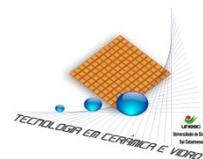




UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE

Curso de Tecnologia em Cerâmica e Vidro



Trabalho de Conclusão de Estágio

RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE APARENTE E CONTROLE DIMENSIONAL DE PLACAS CERÂMICAS

Sandro de Farias Marciano

Oscar Rubem Klegues Montedo¹

Resumo: Os problemas de calibre em placas cerâmicas estão relacionados a diversos fatores, tais como matérias-primas empregadas, tamanho médio e distribuição de tamanhos dos aglomerados, umidade da massa, densidade aparente, acoplamento entre suporte e esmalte, distribuição de temperaturas no forno, etc. Estes fatores normalmente interagem entre si para provocar defeitos dimensionais, que em suma elevam os custos produtivos. Cada um destes afeta de forma diferente as variações dimensionais. A densidade aparente a seco das placas é um destes fatores aceitos como de maior importância. Assim, o presente trabalho tem como objetivo mostrar a relação entre densidade aparente e o controle dimensional de placas cerâmicas em diferentes tipologias das empresas do sul catarinense foram coletadas e a densidade aparente a cru foi determinado, após a secagem estas amostras foram queimadas no canal central do forno e, ao final, as dimensões destas peças foram determinadas. Os resultados mostraram que, apesar das variações dos demais parâmetros existentes, a uma estreita relação entre a variação da densidade aparente nas peças e a variação de tamanho nas peças queimadas.

Palavras-chave: Cerâmica, Placas cerâmicas, Densidade aparente, Defeitos dimensionais.

1. Introdução

Para atender as expectativas de um mercado cada vez mais exigente, as empresas cerâmicas têm procurado desenvolver seus produtos e processos de fabricação buscando a excelência na qualidade. Todavia, nos últimos anos, a velocidade com que as mudanças têm ocorrido é cada vez mais crescente.

¹ Professor Orientador

A busca pela inovação tecnológica tem sido uma ação estratégica para garantir a sobrevivência das empresas no mercado atual. Entretanto, as indústrias de revestimentos cerâmicos precisam produzir com qualidade superior e em menor tempo para reduzirem os custos operacionais e tornarem-se mais competitivas. Para isto são necessários investimentos, que muitas vezes são altos, sobretudo em automação do processo produtivo. Além disso, investimentos em novas tecnologias para a produção de produtos altamente diferenciados, como no caso da impressão a jato de tinta, têm criado uma clara diferenciação de mercado. O controle sobre os parâmetros que interferem diretamente na qualidade do produto tem sido também intensificado. A densidade aparente de placas cerâmicas, por exemplo, é um destes importantes parâmetros de processo para que o produto final atinja as especificações, como os aspectos dimensionais. A densidade aparente depende da plasticidade, da umidade e do empacotamento do pó e da pressão de prensagem.

2. Revisão de Literatura

Diversas propriedades dos materiais cerâmicos estão associadas ao empacotamento das partículas que os constituem. Segundo McGeary (1961) *apud* OLIVEIRA *et al* (2000), o estudo do mesmo pode ser definido como o problema da correta seleção da proporção e do tamanho apropriado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim consecutivamente.

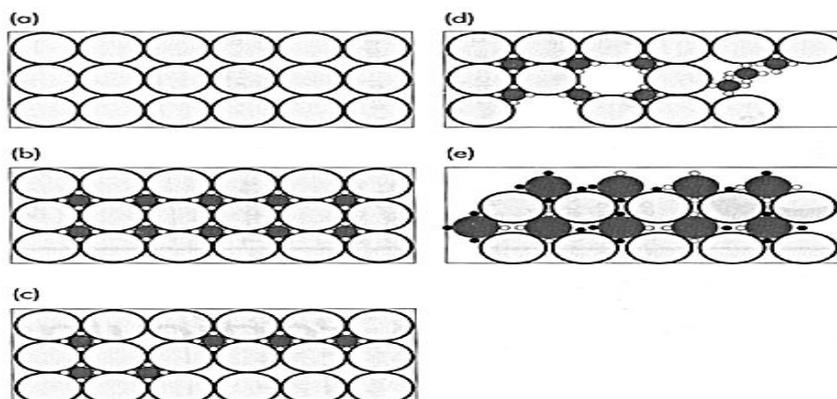


Figura 1: Efeito da qualidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição inadequada do tamanho de partículas.

