

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VINÍCIUS ANTÔNIO GROCHOSKI

**MOLDE POROSO DE EPÓXI PARA COLAGEM SOB PRESSÃO DE
MATERIAL CERÂMICO**

CURITIBA-PR

2022

VINÍCIUS ANTÔNIO GROCHOSKI

MOLDE POROSO DE EPÓXI PARA COLAGEM SOB PRESSÃO DE MATERIAL CERÂMICO

Epoxy porous mould for ceramics pressure slip casting

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Ph.D. Márcia Silva de Araújo

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VINÍCIUS ANTÔNIO GROCHOSKI

**MOLDE POROSO DE EPÓXI PARA COLAGEM SOB PRESSÃO DE MATERIAL
CERÂMICO.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 22 de junho de 2022

Márcia Silva de Araújo
Ph.D.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Euclides Alexandre Bernardelli
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Lucas Freitas Berti
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

Dedico este trabalho aos membros de minha família,
tanto aos presentes quanto aos já ausentes, pelo
suporte nesses anos de estudos.

RESUMO

Peças cerâmicas estão presentes no dia a dia das pessoas em inúmeras funcionalidades como a louça de mesa. Neste caso, as técnicas tradicionais mais utilizadas são torneamento e colagem de barbotina. Uma técnica mais produtiva e eficiente, quando comparada a colagem de barbotina, que aplica mais tecnologia para a fabricação de louça de mesa é a colagem de barbotina sob pressão. Essa técnica consiste em bombear barbotina em molde poroso de resina para acelerar a formação de parede da peça. Geralmente, essa tecnologia é adquirida por meio de vendas casadas de maquinários e moldes, que para a realidade brasileira se dá por importação. Este trabalho teve como objetivo a confecção e teste de um molde poroso em epóxi. Foram realizados ensaios para a caracterização de materiais porosos, quais sejam: resistência à compressão, porosimetria por intrusão de mercúrio, picnometria a gás hélio e densidade aparente. Para os ensaios foram confeccionados cinco corpos de prova de espuma epóxi. Os corpos de prova diferem entre si quanto a concentração relativa do material emulsificante, composto por água, glicerina e *tween* 80. As composições foram 0,55, 0,575, 0,6, 0,625 e 0,65 partes em volume do emulsificante para 1 parte de resina e endurecedor. Constatou-se um decréscimo do módulo elástico com o aumento da concentração do material emulsificante até 0,625, com 0,65 houve um considerável aumento. A densidade real dos materiais manteve-se constante até 0,625, depois aumentou significativamente, no entanto, não houve mudança significativa nas médias das densidades aparentes. Foi observado que a concentração de 0,65 a amostra apresentou ser uma mistura heterogênea, na qual a água formou uma fase no material, o que levou ao aumento da densidade real. Apenas para a amostra de 0,55 foi possível determinar o tamanho médio de poros de 7,51 μ m, a porosidade de 24% e a área superficial total de 2.0118m²/g. Pela diferença entre a densidade real e a aparente as amostras indicaram ter porosidades entre 28 e 84%. A composição escolhida para ser usada como molde foi a de 0,55, pois foi a que apresentou a menor deformação a 1 MPa. No teste em máquina de colagem sob pressão o molde escolhido iniciou a formação de peça na parede do molde, porém, infelizmente o teste não pode ser continuado por causa de um problema de vedação defeituosa.

Palavras-chave: Cerâmica; louça de mesa; colagem sob pressão; epóxi, molde poroso.

ABSTRACT

Ceramic pieces are present in people's daily lives in numerous features such as tableware. In this case, the most used traditional techniques are slip casting and jiggering. A more productive and efficient technique, when compared to slip casting, which applies more technology to the manufacture of tableware, is pressure slip casting. This technique consists of pumping slip into a porous resin mold to accelerate the part's wall formation. Generally, this technology is acquired by combining sales of machinery and molds, which for the Brazilian reality is imported. This work aimed to make and test a porous epoxy mold. Tests were carried out for the characterization of porous materials, namely: compressive strength, porosimetry by mercury intrusion, helium gas pycnometry and apparent density. For the tests, five epoxy foam specimens were made. The specimens differ from each other in terms of the relative concentration of the emulsifying material, composed of water, glycerin and tween 80. The compositions were 0.55, 0.575, 0.6, 0.625 and 0.65 parts by volume of the emulsifier for 1 part resin and hardener. There was a decrease in the elastic modulus with increasing concentration of the emulsifying material up to 0.625, with 0.65 there was a considerable increase. The actual density of the materials remained constant up to 0.625, then it increased significantly, however, there was no significant change in the mean apparent densities. It was observed that at a concentration of 0.65, the sample was presented as a heterogeneous mixture, in which water formed a phase in the material, which led to an increase in the real density. Only for the 0.55 sample it was possible to determine the average pore size of $7.51\mu\text{m}$, the porosity of 24% and the total surface area of $2.0118\text{m}^2/\text{g}$. Due to the difference between the real and apparent density, the samples showed porosity between 28 and 84%. The composition chosen to be used as a mold was 0.55, as it presented the smallest deformation at 1 MPa. In the pressure slip casting machine test, the chosen mold started to form a part on the mold wall, however, unfortunately, the test could not be continued because of a faulty sealing problem.

Keywords: Ceramic; tableware; pressure slip casting; epoxy, porous mold.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Molde para colagem sob pressão	16
Figura 2 - Processo de colagem de barbotina	18
Figura 3 - Fluxograma do processo de colagem de barbotina.....	18
Figura 4 – Desenho esquemático do processo de colagem sob pressão	19
Figura 5 - Colagem sob pressão na fabricação de louças sanitárias	20
Figura 6 - Máquina TDG/500 da marca LIPPERT	20
Figura 7 - Máquina DG180 da empresa DORST	21
Figura 8 - Máquina da empresa PCL utilizada para a confecção de vasos sanitários	21
Figura 9 - Tipos de conexões entre células	23
Figura 10 - Grupos de epóxi	24
Figura 11 - Mecanismo geral para cura de cadeia epóxi com amina	25
Figura 12 - Modelo de nylon	30
Figura 13 - Molde de Silicone	30
Figura 14 - Molde em cruz	31
Figura 15 - Espuma no molde de silicone	32
Figura 16 - Composição no molde em cruz	32
Figura 17 - Máquina protótipo de colagem sob pressão	36
Figura 18 - painel de comando e tanque misturador de barbotina	36
Figura 19 - Placa de fixação e laxa de fixação	37
Figura 20 - Corpo de prova de composição 0,65.....	43
Figura 21 - Molde Finalizado	46
Figura 22 - Molde Fixado	47
Figura 23 - Vista frontal do molde.....	47
Figura 24 - Molde após o ensaio	48
Figura 25 - Início de formação de parede.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais polos e empresas brasileiras de porcelana e louça de mesa	14
Tabela 2 - Informações da resina e agente de cura disponibilizadas pelo fabricante	28
Tabela 3 - Composições para a elaboração das espumas	29
Tabela 4 - Deformação sob tensão de 1 MPa (10 bar)	40
Tabela 5 - Módulo elástico (MPa)	41
Tabela 6 – Densidade real (g/cm ³).....	42
Tabela 7 - Densidade aparente (g/cm ³)	44
Tabela 8 - Porosidade e diâmetro de poro	44
Tabela 9 - Característica de espumas de PMMA	45
Tabela 10 - – Dados técnicos do molde comercial fabricado com GIL-RESIN da Aldero	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivos Específicos.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO CERÂMICA POR COLAGEM	17
2.1.1 Colagem de Barbotina.....	17
2.1.2 Colagem sob Pressão.....	19
2.1.3 Vantagens e Desvantagens entre os Processos.....	21
2.2 ESTRUTURAS DOS MATERIAIS POROSOS.....	22
2.3 ESPUMA DE RESINA EPÓXI.....	24
2.4 FABRICAÇÃO DE MOLDE PARA COLAGEM SOB PRESSÃO.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 MATERIAIS.....	28
3.2 OBTENÇÃO DA ESPUMA.....	29
3.3 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	30
3.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS POROSOS.....	33
3.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão	33
3.4.2 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio.....	33
3.4.3 Medição de Densidade	34
3.5 FIXAÇÃO E TESTE NA MÁQUINA PROTÓTIPO.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	38
4.1.1 Deformação à 1 MPa	40
4.1.2 Módulo Elástico	41
4.2 DENSIDADE	42
4.3 POROSIDADE	44
4.4 TESTE DE COLAGEM.....	46
5 CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Juntamente com China, México, Turquia, Bulgária e Rússia, o Brasil figura como um dos maiores produtores de louça sanitária no mundo (IPTC, 2018). Possuindo 26 unidades fabris de pequeno e médio porte distribuídas por 8 estados, emprega diretamente 7,3 mil pessoas (ANFACER, 2019).

A distribuição do mercado de louças sanitárias se dá da seguinte forma: 37% Bacia com caixa; 25% Cuba; 20% Bacia convencional; 10% Lavatório e coluna; 5% Tanque e 3% Mictório (ANFACER, 2019).

Detendo um mercado consumidor interno que absorve 80% da produção do setor, o Brasil desponta como um dos principais consumidores de louças sanitárias do mundo, juntamente com China, EUA, Índia, Japão e outros (IPTC, 2018). O crescimento da produção brasileira de louças sanitárias se sustenta pelo crescimento do consumo interno a despeito das exportações que tiveram uma queda de 20% para 10% e contabiliza 20 milhões de peças produzidas por ano em 2008 (PRADO *et al.*, 2013).

Quanto ao setor de louça de mesa, essa se apresenta por meio de um parque industrial pulverizado, estima-se que há mais de 500 empresas localizados principalmente no Sudeste do País, nos polos de Pedreira, Porto Ferreira, Andradas e Campo Largo (PRADO *et al.*, 2013). As principais empresas desse ramo são: Rener, Fiori, Vila Rica, Pozzani, Oxford, Schmidt e Germer, além de diversas pequenas e microempresas concentradas nos polos industriais (BUSTAMANTE *et al.*, 2000). A louça brasileira é considerada de boa qualidade e consegue atender normas norte americanas que possibilitam sua exportação para esse país (BUSTAMANTE *et al.*, 2000).

Diferentemente do setor de louças sanitárias, o setor de louças de mesa não consegue suprir a demanda interna e, por essa razão, importa produtos, sobretudo da China e da Índia que passa a ser nosso maior fornecedor (IPTC, 2018) (Anuário, 2020).

