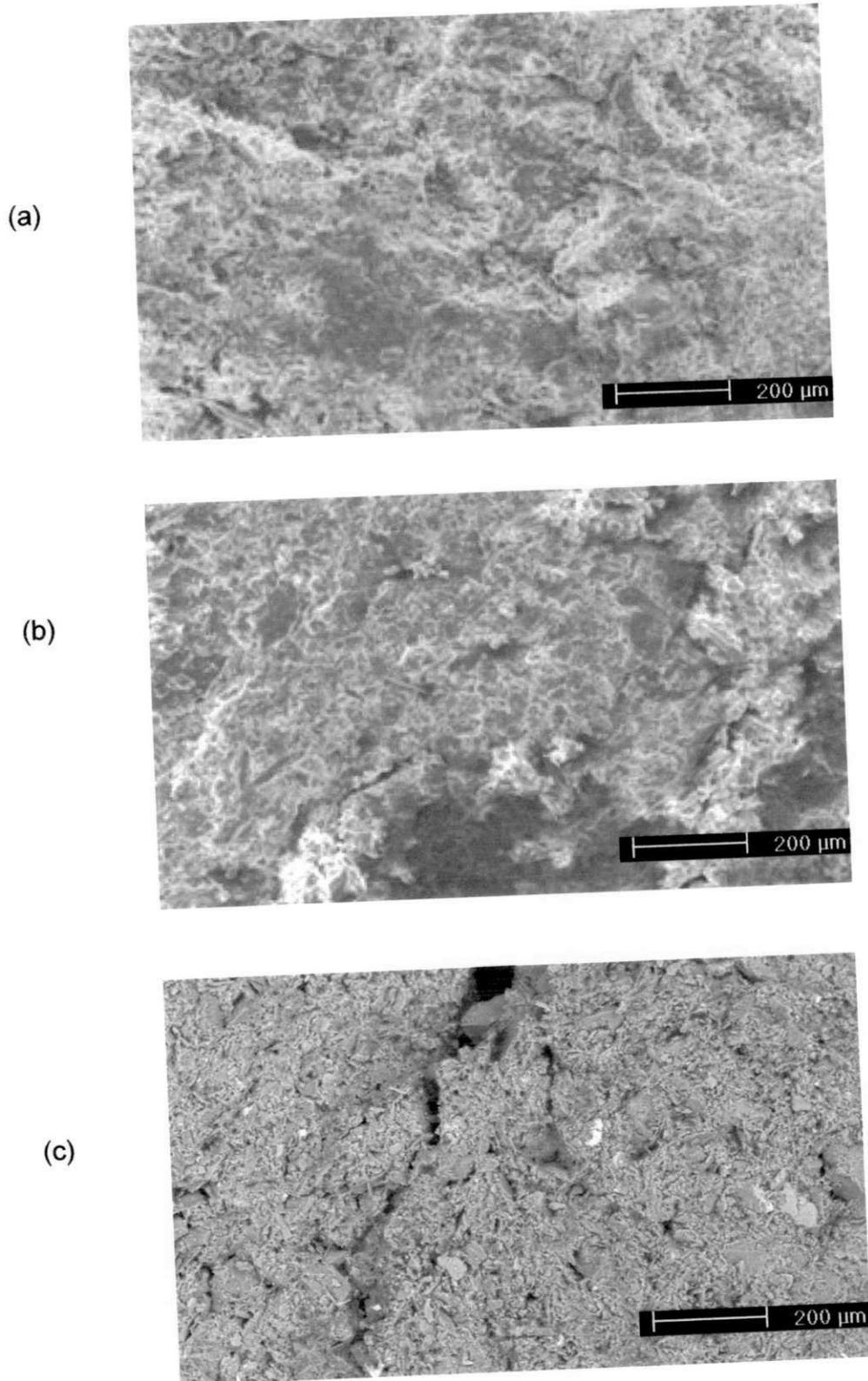


Figura 4.40 – Micrografias das superfícies de fratura das placas cerâmicas: (a) prensadas, (b) extrudadas e (c) laminadas, secas a 110°C.

