INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

Avaliação da utilização de casca cerâmica produzida com lama cerâmica primária e secundária de pó de telha reciclado no processo de microfusão

DOUGLAS DOS SANTOS LEITE

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Nuclear Materiais.

Orientador:
Prof. Dr. Antonio Augusto Couto

São Paulo

2019

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
http://www.ipen.br

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

Avaliação da utilização de casca cerâmica produzida com lama cerâmica primária e secundária de pó de telha reciclado no processo de microfusão

DOUGLAS DOS SANTOS LEITE

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Nuclear Materiais.

Orientador:
Prof. Dr. Antonio Augusto Couto

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

LEITE, D. d. S. ***Avaliação da utilização de casca cerâmica produzida com lama cerâmica primária e secundária de pó de telha reciclado no processo de microfusão***. 2019. 63 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Leite, Douglas dos Santos
Avaliação da utilização de casca cerâmica produzida com lama cerâmica primária e secundária de pó de telha reciclado no processo de microfusão / Douglas dos Santos Leite; orientador Prof. Dr. Antonio Augusto Couto. -- São Paulo, 2019.
63 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

1. pó de telhas. 2. microfusão. 3. casca cerãmica. I. Couto, Prof. Dr. Antonio Augusto, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Douglas dos Santos Leite
Título: **Avaliação da utilização de casca cerâmica produzida com lama cerâmica primária e secundária de pó de telha reciclado no processo de microfusão**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para a obtenção de do título de Mestre em Ciências.

Data: ___/___/___/

Banca Examinadora

Prof. Dr: _____

Instituição:_____Julgamento:_____

Prof. Dr: _____

Instituição:_____Julgamento:_____

Prof. Dr: _____

Instituição:_____Julgamento:_____

Prof. Dr: _____

Instituição:_____Julgamento:_____

Prof. Dr: _____

Instituição:_____Julgamento:_____

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade de realizar este trabalho tão gratificante e enriquecedor, a minha família, especialmente minha esposa Silvia, pela paciência e incentivo, aos meus filhos Lara e Giovanni pelos momentos de descontração tão necessários.

Meus agradecimentos a Escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo” por todo o suporte oferecido, aos colegas que auxiliaram na realização dos ensaios, ao SENAI – SP pelo Programa de Pós-Graduação.

A Sérgio Santos e seu corpo de engenharia da empresa Fundimazza pelo apoio incondicional durante todo o trabalho e pelo fornecimento de matérias primas, cascas cerâmicas e os modelos em cera para a realização deste trabalho.

Aos amigos da empresa Jandinox, do proprietário Geraldo Mitsuo Imamura, do sócio diretor Massami Yamazaki e do sempre disposto e amigo Dilmo Rocha.

Ao grande amigo Eduardo Henrique Xavier, Gerente de vendas da empresa Nalco Ecolab por sempre acreditar no trabalho proposto e pela doação das matérias primas para formulação das lamas cerâmicas.

A Nelson Touron, gerente de vendas do grupo Curimbaba pela doação de matérias primas para confecção das cascas cerâmicas.

A Silvano Sousa sócio proprietário da empresa Cecomatec pela doação de equipamentos para realização do trabalho.

Finalmente, gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Augusto Couto pela atenção, ânimo, dedicação, paciência e ensinamentos recebidos para a realização do presente estudo.

“Não importa quanto a vida possa ser ruim, sempre existe algo que você pode fazer, e triunfar. Enquanto há vida, há esperança”

Stephen Hawking

LISTA DE SIGLAS

ABNT NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
Al	Alumínio
Cu	Cobre
l	Distância entre os suportes
ICI	Investment Casting Institute
L	Espessura da casca cerâmica
L/min.	Permeabilidade
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MOR	Módulo de ruptura
N	Nitrogênio
P	Pressão
Q	Vazão do fluido através do meio poroso
r	raio
RF	Resistência à flexão
Sn	Estanho
Ti	Titânio
3D	3 dimensões

RESUMO

D. Santos Leite. Avaliação da utilização de casca cerâmica produzida com lama cerâmica primária e secundária de pó de telha reciclado no processo de microfusão 2019. 63 p. Dissertações de Mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