Segundo Prado *et al.* (2013) a fatia da produção que é exportada é de 2%, muito abaixo da quantidade histórica de 10% devido, principalmente à concorrência que é imposta pela China e pelo câmbio desfavorável.

A produção anual é na ordem de 200 milhões de peças por ano e engloba produtos como aparelhos de jantar, jogos de xícaras, vasos, estatuetas, utensílio

domésticos etc. (PRADO *et al.*, 2013). O setor é composto por mais de 500 empresas, predominantemente micro e pequenas empresas, concentradas majoritariamente nas regiões Sul e Sudeste (RUIZ *et al.*, 2011).

É caracterizada como uma indústria de utilização de mão de obra intensiva, sendo essa característica responsável por 50-65% do valor do custo industrial. (BUSTAMANTE *et al.*, 2000). A Tabela 1 relaciona as principais empresas e polos produtores de louças de mesa no Brasil à produção.

Tabela 1 - Principais polos e empresas brasileiras de porcelana e louça de mesa

Empresa ou Pólo	Unidades	Produção (peças/ano)	Massa (ton/ano)	Peças (%)
Schmidt	Pomerode (SC) Campo Largo (PR) Mauá (SP)	30.000.000	10.500	15
Oxford	São Bento do Sul (SC)	50.000.000	17.500	2,5
Pozzani	Jundiaí (SP)	12.000.000	3.600	6
Campo Largo	Cerâmica Tirolesa	15.000.000/24.000.000	-	10
	Germer (PR)	6.000.000	2.100	3
	Outras indústrias	3.000.000	750	1,5
Polo de Porto Ferreira	Porto Ferreira (SP)	30.000.000	9.000	1,5
Vista Alegre	Porto Alegre (RS)	2.500.000	875	1
Pólo de Pedreira	Porcelútil / Panger	6.000.000	1.500	3
	Outras indústrias	30.000.000	7.500	1,5
Pólo de Monte Sião – Andradadas	Monte Sião Andradadas (MG)	não disponível	-	
	Total	~200 mi a.a.	53.325	

Fonte: Ruiz *et al.* (2011); IPT (2006)

São Paulo detém a maior concentração de empresas do ramo, predominantemente micro e pequenas empresas, concentradas majoritariamente nos municípios de Pedreira, e Porte Ferreira (RUIZ *et al.*, 2011). O município de Pedreira, conhecido como “Capital da Porcelana” é a maior produtora da América Latina concentrando cerca de 90 empresas que envolvem direta e indiretamente

aproximadamente 70% da disponibilidade de mão de obra local que produz cerca de 36 milhões de peças/ano (ANUÁRIO, 2020).

A cidade de Campo Largo, localizada na região metropolitana de Curitiba no estado do Paraná, hospeda um parque industrial tradicional no setor de louças de mesa, predominantemente micro e pequenas empresas, produz faiança, grés e porcelanas. Esse setor é responsável por 60% do ICMS arrecadado pelo município e pela absorção de 25.000 empregos diretos (ARAÚJO *et al.*, 2012).

A técnica predominante utilizada para a produção de louças de mesa e sanitária presentes no APL de Campo Largo é a colagem de barbotina. Essa técnica demanda o uso de moldes de gesso, que tem um curto ciclo de vida e, após o descarte, não há possibilidade de reciclagem, além do uso intensivo de mão de obra. (NOGUEIRA *et al.*, 2012).

A produção de louça na APL de Campo Largo tradicionalmente utiliza do método da colagem de barbotina que por natureza utiliza de mão de obra intensiva, visto que no processo são utilizados moldes de gesso, que tem um ciclo de vida curto (entre 60 e 100) e, que não há possibilidade de reutilização após a quantidade de ciclos (ARAÚJO *et al.*, 2012).

A alternativa para uma produção semiautomatizada ou automatizada para a confecção de louça é a colagem de barbotina sob pressão, porém, o maior empecilho para essa modernização da produção se dá pelo alto custo de importação dos equipamentos que são comercializados por empresas que fazem vendas casadas do equipamento com os moldes (ARAÚJO *et al.*, 2012).

Com participação de 2% da produção mundial com cerca de 200 milhões de peças/ano e empregando direta e indiretamente 30.000 pessoas, o setor de louças se mostra muito relevante na contribuição para a economia brasileira sendo que Campo Largo produz o montante de 33 milhões de peças/ano (RUIZ *et al.*, 2011).

Portanto, o desenvolvimento de um molde nacional com um custo menor seria uma contribuição importante para o setor da produção de louças auxiliando na melhora da produção.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi caracterizar e testar uma composição de espuma de epóxi. O molde em epóxi tem por finalidade atender a uma demanda dos empresários que importam os moldes usados no processo de colagem de barbotina sob pressão.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Confeccionar corpos de prova que diferem entre si na concentração da solução emulsificante;
- Caracterizar o material poroso;
- Remodelar o molde confeccionado no trabalho de Mendes (2018), Figura 1, a fim de alcançar uma simetria das cavidades no molde com a composição mais adequada para o processo de colagem de barbotina sob pressão;
- Testar o molde poroso na máquina de colagem de barbotina sob pressão.

Figura 1 - Molde para colagem sob pressão



Fonte: Mendes (2018).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa seção serão explanadas com base teórica os fundamentos essenciais para o desenvolvimento desse presente trabalho.

Primeiramente, é explanado sobre as técnicas de fabricação de peças cerâmicas por colagem de barbotina e colagem sob pressão, além de um comparativo entre as duas técnicas. Como o desenvolvimento de um molde para a colagem sob pressão demanda conhecimentos sobre a composição da solução e de técnicas para a obtenção do melhor material, essa seção apresenta conceitos sobre as técnicas de se fabricar um molde de epóxi como a produção da espuma de resina epóxi e a fabricação do molde em si.

2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO CERÂMICA POR COLAGEM

O processo de colagem pode ser feito sob pressão atmosférica com um molde de gesso, que é a forma tradicional, ou sob alta pressão, que exige o uso de um equipamento para tanto.

2.1.1 Colagem de Barbotina

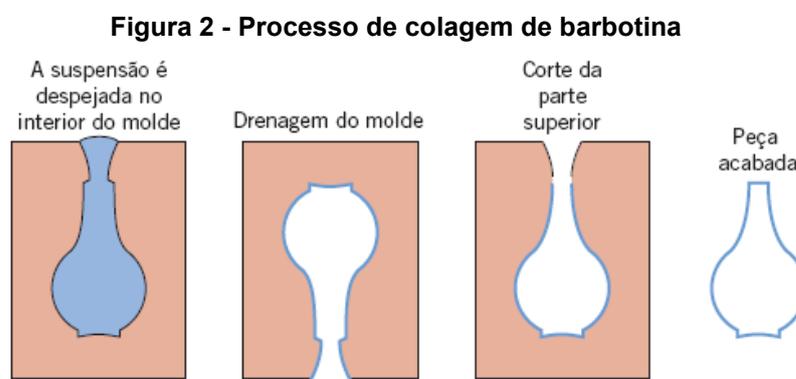
A colagem de barbotina é um processo utilizado na conformação de uma suspensão fluida de cerâmica que possuam composição à base de argila (CALLISTER, 2018). O processo consiste em verter a suspensão em um molde poroso, usualmente feito de gesso Paris (HEINRICH *et al.*, 2017).

Para o escoamento adequado nos moldes, a viscosidade da composição utilizada no processo é baixa, normalmente abaixo de 5 Pa.s em uma taxa de cisalhamento de 1/s. Com o passar do tempo, após verter a barbotina, a composição em contato com o molde perde água que é absorvida pela ação da capilaridade do molde. A viscosidade da suspensão aumenta próximo a parede do molde formando a parede da peça solidificada (ASM, 2020).

A espessura da parede sólida é aumentada em função da raiz quadrada do tempo em que se mantém em contato com o molde e, após, o tempo decorrido

necessário para a espessura desejada, o restante da suspensão é escorrida. (HEINRICH *et al.*, 2017)

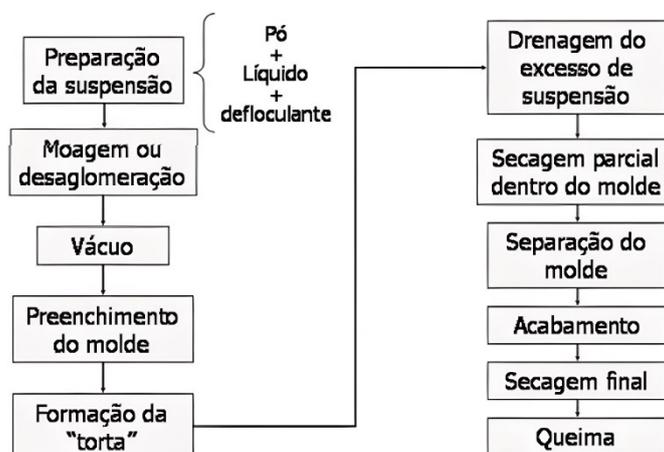
A Figura 2 demonstra o processo da colagem de barbotina.



Esse processo possibilita a conformação de peças ocas e complexas, tais como louças sanitárias, louças de mesa, tubos cerâmicos, peças para decoração (CALLISTER, 2018) e é o processo predominante no APL de Campo Largo, fato que é apontado como uma das causas de um certo atraso no desenvolvimento do setor na região, devido as suas particularidades que fazem desse processo não eficiente em comparação com outros processos como a colagem sob pressão (ARAÚJO *et al.*, 2012).

A Figura 3 apresenta um fluxograma com as etapas do processo de colagem de barbotina.

Figura 3 - Fluxograma do processo de colagem de barbotina



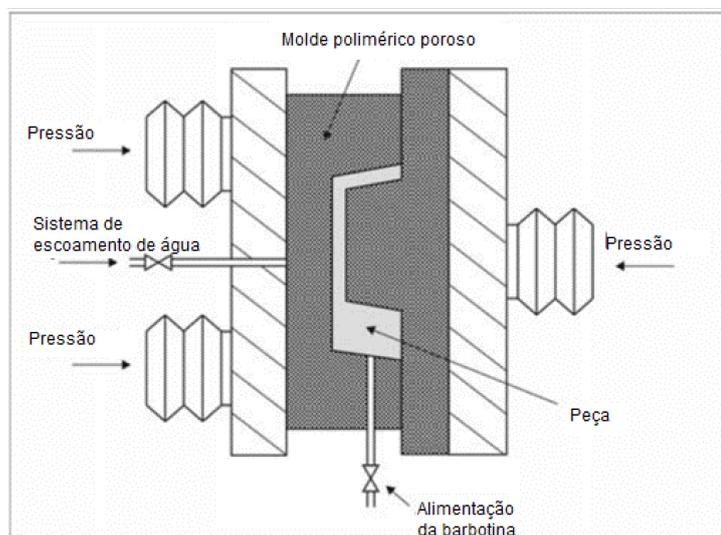
2.1.2 Colagem sob Pressão

A técnica da colagem sob pressão foi inicialmente projetada para ser usada na conformação de louças sanitárias, que possui paredes espessas, buscando uma automatização na produção e, conseqüentemente, aumentando sua produção (LABROZZI, 1993), posteriormente, essa técnica passou a ser implementada na conformação de outras peças cerâmicas como louças de mesas e porcelanas. (HEINRICH *et al.*, 2017).