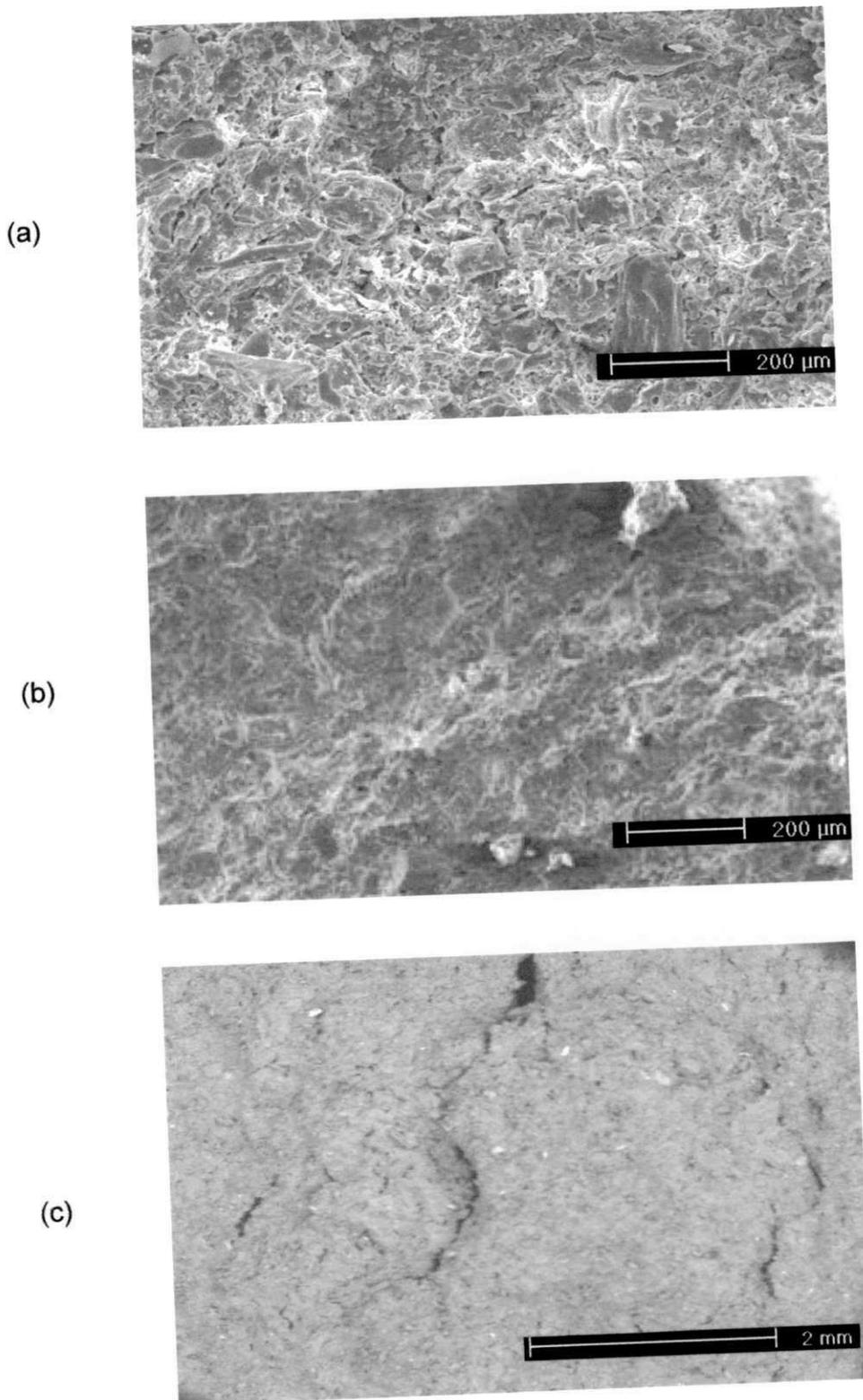


Figura 4.41 – Micrografias das superfícies de fratura de placas cerâmicas: (a) prensadas, (b) extrudadas e (c) laminadas, queimadas a 1150°C.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo estudar a influência dos parâmetros de processamento sobre as propriedades físicas e mecânicas de placas cerâmicas laminadas, como também comparar essas propriedades com as apresentadas por placas cerâmicas obtidas através dos métodos convencionais de prensagem e extrusão. Mediante os resultados, conclui-se que:

- i) a composição química da massa cerâmica apresentou um alto teor de sílica e um teor de ferro acima de 5%, sendo indicativo de cores avermelhadas após queima;
- ii) a massa cerâmica apresentou em sua composição mineralógica após secagem a presença de caulinita, quartzo, ilita, dolomita e calcita e após queima picos característicos da anortita, ghelenita e mulita;
- iii) o teor de umidade ótimo da massa foi de 19%, para conformação através do processo de laminação;
- iv) as placas obtidas com massas submetidas aos maiores tempos e velocidades de mistura apresentaram as melhores propriedades. A capacidade de romper os aglomerados, associada ao aumento no tempo de mistura, provavelmente possibilitou uma melhor homogeneização da massa, favorecendo a obtenção de placas com distribuição mais uniforme dos componentes e poros e, conseqüentemente, melhorias nas propriedades físicas e mecânicas das placas cerâmicas produzidas;
- v) a velocidade de laminação, o diâmetro dos rolos e a abertura entre os rolos laminadores foram parâmetros determinantes na melhoria das propriedades físicas e mecânicas das placas cerâmicas laminadas. Os melhores valores em termos de porosidade, absorção de água, módulo de resistência à flexão, retração linear e

massa específica aparente foram obtidos para a utilização de baixas velocidades de laminação, maior diâmetro dos rolos e menor abertura de laminação;

vi) houve diferenças entre as propriedades avaliadas nos diferentes processos de conformação empregados no estudo. A comparação entre os resultados permitiu identificar que as placas obtidas pelo processo de laminação apresentaram as melhores propriedades físico-mecânicas, quando comparadas com as placas obtidas através dos processos de extrusão e prensagem. As placas laminadas apresentaram maior resistência à flexão, menor porosidade e absorção de água em toda a faixa de temperatura estudada;

vii) as placas laminadas apresentaram propriedades físico-mecânicas superiores às prensadas na indústria;

viii) as placas obtidas com as massas submetidas a uma pré-extrusão seguida de laminação apresentaram melhores propriedades físico-mecânicas;

ix) as placas conformadas com as massas aditivadas apresentaram melhores resultados para a retração linear e para o comportamento mecânico a 110°C, quando comparadas com as placas obtidas sem o amido solúvel;

x) as placas laminadas e sinterizadas na temperatura de 1150°C apresentaram propriedades físico-mecânicas dentro da faixa de valores especificados para uso em revestimentos cerâmicos semi-porosos;

xi) a análise da superfície de fratura das placas laminadas revelou a presença de poros e trincas, que representam defeitos para início de fratura das placas cerâmicas, o que sugere a necessidade de um maior controle no processo de conformação.

De um modo geral, o estudo realizado nos permite confirmar que o processo de laminação mostrou-se viável para a obtenção de placas cerâmicas com

espessura reduzida. Através de noções preliminares de laboratório verificou-se que o processo de conformação por rolos é uma técnica promissora na fabricação de placas cerâmicas e que a determinação e o controle dos parâmetros de processamento são decisivos para a obtenção de uma peça laminada de qualidade. Este estudo contribuiu para o aperfeiçoamento da técnica de laminação como um processo inovador e promissor na fabricação de placas cerâmicas.

## SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Os conhecimentos obtidos no desenvolvimento desta pesquisa podem ser ampliados através de novas pesquisas. Abaixo, estão descritas algumas sugestões de estudos futuros que se propõem como extensão deste trabalho de tese.

- 1 – Realização de ensaios em escala piloto industrial, visando identificar com mais precisão as condições ideais para a aplicação do processo de laminação na fabricação de placas cerâmicas;
- 2 – Estudo da influência da incorporação em série de novos pares de rolos sobre a compactação das placas cerâmicas;
- 3 – Determinação da pressão de compactação exercida pelos rolos durante o processo para as diferentes aberturas estudadas;
- 4 – Estudo comparativo entre as placas laminadas obtidas com massas atomizadas e massas granuladas;
- 5 – Estudo da incorporação de outros aditivos e verificação da influência destes sobre a compactação e as propriedades das placas cerâmicas laminadas;
- 6 – Realização de estudos utilizando outras massas.

## CAPÍTULO VI

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 13816 Placas Cerâmicas para Revestimento – Terminologia**, Rio de Janeiro, 1997.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 13817 Placas Cerâmicas para Revestimento – Classificação**, Rio de Janeiro, 1997.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 13816 Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificação e Métodos de Ensaios**, Rio de Janeiro, 1997.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 6453-84, Solo: Determinação do Limite de Liquidez**, 1984.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **NBR 7180-84, Solo: Determinação do Limite de Plasticidade**, 1984.

ALVES, W.A., BALBO, J. B. O. **Potencial de Utilização de Um Resíduo Argiloso na Fabricação de Revestimentos Cerâmicos. Parte I, Caracterização**. Cerâmica Industrial, v. 2, nº 5/6, 38p, 1997.

ÁLBARO, J. L. **A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. Parte I: O Preenchimento das Cavidades do Molde**. Cerâmica Industrial, v. 5, nº 5, 23p, 2000.

ÁLBARO, J. L. A. **A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e Sua Aplicação Industrial. Parte II: A compactação**. Cerâmica Industrial, v. 5, nº 6, 14p, 2000.

ÁLBARO, J. L. A. **A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial: Parte III: Variáveis do Processo de Compactação.** Cerâmica Industrial, v. 6, nº 1, 15p, 2001.