Fonte: Oliveira, I. R. Dispersão e empacotamento de partículas. 2000.

Terminologia: A terminologia empregada no estudo do comportamento de partículas não é padronizada. Abaixo se descreve aquelas baseadas no trabalho de Funk e Dinger (1994) *apud* OLIVEIRA *et al* (2000).

Eficiência de Empacotamento (P_e): Conteúdo de sólido presente em qualquer unidade de volume que o contenha, ou seja, volume realmente ocupado pelas partículas em relação ao volume total do sistema (partículas mais porosidade), sendo o resultado apresentado em porcentagem (%).

Fator de Empacotamento (P_f): definido como:

$$P_f = P_e / 100$$

Porosidade (P_o): volume de vazios entre as partículas expressas em fração do volume:

$$P_o = (1 - P_f)$$

Volume Aparente (V_{ap}): volume efetivamente ocupado pelas partículas:

$$V_{ap} = \frac{1}{(1 - P_o)} = \frac{1}{P_f}$$

Densidade Relativa de Empacotamento (ρ_{emp}): é definida como o quociente entre a densidade volumétrica do sistema de partículas (ρ_s)

$$\rho_{emp} = \rho_{bulk} / \rho_s.$$

ρ_{bulk} = massa do sólido dividida pelo volume total do sistema (partículas + porosidade).

ρ_s = massa do sólido dividida pelo volume realmente ocupado pelo sólido.

Monodispersão: partículas de um único tamanho, tanto esféricas como não esféricas. É praticamente impossível produzir uma monodispersão real.

Polidispersões: uma mistura de duas ou mais monodispersões ou tamanho discretos.

De uma maneira geral, empacotamentos reais (estruturas de empacotamentos aleatórias) de monodispersões esféricas ocorrerão sempre com o mesmo fator de empacotamento, com $P_f \cong 0,60-0,64$, apesar de ser teoricamente possível obter valores superiores, no caso de estruturas ordenadas ($P_f \leq 0,74$). Entretanto, uma série de fatores pode alterar esta condição OLIVEIRA (2000).

O primeiro a ser considerado é a existência de distribuições de partículas, alterando a condição de monodispersão original. Isso permite obter, desde sistemas as partículas que possuam fatores de empacotamento, bastante elevados, próximos a 1, até misturas onde esse fator aproxima-se do nível das monodispersões. Empacotamento com menor porosidade pode ser obtidos se os vazios existentes entre as partículas nas monodispersões forem preenchidos por partículas menores que os mesmos, como descrito por McGeary (1961) *apud* OLIVEIRA *et al.* (2000). No entanto, se forem introduzidas partículas maiores que os vazios existentes, provocarão o surgimento de novos vazios pelo deslocamento das partículas maiores de suas posições originais, podendo levar ao aumento da porosidade e diminuição da eficiência de empacotamento. Assim, a distribuição das partículas do sistema, determina o aumento ou não da densidade de empacotamento da monodispersão, como visto na Figura 1.

2.1 Morfologia, Porosidade e Densidade de Partículas

Conforme Oliveira (2000), um fator que pode alterar as condições de empacotamento das partículas é a sua morfologia, ou seja, forma. Quanto mais afastada do formato esférico for a partícula, menor é a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha, que pode ser observado na Figura 2. Isso ocorre devido a fricção interparticular, que surge pelo contato das partículas irregulares destas. Quanto menor o tamanho das partículas irregulares, maior esse efeito, em função da maior área superficial específica. Não há na literatura regras que definam quantitativamente o efeito da morfologia das partículas sobre a densidade de empacotamento com exatidão, sendo esse avaliado apenas qualitativamente.

