

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Tulio Concolato Cunha

Fabricação de um Cadinho Pelo Método de Colagem de Barbotina

Juiz de Fora

2019

Tulio Concolato Cunha

Fabricação de um Cadinho Pelo Método de Colagem de Barbotina

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini

Juiz de Fora

2019

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Cunha, Tulio Concolato.

Fabricação de um Cadinho Pelo Método de Colagem de Barbotina /
Tulio Concolato Cunha. – 2019.

35 f. : il.

Orientador: Raphael Fortes Marcomini

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Juiz de Fora,
Faculdade de Engenharia. Curso de Graduação em Engenharia Mecânica,
2019.

1. Trabalho de Conclusão de Curso. I. Fortes Marcomini, Raphael,
orient. II. Título.

Tulio Concolato Cunha

Fabricação de um Cadinho Pelo Método de Colagem de Barbotina

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 7 de Novembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Carlos Renato Pagotto
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior
Universidade Federal de Juiz de Fora

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a fabricação de um cadinho cerâmico com total funcionalidade para uso no laboratório e também para estudo de seu processo de confecção a fim de propiciar a produção de futuras réplicas caso necessário. O processo de fabricação adotado no experimento é o de colagem de barbotina, que utiliza um molde poroso e uma suspensão cerâmica. O molde poroso é obtido a partir de uma mistura de gesso e água, enquanto a suspensão cerâmica consiste em uma mistura de água, caulim e um defloculante. O molde foi obtido a partir de uma mistura de aproximadamente 40% de água e 60% de gesso (em peso), enquanto a suspensão foi obtida a partir de uma mistura de 400ml de água, 100ml de caulim e 4 gotas de defloculante. A colagem de barbotina consiste no preenchimento de um molde de material poroso por uma suspensão, fazendo com que a parte líquida da suspensão seja absorvida pelos poros do molde, formando uma camada de argila junto à parede do molde, com a espessura variando de acordo com o tempo de duração de processo. Após a formação da camada de argila, o excesso de suspensão deve ser retirado. O tempo de absorção da suspensão foi de 1min para os moldes pequenos e 2min para os moldes grandes. O molde com a camada de argila deve ficar um tempo secando até que a camada de argila possa ser removida dele. Depois de seca a camada de argila removida já possui o formato do produto final. Após o processo de colagem o produto deve ser sinterizado em um forno em aproximadamente 1300°C, porém a elevação repentina da temperatura durante a sinterização pode causar falhas na estrutura do cadinho, causando deformações e possíveis trincas. Para que isso seja evitado foi utilizado um forno com uma rampa de aquecimento programável, aquecendo inicialmente até a temperatura de 400°C a uma taxa de 5°C/min, onde permaneceu por 30min, para depois ser aquecido até 1000°C a uma taxa de 12°C/min, onde deve permanecer por 2h. Mesmo sem a remoção cautelosa do ar na suspensão antes do processo de colagem, o processo se mostrou eficiente para a produção de cadinhos de pequeno porte. No entanto, para cadinhos maiores as falhas estruturais causadas pelas bolhas de ar impossibilitaram a sinterização do produto.

Palavras-chave: Cadinho. Colagem de barbotina.

ABSTRACT

This work has as objective a ceramic crucible confection with complete functionality for use in Industrial Processes Laboratory at UFJF and also for a confection method study in order to provide future copies if necessary. The adopted confection method is Slip Casting method, which uses a porous cast and a slip. The porous cast is obtained through a mixture containing plaster and water, while the slip is obtained through a mixture of water, kaolin and a deflocculant agent. The porous cast was obtained through a mixture of approximately 40% water and 60% plaster (in weight), while the suspension was obtained through a mixture of 400ml water, 100ml kaolin and 4 drops of deflocculant agent. The Slip Casting method consists of filling a porous cast with a slip mixture, in which the liquid part from the slip is absorbed by the casts' pores, forming a clay layer near the cast's walls with varying thickness according to the casting' duration. After the clay wall is formed, the slip's excess must be removed. The absorbing time was 1min for the smaller casts and 2min for the bigger casts. The cast and clay coating must go through a drying period until the clay coating can be properly taken off. After dried the clay coating has the final product's dimensions. After the casting process the product must go through sintering in a furnace at approximately 1300°C, but the rapid temperature increase during sintering could lead to structural defects causing deformations and possible cracks. In order to avoid said problems, a programmable temperature ramp furnace was used, initially heating until 400°C at a 5°C/min rate and remaining at the final temperature for 30min, then heating at a 12°C/min rate until 1000°C, remaining there for 2h. Even without cautious air removal from the slip, the casting slip process was efficient for small sized crucibles. However, for bigger crucible dimensions the structural failures caused by air bubbles made the sintering process impossible.

Keywords: Crucible. Slip casting.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Colagem de barbotina	9
Figura 2 – Etapas da colagem	13
Figura 3 – Diagrama da colagem	14
Figura 4 – Tensão de escoamento durante o processo	15
Figura 5 – Relação entre a taxa água/gesso e a resistência mecânica e absorção do molde	16
Figura 6 – Mecanismos de estabilização de suspensões	18
Figura 7 – Criação do molde pequeno de gesso	21
Figura 8 – Molde de gesso grande	21
Figura 9 – Rampa de aquecimento	23
Figura 10 – Forno elétrico do laboratório da UFJF	23
Figura 11 – Forno a gás do laboratório da UFJF	24
Figura 12 – Cadinhos pequenos de argila crua	25
Figura 13 – Cadinhos antes e depois da sinterização a $1000^{\circ}C$	25
Figura 14 – Cadinho pré queimado após queima no forno a gás	27
Figura 15 – Cadinho a verde após o forno a gás	27
Figura 16 – Cadinhos grandes de argila crua	28
Figura 17 – Cadinho rachados	28
Figura 18 – Falhas na estrutura devido à utilização de talco em pó	29
Figura 19 – Danificação dos cadinhos durante a retirada do forno	30
Figura 20 – Falhas na parede relacionadas a bolhas de ar	30
Figura 21 – Rachaduras nas falhas superficiais	31
Figura 22 – Origem das rachaduras no cadinho grande sinterizado	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do gesso	20
Tabela 2 – Relação entre a temperatura e a cor da argila	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVO	11
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	ARGILAS	12
3.1.1	Caulim	12
3.2	COLAGEM DE BARBOTINA (SLIP CASTING)	13
3.2.1	Molde poroso	15
3.2.2	Suspensão cerâmica	17
3.3	SINTERIZAÇÃO	18
4	METODOLOGIA	20
4.1	MOLDE DE GESSO	20
4.2	SUSPENSÃO CERÂMICA	22
4.3	COLAGEM DE BARBOTINA	22
4.4	SINTERIZAÇÃO	22
5	DISCUSSÃO	25
5.1	RESULTADOS	25
5.1.1	Cadinho pequeno	25
5.1.2	Cadinho grande	28
5.2	PROBLEMAS NO PROCESSO	29
5.2.1	Desmoldante	29
5.2.2	Forno a gás	29
5.2.3	Ar na suspensão	30
5.2.4	Rachaduras	31
6	CONCLUSÃO	33
6.1	TRABALHOS FUTUROS	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A colagem de barbotina é um processo muito antigo e largamente empregado na produção de peças cerâmicas devido à sua relativa simplicidade e baixo custo de investimento. É normalmente descrito como a consolidação de partículas cerâmicas de uma suspensão coloidal, através da remoção da parte líquida, por um molde absorvente. Em outras palavras, na suspensão (barbotina) a parte líquida, geralmente água, é retirada por meio de um molde poroso, normalmente gesso. Quando a água é absorvida pelo molde, ocorre a aproximação das partículas de pó, em suspensão na água, na superfície do molde. Após a formação da parede com a espessura desejada, o eventual excedente de barbotina pode ser drenado, deixando-se o que resta de água na parede formada ser absorvido pelo molde, quando então temos a peça a verde. Entre as vantagens deste método temos a obtenção de formas relativamente complexas, com paredes finas e uniformes, economia em pequenas produções e moldes mais baratos [1].