ÁLBARO, J. L. A. **A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial: Parte IV: Extração da Peça e Resistência Mecânica a Verde.** Cerâmica Industrial, v. 6, nº 2, 46p, 2001.

ÁLBARO, J. L. **A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. Parte V: Descrição da etapa de prensagem.** Cerâmica Industrial, v. 6, nº 3, 26p, 2001.

ANFACER - Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento. **Conquistando o Crescimento Sustentável,** 2003. Disponível em: [www.anfacer.org.br](http://www.anfacer.org.br). Acesso em 06/02/2004.

ANUÁRIO BRASILEIRO DE CERÂMICA, Associação Brasileira de Cerâmica (ABC), 2002.

ANUÁRIO BRASILEIRO DE CERÂMICA, Associação Brasileira de Cerâmica (ABC), 2003.

AMBORI, N. **Contexto da Indústria de Revestimento Cerâmico,** 1999. Disponível em: [www.esp.ufsc.br](http://www.esp.ufsc.br). Acesso em 10/10/2002.

AMORÓS, J. L., FELÍU, C., GINÉS, F., AGRAMUNT, J.V. **Resistência Mecânica Y Microestrutura de Suportes Cerâmicos em Crudo.** Técnica Cerâmica, nº 244, 362p, 1996.

ARAÚJO, A., ROMACHELLI, C. J., MARTINS, M. **Análise Crítica do Setor de Revestimentos Cerâmicos no Brasil, Parte I: Histórico Recente.** Cerâmica Industrial, v. 6, nº 4, 29p, 2001.

BALZEREIT, J., RYMON-LIPINSKI, T., RASS, I. **Roll-Pressing: A New Variation for Shaping Tiles**. Journal Info Ceramic Forum Internacional, v. 75, nº 3, 111p, 1998.

BARBA, A. BELTRÁN, V., FELIU, C., GARCIA, J., GINÉS, F., SÁNCHEZ, E., SANZ, V. **Matérias Primas para la Fabricación de Soportes de Baldosas Cerámicas**. AICE, Castellón, 1997.

BATTISTA, L. C. Z., MELCHIADES, F. G., BOSCHI, A.O. **Estudo das Variáveis que Afetam o Comportamento Mecânico de Revestimentos Cerâmicos Antes da Queima**. Anais do 43º congresso Brasileiro de Cerâmica. Florianópolis, SC, 1999.

BOSCHI, A. O. **Uma Análise Crítica do Setor de Revestimentos Cerâmicos**. Cerâmica Industrial, v.7 nº 2, 8p, 2002.

BOSCHI, A. O. **O Pólo de Santa Gertrudes e a Indústria Brasileira de Revestimentos Cerâmicos**. Cerâmica Industrial, v.9, nº 3, 7p, 2004.

CALLISTER, JÚNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. LTC, 5ª . Ed., Rio de Janeiro, 1999.

CHIARA, G. D., BORRONI M., CHIARA, A. D. **A Tecnologia do Processo de Produção na Indústria de Cerâmica Vermelha**. Curso de formação para profissionais da indústria de cerâmica vermelha, apostila, ACIMAC/IEC, Florianópolis, 2000.

CORPO TÉCNICO DA CERÂMICA PORTO FERREIRA. **Análise Crítica das Novas Normas Técnicas de Revestimentos Cerâmicos: Parte I**. Cerâmica Industrial, v. 5 nº 1, 7p, 2000.

CORPO TÉCNICO DA CERÂMICA PORTO FERREIRA. **Análise Crítica das Novas Normas Técnicas de Revestimentos Cerâmicos. Parte II: O Fundamental das**

**Normas ISO/NBR Sobre Placas Cerâmicas Para Revestimento (ISO 13006, ISO 10554, NBR 13816 – NBR 13817 – NBR 13818).** Cerâmica Industrial, v. 5, nº 2, 12p, 2000.

**CENTRO CERÂMICO DO BRASIL (CCB) Ensaio Para Certificação de Revestimentos Cerâmicos Segundo Norma NBR 13818,** 1999.

**CAMPANTE, H., SEABRA, A. Diagnóstico e Otimização de Operações e Processos. Parte I – Fornos Industriais.** Centro de Tecnologia da Cerâmica e do Vidro - CTCV, 2002.

**DUTRA, R. P.S., PONTES, L.R.A., JÚNIOR, W. R. S. Preparação de Cerâmicas Porosas com a Incorporação de aditivos Orgânicos ao corpo Cerâmico.** Anais do 47 Congresso Brasileiro de Cerâmica, 1927p. João Pessoa, 2003.

**DANIEL, R. E. Situação da Indústria de Revestimentos Cerâmicos.** Cerâmica Industrial, v. 7, nº 2, 7p, 2002.

**ENRIQUE, J. E., MONFORT, E., CANTAVELLA, V. Racionalização de Energia em Fornos de Revestimentos Cerâmicos.** Cerâmica Industrial, v. 5, nº 1, 22p, 2000.

**GARCIA, J., SÁNCHEZ, E., AMORÓS, J.L., GARCIA, M.C. Composições para a Fabricação de Revestimentos Cerâmicos. Influência dos Distintos Componentes sobre o seu Comportamento no Processo de Fabricação.** Cerâmica Informação, nº 4, 15p, 1999.

**GARCIA, J., SÁNCHEZ, E., AMORÓS, J.L., GARCIA, M.C. Composiciones para la Fabricación de Baldosas Cerámicas. Influência de los Distintos Componentes sobre su Comportamiento em el Processo de Fabricacion.** Cerámica Informacion nº 243,37p, 1998.

**GUIGON, P., SIMON, O. Roll Press Design – Influence of Force Feed Systems on Compaction.** Powder Technology v. 130, 41p, 2003.

**GERMAM, R. M. Particle Packing Characteristic.** 1º.Ed. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1989.

**GOERENZ, E., RYMON – LIPINSKIT.** European Patent 0 497 151 B1, 1996.

**GUSTAVO, R. P., QUINTEIRO, E., BOSCHI, A O. Efeito do Teor de Umidade e da Pressão de Prensagem sobre as Características de Revestimentos Cerâmicos.** Cerâmica Industrial, v. 2, nº 3, 28p, 1997.

**GORINI, F. P. A., E CORREIA, R. A Cerâmica Para Revestimentos.** Apostila do BNDES setorial, Rio de Janeiro, 1999.

**HYATT, T. P. Eletronics: Tape Casting, Roll Compaction.** The American Ceramic Society Bulletin, v. 74, nº 10, 56p, 1995.