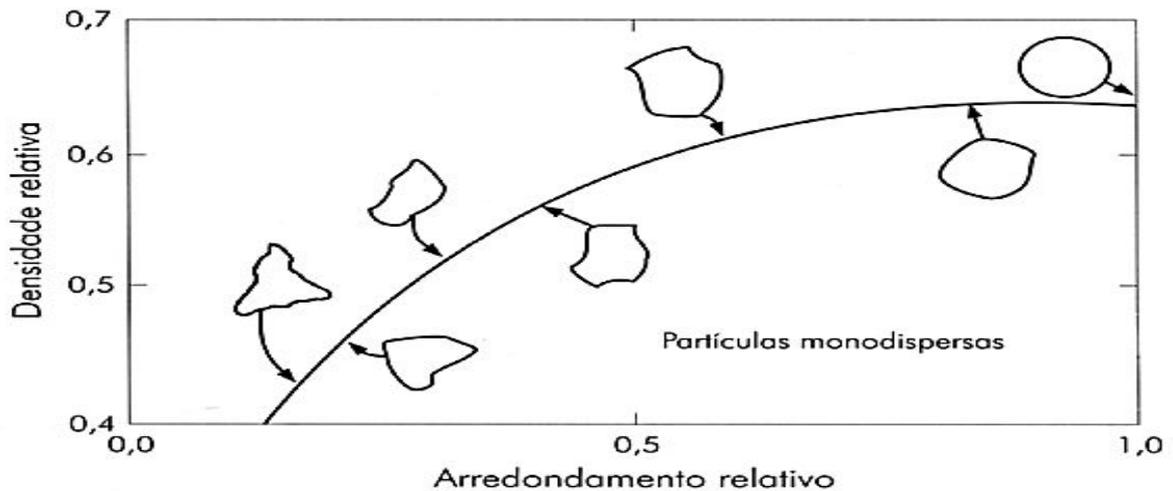


Figura 2: Relação qualitativa existente entre densidade relativa e o arredondamento relativo para empacotamentos monodispersos aleatórios de partículas.

Fonte: Oliveira, I. R. Dispersão e empacotamento de partículas. 2000.

Atualmente, a prensagem uniaxial é a técnica de conformação de peças mais empregadas no processamento de materiais cerâmicos. Ela consiste na compactação de uma massa aglomerada contida em uma cavidade rígida, mediante a aplicação de pressão em apenas uma direção axial. De acordo com Barba (2002) *apud* NANDI *et al.* (2011), a prensagem de placas cerâmicas é função de três condições básicas (Figura 3): o processo de granulação da massa cerâmica após moagem, resultando em um pó granulado com geometria bem definida e adequada à prensagem; a conformação do pó granulado na forma de peças com resistência mínima às solicitações mecânicas; e o adensamento (ou densificação), com função de limitar os espaços vazios existentes entre as partículas de massa. Ainda de acordo com o autor citado acima, a boa execução destas condições resulta em um produto bem conformado e adequado ao processo cerâmico. O controle inclui a verificação de sua densidade.

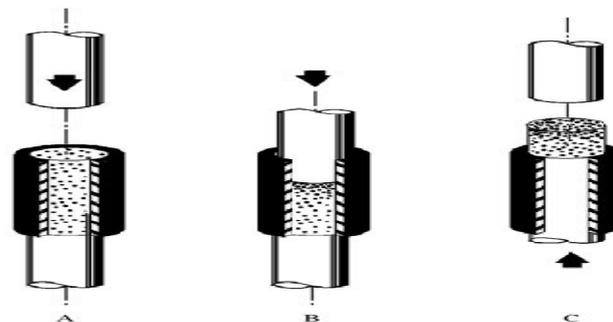


Figura 3 – Prensagem uniaxial de ação simples.

Fonte: Alberio, J.L. A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. 2001.

Quando o volume do material granulado contido no interior de uma matriz (rígida ou flexível) é submetido a uma tensão de compressão suficientemente elevada (unidirecional ou isostática) podem resultar nos seguintes processos, fenômenos ou trocas: Uma consolidação permanente do material, ou seja, um aumento na compactação do corpo, que persiste depois de retirada a carga. Este processo implica basicamente no fluxo, na reordenação, na deformação plástica e na destruição dos grânulos, no intervalo de baixas pressões de prensagem, e no deslizamento e reordenação das partículas que constituem os grânulos em pressões habituais de prensagem (ALBERO, 2000).