O processo necessita de um maquinário específico projetado para o processo e consiste em bombear a barbotina para dentro de um molde poroso, comumente de resina, e por meio da pressão imposta no conjunto se dá a formação de parede da barbotina em contato com o molde. O tempo de colagem é proporcional à pressão aplicada (ORTEGA, 2000).

A Figura 4 demonstra um desenho esquemático do processo de colagem sob pressão.

Figura 4 – Desenho esquemático do processo de colagem sob pressão



Fonte: Heinrich *et al.* (2017, p. 137).

Para que o processo se realize, é necessária uma pressão entre 10 e 13 Bar e manter a composição aquecida a pelo menos 45°C (VENKAT, 2019) e, o molde utilizado deve possuir propriedades mecânicas adequadas como, resistência à abrasão, devido à repetição do processo, que garanta sua integridade dimensional, porosidade e permeabilidade (GALHARDI, 1998).

A Figura 5 demonstra o processo de colagem de barbotina sob pressão de louças sanitárias de modo industrial. Atualmente adquirir esses equipamentos se dá somente por meio de importação.

Figura 5 - Colagem sob pressão na fabricação de louças sanitárias



Fonte: Baio *et al.* (2021, p. 91)

Entre as empresas que comercializam máquinas empregadas no processo, destaca-se a empresa alemã Lippert que tem em seu portfólio máquinas que possibilitam a automatização total do processo. A Figura 6 mostra a máquina do modelo TDG/500 utilizada para a fabricação de canecas.

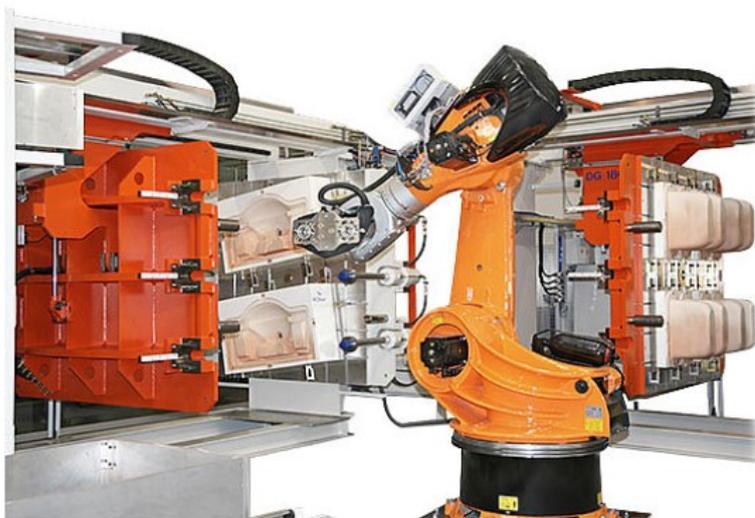
Figura 6 - Máquina TDG/500 da marca LIPPERT



Fonte: LIPPERT (2021)

Fundada em 1860, a holandesa DORST disponibiliza máquinas para a confecção por meio de colagem sob pressão de barbotina de louças sanitárias e de mesa tanto ocas, planas ou peças mais complexas. A Figura 7 mostra a máquina do modelo DG180 que é utilizada tanto para peças ocas ou sólidas.

Figura 7 - Máquina DG180 da empresa DORST



Fonte: DORST (2021)

A Figura 8 apresenta um maquinário utilizado para a conformação de vasos sanitários da empresa britânica PCL.

Figura 8 - Máquina da empresa PCL utilizada para a confecção de vasos sanitários



Fonte: PCL (2021)

2.1.3 Vantagens e Desvantagens entre os Processos

A colagem de barbotina é um processo simples e que demanda mão de obra intensiva, porém é possível a produção de geometrias complexas, mas a natureza do seu processo demanda um tempo maior de conformação. Em relação ao molde utilizado, o material é o gesso Paris que é relativamente barato, mas tem um ciclo de vida curto e há a necessidade de secar os moldes após o processo e, para o aumento

da produção, a solução encontrada é manter uma quantidade exacerbada de moldes o que demanda um grande espaço na empresa para estocar os moldes, além de que não há a possibilidade de reciclagem (ARAÚJO *et al.*, 2012).

A colagem sob pressão é um processo que tem a produção mais elevada em comparação a colagem de barbotina, pois utiliza pressão para acelerar a formação dos objetos a serem conformados e o molde utilizado de resina tem uma vida útil maior e não há a necessidade de mudar de molde para a próxima conformação (GALHARDI, 1998).

Entretanto, os moldes utilizados no processo de colagem sob pressão são muito mais caros em relação aos moldes de gesso e, por vezes, os moldes são adquiridos somente em vendas casadas com os maquinários necessários para o processo. Em termos de qualidade do produto, tem-se maior precisão nas formas, maior resistência mecânica e densidade a verde.

2.2 ESTRUTURAS DOS MATERIAIS POROSOS

Materiais porosos são aqueles que são constituídos por uma fase sólida e, pelo menos, uma fase fluida como por exemplo, um gás, líquido ou vácuo (poros, vazios).

A microestrutura dos materiais cerâmicos é o que resulta nas propriedades desejadas por meio do processo utilizado. A porosidade é a mais importante informação da microestrutura, pois muitas outras características são qualificadas a partir dessa informação e, concomitantemente, o formato dos poros incluindo a curvatura da superfície, conexões entre os poros e o tamanho dos poros também são características que influenciam a eficiência do material poroso (NEWTON, 2016 Pág. 2 – 14).

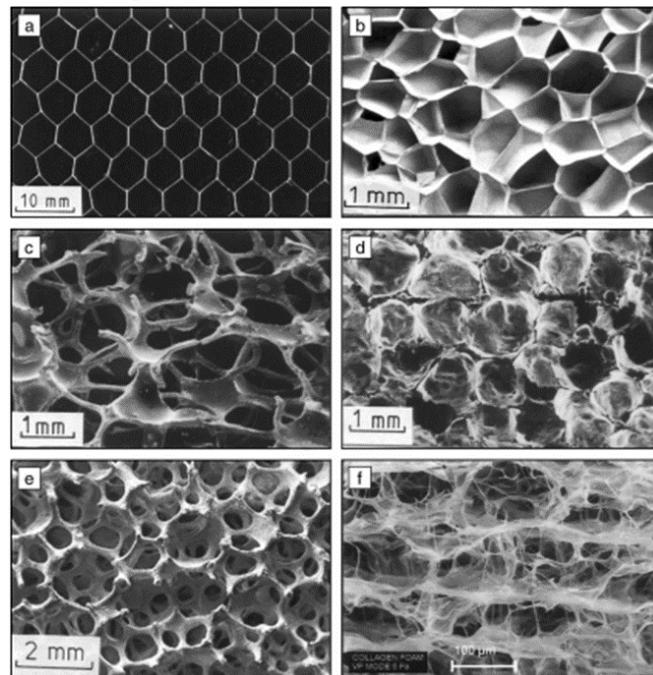
Uma forma de qualificar o material é pela densidade relativa do material que é dada pela relação ρ/ρ_s , onde ρ é a densidade da espuma e ρ_s a densidade do material da parede porosa. O resultado desse cálculo qualifica o material quanto às suas empregabilidades, por exemplo, isolamento térmica, aplicações biomédicas, equipamentos para absorção de energia entre outros (ERGÜN, 2004).

Tradicionalmente, materiais cerâmicos e celulares são classificados da seguinte forma: (NEWTON, 2016)

- Conforme sua porosidade:
 - < 70 % - cerâmicos porosos,
 - >70 % - cerâmicos celulares,
- Conforme a estrutura do reticulado:
 - 2D – honeycombs,
 - 3D – esponjas,
- Conforme o a conectividade e abertura do espaço de poros:
 - Isolado, poros fechados (materiais de células fechadas),
 - Interconectado, poros completamente abertos (materiais de células abertas).

Materiais celulares podem ser isolados ou interconectados. Em materiais isolados, cada célula é completamente encapsulada por paredes celulares finas, ao contrário, materiais interconectados, as células individuais são interconectadas como podemos ver na Figura 9 (ERGÜN, 2004).

Figura 9 - Tipos de conexões entre células



Fonte: Gibson (2003)

A conexão na imagem da Figura 9A chama-se *honeycomb*, na Figura 9B: espuma de polietileno de célula fechada, na Figura 9C: espuma de níquel de célula aberta, na Figura 9D: espuma de vidro de célula aberta, na Figura 9E: espuma de zircônio de célula aberta e na Figura 9F: *scaffold* poros à base de colágeno.

O material usado no molde para a colagem sob pressão deve ser o de células abertas, pois o processo exige permeabilidade suficiente para o escoamento da água da barbotina e retenção da fase cerâmica da suspensão permitindo a formação da parede pelo processo de filtragem.

2.3 ESPUMA DE RESINA EPÓXI

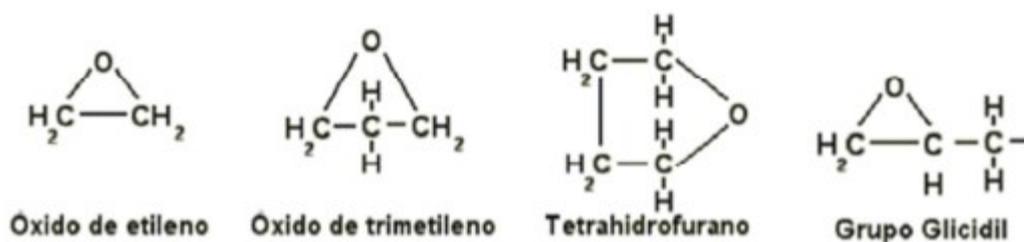
Tradicionalmente, a indústria de fabricação de utensílios sanitários utilizou de moldes de gesso em seus processos. Devido às suas características, esse material, freava o avanço tecnológico que viria com a mecanização do processo. Na busca de um material mais resistente para o emprego de novas técnicas como, a colagem sob pressão, o material ideal foi o plástico. Esse material, em comparação aos moldes de gesso, apresenta uma maior resistência, constância do seu volume durante a polimerização e seu relativo alto custo é absorvido devido à sua vida que é maior que os moldes de gesso (BUTYLEVA *et al.*, 1966).