**ISO 13006. Ceramic Tile – Definitions, Clasification, Characteristics and Marking.** 1995.

**JOHANSON, J. R. Feeding Roll Presses For Stable Roll Operation.** Proceedings of the Biennial Conference, 209p, 1984.

**JOHANSON, J.R. A Rolling Theory for Granular Solids.** Journal of Applied Mechanics, 842p, 1965.

**KINGERY, W. D. Introduction to Ceramics.** 2ª. Ed. John Wiley and Sons, 1976.

**LE MOS, A. Revestimentos Cerâmicos.** Anuário Brasileiro de Cerâmica, São Paulo, 31p, 1996.

- LEMOS, A., VINONA, D. **Visão Estratégica do Setor de Revestimentos Cerâmicos, Mercadológica e Tecnológica, em busca da Consolidação da Competitividade Internacional.** Cerâmica Industrial, v. 2, nº 3/4, 10p, 1997.
- LOLLI, L., NASSETI, G., MARINO, L. F. B. **A Preparação a Seco de Massas Cerâmicas,** Cerâmica Industrial, v. 5, nº 2, 23p, 2000.
- LIN, Y., MESSER, P. F. **Mixing Prior to Calcination.** Br. Ceram. Trans, v. 86, 85p, 1987.
- LIPINSKI-RYMON, T., GEBHARDT, F. **Roll-Pressing of Ceramic Bodies.** Journal Info Ceramic Forum International, v. 71 nº 8, 467p, 1994.
- MELCHIADES, F. G., ROVERI, C. D., SOTÉRIO, J., SILVA, L. L., BOSCHI, A. O. **Controle Dimensional e do Formato de Revestimentos Cerâmicos. Parte I: Dimensões.** Cerâmica Industrial, v. 6, nº 5, 12p, 2001.
- MELCHIADES, F. G., ROVERI, C. D., SOTÉRIO, J., SILVA, L. L., BOSCHI, A. O. **Estabilidade das Dimensões e do Formato de Revestimentos Cerâmicos. Parte II: Formato.** Cerâmica Industrial, v. 6, nº 6, 11p, 2001.
- MELCHIADES, F. G., QUINTEIRO, E., BOSCHI, A. O. **A Curva de Gresificação. Parte I.** Cerâmica Industrial, v. 1, nº 4, 12p, 1996.
- MELCHIADES, F. G., QUINTEIRO, E., BOSCHI, A. O. **A Curva de Gresificação. Parte II.** Cerâmica Industrial, v. 2, nº 1, 23p, 1997.
- MARINHO, M. M. R. **Caracterização de Massas para Revestimentos Cerâmicos.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPB. João Pessoa, Paraíba, 1999.

- MOTTA, J. F. M., CABRAL JUNIOR M., TANNO, L. C. **Panorama das Matérias-Primas Utilizadas na Indústria de Revestimentos Cerâmicos: Desafios ao Setor Produtivo.** Cerâmica Industrial, v. 3, nº 6, 30p, 1998.
- MOTTA, J. F. M., CABRAL JUNIOR M., TANNO, L. C., ZANARDO, A. **As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte II: Os Minerais Industriais e as Massas de Cerâmica Tradicional.** Cerâmica Industrial, v. 7, nº 1, 33p, 2002.
- MANFREDINI, T. **Estrutura dos Materiais Cerâmicos. Parte I.** Cerâmica Informação, v.12, 42p, 2000.
- MANTLE, M. D., BARDSLEY, M. H., GLADDEN, L.F., BRIDGWATER, J. **Laminations in Ceramic Forming.** Acta Materialia, v. 52, 899p, 2004.
- MISTLER, R. E. **Tape Casting.** Ceramic and Glasses, Engineered Materials handbook, ASM International, 1991.
- MENEGAZZO, A.P., SOARES, C.S., VARGAS, D.D.T. **Ensaio Para Certificação de Revestimentos Cerâmicos Segundo Norma NBR 13818.** Centro Cerâmico do Brasil, 1999.
- NASSETI, G., PALMONARE, C. **Moagem Fina à Seco e Granulação via Moagem a Umido e Atomização na Preparação de Massas de Base Vermelha para Monoqueima Rápida de Pisos Vidrados.** Cerâmica Industrial, v. 2, nº 5/6, 11p, 1997.
- NEGRE, F, JARQUE, J.C., FELIÚ, C., ENRIQUE, J.E. **Estudo da Operação de Secagem por Atomização de Pós Cerâmicos em Escala Industrial: Seu Controle e Automatização.** Cerâmica Industrial, v.5, nº 2, 47p, 1998.

**NEGRE, F, SANCHEZ, E. Avanços no Processamento de Pós Atomizados para a Fabricação de Revestimentos Cerâmicos. Cerâmica Industrial, v.3, nº 1, 22p, 1998.**

**NOGUEIRA, E., FILHO, A. G. A., TORKOMIAN, A. L. V. M CSILLAG, J. M. Identificando Estratégias Competitivas e de Produção de Empresas de Revestimentos Cerâmicos. Cerâmica Industrial, v. 7, nº 3, 7p, 2002.**

**OLIVEIRA, N. P. A., Tecnologia de Fabricação de Revestimentos Cerâmicos. Cerâmica Industrial, v. 5, nº 6, 37p, 2000.**

**ONODA, J.G.Y. Ceramic Processing Before Firing. Wiley, New York, 1978.**

**QUINTEIRO, E. Efeito das Características de Pós Granulados sobre o Processamento e Qualidade de Revestimentos Cerâmicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 1996.**

**RAMBALI, B., BAERT, L., JANS, E., MASSART, D.L., Influence of the Roll Compactor Parameter Settings and the Compression Pressure on the Buccal Bio-adhesive Tablet Properties. International Journal of Pharmaceutics, v. 220, 129p, 2001.**

**REED, J. S. Introduction to the Principles of Ceramic Processing, 2. Ed. Wiley – Interscience, New York, 1995.**

**RIBEIRO, J. M., VENTURA, M. J., LABRINCHA, A J. A Atomização como Processos de Obtenção de Pós para a Indústria Cerâmica. Cerâmica Industrial, v. 6, nº 5, 34p, 2001.**

RIBEIRO, J.M., ANTONIO, A.L.F., LABRINCHA, A.J. **Aspectos Fundamentais Sobre a Extrusão de Massas de Cerâmicas Vermelhas**. Cerâmica Industrial, v.8, nº 1, 37p, 2003.

RICHERSON, D.W. **Modern Ceramic Engineering**. Marcel Dekker, New York, 1992.

ROMAN, T.D., ZAVALIANGOS, A., CUNNINGHAM, C.J. **Comparison of various Modeling Methods for Analysis of Powder Compaction in Roller Press**. Powder Technology v. 130, 265p, 2003.

RAGAN, R.C. **Method for Continuous Manufacture of Ceramic Sheets**. United States Patent Office 3.007.222, Nov, 1961.

RAGAN, R.C. **Method for Continuous Manufacture of Ceramic Sheathing**. United States Patent Office 3.097.929, July, 1963.

SIMON, O., GUIGON, P. **Correlation Between Powder-Packing Properties and Roll Press Compact Heterogeneity**. Powder Technology v. 130, 257p, 2003.

SANCHEZ, E.; GARCIA, J.; GINÉS, F.; NEGRE, F. **Aspectos a Serem Melhorados nas Características e Homogeneidade de Argilas Vermelhas Empregadas na Fabricação de Placas Cerâmicas**. Cerâmica Industrial, v. 1, nº 3, 13p, 1996.