Uma compressão elástica das partículas, ligantes e lubrificantes líquidos, bem como do gás presente no corpo. Esta deformação se desfaz quando a carga é eliminada, sendo a responsável pela expansão do material. O fenômeno da expansão é analisado na fase de extração, uma vez que é nesta fase que se manifesta e causa problemas (ALBERO, 2000).

Ainda de acordo com Albero (2000), um fluxo de líquidos e gases através dos poros do corpo por fluxo viscoso, devido aos gradientes de pressão estabelecidos ao longo dos distintos pontos da peça. Por fim, se a prensagem é uniaxial, a fricção entre as partículas e entre estas e as paredes do molde provoca uma distribuição heterogênea da pressão de compactação no volume do material. Na compactação de um material granular (massa) a diminuição de volume dos poros e de seus tamanhos se dá através dos três mecanismos seguintes:

Mecanismo I: Redução do volume ocupado pelos poros intergranulares e de seu volume através do deslocamento e reordenação dos grânulos.

Mecanismo II: 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 inclui o esmagamento de grânulos ociosos, geralmente presentes nas massas cerâmicas.

Mecanismo III: Diminuição de volume e tamanho dos poros intragranulares pelo deslizamento e reordenação das partículas buscando alcançar um empacotamento de mais denso (ALBERO, 2000).

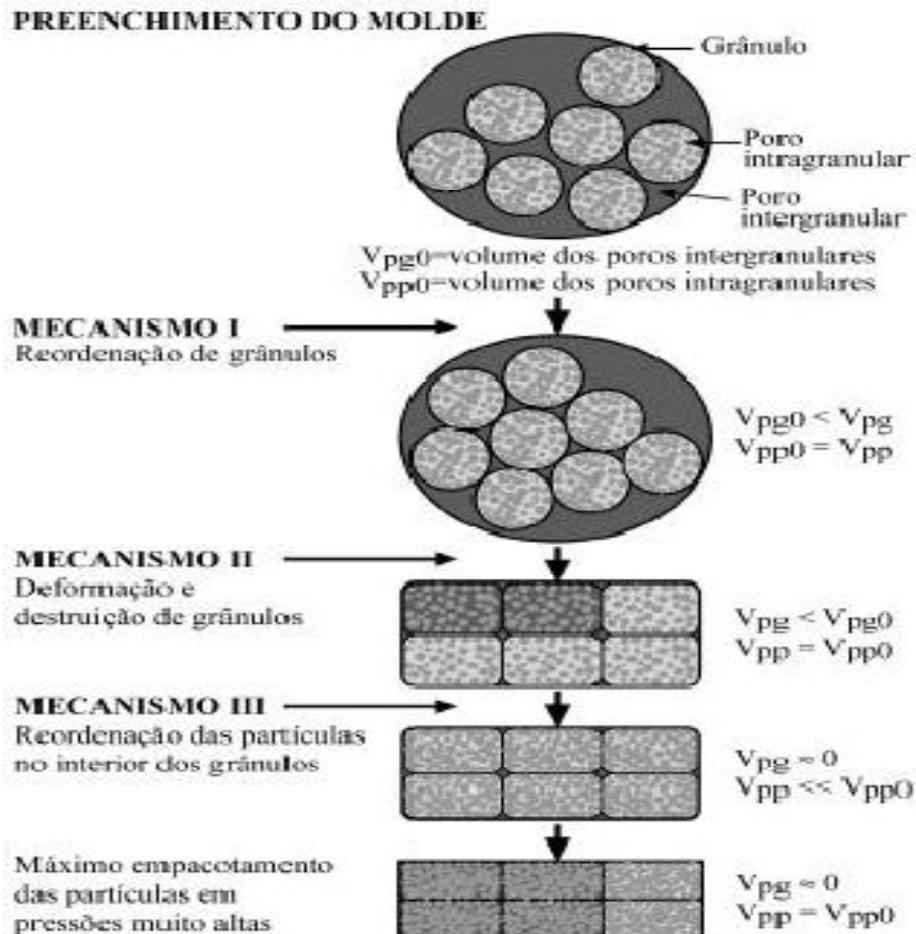


Figura 4 - Mecanismos de compactação.