No presente trabalho o material plástico escolhida foi a resina epóxi. Essa resina é composta de pelo menos dois grupos epoxídicos e um extensor de cadeia, comumente, de amins ou de diácido. São polímeros termofixos com alta rigidez, estabilidade dimensional, resistência mecânica, química e ambiental, processabilidade versátil e relação favorável custo-benefício (ROSA *et al.*, 2020).

A estrutura química denominado epóxi, geralmente, é composta por um átomo de oxigênio que está ligado a dois átomos de carbono em um anel (NASCIMENTO, 2010).

A Figura 10 mostra alguns tipos de estruturas epóxi.

Figura 10 - Grupos de epóxi



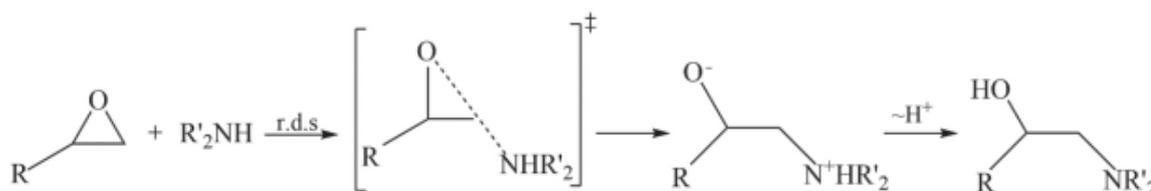
Fonte: Vieira (2006)

Espumas em resina epóxi são fabricadas com o uso de um agente espumante e, se necessário, um estabilizante para manter a espuma após a expansão e antes da solidificação da resina (NOGUEIRA *et al.*, 2012).

O agente endurecedor ou agente de cura é usado para o entrelaçamento da resina epóxi em uma rede tridimensional insolúvel e infusível (RODRIGUES, 1987). Entre os endurecedores utilizados, há as aminas. O uso das aminas como agente endurecedor se dá quando há a necessidade de curas à baixa temperatura (NASCIMENTO, 2010).

A reação geral da cura da cadeia epóxi por amina ocorre por meio de um ataque nucleofílico do nitrogênio da amina no carbono terminal da função epóxi como demonstrado na Figura 11.

Figura 11 - Mecanismo geral para cura de cadeia epóxi com amina



Fonte: Rosa *et al.* (2020).

A formação da espuma se dá pela ação dos agentes surfactantes que diminuem a tensão superficial da solução. Carbonatos são utilizados para esse fim devido à liberação de gás carbônico com sua decomposição em óxidos devido ao aquecimento da solução (MARINO e BOSCHI, 2000).

Com o propósito de modificar as propriedades mecânicas das resinas são adicionados diluentes, cargas, agentes flexibilizantes entre outros aditivos.

Os diluentes são utilizados para diminuir a viscosidade da solução, porém podem ser utilizados para adicionar propriedades como resistência ao impacto e resistência a chamas. As cargas são adicionadas a fim de diminuir a flexibilidade e diminuir o coeficiente de expansão térmico, além de serem um artifício para diminuir o custo final do produto, as mais comumente utilizados são o carbonato de cálcio, alumina, argila, sílica entre outros (NASCIMENTO, 2010).

2.4 FABRICAÇÃO DE MOLDE PARA COLAGEM SOB PRESSÃO

A utilização de um molde de resina para a colagem sob pressão consiste em construir um molde com geometria, tamanho e número de partes configurados de forma a resultar em uma peça cerâmica com o formato desejado.

O molde de resina tem o papel de ser um filtro para que a fase líquida da solução de barbotina, que é bombeada para a cavidade do molde pela ação da pressão imposta pelo conjunto do maquinário que varia de 2 a 50 bar, promova o empacotamento das partículas sólidas da suspensão.

Após o processo inicial de escoamento, a peça conformada se encontra com resistência mecânica entre 30 e 50 kgf/cm², resistência tal que possibilita o manuseio da peça e o recebimento de processos de acabamento, secagem, aplicação de esmalte e queima.

A velocidade da formação das paredes da peça cerâmica está entre 1,5 e 4,0 mm/min, o controle dessa variável se dá pela porosidade dos moldes e da pressão aplicada no conjunto (MU 7501070).

Para a construção do molde é preferível que sua conformidade seja obtida por fundição, de modo que possa prever a confecção dos orifícios e canais internos aos moldes. Uma matriz com os formatos da peça desejada é utilizada para a conformação do molde. A matriz com as dimensões externas iguais às do molde que se deseja fabricar é envolta por uma caixa de Celeron, polipropileno, ou material parecido com os lados perfeitamente planos e em esquadro com furos para encaixe das estruturas internas do molde. Canais internos ao molde são utilizados para facilitar o escoamento da água pelos poros do molde (GALHARDI, 1998).

Os canais internos podem ser divididos em:

- Os que afloram na superfície: pelo menos dois por cavidade, um para a entrada de barbotina e outro para a entrada de ar comprimido utilizado na drenagem do excesso de barbotina e secagem interna da peça cerâmica.
- Canais internos condutores de fluxo: para a formação de um circuito que conduza a todos os locais do molde, os fluxos de água e ar comprimido. Após a montagem da estrutura hidráulica interna e

apoiada na caixa de fechamento, a mistura, previamente produzida, é vertida no interior da matriz.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No trabalho experimental foram confeccionados a espuma de epóxi, os corpos de prova utilizados para os testes de caracterização de materiais porosos como, a porosidade, a densidade e o módulo elástico. E, por fim, o teste do molde para averiguar sua eficiência para sua finalidade no processo de colagem de barbotina sob pressão.

3.1 MATERIAIS

Foi utilizada a resina de nome comercial D.E.R.TM 324 que devido as suas características de baixa viscosidade e baixa tensão superficial, características que fazem com que essa resina supra a necessidade de molhar a superfície adequadamente, se mostra adequada para a obtenção da espuma. O agente de cura 043 foi utilizado para o processo. Tanto a resina quanto o agente de cura são produzidos pela empresa DOW.

Os dados de viscosidade e densidades tanto da resina quanto do agente de cura 043 estão disponibilizados pela fabricante são apresentados na Tabela 2,

Tabela 2 - Informações da resina e agente de cura disponibilizadas pelo fabricante

Componente	Aspecto	Densidade, 25°C	Viscosidade, 25°C
Resina	Líquido viscoso transparente	1,10 g/ml	600 a 800 cps
Agente de Cura	Líquido amarelado	0,98 g/ml	19,5 a 22,5 cps

Fonte: DOW QUÍMICA (2017)

Como carga mineral foi utilizado o carbonato de cálcio ultraleve tratado com 8% de estearato de cálcio. Para o tratamento foi utilizado uma proporção de 0,5g de carga para 1mL de álcool isopropílico e, a mistura, agitada em uma rotação de 200 rpm durante uma hora utilizando o agitador mecânico da marca Quimis, modelo Q250M1. Logo após a agitação, a mistura foi filtrada à vácuo e posteriormente foi realizada a secagem ao ar livre por alguns dias. Após a secagem foi realizada a maceração para desaglomerar as partículas.

Para as emulsões foram utilizados água deionizada, glicerina bidestilada e Tween 80. A mistura era composta por 75% de água e 25% de óleo (glicerina) e o volume do surfactante Tween 80 era o equivalente a 7,5% do volume da mistura de água e óleo.

3.2 OBTENÇÃO DA ESPUMA

Primeiramente foram misturados todos os componentes de emulsão no misturador de modelo Q250M1 com rotação em 1000 rpm até que o líquido acumulado no fundo do recipiente fosse absorvido na forma de espuma. Posteriormente, foi realizada a homogeneização da mistura da resina epóxi com o agente de cura que por dois minutos e, em seguida, essa mistura foi adicionada junta à emulsão. Finalmente, a carga de carbonato de cálcio previamente tratada com estearato de cálcio foi adicionada até sua homogeneização.

O resultado dessa mistura completa foi da espuma em estado líquido que foi vertida para a fabricação da cavidade da peça no molde e dos corpos de prova.

As composições de espuma que foram testadas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Composições para a elaboração das espumas

Espuma	Relação Volumétrica (partes)		Partes Mássicas					
	Resina + Agente de cura	Água + Óleo + Tween	Resina	Carga	Agente	Tween 80	Óleo	Água
1	1,00	0,550	100	90	40	5,38	20,54	48,90
2	1,00	0,575	100	90	40	5,63	21,48	51,15
3	1,00	0,600	100	90	40	5,87	22,40	53,33
4	1,00	0,625	100	90	40	6,11	23,34	55,58
5	1,00	0,650	100	90	40	6,35	24,26	57,75

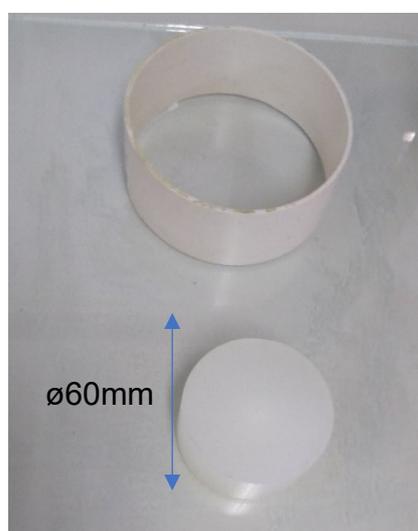
Fonte: Autoria própria, 2022.

Como resultado tem-se cinco espumas, uma dessas composições foi escolhida para a fabricação do molde poroso para o processo de colagem de barbotina sob pressão.