SEZZI, G. **Produção e Consumo Mundial de Revestimentos Cerâmicos**. Cerâmica Industrial, v. 7, nº 5, 2002.

SANTANA, L.N.L., FERREIRA, J.M., FREDEL C.M., ALARCON, E. **O Efeito dos Parâmetros de Mistura sobre as Propriedades de Placas Cerâmicas Laminadas**. Cerâmica Informação, v. 16, 2001.

SANTANA, L.N.L., FERREIRA, J.M., FREDEL C.M., ALARCON, E.O. **Estudo Preliminar Visando a Obtenção de Placas Cerâmicas pelo Processo de Laminação**. Cerâmica Informação, (9), 2000.

SANTANA, L.N.L. **Aplicação do Processamento Viscoplastico para a Obtenção de Placas Cerâmicas Laminadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC. Florianópolis, Santa Catarina, 2002.

SUPATI, R., LOH, N.H., KHOR, K.A., TOR, S.B. **Mixing and Characterization of Feedstock for Powder Injection Molding**. Materials Letters, 109p, 2000.

SOUSA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. Edgard Blucher, São Paulo, 1992.

SANTOS, P.S., COELHO, A.C.V., CARDOSO, S.R.F., SANTOS, H.S. **Caracterização e Propriedades Cerâmicas de Alguns Caulins e Argilas usados em Cerâmica Branca no Estado de São Paulo**. Cerâmica Industrial, v. 3, nº 3, 47p, 1998.

SMITH, F. W. **Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Ed. McGraw-Hill, 1998.

SANDOVAL, F., IBANEZ, A. **Discusión sobre la Influência de la Porosidad em la Resistencia Mecânica de las Baldosas Cerâmicas**. Sociedade Espanhola Cerâmica e Vidro, v. 39, nº 2, 255p, 2000.

TEIXEIRA, R.A., MELCHIADES, F.G., BOSCHI, A.O. **A Variação das Características das Argilas e o Processo Cerâmico**. Cerâmica Industrial, v. 7, nº 3, 18p, 2002.

VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos Materiais Cerâmicos**. Ed. Edgard Blucher, 1973.

VARNER, J.R. **Descriptive Factography**. Ceramics and Glasses, ASM International, 1991.

VIEIRA, C.M.F.; HOLANDA, J.N.F.; PINATTI, D.G. **Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos de Goytacases – RJ**. Cerâmica, v.46, nº 297, 15p, 2000.

WILLIAMSON, W.O. **Strength of Dried Clay – A Review**. Ceramic Bulletin, v. 50, nº 7, 620p, 1971.

## **ANEXOS**

Tabelas construídas com base nos resultados experimentais obtidos em laboratório

**Tabela 4.3 - Absorção de água em função da temperatura e do teor de umidade da massa.**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
15%	21,30 (±0,03)	20,88 (±0,32)	19,88 (±0,06)	16,06 (±0,17)
16%	20,30 (±0,01)	19,93 (±0,15)	19,00 (±0,02)	17,00 (±0,10)
17%	19,36 (±0,04)	18,48 (±0,04)	17,98 (±0,15)	16,00 (±0,08)
18%	18,82 (±0,02)	16,17 (±0,02)	15,42 (±0,01)	9,28 (±0,04)
19%	16,83 (±0,01)	16,01 (±0,01)	14,65 (±0,08)	6,40 (±0,09)
20%	19,39 (±0,11)	18,30 (±0,16)	16,83 (±0,06)	10,65 (±0,52)
21%	20,25 (±0,16)	19,99 (±0,08)	18,02 (±0,17)	12,32 (±0,35)

**Tabela 4.4 - Porosidade aparente em função da temperatura e do teor de umidade da massa.**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
15%	37,06(±0,10)	36,74 (±0,06)	35,58 (±0,12)	33,23 (±0,32)
16%	36,13 (±0,02)	35,47 (±0,22)	34,20 (±0,08)	32,30 (±0,40)
17%	34,84 (±0,01)	33,44 (±0,05)	33,08 (±0,10)	30,88 (±0,12)
18%	33,68 (±0,15)	29,91 (±0,50)	28,98(±0,09)	18,46 (±0,08)
19%	31,30 (±0,09)	30,09 (±0,03)	28,42 (±0,50)	13,37 (±0,16)
20%	34,07 (±0,01)	32,94 (±0,72)	30,79 (±0,36)	20,76 (±0,75)
21%	35,64 (±0,16)	35,58 (±0,31)	32,43 (±0,07)	23,90 (±0,86)

**Tabela 4.5 – Retração linear de secagem e queima em função da temperatura e do teor de umidade da massa.**

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
15%	0,032 (±0,01)	0,28 (±0,01)	0,77 (±0,06)	0,95 (±0,01)	4,01 (±0,14)
16%	0,043 (±0,04)	0,36 (±0,04)	0,99 (±0,04)	1,02 (±0,06)	4,74 (±1,36)
17%	0,057 (±0,02)	0,38 (±0,01)	0,98 (±0,01)	1,22 (±0,02)	4,84 (±0,50)
18%	0,064 (±0,01)	0,26 (±0,06)	0,89 (±0,02)	1,14 (±0,09)	4,08 (+0,40)
19%	0,066 (±0,14)	0,25 (±0,03)	0,65 (±0,06)	0,99 (±0,11)	3,25 (±0,09)
20%	0,078 (±0,32)	0,44 (±0,01)	0,69 (±0,08)	1,38(±0,16)	4,38 (±1,02)
21%	0,099 (±0,50)	0,60 (±0,01)	0,88 (±0,02)	1,40 (±0,08)	5,57 (±0,21)

**Tabela 4.6 – Massa específica aparente em função da temperatura e do teor de umidade da massa.**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
15%	1,74 (±0,01)	1,76 (±0,02)	1,78 (±0,02)	1,84 (±0,04)
16%	1,78 (±0,02)	1,78 (±0,04)	1,80 (±0,06)	1,90 (±0,06)
17%	1,80 (±0,01)	1,81 (±0,06)	1,84 (±0,04)	1,93 (±0,08)
18%	1,79 (±0,04)	1,85 (±0,01)	1,88 (±0,01)	1,99 (±0,03)
19%	1,86 (±0,02)	1,88 (±0,02)	1,94 (±0,01)	2,09 (±0,01)
20%	1,78 (±0,01)	1,80 (±0,08)	1,83 (±0,03)	1,95 (±0,04)
21%	1,76 (±0,09)	1,78 (±0,03)	1,80 (±0,04)	1,94 (±0,02)