Fonte: Albero, J.L. A.. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. 2000.

Sabe-se da importância da determinação da densidade aparente das peças cerâmicas. A densidade aparente, junto com a resistência mecânica, é uma das propriedades mais importantes da peça cerâmica prensada, afetando o comportamento da peça em diferentes etapas do processo cerâmico e influenciando de maneira decisiva na contração linear, absorção de água, deformação piropelástica este é um fator crucial. A igualdade de composição, do procedimento de preparação das peças e das variáveis de queima, da contração linear e da capacidade de absorção de água diminuem à medida que aumenta a densidade aparente da peça, sendo esta uma relação linear DAL BO, NEVES, AMARAL (2002).

De acordo com DalBo, Neves e Amaral (2002), a velocidade de secagem e de oxidação da peça durante o processo de queima diminui à medida que aumenta a densidade aparente, pois o coeficiente de difusão efetiva dos gases diminui quando se tem porosidade baixa. Por outro lado, variações da densidade aparente da peça

podem conduzir a contrações diferenciadas que se traduzem em produtos fora de esquadro, curvaturas, bitolas diferentes, etc. Como foi comentado anteriormente, se sucede a grande importância que tem a densidade aparente sobre as variáveis do processo e das características finais do produto.

3. Materiais e Métodos

Para obtenção dos resultados foram utilizados os seguintes materiais e métodos:

- Balança digital, capacidade de até 5.000 g, incerteza de medição de $\pm 0,1$ g;
- Paquímetro digital de 0 a 600 mm;
- Calculadora científica;
- Empuxímetro de mercúrio;
- Placas cerâmicas.

Para a realização deste trabalho, foram escolhidas placas cerâmicas de diferentes tipologias de diferentes indústrias cerâmicas do Estado de Santa Catarina. A Tabela 1 mostra as tipologias empregadas.

Tabela 1: Tipologias empregadas nas empresas da região sul.

Empresa	Tipologia	Formato	nº de prensas	Cavidades por prensa
A	Porcelanato	60 cm x 60 cm	03	02
B	Monoporosa	45 cm x 90 cm	02	03
	Monoqueima	60 cm x 60 cm	02	02
C	Porcelanato Técnico 1/2/3	60 cm x 60 cm	03	02
D	Semi-gres	60 cm x 60 cm	01	03

Depois de prensadas, as placas cerâmicas de cada cavidade da prensa foram separadas para medir a densidade aparente por imersão em mercúrio em 9 pontos diferentes da amostra, conforme procedimento padrão, representado na imagem abaixo (Figura 5). O Princípio de Arquimedes relata que um corpo mergulhado em

um fluido em equilíbrio recebe um empuxo vertical, de baixo para cima, cuja intensidade é igual o peso do fluido deslocado pelo corpo.

D1	D2	D3
D4	D5	D6
D7	D8	D9

Figura 5: Disposição dos valores das densidades (g/cm³)

Pode-se correlacionar à variação da densidade de massas da amostra (m_1) e da amostra submetida ao empuxo (m_2) com a densidade do mercúrio em função da temperatura ($\rho_{Hg}(T)$), através da seguinte equação:

$$D_{ap} = (m_1/m_2) \times \rho_{Hg}(T)$$

$$\rho_{Hg}(T) = [13,5325 \times 0,0025 \times (T - 25)] \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

O equipamento utilizado é o empuxímetro de mercúrio (Figura 6), que consta de um recipiente contendo mercúrio assentado sobre uma balança de precisão, onde a amostra é submersa com o auxílio de uma haste de profundidade padronizada, quando é realizada a leitura da massa relativa à força de empuxo sobre temperatura controlada por um termômetro.

É importante analisar como está sendo preparada a amostra, se a mesma representa a real situação da peça. Na região da muratura, por exemplo, é importante que as amostras sejam selecionadas da mesma forma nas extremidades e no centro, para que não ocorra variação devido a partes diferentes.