Apesar da técnica de colagem de barbotina ser antiga, é necessário o desenvolvimento de uma formulação (pó cerâmico + aditivos de moldagem) adequada, de acordo com as características de cada pó cerâmico. Se a barbotina não estiver bem dispersa, as propriedades das peças podem ficar aquém do desejado, gerando peças defeituosas, com paredes irregulares. Estas peças defeituosas terão suas propriedades mecânicas ou estruturais prejudicadas, após a sinterização, por defeitos ocorridos no processo de conformação [1].

Figura 1 – Colagem de barbotina



Fonte: Clay Make Studio (2019).

O meio mais usado na colagem é a suspensão aquosa, onde a aglomeração e a decantação são evitadas com o uso de dispersantes ou defloculantes [1].

Os moldes utilizados na colagem de barbotina geralmente são de gesso de alta permeabilidade e pequeno tamanho de poro de modo a absorver a água da barbotina sem escoamento das partículas em suspensão para dentro da parede do molde [1].

A vantagem deste tipo de molde são o custo relativamente baixo, simplicidade no manuseio, porosidade controlada e boa exatidão dimensional. Estes moldes podem ser secados e reaproveitados [1].

Após a colagem, as peças secam dentro dos moldes à temperatura ambiente até a retirada da maior quantidade de água possível e, após a abertura dos moldes, as peças terminam de secar ao ar. Em seguida, as peças são pré-sinterizadas [1].

Isto posto, o presente trabalho passa por todos os processos da colagem, desde a preparação da suspensão cerâmica até a sinterização. Estas etapas são percorridas inicialmente utilizando uma peça de menor dimensão para que seja possível observar os resultados de todas as etapas envolvidas sem gastar muito material. Após os testes uma peça de maiores dimensões (aproximadamente 10cm de diâmetro e 20cm de altura) é fabricada.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo a confecção de um cadinho para a utilização no Laboratório de Processos de Fabricação da Universidade Federal de Juiz de Fora.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Criação de um molde de gesso através da pesquisa bibliográfica e empírica;
- Obtenção de uma suspensão cerâmica adequada à finalidade proposta;
- Utilização do método de colagem de barbotina para a fabricação de um cadinho;
- Sinterização da peça obtida em um forno;
- Passar por todas as etapas descritas em menor escala, primeiramente, para somente depois reproduzir tudo no tamanho desejado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ARGILAS

Os materiais cerâmicos são classificados da seguinte maneira: cerâmica estrutural, cerâmica branca (revestimento, louça de mesa e sanitária, isolantes elétricos, cerâmica artística e cerâmica técnica), isolantes térmicos, fritas e corantes, refratários, abrasivos, cal, cimento e vidros, cerâmica de alta tecnologia/avançada [2].

A argila é considerada o principal componente de grande parte das massas cerâmicas que possuem como objetivo a produção dos mais variados tipos de produtos, como também, para outros fins industriais. De acordo com Motta et al. [3], “o termo argila *sensu lato* é empregado para designar um material inorgânico natural, de granulometria fina, com partículas de poucos micrômetros, que apresenta comportamento plástico quando adicionada uma determinada quantidade de água.” Uma das principais características que faz com que as argilas se diferenciem entre si é sua composição química. Por exemplo, têm argilas que possuem uma quantidade razoável de Fe_2O_3 , sendo este material destinado a fabricação de blocos/tijolos de cor vermelha (cerâmica estrutural). Por outro lado, uma argila apresentando uma baixa quantidade de Fe_2O_3 e uma razoável porcentagem de Al_2O_3 na sua estrutura química torna preferível seu uso para fabricação de peças da categoria cerâmica branca. Nesse sentido, a expressão “cerâmica branca” é proveniente do fato de que, no passado, devido à transparência dos vidrados, procurava-se produzir corpos brancos e isentos de manchas.” [4] Como dito anteriormente, esse setor agrupa alguns subsetores, sendo a característica básica que os unifica, a coloração branca, proporcionada pela argila caulinitica e os demais componentes da massa cerâmica (caulins, filitos, quartzo e feldspatos). Por outro lado, esse tipo de argila não é encontrada com facilidade, o que demanda pesquisas de prospecção de novas jazidas.[5]

3.1.1 Caulim

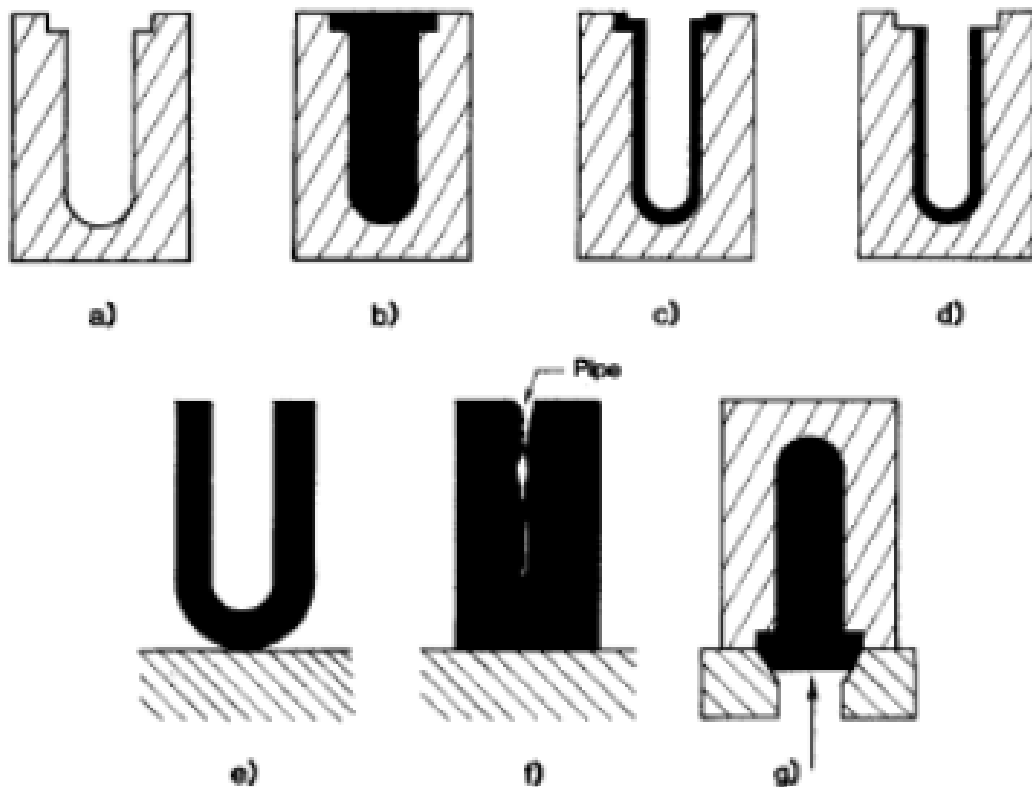
O caulim é um material branco (claro) e fino, constituído essencialmente de caulinita, com pouca contaminação de outros minerais e sem matéria orgânica. Entre suas características cerâmica mais comuns destacam-se a cor branca de queima, refratariedade, plasticidade média a baixa e baixa resistência mecânica a verde. Devido a estas últimas características, é utilizado em conjunto com as argilas plásticas para formar as diversas massas de cerâmica branca [3].