**Tabela 4.7 – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do teor de umidade da massa.**

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
15%	3,85 (±0,20)	6,32 (±0,99)	9,48 (±0,11)	10,80 (±0,75)	11,32 (±0,66)
16%	3,95 (±0,31)	9,36 (±0,80)	11,36 (±0,17)	12,05 (±0,60)	14,32 (±1,06)
17%	3,99 (±0,22)	10,88 (±0,38)	11,58 (±0,22)	12,85 (±0,36)	15,34 (±,76)
18%	4,68 (±0,36)	11,58 (±0,50)	11,99 (±0,30)	13,79 (±0,64)	21,68 (±2,50)
19%	5,06 (±0,14)	12,29 (±0,84)	12,72 (±0,50)	15,45 (±0,75)	24,49 (±1,85)
20%	4,05 (±0,32)	9,46 (±0,15)	10,79 (±0,64)	12,41 (±0,95)	18,08 (±1,45)
21%	4,21 (±0,50)	8,97 (±0,52)	10,09 (±0,23)	12,05 (±0,50)	17,23 (±0,99)

**Tabela 4.8 – Absorção de água em função da temperatura e do tempo e velocidade de mistura.**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
15min/60rpm	19,99 (±0,06)	18,48 (±0,06)	17,98 (±0,01)	16,00 (±0,11)
15min/120rpm	19,36 (±0,09)	18,04 (±0,04)	17,45 (±0,04)	15,36 (±0,04)
30min/60rpm	18,82 (±0,04)	17,01 (±0,08)	16,50 (±0,06)	11,32 (±0,09)
30min/120rpm	16,83 (±0,06)	16,01 (±0,01)	14,65 (±0,21)	9,36 (±0,06)
60min/60rpm	17,01 (±0,01)	15,99 (±0,06)	14,32 (±0,11)	9,48 (±0,50)
60min/120rpm	16,00 (±0,04)	14,88 (±0,01)	14,00 (±0,01)	6,48 (±0,99)

**Tabela 4.9 – Porosidade aparente em função da temperatura e do tempo e velocidade de mistura.**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
15min/60rpm	33,68 (±0,06)	35,25 (±0,06)	32,00 (±0,04)	29,44 (±0,10)
15min/120rpm	33,04 (±0,09)	31,93 (±0,50)	31,68 (±0,06)	28,72 (±0,12)
30min/60rpm	32,59 (±0,06)	30,01 (±0,11)	30,70 (±0,10)	22,20 (±0,22)
30min/120rpm	31,30 (±0,08)	30,09 (±0,14)	28,42 (±0,09)	18,62 (±0,99)
60min/60rpm	30,40 (±0,04)	29,60 (±0,01)	28,00 (±0,32)	18,60 (±0,17)
60min/120rpm	30,06 (±0,06)	28,66 (±0,08)	27,12 (±0,11)	13,37 (±1,05)

**Tabela 4.10 – Retração linear em função da temperatura e do tempo e velocidade de mistura.**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
15min/60rpm	0,38 (±0,02)	0,98 (±0,02)	1,26 (±0,01)	4,98 (±0,16)
15min/120rpm	0,32 (±0,02)	0,90 (±0,01)	1,24 (±0,02)	4,46 (±0,06)
30min/60rpm	0,30 (±0,01)	0,86 (±0,04)	1,10 (±0,08)	4,38 (±0,50)
30min/120rpm	0,26 (±0,02)	0,80 (±0,01)	1,08 (±0,03)	3,55 (±0,09)
60min/60rpm	0,24 (±0,01)	0,82 (±0,06)	1,06 (±0,06)	3,62 (±0,11)
60min/120rpm	0,25 (±0,02)	0,78 (±0,01)	0,99 (±0,02)	3,48 (±0,20)

**Tabela 4.11 – Massa específica aparente em função da temperatura e do tempo e velocidade de mistura.**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
15min/60rpm	1,74 ( $\pm 0,02$ )	1,76 ( $\pm 0,01$ )	1,78 ( $\pm 0,01$ )	1,84 ( $\pm 0,01$ )
15min/120rpm	1,74 ( $\pm 0,01$ )	1,75 ( $\pm 0,01$ )	1,77 ( $\pm 0,01$ )	1,87 ( $\pm 0,02$ )
30min/60rpm	1,76 ( $\pm 0,06$ )	1,77 ( $\pm 0,02$ )	1,85 ( $\pm 0,04$ )	1,96 ( $\pm 0,01$ )
30min/120rpm	1,85 ( $\pm 0,04$ )	1,87 ( $\pm 0,01$ )	1,93 ( $\pm 0,02$ )	1,98 ( $\pm 0,02$ )
60min/60rpm	1,78 ( $\pm 0,09$ )	1,85 ( $\pm 0,03$ )	1,95 ( $\pm 0,04$ )	1,96 ( $\pm 0,04$ )
60min/120rpm	1,87 ( $\pm 0,06$ )	1,92 ( $\pm 0,01$ )	1,95 ( $\pm 0,06$ )	2,06 ( $\pm 0,03$ )

**Tabela 4.12 – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do tempo e velocidade de mistura.**

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
15min/60rpm	3,78 ( $\pm 0,50$ )	9,01 ( $\pm 0,11$ )	10,12 ( $\pm 0,50$ )	11,88 ( $\pm 0,60$ )	18,60 ( $\pm 0,99$ )
15min/120rpm	3,92 ( $\pm 0,75$ )	9,38 ( $\pm 0,10$ )	11,88 ( $\pm 0,22$ )	12,96 ( $\pm 0,36$ )	19,04 ( $\pm 0,50$ )
30min/60rpm	4,20 ( $\pm 0,32$ )	10,36 ( $\pm 0,50$ )	12,08 ( $\pm 0,36$ )	13,72 ( $\pm 0,50$ )	22,36 ( $\pm 1,20$ )
30min/120rpm	5,10 ( $\pm 0,65$ )	11,94 ( $\pm 0,64$ )	12,72 ( $\pm 0,25$ )	14,99 ( $\pm 0,75$ )	24,49 ( $\pm 0,84$ )
60min/60rpm	4,99 ( $\pm 0,11$ )	12,04 ( $\pm 0,50$ )	12,86 ( $\pm 0,50$ )	15,10 ( $\pm 0,12$ )	24,10 ( $\pm 1,50$ )
60min/120rpm	5,21 ( $\pm 0,21$ )	12,32 ( $\pm 0,09$ )	12,94 ( $\pm 0,11$ )	15,05 ( $\pm 0,19$ )	24,79 ( $\pm 1,32$ )

**Tabela 4.13 – Retração linear em função da temperatura e da velocidade de laminação.**

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
10rpm	0,0023 ( $\pm 0,01$ )	0,21 ( $\pm 0,09$ )	0,48 ( $\pm 0,11$ )	0,66 ( $\pm 0,14$ )	2,86 ( $\pm 0,17$ )
110rpm	0,0032 ( $\pm 0,06$ )	0,25 ( $\pm 0,02$ )	0,62 ( $\pm 0,04$ )	0,99 ( $\pm 0,21$ )	3,64 ( $\pm 0,75$ )