3.3 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

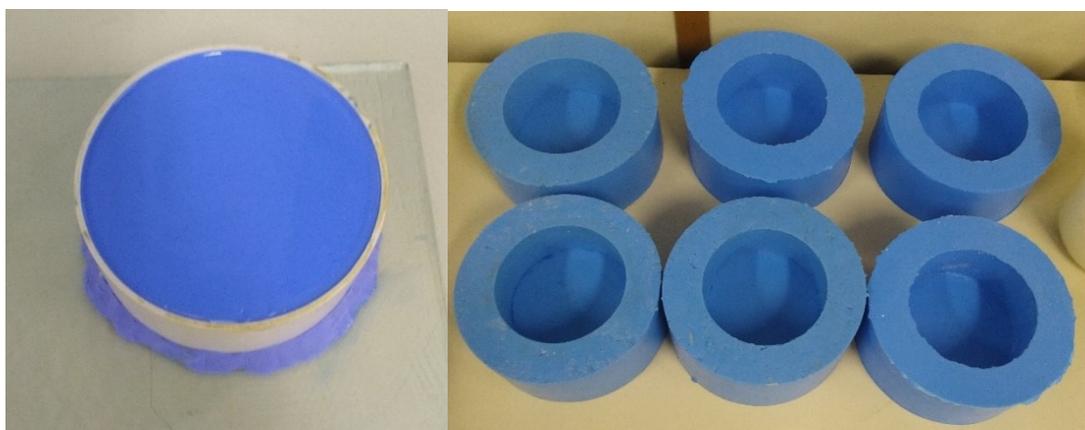
Os corpos de prova que foram utilizados para o ensaio de compressão foram moldados a partir de um molde de silicone que possui as dimensões de 30mm de altura e 60mm de diâmetro. Para esse molde, o modelo de nylon, como visto na Figura 12 com as dimensões dos corpos de provas, são coladas sobre uma lâmina de vidro e posteriormente envolto por um cano de PVC, foi passado desmoldante no conjunto e nas laterais externas inferiores do cano, e então, foi selado com a ajuda de massa de modelar para evitar vazamentos, como visto na Figura 13.

Figura 12 - Modelo de nylon



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 13 - Molde de Silicone



Fonte: Autoria própria (2022).

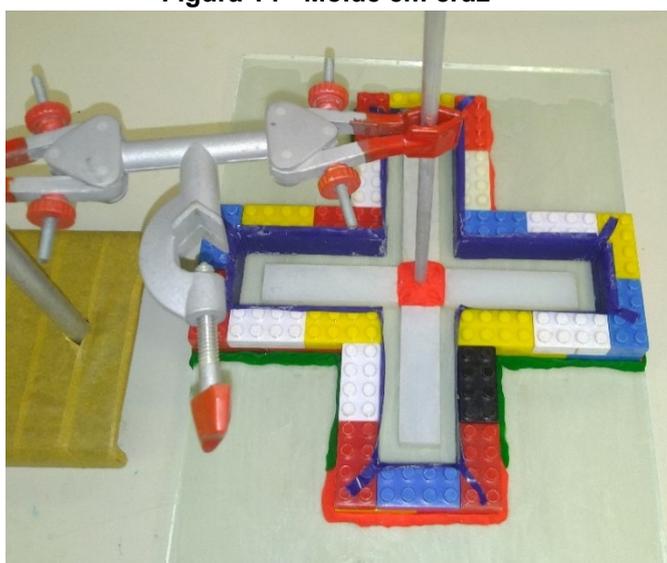
Foi preparada a mistura de silicone azul e catalisador em uma proporção de 1 gota de catalisador para cada 1 grama de silicone para, em seguida, verter a mistura dentro do cano até que fosse atingida a altura total, foi esperado 24 horas para que o molde estivesse pronto para ser utilizado.

Foram feitos seis moldes para os corpos de prova para os ensaios de compressão.

Para os corpos de prova destinados às medidas de densidade e porosidade o processo assemelha-se ao anterior, porém a geometria é diferente, pois o molde tem quatro cavidades na forma de paralelepípedo dispostas lado a lado.

Para o teste de colagem de barbotina foi confeccionado um molde, com a composição mais adequada para o processo, no formato de cruz com quatro cavidades de geometria de 60mm de comprimento, 20mm de largura e 10mm de altura. Para a confecção desse molde foi utilizado peças do tipo Lego e fita adesiva emborrachada para uma maior rigidez a fim de manter a geometria. O canal onde a barbotina foi vertida foi obtida com a utilização de massa de modelar e um cilindro de alumínio posicionado com a ajuda de um mordente, como pode ser visto na Figura 14. Todas as laterais do molde, assim como os modelos para a obtenção das cavidades, foram embebidas com líquido desmoldante e as laterais seladas com massa de modelar.

Figura 14 - Molde em cruz



Fonte: Autoria própria (2022)

Por seguinte a espuma foi produzida conforme o procedimento do Tópico 3.2 e, em seguida, vertida para dentro dos moldes de silicone, Figura 15 e 16. Após dois

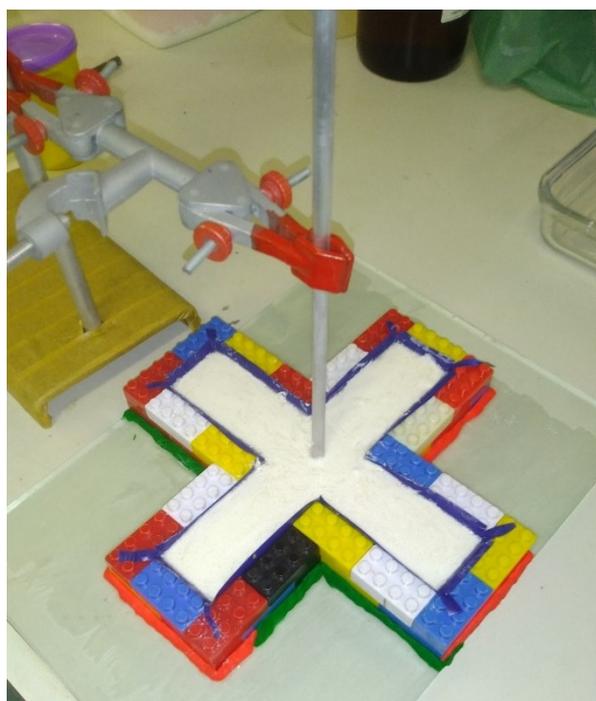
dias, os corpos foram desmoldados e, em seguida, colocados na estufa por 2 dias em uma temperatura de 30°C a fim de acelerar a obtenção de rigidez das peças, finalmente, foram necessários mais cinco dias de repouso em temperatura ambiente para que as peças pudessem ser caracterizadas.

Figura 15 - Espuma no molde de silicone



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 16 - Composição no molde em cruz



Fonte: Autoria própria (2022)

3.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS POROSOS

3.4.1 Ensaio de Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão do molde foram feitos seguindo a norma técnica ASTM D1621-94 de 2016 que normaliza o teste de compressão em materiais plásticos rígidos utilizando a máquina DL-5000/10000 da marca EMIC de 100kN. Os dados foram tratados por meio do *software* Tesc que comanda o ensaio junto à máquina e o programa Microsoft Office Excel para a análise dos dados.

Os seis corpos de prova têm 30mm de altura e diâmetro de 60mm. A célula de carga utilizada é de 100kN com uma taxa de deslocamento de 2,5mm/min. Para as paradas, foram estabelecidos os seguintes critérios: deformação máxima de 20mm ou força máxima de 90kN (ASTM D1621-94, 2016).

Os dados obtidos foram de tensão e deslocamento. O resultado de deslocamento não utiliza extensômetros, e sim, o deslocamento da própria célula de carga na direção do ensaio.

Para o cálculo dos módulos elástico é utilizado o *software* Excel, sendo utilizado para a plotagem dos gráficos utilizando os dados obtidos por meio do ensaio de compressão.

Para a obtenção do módulo elástico foi utilizada a Equação 2.

$$E = \frac{\Delta\delta}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

No qual:

E = Módulo elástico, MPa;

δ = Tensão, MPa;

ε = Deformação.

Os dados, tanto de tensão como deformação, são extraídos do gráfico na região anterior a deformação plástica, essa região é caracterizada como uma reta.

3.4.2 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

Por essa técnica foi caracterizada a porosidade, o tamanho médio de poros e a área superficial total.

O porosímetro de intrusão de mercúrio é formado por uma bomba de vácuo, que gera o vácuo na câmara de pressão, uma balança analítica utilizada para determinar a massa do corpo de prova com uma precisão de $\pm 1\%$ que significa uma precisão de $\pm 0,1$ mg e mercúrio com uma pureza de no mínimo de dupla destilação (UOP Method 999, 2016).

O método consiste em posicionar o corpo de prova previamente pesado e que tenha sido eliminado os resíduos gasosos na câmara de baixa pressão do porosímetro, gerar vácuo e preencher a câmara com mercúrio, que devido sua característica de ser um líquido que não molha, não adentra os poros do material a não ser que pressão seja aplicada por meio do porosímetro. As pressões aplicadas são entre 1,5 kPa e 350 kPa dependendo de quão grandes são os poros de interesse. Em seguida, os corpos de prova irão ser posicionados na câmara de alta pressão que podem chegar até 231 MPa para que o mercúrio adentre nos poros do material. O dado recolhido é a pressão necessária para que o mercúrio penetre no material e essa pressão está ligada ao tamanho do poro que o material possui e quanto maior a pressão necessária, menor o tamanho do poro. (ASTM D4284-12, 2016).

O tamanho do poro pode ser calculado pela Equação 1.

$$D = \frac{-4\gamma \cos \theta}{P} \quad (2)$$

No qual:

D = diâmetro do poro, μm ;

P = pressão, psia;

γ = tensão superficial do mercúrio, dynes/cm e

θ = ângulo de contato entre o mercúrio a o material sendo testado, graus.

3.4.3 Medição de Densidade

Segundo a Norma ASTM D4892 de 1999 a picnometria de hélio é uma técnica utilizada para a determinação do volume ocupado do material a ser testado, por meio da comparação da variação da pressão de hélio na câmara com o corpo de prova e uma câmara de volume calibrado. O gás hélio é utilizado por sua característica de ser inerte e de penetrar facilmente nos poros das amostras.

Para efetuar o procedimento são necessários os seguintes aparatos: Picnômetro de hélio, balança capaz de pesar um corpo de prova de 150g com precisão

de 1mg; peneira de padrão americano 2,36mm (Nº 8), 600µm (Nº 30) e termômetro para medira a temperatura ambiente.

As amostras foram ser secas a ar ou em fornos convencionais ou em fornos com fluxo de ar forçado à 50° C. A preparação do corpo de prova continua com a extração de uma porção de 50 a 200g com tamanho que atravesse a peneira de 2,38mm e selecionar os pedaços com melhor formação e selecionar com o uso da peneira de 600µm. Calibrar o picnômetro de hélio. Posicionar de 10 a 150g no compartimento do instrumento e pesar com a maior precisão possível e determinar o volume. Determinar o volume aplicado seguindo instruções da máquina e pesar o corpo de prova, durante o processo, anotar a temperatura ambiente.