O caulim pode ser de origem primária (residual) ou secundária (transportado ou sedimentar), sendo que o primeiro tipo é o mais comum em se tratando de matéria prima cerâmica produzida no Sudeste brasileiro. Nesta região, a rocha-mãe é geralmente ígnea e metamórfica e o porte dos depósitos primários variam de pequenos bolsões pegmatíticos a maciços granitóides de grande porte [3].

3.2 COLAGEM DE BARBOTINA (SLIP CASTING)

A conformação de uma peça cerâmica por colagem de barbotina é mostrada na figura 2. Os passos envolvidos neste processo são: a preparação da suspensão fluida, incluindo o uso de diferentes matérias-primas e incorporação de aditivos de processamento, beneficiamento da suspensão através de moagem, peneiramento ou outra forma de classificação, evacuação do ar para eliminação de bolhas, preenchimento de um molde poroso, formação da parede, drenagem, secagem parcial (com o corpo ainda na matriz), separação da matriz (desmoldagem) e, às vezes, limpeza e acabamento da superfície antes da secagem final [6].

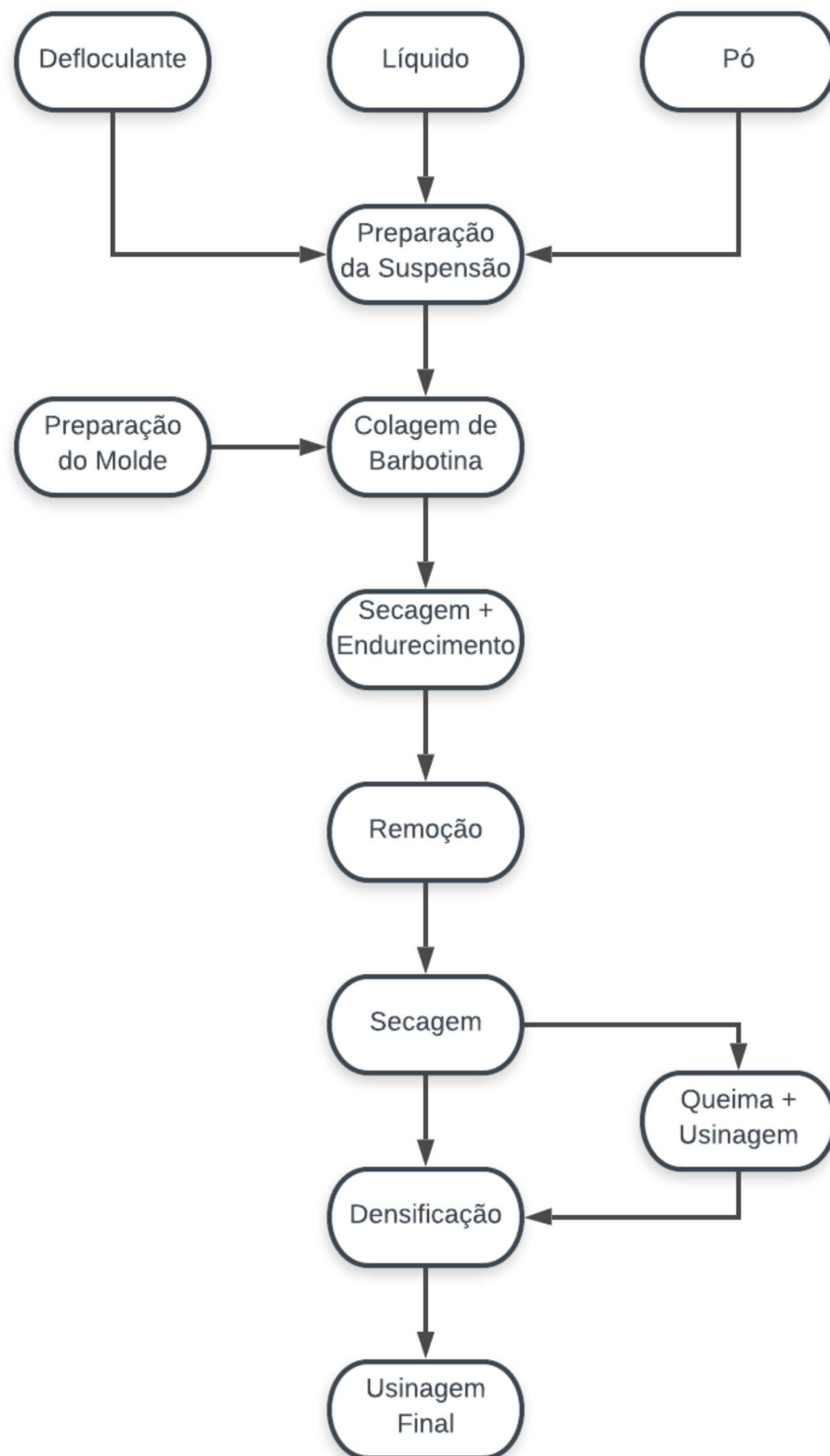
Figura 2 – Etapas da colagem



Fonte: REED (1995).

Etapas da colagem de barbotina da figura 2: (a) molde poroso; (b) preenchimento com suspensão; (c) drenagem da suspensão em excesso; (d) acabamento; (e) tempos prolongados de colagem fornecem paredes mais grossas; (f) moldados quase sólidos; (g) moldagem com aplicação de pressão [6].