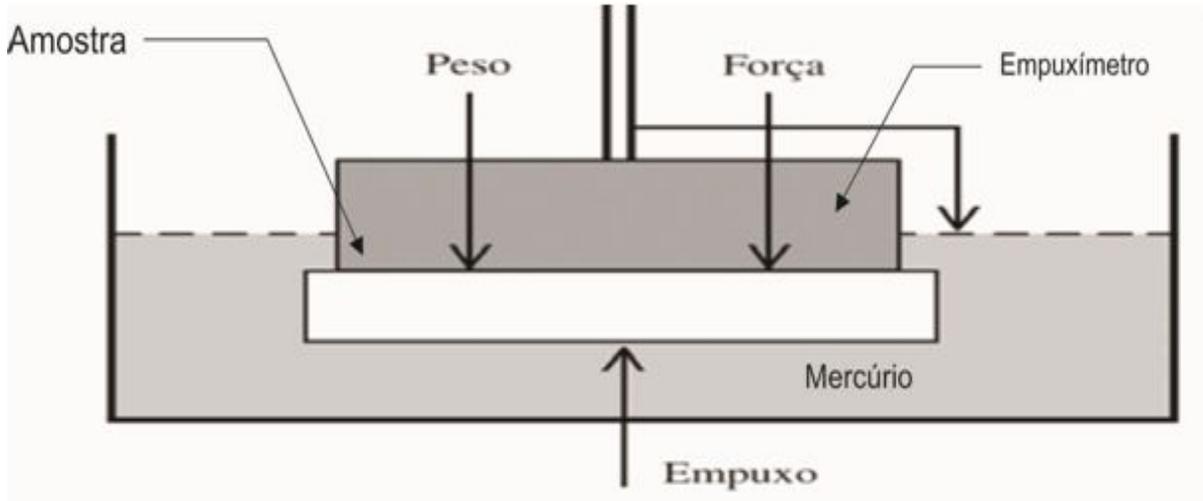


Figura 6: Descrição do método utilizando Mercúrio (Hg) Balanço de Forças
 Fonte: Dal Bó, M. Substituição do Mercúrio por Água na Determinação da Densidade Aparente do Suporte Cerâmico Cru. 2002.

Para medir a densidade foram usadas no mínimo quatro placas cerâmicas e em cada placa foram medidos nove pontos. Placas de cada cavidade e prensadas logo na sequência das amostradas foram identificadas, retiradas após secagem e colocadas na máquina de carga do forno, sempre na posição central deste, para evitar que os efeitos do gradiente térmico existente entre o centro e as paredes internas do forno pudessem interferir na queima das amostras. Após a queima, cada placa identificada teve suas dimensões medidas com a ajuda de um paquímetro digital. No total, trinta e seis amostras foram empregadas para cada tipologia para se obter representatividade das variações medidas.

4. Resultados e Discussões

Podem-se analisar os dados na tabela abaixo.

Tabela 2: Dados de variação da Dap e variação dimensional por matéria prima e cerâmica.

Tipologia/Empresa	Média Dap	Variação Dap	% DP (L)	% DP (Dap)
A	2,016	0,018	0,071	0,318
60x60	2,019	0,024	0,073	0,430
Monoqueima	2,049	0,025	0,057	0,370
	2,054	0,029	0,058	0,430

Sequencia tabela 2

Tipologia/Empresa	Média Dap	Varição Dap	% DP (L)	% DP (Dap)
B 60x60 Porcelanato Técnico	1,956	0,045	0,27	1,414
	1,989	0,087	0,176	1,443
	1,990	0,093	0,183	1,483
	1,994	0,081	0,190	1,514
	1,997	0,099	0,200	1,551
C 60x60 Porcelanato Técnico 2	1,939	0,039	0,012	0,626
	1,945	0,048	0,018	0,891
	1,951	0,036	0,094	0,206
	1,953	0,039	0,171	0,681
	1,982	0,064	0,180	0,999
D 60x60 Porcelanato Técnico 3	1,956	0,042	0,149	0,686
	1,957	0,044	0,137	0,698
	1,993	0,051	0,185	0,734
	1,993	0,058	0,171	0,820
	1,997	0,066	0,212	0,371
E 60x60 Porcelanato	1,970	0,010	0,066	0,183
	1,971	0,012	0,069	0,218
	1,971	0,013	0,063	0,192
	1,980	0,016	0,075	0,312
	1,969	0,003	0,040	0,056
F 60x60 Semi-gres	1,971	0,005	0,024	0,097
	1,971	0,005	0,013	0,096
	1,992	0,004	0,035	0,061
	1,996	0,007	0,048	0,141