Esse procedimento determina o volume de uma determinada massa em temperatura ambiente, para o cálculo da densidade a Equação 3 que é corrigida para 25° C foi usada:

$$d_{r25^{\circ}C} = \frac{W}{V_t[1 \pm 0,00047\Delta t]} \quad (3)$$

Sendo:

W = massa do corpo de prova, g;

V_t = volume do corpo de prova, cm³, em temperatura ambiente;

Δt = diferença entre 25° C e a temperatura medida;

d_{r25°C} = densidade real a 25° C, g/cm³.

A densidade aparente (d_a) foi determinada medindo a massa e as dimensões com paquímetro de um corpo de prova de secção transversal retangular, descrita pela Equação 4

$$d_a = \frac{W}{V_t} \quad (4)$$

Sendo:

W = massa do corpo de prova, g;

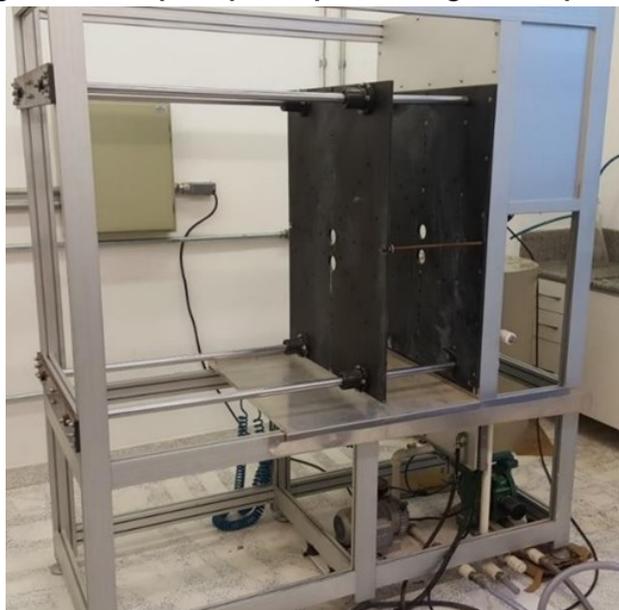
V_t = volume do corpo de prova, cm³, em temperatura ambiente.

3.5 FIXAÇÃO E TESTE NA MÁQUINA PROTÓTIPO

Após fabricado, o molde foi testado na máquina protótipo desenvolvida na UTFPR pelo grupo de pesquisa do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT) com a

ajuda de um convênio da FUNTEF, FINEP e SEBRAE. Em contrapartida aos altos custos das máquinas usadas no processo de colagem sob pressão para louças de mesa disponibilizadas no mercado, a máquina protótipo foi desenvolvida para ser uma alternativa quanto ao que se encontra no mercado tendo um custo menor. A Figura 17 apresenta a máquina desenvolvida.

Figura 17 - Máquina protótipo de colagem sob pressão



Fonte: Mendes (2018).

O tanque misturador da barbotina e o painel de controle são apresentados na Figura 18.

Figura 18 - painel de comando e tanque misturador de barbotina



Fonte: Mendes (2018)

A Figura 19 apresenta o sistema de fixação do molde na máquina para colagem sob pressão, na estrutura da máquina há um painel de furações padrão e são utilizadas laxes de fixação.

Figura 19 - Placa de fixação e laxe de fixação



Fonte: Mendes (2018)

O padrão de furação na placa segue uma disposição radial separados em ângulos de 45° e cada sequência de furos é separado por 60 mm no raio. A barbotina é aplicada pela abertura central de 60 mm de diâmetro posicionada atrás da placa conectada ao molde.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

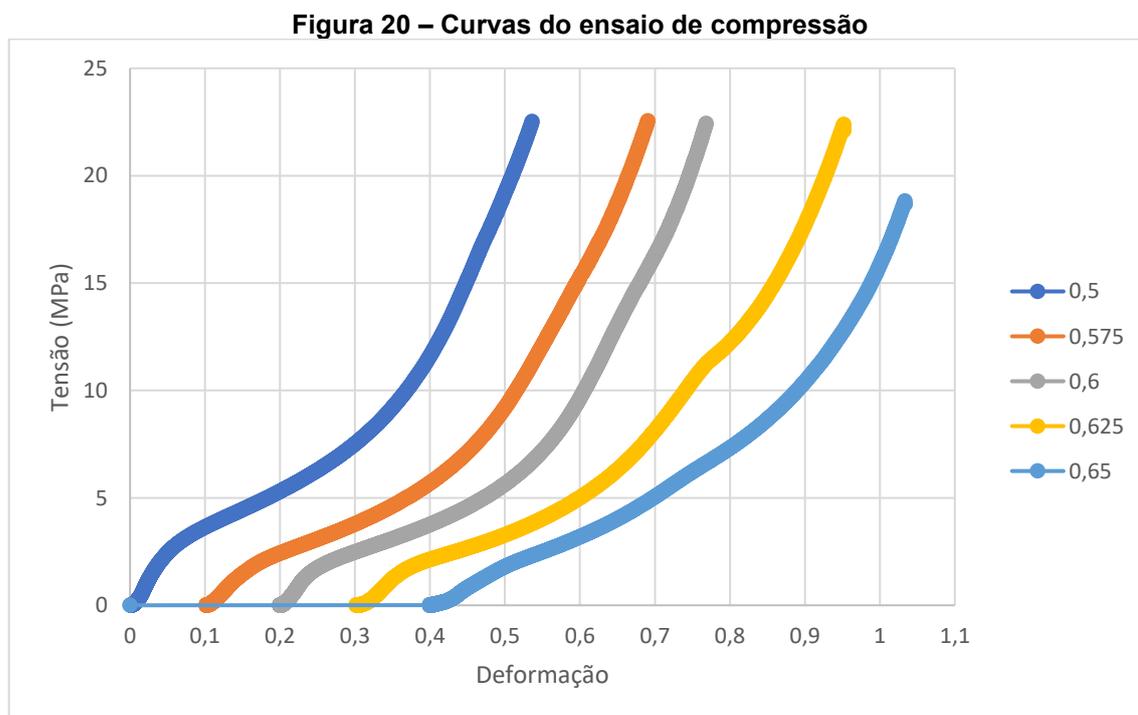
No presente capítulo será apresentado os resultados dos testes de caracterização dos corpos de prova seguidos de uma breve discussão.

Primeiramente os resultados do ensaio de resistência à compressão, seguindo pelos resultados dos testes de porosimetria por mercúrio, de picnometria, e finalmente, o teste de colagem de barbotina sobre pressão com a composição escolhida.

4.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Como pode ser visto na Figura 20, as curvas obtidas a partir do ensaio de compressão assemelham-se, iniciando em uma região com inclinação acentuada seguida de uma curva crescente.

Durante o ensaio de compressão foi possível observar a característica elástica do material que após ser submetido ao teste, em poucos minutos, recupera seu formato original como demonstrado na sequência de fotos no Quadro 1.



Fonte: Autoria própria (2022).

Quadro 1 - Sequência de deformação do corpo de prova no ensaio de compressão

		<p>Corpo de prova de composição 0,55 antes do ensaio de compressão. Vista lateral.</p>
		<p>Corpo de prova de composição 0,55 antes do ensaio de compressão. Vista superior.</p>
		<p>Corpo de prova de composição 0,55 após o ensaio de compressão. Vista lateral.</p>
		<p>Corpo de prova de composição 0,55 após o ensaio de compressão. Vista superior.</p>
		<p>Corpo de prova de composição 0,55 após alguns minutos em repouso. Vista lateral.</p>

Fonte: Autoria própria (2022).

4.1.1 Deformação à 1 MPa

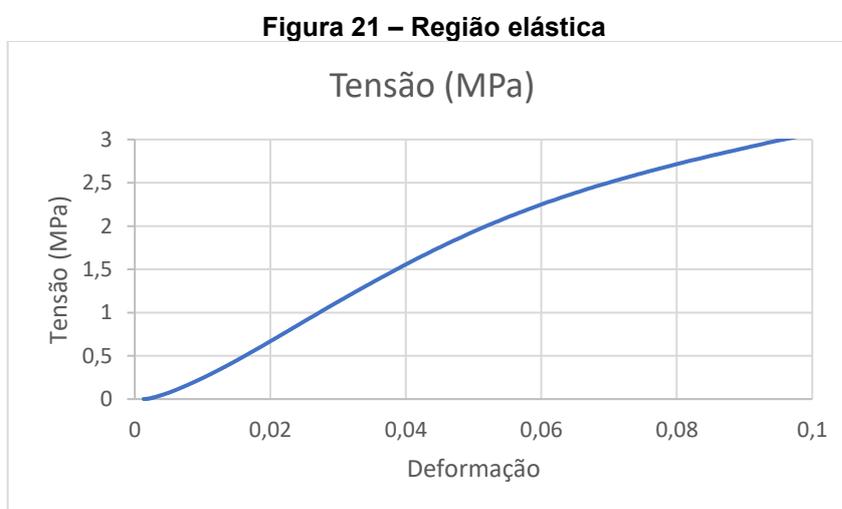
Durante o processo de colagem de barbotina sob pressão, a magnitude alcançada pelo equipamento para fazer o processo se dá entre 1 e 1,3 MPa (10 e 13 bar), a Tabela 5 apresenta a deformação dos corpos de prova sob uma tensão de 1MPa (10 bar).

Tabela 4 - Deformação sob tensão de 1 MPa (10 bar)

Amostra	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65
1	0,0309	0,0370	0,0411	0,0579	0,0494
2	0,0258	0,0364	0,0365	0,0508	0,0395
3	0,0341	0,0342	0,0445	0,0543	0,0344
4	0,0239	0,0392	0,0331	0,0729	0,0443
5	0,0221	0,0350	0,0270	0,0450	0,0505
6	0,0274	0,0542	0,0382	0,0437	0,0430
Média	0,0274 _a	0,0393 _b	0,2204 _b	0,3246 _c	0,0802 _d
Desvio Padrão	0,0045	0,0075	0,0062	0,0107	0,0060
Coefficiente de Variação	16,35%	1,90%	2,79%	3,29%	2,32%

Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 21 é uma ampliação da reta da composição de 0,55, na qual podemos observar que a região elástica se dá abaixo de 2 MPa e que a tensão de 1MPa encontra-se dentro dessa região. Podemos concluir que os materiais se comportam adequadamente para o processo de colagem de barbotina sob pressão.



Fonte: Autoria própria (2022).