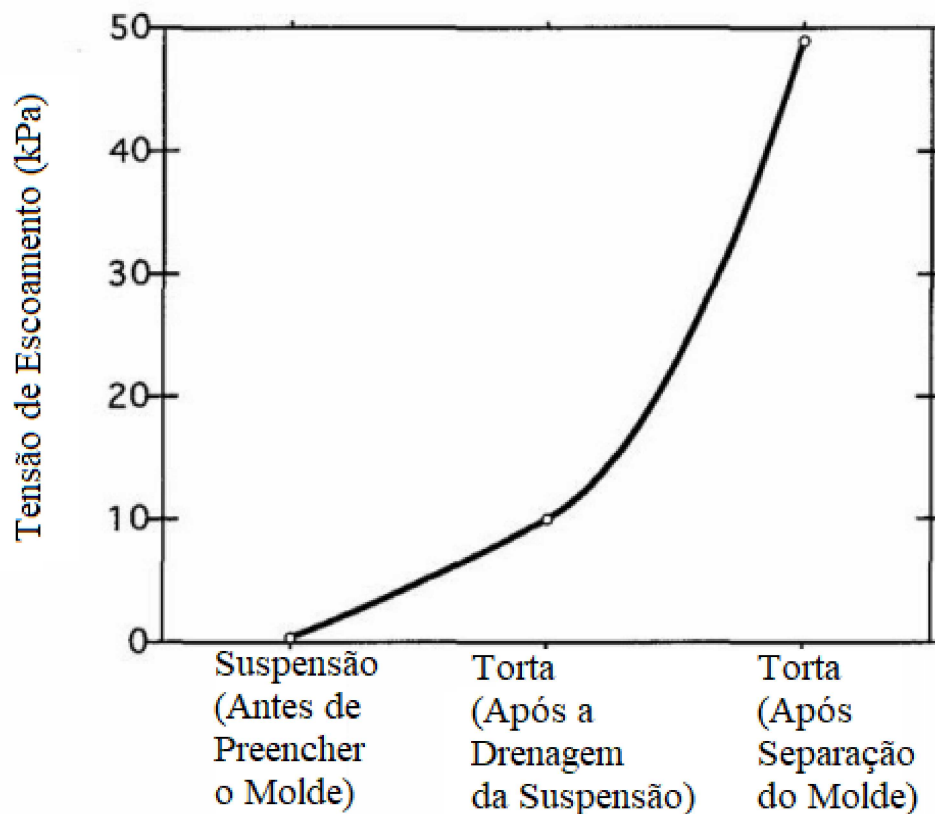
Figura 3 – Diagrama da colagem



Fonte: REED (1995).

Quando se pretende formar apenas uma camada depositada sobre a parede do molde, e não um corpo maciço, a barbotina excedente precisa ser drenada rapidamente da superfície da torta quando esta atinge a espessura desejada. Entretanto, o moldado deve ter uma tensão de escoamento suficiente para não sofrer deformações durante a desmoldagem. A figura 4 mostra a diferença entre a tensão de escoamento da suspensão usada para preencher o molde, da torta após a drenagem da suspensão e da torta parcialmente seca, quando é destacada do molde. Esta diferença é decorrente da redução do teor de líquido. Em alguns sistemas, especialmente em barbotinas parcialmente coaguladas, as forças de coagulação no moldado contribuem para aumentar a resistência ao escoamento. Essa coagulação é frequentemente denominada gelificação. A tensão de escoamento da torta depende também do empacotamento das partículas na torta, das forças de atração entre as partículas (a qual aumenta quando ocorre coagulação do pó) e da resistência proporcionada por ligantes previamente adicionados à suspensão [6].

Figura 4 – Tensão de escoamento durante o processo



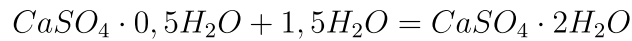
Fonte: REED (1995).

3.2.1 Molde poroso

Existem muitos materiais em potencial para a fabricação de moldes, mas o gesso (“Plaster of Paris”) é universalmente utilizado [7]. Os moldes de gesso são amplamente

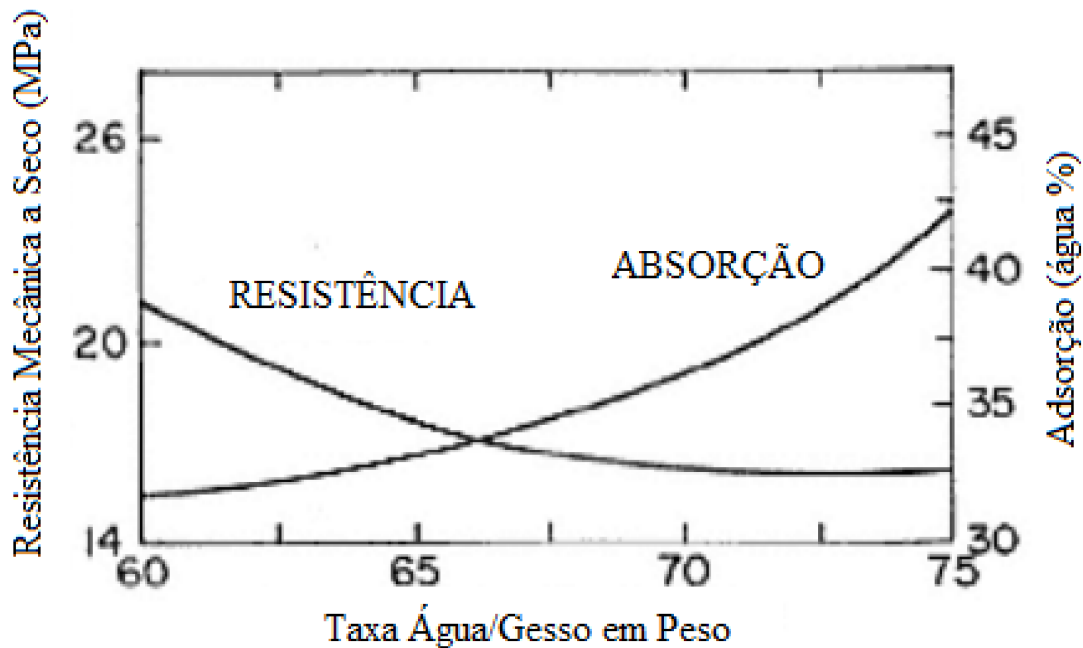
utilizados para colagem devido a sua grande porosidade e sua capacidade de absorção de água da barbotina que não se encontra em outros materiais [8].

O molde poroso mais comumente usado na colagem de barbotina é o molde de gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) formado da reação entre o gesso ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$) e a água [6]:



Esta é frequentemente a tecnologia mais utilizada devido à habilidade na fabricação de moldes finos e com bons detalhes, por possuir tempo curto de ajuste, poros de alta porosidade, reutilização dos moldes, e custo relativamente baixo. [6].

Figura 5 – Relação entre a taxa água/gesso e a resistência mecânica e absorção do molde



Fonte: REED (1995).