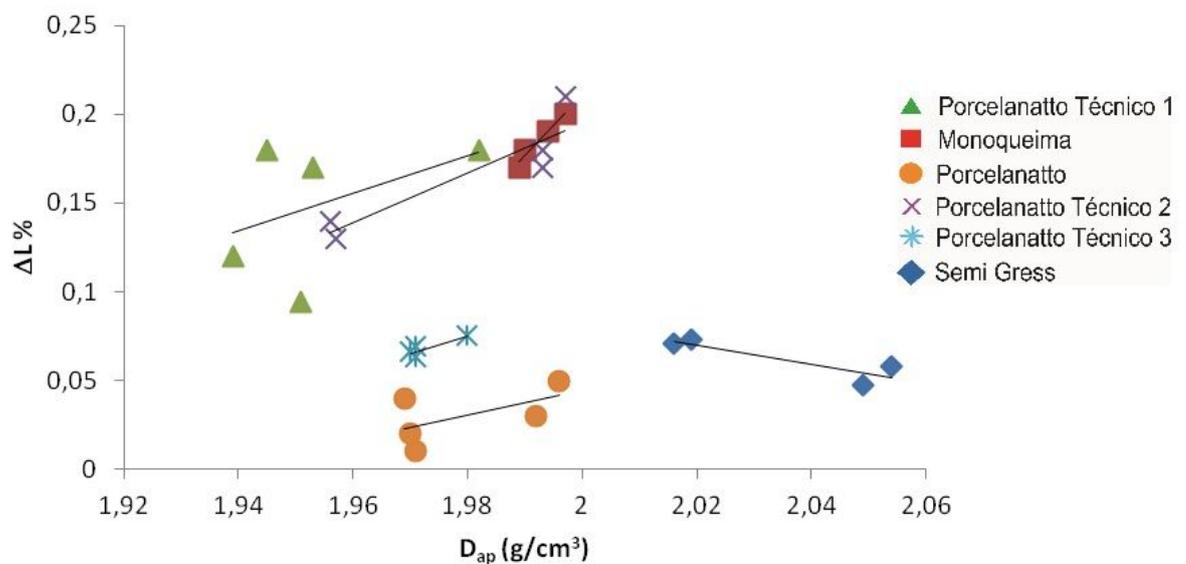


Figura 7: percentual da variação dimensional em relação densidade aparente.