**Tabela 4.14 - Retração linear em função da temperatura e do diâmetro dos rolos laminadores.**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
D - 6,0cm	0,38 ( $\pm 0,02$ )	0,98 ( $\pm 0,06$ )	1,26 ( $\pm 0,09$ )	4,32 ( $\pm 0,11$ )
D - 12,5cm	0,25 ( $\pm 0,04$ )	0,66 ( $\pm 0,04$ )	0,92 ( $\pm 0,04$ )	3,24 ( $\pm 0,06$ )

**Tabela 4.15 – Absorção de água em função da temperatura e da velocidade de laminação.**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
10rpm	15,66 ( $\pm 0,02$ )	14,86 ( $\pm 0,06$ )	12,96 ( $\pm 0,02$ )	4,32 ( $\pm 0,08$ )
110rpm	16,99 ( $\pm 0,04$ )	15,46 ( $\pm 0,02$ )	13,32 ( $\pm 0,04$ )	5,54 ( $\pm 0,06$ )

**Tabela 4.16** – Absorção de água em função da temperatura e do diâmetro dos rolos laminadores.

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
D - 6,0cm	18,15 (±0,02)	16,50 (±0,06)	14,93 (±0,09)	9,16 (±0,11)
D - 12,5cm	16,99 (±0,04)	15,46 (±0,02)	13,32 (±0,04)	5,54 (±0,06)

**Tabela 4.17** - Porosidade aparente em função da temperatura e da velocidade de laminação.

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
10rpm	28,18 (±0,14)	27,93 (±0,06)	25,92 (±0,09)	10,02 (±0,12)
110rpm	30,24 (±0,16)	28,50 (±0,09)	26,50 (±0,10)	12,40 (±0,21)

**Tabela 4.18** – Porosidade aparente em função da temperatura e do diâmetro dos rolos laminadores.

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
D - 6,0cm	31,58 (±0,12)	30,05 (±0,126)	27,95 (±0,15)	18,01 (±0,17)
D - 12,5cm	30,24 (±0,09)	28,50 (±0,09)	26,50 (±0,10)	12,40 (±0,21)

**Tabela 4.19** - Massa específica aparente em função da temperatura e da velocidade de laminação.

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
10rpm	1,80 (±0,02)	1,88 (±0,04)	2,00 (±0,04)	2,32 (±0,06)
110rpm	1,77 (±0,04)	1,84 (±0,01)	1,98 (±0,01)	2,23 (±0,10)

**Tabela 4.20** – Massa específica aparente em função da temperatura e do diâmetro dos rolos laminadores.

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
D - 6,0cm	1,74(± 0,02)	1,82 (±0,01)	1,87 (±0,02)	1,96 (±0,08)
D - 12,5cm	1,77 (±0,04)	1,84 (±0,01)	1,90 (±0,01)	2,23 (±0,10)

**Tabela 4.21** – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e da velocidade de laminação.

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
10rpm	6,17 (±0,22)	12,54 (±0,15)	12,99 (±0,11)	16,32 (±0,17)	27,93 (±0,12)
110rpm	5,10 (±0,18)	11,94 (±0,09)	12,36 (±0,12)	14,99 (±0,24)	25,22 (±0,45)

**Tabela 4.22** – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do diâmetro dos rolos laminadores.

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
D-6,0cm	3,83 (±0,10)	9,36 (±0,22)	10,25 (±0,25)	12,26 (±0,32)	19,19 (±1,02)
D-12,5cm	5,10 (±0,21)	11,94 (±0,11)	12,86 (±0,26)	14,99 (±0,24)	25,22 (±0,85)

**Tabela 4.23** – Absorção de água em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
E – 3,5mm	16,99 (±0,10)	15,46 (±0,09)	13,32 (±0,02)	5,54 (±0,16)
E – 2,5mm	16,60 (±0,06)	14,75 (±0,04)	11,70 (±0,08)	4,39 (±0,09)

**Tabela 4.24** - Porosidade aparente em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
E – 3,5mm	30,24 (±0,16)	28,50 (±0,09)	26,50 (±0,10)	12,40 (±0,21)
E – 2,5mm	30,01 (±0,09)	27,9 (±0,08)	23,32 (±0,99)	10,75 (±0,75)

**Tabela 4.25** – Retração linear em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
E – 3,5mm	0,25 (±0,02)	0,66 (±0,04)	0,99 (±0,10)	3,64 (±0,14)
E – 2,5mm	0,22 (±0,01)	0,53 (±0,09)	0,94(±0,02)	3,45 (±0,94)

**Tabela 4.26** - Massa específica aparente em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
E – 3,5mm	1,77 (±0,04)	1,84 (±0,01)	1,98 (±0,01)	2,23 (±0,10)
E – 2,5mm	1,80 (±0,02)	1,89 (±0,06)	1,99 (±0,05)	2,44 (±0,08)

**Tabela 4.27** - Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e da abertura entre os rolos laminadores.

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
E-3,5mm	5,10 (±0,18)	11,94 (±0,09)	12,86 (±0,12)	14,99 (±0,24)	25,22 (±0,45)
E-2,5mm	5,26 (±0,08)	12,50 (±0,21)	12,94 (±0,26)	15,32 (±0,14)	26,94 (±0,99)

**Tabela 4.28** – Absorção de água em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PE	18,93 (±0,11)	18,47 (±0,09)	16,60 (±0,04)	9,03 (±0,04)
PP	21,63 (±0,06)	21,44 (±0,21)	19,99 (±0,50)	16,04 (±0,99)
PL	16,99 (±0,10)	15,46 (±0,09)	13,32 (±0,06)	5,54 (±0,45)

**Tabela 4.29 – Porosidade aparente em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PE	33,08 (±0,26)	32,85 (±0,14)	30,15 (±0,16)	17,45 (±0,31)
PP	37,35 (±0,86)	37,02 (±0,31)	36,15 (±0,50)	29,57 (±0,75)
PL	30,24 (±0,16)	28,50 (±0,09)	26,50 (±0,10)	12,40 (±0,21)

**Tabela 4.30 - Retração linear em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).**

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PE	0,65 (±0,21)	0,85 (±0,11)	0,77 (±0,10)	1,22 (±0,04)	4,57 (±0,45)
PP	0,18 (±0,09)	0,25 (±0,02)	0,53 (±0,04)	0,94 (±0,06)	2,59 (±0,12)
PL	0,068 (±0,14)	0,28 (±0,04)	0,65 (±0,06)	0,99 (±0,11)	3,25 (±0,09)

**Tabela 4.31 – Massa específica aparente em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PE	1,74 (±0,02)	1,77 (±0,06)	1,81 (±0,04)	1,93 (±0,10)
PP	1,72 (±0,01)	1,72 (±0,02)	1,80 (±0,01)	1,84 (±0,09)
PL	1,77 (±0,04)	1,84 (±0,04)	1,98 (±0,01)	2,23 (±0,12)

**Tabela 4.32 - Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura: PL (placa laminada), PE (placa extrudada) e PP (placa prensada).**