Da equação apresentada, a taxa entre os pesos da água e do gesso requerida para a hidratação do gesso é 18,5/100. Uma extensão entre 60/100 até 80/100 do peso água/gesso é utilizado na produção de gessos para moldes. Água quente é mais comumente utilizada para uma consistência melhor da estrutura do molde. Durante o endurecimento um arranjo cristalino é formado no gesso dando força ao molde. Moldes com um tamanho de poro máximo de aproximadamente $5\mu m$ e porosidade aparente de 40 – 50% são formados após a secagem. Uma alta taxa água/gesso usada para moldes de colagem industrial diminui a máxima porosidade e aumenta levemente o tamanho máximo dos poros, o que aumenta a absorção de água, porém diminui a resistência (figura 5). Moldes mais fortes para

prensagem mecânica são preparados com uma taxa de água/gesso de aproximadamente 40/100. Ar deve ser soprado pelo molde após a configuração inicial para manter canais de poros contínuos. O tempo de preparo e a estrutura de poros dependem da temperatura e dos eletrólitos na água, além da intensidade de mistura e tempo [6].

3.2.2 Suspensão cerâmica

Nas suspensões cerâmicas, as propriedades físicas, como o comportamento reológico estão diretamente ligados às propriedades dos coloides. O maior objetivo é de se maximizar as forças de repulsão entre as partículas com a finalidade de obter uma suspensão estável evitando a sedimentação de aglomerados [9].

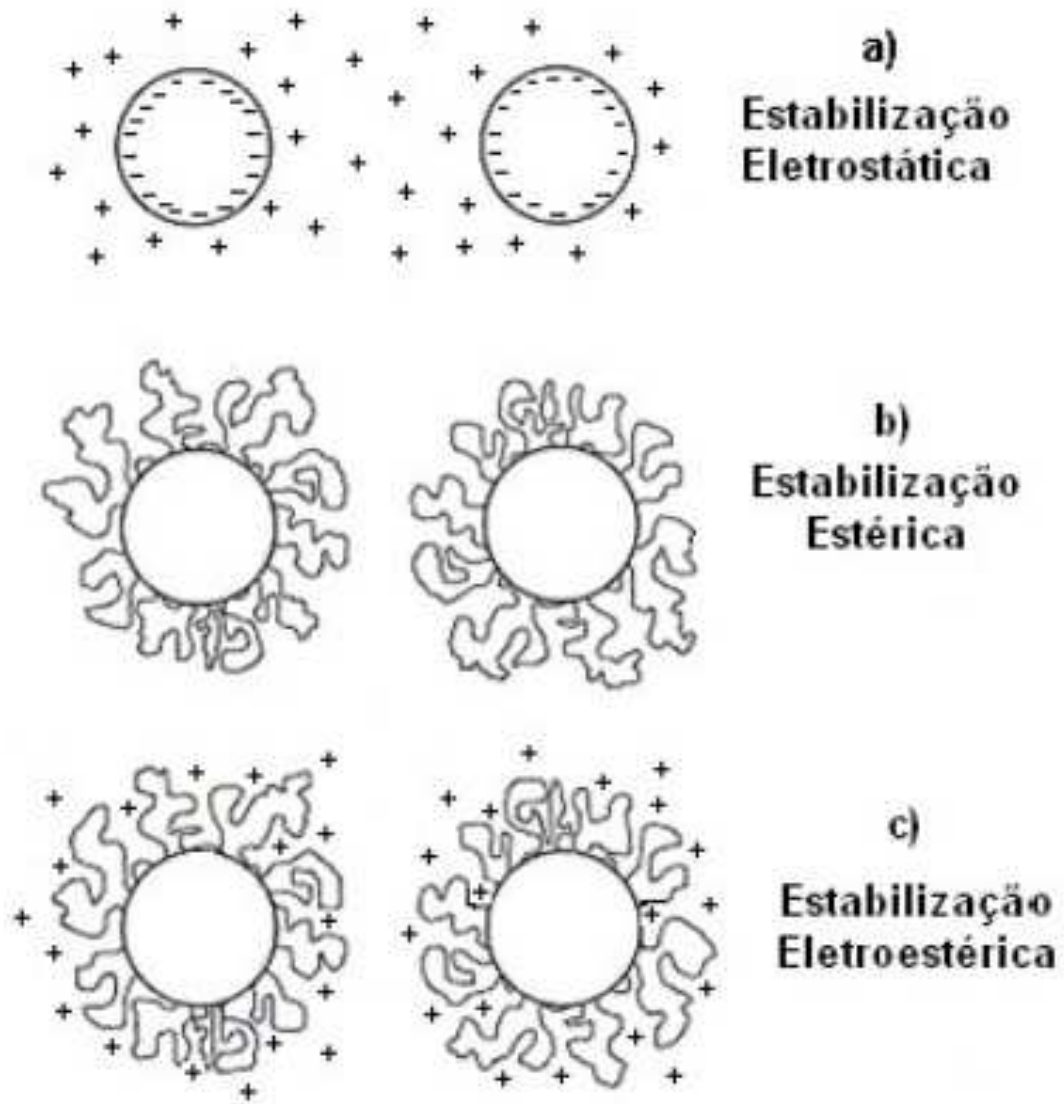
Peças feitas através de colagem de barbotina com suspensões dispersas geralmente proporcionam maior resistência da peça crua, assim como uma microestrutura homogênea, devido a um melhor empacotamento das partículas.[10]

O fato de tais suspensões gerarem um bom empacotamento possibilita que os corpos conformados apresentem baixas retrações de secagem e de queima, o que facilita o controle dimensional da peça.[10]

Para se obter suspensões dispersas, as forças de repulsão devem exceder as forças atrativas. As forças de repulsão podem ser originar basicamente através:

- Do desenvolvimento de cargas elétricas na partícula, devido à interação da superfície da partícula com o meio líquido (eletrostático).
- Da adsorção superficial de polímeros de cadeias longas que dificultam a aproximação das partículas por impedimento espacial (estérico), ou forças osmóticas.
- Da adsorção específica de moléculas com grupos ionizáveis ou polieletrólitos na superfície das partículas (eletroestérico), no qual os íons provenientes da ionização desses grupos ionizáveis somam uma barreira eletrostática ao efeito estérico [10].

Figura 6 – Mecanismos de estabilização de suspensões



Fonte: OLIVEIRA, et al. (2000).

3.3 SINTERIZAÇÃO

A queima é a etapa onde acontecem as principais alterações no material: Transformação de fases, formação de fase vítrea, densificação, decomposição e oxidação e reações de queima de matéria orgânica [11].

Em função do tratamento térmico e das características das diferentes matérias primas, são obtidos produtos para as mais diversas aplicações [11].

A perda de massa da peça nesta etapa deve-se principalmente a retirada de água. A água de plasticidade ou de poros é eliminada desde a temperatura ambiente até 120°C. Boa parte desta água é retirada na etapa de secagem, em caso de secagem mecânica. A

água absorvida é eliminada entre as temperaturas de $120 - 150^{\circ}C$. A água de reticulado é eliminada entre as temperaturas de $150 - 350^{\circ}C$. Presente em interstícios do reticulado cristalino de certas fases (principalmente montmorilonita). E a água de constituição é eliminada entre as temperaturas de $350 - 650^{\circ}C$ [11].