Uma análise comparativa entre as deformações dos corpos de provas de diferentes composições foi feita utilizando a função ANOVA do *software* EXCEL. Essa função é uma análise de variância que utiliza o teste F, na qual a hipótese nula é aceita ou rejeitada segundo as comparações entre os dados obtidos. Quando a hipótese é aceita, as variâncias dos dados encontram-se pertencentes à mesma população, ou seja, as médias das amostras fazem parte da mesma população e, portanto, recebem a mesma letra, num nível de significância de 0,05.

A análise dos dados demonstra que a variância da deformação é relevante entre os corpos da composição 0,55 e 0,575, entre os corpos de 0,575 e 0,6 a diferença não é substancial, entre os corpos 0,6 e 0,625 a diferença é relevante e, entre, os corpos 0,625 e 0,65 a diferença não é relevante.

4.1.2 Módulo Elástico

Por meio da análise das curvas foram extraídos os módulos de elasticidades dos corpos de provas, os módulos são apresentados na Tabela 5, assim como os resultados do teste estatístico.

Analisando os dados da Tabela 5, nota-se que as composições de 0,55, 0,575, 0,6 e 0,65 diferem entre si substancialmente, entretanto, as composições de 0,6 e 0,625 apresentam suas variâncias dentro da mesma população. Observa-se que o módulo elástico diminui enquanto a concentração aumenta, excluindo a concentração de 0,65 que possui o maior módulo elástico entre as composições.

Tabela 5 - Módulo elástico (MPa)

Amostra	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65
1	16,1429	13,7074	12,2468	12,4717	17,8765
2	16,5466	14,9024	12,8949	10,5107	29,3500
3	16,3817	13,7074	12,6496	12,4951	29,3500
4	15,5517	12,7133	12,3538	12,7604	24,1341
5	16,4321	13,3402	12,2889	11,2843	19,9600
6	15,8024	13,8738	12,3257	11,0935	17,6664
Média	16,14289 _a	13,70744 _b	12,45998 _c	11,76927 _c	23,05617 _d
Desvio Padrão	0,3580	0,6556	0,2342	0,8444	4,9303
Coefficiente de Variação	2,22%	4,78%	1,88%	7,17%	21,38%

Fonte: Autoria própria (2022).

4.2 DENSIDADE

O ensaio de picnometria por hélio determina a densidade real do material, Tabela 6. Por meio de análise de variância teste F, as médias das densidades das amostras 0,55, 0,575, 0,6 e 0,625 não apresentam diferença significativa, em contrapartida a amostra de 0,65 apresenta diferença considerável.

Tabela 6 – Densidade real (g/cm³)

CP	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65
1	1,416	1,372	1,391	1,405	6,198
2	1,449	1,433	1,461	1,490	6,261
3	1,463	1,450	1,469	1,465	6,189
4	1,450	1,430	1,529	1,475	6,088
5	1,430	1,441	1,470	1,473	6,146
Média	1,442 _a	1,426 _a	1,464 _a	1,462 _a	6,176 _b
Desvio Padrão	0,018	0,028	0,0490	0,033	0,064
Coefficiente de Variação	1,28%	2,00%	3,35%	2,26%	1,04%

Fonte: Autoria própria (2022).

Em relação ao corpo de prova com composição de 0,65, esse mostra-se como um material com densidade muito acima das demais composições. Uma explicação pode ser o fato de que com essa composição a mistura se mostrou heterogênea, uma vez que a água presente na composição formou uma fase distinta do resto do material como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Corpo de prova de composição 0,65



Fonte: Autoria própria (2022).

Por meio da coleta das medidas de massa e de dimensão dos corpos de prova em formato de paralelepípedo foram calculadas as densidades aparentes apresentadas na Tabela 7. Aplicando o teste de variância F, constata-se que todos as médias das densidades não apresentam diferenças significativas.

É possível calcular a porosidade a partir dos valores das densidades real e aparente, conforme a Equação 5, os resultados são apresentados na Tabela 8.

$$\text{Porosidade (\%)} = \left(1 - \frac{d_a}{d_r}\right) * 100 \quad (5)$$

Sendo:

d_a = densidade aparente;

d_r = densidade real.

Tabela 7 - Densidade aparente (g/cm³)

CP	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65
1	1,082	0,996	0,989	0,998	1,020
2	0,992	0,967	1,006	0,988	0,984
3	1,016	1,026	0,994	0,989	1,000
4	1,034	0,810	0,968	0,979	0,978
5	1,045	0,806	0,851	1,001	1,030
Média	1,034 _a	0,921 _a	0,962 _a	0,991 _a	1,002 _a
Desvio Padrão	0,034	0,105	0,063	0,009	0,023
Coefficiente de Variação	3,04%	19,13%	6,55%	1,45%	3,62%

Fonte: Autoria própria (2022).

4.3 POROSIDADE

Por intermédio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi possível obter os seguintes dados: porosidade total, diâmetro médio de poros e área superficial total apresentados na Tabela 8. Para efeito de comparação, foram calculadas as porosidades com base nas densidades real e aparente, segundo a sua quantidade relativa de solução emulsificante.

Tabela 8 - Porosidade e diâmetro de poro

Amostra	Porosidade total (%)	Porosidade calculada a partir das densidades	Diâmetro médio de poros (µm)	Área superficial total (m ² /g)
0,55	23,99	28,02	7,51	2.0118
0,575	3,32	35,42	8.113E-02	1.1637
0,6	3,69	34,28	8.142E-02	1.4960
0,625	2,67	32,22	5.282E-02	1.7126
0,65	3,81	83,77	6.935E-02	5.1580

Fonte: Autoria própria (2022).

Observando os dados, nota-se uma pequena diferença de 4% entre os resultados da porosidade total e a calculada para a emulsões de 0,55. A partir de 0,55 a diferença entre as porosidades total e calculada aumenta significativamente.

O resultado esperado era que houvesse um aumento de porosidade, do tamanho de poros e da área superficial com o aumento da quantidade de emulsificante. Porém, os resultados obtidos por porosimetria de intrusão de mercúrio indicaram uma redução abrupta da porosidade total e do tamanho médio de poros, após a concentração de 0,55. Isto pode ser uma indicação de colapso da estrutura da espuma durante o ensaio.

A amostra de 0,65 apresenta uma porosidade calculada e uma área superficial muito acima das demais, o que pode ter advindo da formação de uma fase aquosa que promoveu a geração de poros na forma de canais.

Na Tabela 9 são apresentados os dados de porosidade e tamanho médio de poros encontrados no trabalho de Galhardi (1998) e na Tabela 10 são apresentados os dados de molde comercial da empresa Aldero. Nota-se que os valores de porosidade encontrados estão próximos dos obtidos por Galhardi (1998). Entretanto, os dados de tamanho médio de poros dos moldes em PMMA e em Gil-Resin são maiores do que os obtidos por meio dos experimentos com epóxi do presente trabalho.

Tabela 9 - Característica de espumas de PMMA

Espuma	Porosidade (%)	Tamanho médio de poros (μm)
A1	22,4	96
A6	25,7	109
A12	43,6	155
B1	20,3	62
B6	24,1	75
B12	40,6	97
C1	31,3	56
C6	25,2	40
C12	31,3	56

Fonte: Galhardi (1998).

Tabela 10 - Dados técnicos do molde comercial fabricado com GIL-RESIN da Aldero

	GIL-RESIN S	GIL-RESIN T
Pressão de trabalho (bar)	5-14	10-12
Diâmetro médio de poro (μm) ¹⁾	30	20
Volume específico médio do poro (ml/g) ¹⁾	0,33	0,28
Taxa de escoamento (l/min) ²⁾	Mín. 20	Mín. 15
Resistência à tração (N/mm ²)	Mín. 20	Mín. 20
Resistência à compressão (N/mm ²)	Mín. 35	Mín 40

1) Medido com porosímetro por intrusão de mercúrio.

2) Espessura: 2 mm - Diâmetro: 80 mm - Área: 50,2 cm² - Pressão da água: 2 bar.

Fonte: Aldero (1998) - traduzido.

4.4 TESTE DE COLAGEM

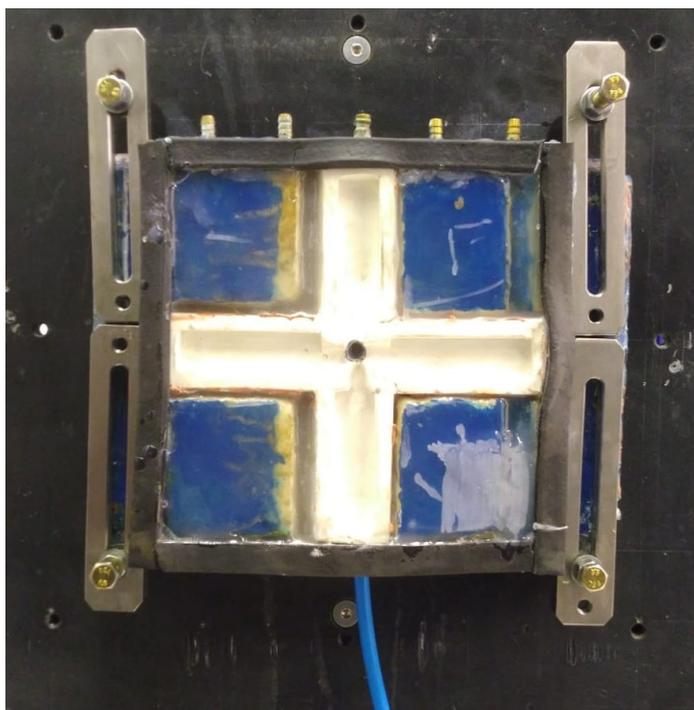
Para o teste de colagem de barbotina sob pressão, a composição escolhida foi a de 0,55 por ser a composição que apresentou a menor deformação a 1 MPa.

Primeiramente, o molde já preparado com a composição escolhida, conforme apresentada na Figura 21, foi fixado na máquina de teste de colagem, apresentada na Figura 17, por meio de laxas de fixação como apresentado na Figura 22.

Figura 21 - Molde Finalizado



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 22 - Molde Fixado

Fonte: Aatoria própria (2022).

Em seguida, a conexão de bombeamento de saída do fluido foi conectada na parte inferior do molde por meio de uma conexão rosqueada, a tubulação de entrada de barbotina foi posicionada de modo a estar submersa no fluido.

Uma placa acrílica foi posicionada frontalmente ao molde e, então, a placa frontal da máquina foi colocada em contato com o molde e um aperto foi imposto por meio de duas roscas laterais. A Figura 23 demonstra a visão frontal do molde posicionado com a placa de fixação da máquina, as aberturas facilitam a visualização do processo.