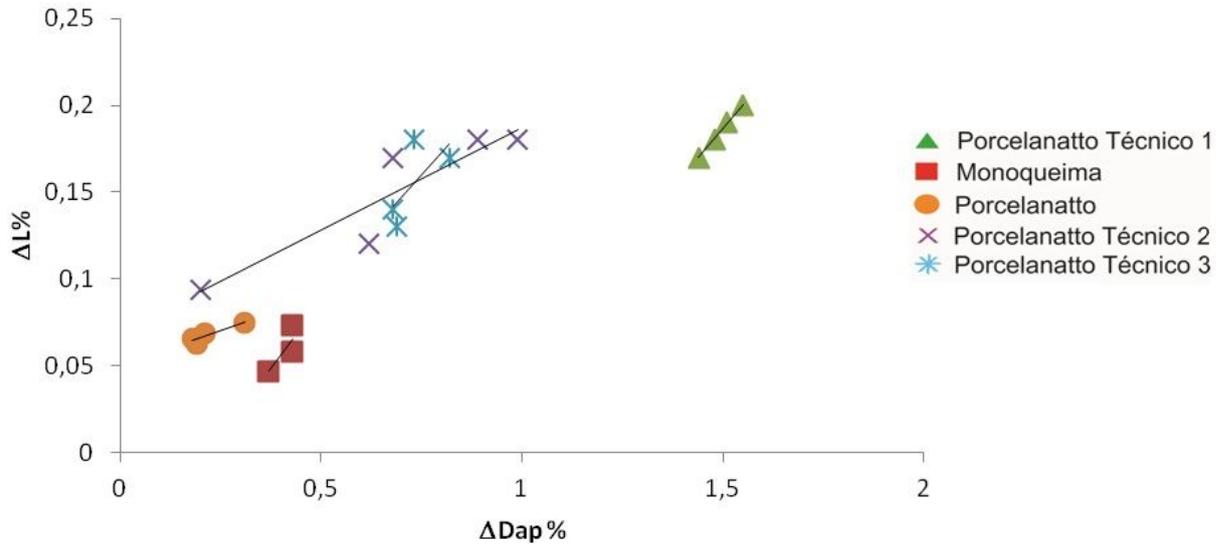


Figura 8: Percentual da variação dimensional em relação ao percentual da variação da densidade aparente.

As figuras 7 e 8 mostram que em diferentes tipologias de matéria prima a inclinação da reta ficou semelhante, quanto maior a densidade aparente maior é a sua variação dimensional, lembrando que quanto mais se exige da prensa, pressão elevada e ciclo de prensagem, maiores serão as suas variações de densidade aparente, somente no produto monoqueima teve um comportamento diferente.

Os resultados das análises podem-se verificar na tabela seguinte, que demonstra a relação entre densidade aparente e Variação dimensional por tipologia de matéria prima.

Tabela 3: Variação de Densidade Aparente por Tipologia de Matéria Prima.

Variação de Densidade (g/cm ³)	Média da Variação dimensional (mm)				
	Monoporosa	Monoqueima	Semi Gres	Porcelanato	Porcelanato Téc.
0,005	-	-	0,42	-	-
0,010	-	-	0,91	0,91	-
0,015	-	0,83	1,1	0,94	-
0,020	-	0,94	-	-	-
0,030	0,33	0,96	-	-	1,14
0,040	0,45	-	-	-	1,48
0,050	-	-	-	-	2,65
0,060	-	-	-	-	2,75
0,080	-	-	-	-	2,93

5. Considerações Finais

Neste trabalho, foi determinada a relação entre a variedade de densidade aparente a cru e a variação dimensional queimada de diferentes tipologias de placas cerâmicas produzidas na região sul do estado de Santa Catarina. Os testes realizados mostraram a dificuldade em produzir placas cerâmicas com baixa variação dimensional, devido a tipologia das massas empregadas. Mesmo com baixa variação de densidade aparente, algumas tipologias apresentaram uma elevada variação dimensional devido ao comportamento anormal de respectivos pós. Nas placas com massa monoporosa, a retração linear é 1,5% e a variação dimensional é baixa, não alterando a qualidade do produto. Já nos produtos monoqueima, semi-gres, porcelanato e porcelanto técnico que têm retração linear média de 8,5%, teve uma significativa variação dimensional. Atualmente a alternativa mais prática que as cerâmicas estão utilizando para não terem os produtos desclassificados por tamanho de calibre, é retificar as placas cerâmicas após a queima.

Referências Bibliográficas

ALBERO, J.L.A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. Parte 1: O Preenchimento das Cavidades do Molde. Cerâmica Industrial V.5(5), pg. 23-28 (2000).

ALBERO, J.L.A. A Operação de prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. Parte 2: A Compactação. Cerâmica Industrial V.5(6), pg. 15 (2000).

ALBERO, J.L.A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. Parte V: Descrição da Etapa de Prensagem. Cerâmica Industrial V.6(3), pg. 26-32 (2001).

DAL BÓ, M.; NEVES, W.N.; AMARAL, S. Substituição do Mercúrio por Água na Determinação da Densidade Aparente do Suporte Cerâmico Cru. Criciúma, SC: Cerâmica Industrial, v.7, n.2, pp.42-46, 2002.

NANDI, V. S.; MADALENA, J.R.; BERNARDIN, A. M.. Redução de Espessura de Porcelanato Esmaltado: Desenvolvimento Laboratorial. São Paulo: Cerâmica Industrial, v.16, n.4, pp.26-29, 2011.

OLIVEIRA, I. R. de. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo arte, 2000.