O processo de queima agrega as partículas cerâmicas e produz uma peça coesa e resistente, através da formação da fase vítrea (dissolução e reação de alguns argilominerais presentes nas argilas)[11].

4 METODOLOGIA

4.1 MOLDE DE GESSO

Para a criação de um molde de gesso adequado à finalidade proposta, alguns elementos foram utilizados.

Primeiramente foi estabelecida a proporção entre água e gesso da mistura, que segundo o livro do REED de 1995, normalmente varia entre 60/100 e 80/100 gramas de água/gesso para a produção de moldes. Como a faixa de fabricação é relativamente grande, foi feita uma mistura de aproximadamente 40% de água e 60% de gesso (em peso), o que daria uma proporção aproximada de 70/100 gramas de água/gesso.

Tabela 1 – Propriedades do gesso

Características	Valores	Limite – NBR 13207 (ABNT, 1994)
Químicas		
Óxido de cálcio (CaO) (%)	43,26	> 38
Anidrido sulfúrico (SO ₃) (%)	54,96	> 53
Óxido de magnésio (MgO) (%)	0,09	
Físicas e mecânicas		
Módulo de finura	0,08	< 1,10
Massa unitária (g cm ⁻³)	0,62	< 0,70
Massa específica real (g cm ⁻³)	2,60	
Área específica (cm ² g ⁻¹)	7643,00	
Consistência normal (a g ⁻¹)	0,60	
Tempo de início de pega (min)	18,95	> 10
Tempo de fim de pega (min)	34,30	> 45
Resistência à compressão (MPa)	9,00	> 8,4
Resistência à tração na flexão (MPa)	3,90	> 3,0

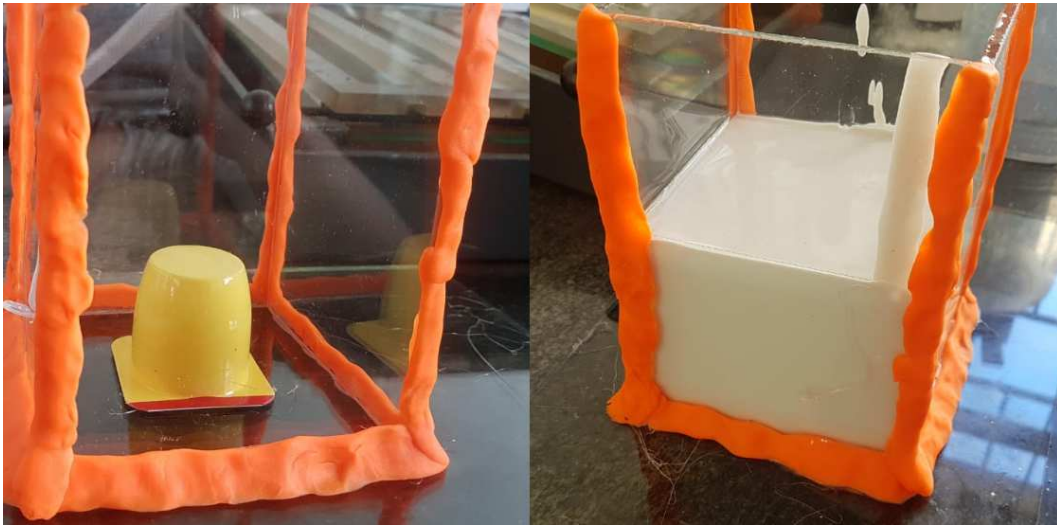
Fonte: OLIVEIRA, et al. (2012).

O primeiro molde, que foi o molde utilizado na versão de testes do cadinho, foi feito por meio de um aquário de vidro, massa de modelar, cola quente e um recipiente alimentício de superfície lisa e tamanho adequado.

Um aquário de vidro foi montado e o recipiente que definiria o formado do molde foi fixado à parte a base do aquario. O recipiente foi então preenchido com a mistura de

gesso como mostrado na figura 7.

Figura 7 – Criação do molde pequeno de gesso



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

Um método diferente foi utilizado para o molde em tamanho real. Para facilitar o processo de criação do molde de gesso maior dois recipientes plásticos foram apoiados, por meio de suportes de madeira e fita adesiva, na posição em que deveriam ficar (um dentro do outro, sem o contato entre os fundos dos recipientes e concêntricos).

A parte entre um recipiente e outro foi então preenchida pela mistura de gesso. Após alguns dias, com o gesso seco, os moldes foram removidos (o interior foi facilmente removido e o exterior foi descartado) dando origem ao molde mostrado na figura 8

Figura 8 – Molde de gesso grande



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

4.2 SUSPENSÃO CERÂMICA

Uma mistura de 400 ml de água para cada 100 ml de argila (densidade de aproximadamente $2,6g/cm^3$), acrescentado o defloculante fabricado pela empresa MIRACEMA-NUODEX (Lioperse 511), aos poucos para se obter a partícula em suspensão, e, posteriormente, foi analisado a velocidade de escoamento da água através do funil. À medida que se acrescentava pequenas gotas de defloculante, media-se o tempo de escoamento da argila através do funil por um cronômetro. Do experimento foi possível perceber que a mistura se estabiliza a partir de quatro gotas em um tempo de aproximadamente 35 segundos.[12].

A suspensão cerâmica utilizada em todos os processos de colagem foi a mesma do Trabalho de Conclusão de Curso LEÃO (2018) anexado às referências.

Durante a produção do primeiro cadinho a suspensão foi utilizada por já estar presente no laboratório. Com o sucesso do processo de colagem a formulação da mesma foi adotada como padrão e feita segundo as medidas da primeira, quando a suspensão citada chegou ao fim.

4.3 COLAGEM DE BARBOTINA

O processo de colagem de ambos os cadinhos se deu da mesma forma, variando apenas o tempo de absorção da suspensão pelo molde. Para o cadinho pequeno, o tempo utilizado foi de $1min$ de absorção, que mostrou um resultado satisfatório para a espessura da parede, aproximadamente $4mm$. Já para o cadinho de tamanho maior o tempo de absorção utilizado foi de $2min$, produzindo uma parede de aproximadamente $6mm$.

A suspensão devidamente misturada era aplicada no vão interior do molde, onde então permanecia sendo absorvida pelo molde pelo tempo necessário. Após o tempo selecionado, o excesso da suspensão era retirado e voltava para o recipiente onde era armazenada.

Este processo foi repetido diversas vezes, dando origem, após a secagem, a vários cadinhos.

4.4 SINTERIZAÇÃO

O processo de sinterização deve ocorrer de forma lenta, para que os voláteis presentes na argila crua não prejudiquem a estrutura final do produto ao serem expulsos.