Figura 23 - Vista frontal do molde

Fonte: Aatoria própria (2022).

A configuração do modo de trabalho da máquina foi colocada no modo manual por meio dos controles presentes no painel de controle da máquina conforme a Figura 18 apresenta, em seguida o compressor foi acionado por meio do mesmo painel e após o compressor desligar o processo pôde ser iniciado.

A Figura 24 apresenta o molde logo após o ensaio e a Figura 25 apresenta um início de formação de parede no molde.

Figura 24 - Molde após o ensaio



Fonte: A autoria própria (2022).

Figura 25 - Início de formação de parede



Fonte: A autoria própria (2022).

Ao decorrer do teste foi observado que o sistema de vedação não foi suficiente para que o processo se realizasse até o final programado, já que a borracha de vedação inferior se deslocou e o fluido começou a verter pelo espaço aberto.

Encerrado o teste foi possível observar que houve o início de formação de parede no molde poroso, porém devido ao problema de vedação não houve tempo suficiente para que fosse formada uma peça.

5 CONCLUSÃO

As necessidades do setor de louças de mesa no cenário brasileiro para se manter competitivo e, principalmente, confrontar os produtores internacionais, tangencia a automação e aperfeiçoamento da produção. O processo consolidado para aumentar a produção de louças é a colagem de barbotina sob pressão, que precisa de maquinários desenhados para tal processo e de moldes, que usualmente são vendidos juntamente com as máquinas e são, necessariamente, importados.

Portanto a confecção de um molde poroso de epóxi para a colagem de barbotina sob pressão se mostra pertinente para o progresso tecnológico nacional.

A partir dos dados obtidos por meio dos experimentos observa-se que a técnica descrita no presente trabalho produz espumas rígidas porosas e suas diferentes composições geram materiais que diferem entre si quanto a resistência mecânica.

Os dados resultantes nos ensaios de compressão apresentam-se coerente, pois os dados confirmam que diferentes composições geram diferentes módulos de elasticidade e como esperado o aumento da quantidade de emulsificante diminuiu o módulo até a composição com 0,65, nesta composição em especial houve um aumento significativo.

Quanto a densidade real obtida por meio do ensaio de picnometria, os resultados demonstram que as composições excluindo a composição de 0,65 mostram-se uniformes e a concentração de emulsificante não tem efeito sobre a densidade. As densidades aparentes foram consideradas semelhantes.

A porosidade medida por intrusão de mercúrio dos materiais não foi útil para comparar as composições, pois as amostras com proporção de emulsificante maior que 0,55 não suportaram a pressão usada no ensaio e provavelmente colapsaram. A porosidade da amostra com 0,55 foi de 24%. A porosidade calculada a partir das densidades apresentaram valores próximos aos obtidos por Galhardi (1998). Entretanto, os valores de tamanho de poros encontrados foram menores dos que os obtidos com os moldes comercializados pela Aldero ou os dos experimentos de Galhardi (1998).

A composição escolhida para o teste de colagem de barbotina sob pressão mostrou-se promissora para o processo e recomenda-se para trabalhos futuros

refazer o molde com uma precisão geométrica melhor a fim de produzir um molde com um sistema de fixação mais eficiente.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002

ALDERO. Microporous resins. Disponível em:
<<https://www.aldero.com>.> Acesso em: 22 de out. 2021.

ANFACER: Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento, Louças Sanitárias e Congêneres. Setembro de 2019.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO SETOR DE TRANSFORMAÇÃO DE NÃO METÁLICOS. Brasil, 2020.

ARAUJO, M. S.; WENG L.Y.; JACICHEN G.; CERRI J.A.; A tecnologia de colagem sob pressão como fortalecimento competitivo para a indústria de louça de mesa nacional *In*: 56º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2012, Curitiba. **Anais[...]** Curitiba.

ASTM (American Society for Testing and Materials). **D 4892-89**: Standard Test Method for Density of Solid Pitch (Helium Pycnometer Method). USA: ASTM, 1999.

ASTM (American Society for Testing and Materials). **D 4284-12**: Determining Pore Volume Distribution of Catalysts and Catalyst Carriers by Mercury Intrusion Porosimetry. USA: ASTM, 2016.

ASTM (American Society for Testing and Materials). **D 1621-94**: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics. USA: ASTM, 2016.

AUGUSTSSON, C. **NM EPOXY HANDBOOK**, 3, Sweden, 2004.

BAINO, F.; TOMALINO, Massino. **Ceramics, Glass and Glass-Ceramics**: From Early Manufacturing Steps Towards Modern Frontiers. Turin: Ed. Springer, 2021.

BUSTAMANTE, Gladstone Motta *et al.* A indústria cerâmica brasileira. **Cerâmica industrial**, v. 5, n. 3, p. 31-36, 2000.

BUTYLEVA, E. S.; SERGEEVA, V. A.; DETAIN G. G; KANAeva, V. I. **Steklo i Keramika**, Vol. 23, No. 5, pp. 29-31, 1966.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 10th Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

ERGÜN, Y. **Development and Characterization of PMMA Based Porous Materials Used for High Pressure Casting of Sanitaryware Ceramics**. Dissertação de Mestrado. Department Materials Science and Engineering, Izmir Institute of Technology, Pg 50-55, jul.2004.

FREITAS, D. A. N.; ARAÚJO, M. S.; CERRI, J. A. Desenvolvimento de molde polimérico para colagem sob pressão de peças cerâmicas. *In: 56° CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA*, 2012, Curitiba. **Anais [...]** Curitiba P. 2570 – 2581, 2012.

GALHARDI, A. C.; **Desenvolvimento e Caracterização de Espumas Rígidas com Poros Intercomunicantes de Polimetacrilato de Metila e sua Aplicação na Indústria Cerâmica**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Materiais, Campinas, UNICAMP, dez. 1998.

GELHARDI, Antonio Cesar. MU 7501070-a U, 01 mar. 1995, 09 set. 1997.

GIBSON, Lorna J. ; ASHBY, Michael F. **Cellular solids: structure and properties**. Cambridge university press, 1999.

HEINRICH, J. G.; GOMES, C. M. **Introduction to Ceramics Processing**. Lecture Manuscript, TU Clausthal, 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Bases Técnicas para Modernização e Consolidação do Arranjo Produtivo de Cerâmica Branca de Pedreira**. São Paulo: IPT, 2006. (Relatório Técnico, n. 90869-205)

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Estudo Estratégico da Cadeia Produtiva da Indústria Cerâmica no Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 2018. (Relatório Técnico, n. 153900-205)

IPARDES – INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL; UEPG – UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA; GOVERNO DO PARANÁ – SECRETARIA DE ESTADO DO PLANEJAMENTO. **Arranjo Produtivo Local de Louças e Porcelanas de Campo Largo**: Estudo de Caso. Curitiba: IPARDES, 2006.

LABROZZI, E. ; Castings from the Beginning up to Present-Day Technology. **Ceram. Eng. Sci**, v15, p.93 - 97, 1994.

MARINO, L. F; BOSCHI, A. O. A expansão térmica dos revestimentos cerâmicos. Parte IV: Efeitos da adição de Dolomita, **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 1, 2000.

MENDES, Murilo. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE MOLDE POROSO EM EPÓXI PARA COLAGEM SOB PRESSÃO DE PEÇAS CERÂMICAS**. 2018. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018

NASCIMENTO, Richard Rangel do. **Estudo do Comportamento Reocinético, Propriedades de Temperatura de Transição Vítea e Viscosidade de Sistemas de Resinas Epóxi**. Dissertação de mestrado. Departamento de Química, São Carlos, UFSC, 2010.

NEWTON, Alan. **Advances in Porous Ceramics**, 8th. Ed. New York : Nova Science Publishers, Inc, 2016.

NOGUEIRA, A.B.; ARAUJO, M. S.; CERRI, J. A. Planejamento Experimental para Estudo de Composição de Espumas em Resina Epóxi de Células Abertas. *In*: 20º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, 2012, Joinvile. **Anais [...]** p. 2234 - 2241.

ORTEGA, Fernando S. **Processamento de Materiais Cerâmicos: Conformação Fluida de Materiais Cerâmicos**, Universidade de São Paulo, 2020. Acesso em 21 de outubro de 2020. Disponível em:
<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1942359/mod_resource/content/1/apost%2008%20-%20conforma%C3%A7%C3%A3o%20fluida.pdf>

PALUCH, M. P. **Obtenção de Espuma Microporosa Para Uso em Molde de Colagem Sob Pressão de Peças Cerâmicas**. 2005. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PALUCH, M. P. Espuma Rígida de Célula Aberta Obtida por Emulsão em Epóxi. *In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS*, 2012, Joinville, **Anais [...]**, p. 8126-8137. 2012

PRADO, US do *et al.* Panorama da indústria cerâmica brasileira na última década. **Cerâmica Industrial**. São Paulo, v. 18, n. 1, p. 07-11, 2013.

RODRIGUEZ, Maria Regina Alves. **Estudo da Reação de Cura da Resina Epóxi com Anidrido Ftálico E Trietilamina como Iniciador**. Dissertação de doutorado. Rio Grande do Sul. UFRS. 1987.

ROSA, Ellen Cristine Araújo. *et al.* Dinâmica Molecular Reativa da Abertura do Anel Epóxi em Reações com Poliamina. **Quim. Nova**, v. 43, n. 5, p. 528-533, 2020.

RONFELD, Rafael S. **IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS EM MÁQUINA PROTÓTIPO DE COLAGEM SOB PRESSÃO DE PEÇAS CERÂMICAS**. 2018. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

RUIZ, Mauro Silva, *et al.* A Indústria de Louça e Porcelana de Mesa no Brasil. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 29-34, 2011.

UOP. **UOP Method 578-11**: Automated Pore Volume and Pore Size Distribution of Porous Substances by Mercury Porosimetry. USA: UOP, 2016.

VENKAT, Mani. High Pressure Casting in Sanitaryware. 2019. Disponível em <https://ceramicninja.com/high-pressure-casting-in-sanitaryware/>. Acesso em: 10 de out. 2021.

WENG, L.Y; **Adição de amido em massa comercial para produção de louça de mesa por colagem sob pressão**. Dissertação de mestrado. Curitiba. UTFPR. 2009.

VIEIRA, J. C; **Estudo de interfases eletroquímicas envolvendo materiais metálicos de uso odontológico**. Dissertação de mestrado. São Paulo. Universidade de São Paulo. 2006