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PE	6,99 (±0,50)	9,95 (±0,11)	10,26 (±0,10)	13,13 (±0,16)	16,05 (±1,45)
PP	2,22 (±1,14)	6,01 (±0,34)	6,92 (±0,64)	9,20 (±0,50)	14,81 (±1,22)
PL	5,43 (±0,99)	11,09 (±0,17)	12,35 (±0,06)	15,50 (±0,11)	26,94 (±0,99)

**Tabela 4.33 – Absorção de água em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria)**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PL	16,99 (±0,10)	15,46 (±0,09)	13,32 (±0,06)	5,54 (±0,45)
PPI	19,98 (±0,22)	19,28 (±0,12)	17,81 (±0,16)	12,66 (±0,25)

**Tabela 4.34 – Porosidade aparente em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria).**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PL	30,24 (±0,16)	28,50 (±0,09)	26,50 (±0,10)	12,40 (±0,21)
PPI	34,06 (±0,27)	33,98 (±0,50)	32,65 (±0,09)	24,22 (±0,18)

**Tabela 4.35 – Retração linear em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria).**

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PL	0,068 ( $\pm 0,14$ )	0,28 ( $\pm 0,04$ )	0,65 ( $\pm 0,06$ )	0,99 ( $\pm 0,11$ )	3,64 ( $\pm 0,09$ )
PPI	0,22 ( $\pm 0,12$ )	0,35 ( $\pm 0,09$ )	0,95 ( $\pm 0,11$ )	1,31 ( $\pm 0,08$ )	3,01 ( $\pm 0,17$ )

**Tabela 4.36 – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura: PL (placa laminada) e PPI (placa prensada na indústria).**

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PL	5,43 ( $\pm 0,99$ )	11,09 ( $\pm 0,17$ )	12,35 ( $\pm 0,06$ )	15,50 ( $\pm 0,11$ )	26,94 ( $\pm 0,99$ )
PPI	4,88 ( $\pm 0,88$ )	5,84 ( $\pm 0,60$ )	6,34 ( $\pm 0,75$ )	9,85 ( $\pm 0,99$ )	16,02 ( $\pm 1,50$ )

**Tabela 4.37 – Absorção de água em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PL	20,25 ( $\pm 0,16$ )	19,99 ( $\pm 0,08$ )	18,02 ( $\pm 0,17$ )	12,32 ( $\pm 0,35$ )
PEL	18,17 ( $\pm 0,09$ )	17,34 ( $\pm 0,06$ )	16,43 ( $\pm 0,04$ )	6,99 ( $\pm 0,12$ )

**Tabela 4.38 – Porosidade aparente em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PL	35,64 ( $\pm 0,16$ )	35,58 ( $\pm 0,31$ )	32,43 ( $\pm 0,07$ )	23,90 ( $\pm 0,86$ )
PEL	32,88 ( $\pm 0,02$ )	31,73 ( $\pm 0,11$ )	30,89 ( $\pm 0,09$ )	14,38 ( $\pm 0,18$ )

**Tabela 4.39 – Retração linear em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).**

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PL	0,099 ( $\pm 0,50$ )	0,60 ( $\pm 0,01$ )	0,88 ( $\pm 0,02$ )	1,40 ( $\pm 0,08$ )	5,57 ( $\pm 0,21$ )
PEL	0,058 ( $\pm 0,09$ )	0,62 ( $\pm 0,04$ )	0,74 ( $\pm 0,06$ )	0,99 ( $\pm 0,02$ )	3,83 ( $\pm 0,10$ )

**Tabela 4.40 - Massa específica aparente em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PL	1,76 ( $\pm 0,09$ )	1,78 ( $\pm 0,03$ )	1,80 ( $\pm 0,04$ )	1,94 ( $\pm 0,02$ )
PEL	1,80 ( $\pm 0,04$ )	1,82 ( $\pm 0,02$ )	1,88 ( $\pm 0,02$ )	2,05 ( $\pm 0,04$ )

**Tabela 4.41 – Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura: PL (placa laminada) e PEL (placa extrudada e laminada).**

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
PL	4,21 (±0,50)	8,97 (±0,52)	10,09 (±0,23)	12,05 (±0,50)	17,23 (±0,99)
PEL	4,88 (±0,23)	10,01 (±0,17)	12,22 (±0,45)	14,65 (±0,99)	23,58 (±0,32)

**Tabela 4.42 – Retração linear em função da temperatura e do teor de aditivo.**

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
0%	0,068 (±0,14)	0,28 (±0,04)	0,65 (±0,06)	0,99 (±0,11)	3,64 (±0,09)
0,5%	0,010 (±0,01)	0,16 (±0,02)	0,31 (±0,02)	1,02 (±0,06)	2,72 (±0,13)
1,0%	0,009 (±0,04)	0,14 (±0,01)	0,28 (±0,04)	0,86 (±0,09)	2,68 (±0,09)
1,5%	0,011 (±0,02)	0,15 (±0,04)	0,32 (±0,01)	0,94 (±0,10)	2,65 (±0,10)

**Tabela 4.43 – Absorção de água em função da temperatura e do teor de aditivo.**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
0%	16,99 (±0,10)	15,46 (±0,09)	13,32 (±0,06)	5,54 (±0,45)
0,5%	18,28 (±0,04)	16,88 (±0,02)	14,65 (±0,02)	10,17 (±0,08)
1,0%	18,31 (±0,06)	18,03 (±0,06)	14,99 (±0,04)	10,32 (±0,02)
1,5%	19,36 (±0,01)	18,74 (±0,09)	15,15 (±0,12)	10,46 (±0,10)

**Tabela 4.44 – Porosidade aparente em função da temperatura e do teor de aditivo.**

	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
0%	30,24 (±0,16)	28,50 (±0,09)	26,50 (±0,10)	12,40 (±0,21)
0,5%	32,51 (±0,06)	31,12 (±0,02)	28,99 (±0,02)	20,44 (±0,09)
1,0%	32,98 (±0,03)	32,40 (±0,04)	29,38 (±0,06)	20,56 (±0,05)
1,5%	34,83 (±0,08)	33,96 (±0,06)	28,56 (±0,04)	20,74 (±0,06)

**Tabela 4.45 - Tensão de ruptura à flexão em função da temperatura e do teor de aditivo.**

	110°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C
0%	5,43 (±0,99)	11,09 (±0,17)	12,35 (±0,06)	15,50 (±0,11)	26,94 (±0,99)
0,5%	8,36 (±0,06)	8,72 (±0,10)	12,02 (±0,06)	18,30 (±0,25)	22,94 (±1,06)
1,0%	8,34 (±0,09)	8,65 (±0,12)	8,07 (±0,21)	14,08 (±0,17)	20,35 (±0,99)
1,5%	8,42 (±0,04)	8,52 (±0,09)	8,34 (±0,14)	10,99 (±0,10)	19,99 (±1,66)