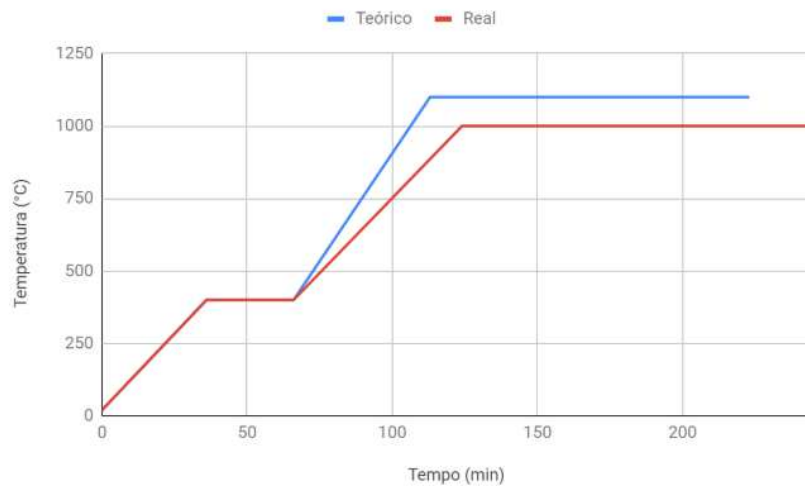
Para que este aquecimento pudesse então ser feito de maneira suave, utilizou-se uma rampa de aquecimento, que foi primeiramente idealizada e depois ajustadas às limitações do forno, como mostrado na figura 9.

O rampa teórica parte da temperatura ambiente, a uma taxa de aquecimento a $5^{\circ}C/min$ até atingir a temperatura de $400^{\circ}C$, temperatura essa que deve ser mantida por

30min, para que depois possa aumentar novamente até 1100°C a uma taxa de aquecimento de 15°C/min. O resfriamento é feito com o forno desligado.

Já na rampa real temos uma limitação de taxa de aquecimento de no máximo 12°C/min e uma temperatura máxima de 1000°C.

Figura 9 – Rampa de aquecimento



Fonte: Imagem criada pelo autor (2019).

O processo de aquecimento com rampa foi feito no forno elétrico, mas para que se pudesse atingir uma temperatura máxima maior o forno a gás foi utilizado, não se importando mais com o avanço da temperatura, apenas com a temperatura máxima.

Figura 10 – Forno elétrico do laboratório da UFJF



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

Figura 11 – Forno a gás do laboratório da UFJF



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

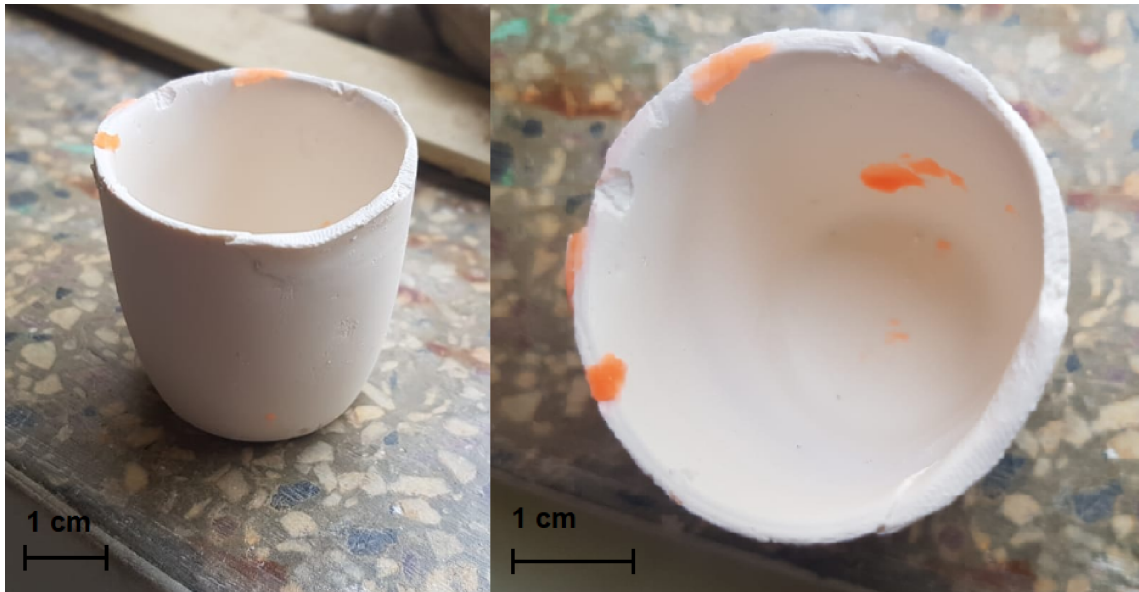
5 DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS

5.1.1 Cadinho pequeno

O cadinho, após a colagem, ficou como mostra a figura 12.

Figura 12 – Cadinhos pequenos de argila crua



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

Após o primeiro processo de sinterização do cadinho pequeno, no forno elétrico, foi possível notar a redução de aproximadamente 10% do volume da peça, devido principalmente à perda de água, como ilustra a figura 13.

Figura 13 – Cadinhos antes e depois da sinterização a 1000°C



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

Após essa primeira queima foi possível notar que a estrutura do cadinho ainda não estava como desejado, provavelmente por causa da temperatura atingida, que não pôde

ser tão alta como a idealizada inicialmente.

Dois cadinhos foram então colocados diretamente no forno a gás do Laboratório de Processos de Fabricação da Universidade Federal de Juiz de Fora, que apesar de não ter um controlador, atinge valores bem mais altos de temperatura (aproximadamente 1300°C).

Por não possuir um controlador, a temperatura máxima atingida pelo forno foi estimada a partir de uma tabela de cores de acordo com a temperatura da argila, como mostra a tabela 2.

Tabela 2 – Relação entre a temperatura e a cor da argila

Temperature		Color
C°	F°	
1400	2552	Brilliant white
1300	2372	White
1200	2192	Yellow-white
		Yellow
1100	2012	Yellow-orange
		Orange
1000	1832	Red-orange
900	1652	Cherry red
800	1472	Dull red
700	1292	Dark red
600	1112	Dull red glow
500	932	Black
400	752	
300	572	
200	392	
100	212	

Fonte: Pottery Making Illustrated (2019).

O cadinho que já havia passado pela queima no forno elétrico demonstrou um ótimo resultado, com uma parede lisa e uma resistência mecânica claramente melhor. Já o cadinho verde que foi colocado diretamente no forno a gás sofreu uma deformação já no início do processo.

O comportamento do cadinho a verde diretamente no forno deixou claro a importância da utilização da rampa de aquecimento para um resultado satisfatório.

Figura 14 – Cadinho pré queimado após queima no forno a gás



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

Figura 15 – Cadinho a verde após o forno a gás



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

5.1.2 Cadinho grande

Nas primeiras colagens foi possível obter cadinhos a verde bons, apesar da qualidade superficial claramente pior do que a dos cadinhos menores, porém com nenhum deles foi possível passar do primeiro processo de sinterização.

Figura 16 – Cadinhos grandes de argila crua



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

Todos os cadinhos grandes racharam. Um deles rachou no processo de sinterização, outro rachou enquanto estava sendo lixado na tentativa de proporcionar um acabamento melhor para a superfície e os outros racharam antes mesmo de sair do molde poroso.

Figura 17 – Cadinho rachados



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

5.2 PROBLEMAS NO PROCESSO

Alguns poucos problemas foram observados durante o processo de confecção dos cadinhos pequenos e grandes.

5.2.1 Desmoldante

O primeiro problema foi a tentativa de utilização de talco em pó para auxiliar na desmoldagem do cadinho. O talco se acumulava em alguns pontos, atrapalhando a absorção da água pelo molde e causando falhas nas estruturas dos produtos resultantes da colagem.

Figura 18 – Falhas na estrutura devido à utilização de talco em pó



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

Ainda, o objeto de argila crua, após a secagem dentro do molde, reduz o levemente o seu volume, fazendo com que ele se solte facilmente da estrutura de gesso.

5.2.2 Forno a gás

Além de um problema já esperado, que foi a deformação de cadinho a verde colocado diretamente no forno a gás, houve também um outro problema.

A falta de utilização de um apoio durante a sinterização dos cadinhos, fez com que eles entrassem em contato direto com o fundo do forno, onde haviam resíduos de queimas anteriores. Esses resíduos acabaram se agarrando ao fundo de alguns dos cadinhos, o que acabou fazendo com que sua estrutura fosse danificada ou quebrada durante a retirada.

Figura 19 – Danificação dos cadinhos durante a retirada do forno



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

5.2.3 Ar na suspensão

Apesar da recomendação literária, não houve utilização de instrumentos para a retirada do ar presente na suspensão após a sua mistura. Isso fez com que, após a colagem, fosse possível observar algumas falhas nas paredes das cerâmicas ainda a verde, advindas de bolhas de ar. O REED (1995) ainda cita que este é um problema comum com suspensões muito densas, que era o caso da suspensão utilizada.

Figura 20 – Falhas na parede relacionadas a bolhas de ar



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

5.2.4 Rachaduras

O principal problema, consequência do ar na suspensão, foi o aparecimento de rachaduras na estrutura dos cadinhos.

O problema fez o avanço nos cadinhos grandes cessar, pois todos os cadinhos grandes racharam antes de ir para a segunda sinterização.

Grande parte das rachaduras nos cadinhos, isso inclui os pequenos e grandes, se originou em falhas superficiais. E como a presença de ar na suspensão causava falhas superficiais, podemos dizer que este foi o principal problema do experimento.

Figura 21 – Rachaduras nas falhas superficiais



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

Estas falhas, sejam elas causadas por bolhas ou irregularidades do molde, fizeram com que a estrutura dos cadinhos apresentassem muitos concentradores de tensão. Principalmente os cadinhos grandes, por utilizarem mais material e, por sua vez, apresentarem mais vulnerabilidade a qualquer imperfeição advinda dele.

A tentativa de fazer um cadinho grande com uma parede mais fina, que infelizmente não conseguiu sair do molde, talvez pudesse passar do processo de sinterização, mesmo com os problemas aqui apresentados.

Figura 22 – Origem das rachaduras no cadinho grande sinterizado



Fonte: Imagem capturada pelo autor (2019).

6 CONCLUSÃO

O método de colagem de barbotina se mostrou eficiente na criação de objetos de argila, pois a partir de um molde de gesso foi possível criar vários cadinhos a verde com a suspensão. O método é simples e rápido, porém toma bastante tempo para a secagem, caso não se utilize nenhum equipamento para a aceleração dela.

A superfície obtida nos cadinhos pequenos foi de fato boa, alguns modelos apenas que apresentavam falhas referentes ao uso de talco e ao ar na suspensão. Esses cadinhos foram os que resistiram ao processo de sinterização e chegaram o mais próximo de se tornarem o produto final objetivo do experimento.

Já para os cadinhos grandes, as falhas referentes ao ar na suspensão se mostraram mais graves, ocasionando o aparecimento de rachaduras tanto na fase de sinterização quanto na fase a verde.

Todos os processos foram feitos sem a utilização de equipamentos para remover o ar da suspensão, diferente do que recomenda a literatura. Este fato foi determinante durante o processo de colagem dos cadinhos grandes.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

- Utilização de equipamentos para a remoção de ar da suspensão;
- Variação na formulação da suspensão, de preferência para uma menos densa;
- Teste com uma rampa de aquecimento ainda mais lenta na sinterização dos cadinhos grandes.

REFERÊNCIAS

- [1] CATAFESTA, J. et al., **Colagem de barbotina de aluminas submicrométricas comerciais**, Revista Cerâmica, v. 53, p. 29., 2007.
- [2] ABCERAM. **Informações Técnicas - Definição e Classificação**. Disponível em: <<http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>> . Acesso em: 19 out. 2019.
- [3] MOTTA, José Francisco Marciano et al. **As Matérias-Primas Plásticas para a Cerâmica Tradicional: Argilas e Caulins**. Revista Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 9, n. 2, p.33-46, mar/abr. 2004
- [4] MOTTA, José Francisco Marciano; ZANARDO, Antenor; CABRAL JUNIOR, Marsis. **As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos**. Revista Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 2, n. 6, p.28-39, mar. 2001.
- [5] MONTEIRO, Flánelson Maciel; COSTA, Franciné Alves; MACHADO, Tércio Graciano; DE ASSIS, Raimison Bezerra. **Caracterização de argila caulínica da região metropolitana de natal-RN – parte 1**. Anais do 72o Congresso Anual da ABM. vol. 72, num. 1. 2017.
- [6] REED. James Stalford. **Principles Of Ceramics Processing**. 2 ed. 1995.
- [7] VAN VLACK, L.H.; **Propriedades de Materiais Cerâmicos**. Editora Edgard Blucher Ltda, S.P.,1973.
- [8] RAVENTÓS, J.; **Nueva Generación De Moldes Cerámicos**. Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio n.36 1997. 603-607 p.
- [9] Inc., Z. M. **Zeta Potential: A Complete Course in 5 Minutes; The Interaction of Colloids**. 11 Staunton, USA: Zeta Meter Inc., 1993.
- [10] ALATRISTA, Gerardo Augusto Vera. **Preparação e Estabilização de uma Suspensão Cerâmica de Porcelana de Ossos**. 2008. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [11] COLLA JUNIOR. Jorge. **Desenvolvimento de uma massa cerâmica para produção de peças especiais esmaltadas para revestimento através do método de colagem**. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.
- [12] LEÃO, Carolina Detoni. **Membranas Porosas Obtidas a Partir de Argilas Caulínicas de Mar de Espanha**. 2018. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.
- [13] DELAVI. Deyse Gonzaga Gomes. **Defloculação de suspensões aquosas de argila e sua correlação com caracterizações químicas e de superfície**. Tese (Mestrado em Materiais Particulados) – Faculdade de Engenharias de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

- [14] OLIVEIRA, I. R. d.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas. Princípios e aplicações em processamento cerâmico.** São Paulo: Fazenda Arte Editorial, 2000. 224 p.
- [15] OLIVEIRA, Marília P. de et al. **Compósitos à base de gesso com resíduos de EVA e vermiculita.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 6, n. 16, p.684-689, mar. 2012.