O processo de fundição por cera perdida representa, há muitos anos, o principal processo de produção gerador de peças de alta complexidade para atender os mais variados segmentos industriais tais como o automotivo, geração de energia, médico e bélico. A característica principal deste processo é a de obter cascas cerâmicas por meio de banhos de lama cerâmica ancorados por material refratário granulado aplicados sobre a superfície de modelos em cera com o formato da peça final. Estudou-se neste trabalho as propriedades do pó de telhas e também das cascas cerâmicas produzidas com lamas utilizando o próprio pó de telhas como material refratário tanto na lama primária quanto na lama secundária. O pó de telhas apresentou alta dispersão granulométrica #20-#325 mesh e em sua composição foram identificados compostos refratários importantes como a sílica e a alumina. Os ensaios realizados nas cascas cerâmicas confeccionadas com lamas de pó de telhas apresentaram resultados de módulo de ruptura à verde e calcinado (1000 °C) de respectivamente 1,02 MPa e 4,95 MPa e de permeabilidade a quente (1000 °C) 4,2 L/min. Os ensaios nas cascas cerâmicas utilizadas na indústria apresentaram resultados de módulo de ruptura a verde e calcinado respectivamente de 2,48 MPa e 5,7 MPa e permeabilidade de 3,8 L/min. As cascas cerâmicas confeccionadas com pó de telhas apresentaram módulo de ruptura inferior as cascas industriais, porém, com resultado de permeabilidade superior. As cascas cerâmicas com lamas de pó de telhas apresentaram bom comportamento durante o vazamento dos metais líquidos alumínio 356, bronze e ferro fundido cinzento, não foi observado quebras no molde e nem reação com o metal. As peças fundidas com as cascas cerâmicas produzidas com lamas de pó de telhas atenderam as tolerâncias dimensionais exigidas pela norma ABNT NBR 15990.

Palavras Chave: casca cerâmica, pó de telhas, cera perdida, microfusão

ABSTRACT

D. Santos Leite. Avaliação da utilização de casca cerâmica produzida com lama cerâmica primária e secundária de pó de telha reciclado no processo de microfusão 2019. 63 p. Dissertações de Mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

The lost wax process has for many years been the main production process generating parts of high complexity to meet the most varied industrial segments such as automotive, power generation, medical and military. The main feature of this process is to obtain ceramic shells by means of ceramic slurry baths anchored by granular refractory material applied to the surface of wax models in the shape of the final part. This work evaluated the properties of tile powder and also the ceramic shells produced with slurries using the tile powder itself as a refractory material in both primary and secondary slurries. The powder of tiles presented high particle size dispersion # 20 - # 325 mesh and in its composition important refractory compounds such as silica and alumina were identified. The tests carried out on the ceramic shells made with tile powder slurries showed green and calcined (1000 °C) modulus of 1.02 MPa and 4.95 MPa respectively and a heat permeability of (1000 °C) 4, 2 L / min. The tests in the ceramic shells used in the industry showed green and calcined rupture modulus results of 2.48 MPa and 5.7 MPa and permeability of 3.8 L/min respectively. The ceramic shells made with powder tiles had a lower rupture modulus than the industrial ceramic shell, but with a higher permeability result. The ceramic shells with tile slurries showed good performance during the casting of liquid aluminum 356, bronze and gray cast iron, no mold breaks and no reaction with the metal. The parts cast with the ceramic shells produced with tile powder slurries e met the dimensional tolerances required by ABNT NBR 15990.

Keywords: ceramic shell, tile powder, lost wax, investment casting

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **1**

2 OBJETIVOS **5**

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS **5**

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **6**

3.1 HISTÓRICO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA **6**

3.2 CERÂMICA VERMELHA **9**

3.2.1 O processo de produção de telhas cerâmicas **10**

3.2.2 O processo de micronização do pó de telhas **12**

3.3 ETAPAS DO PROCESSO DE MICROFUSÃO **14**

3.4 CONFECÇÃO DAS CASCAS CERÂMICAS **15**

3.5 CONTROLE DOS PARÂMETROS DE **21**

3.6 MICROESTRUTURAS DE CASCAS CERÂMICAS **24**

3.7 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CASCAS CERÂMICAS **27**

3.7.1 Permeabilidade **27**

3.7.2 Resistência das cascas cerâmicas **29**

3.7.3 Aspectos térmicos das cascas cerâmicas **31**

4 MATERIAIS E MÉTODOS **33**

4.1 MATERIAIS **33**

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE TELHAS **35**

4.2.1 Análise granulométrica **35**

4.2.2 Análise química por espectrometria de fluorescência de raios x **35**

4.2.3 Análise por difração de raios x **35**

4.2.4 Micronização **35**

4.3 CONFECÇÃO DAS CASCAS CERÂMICAS E CORPOS DE PROVA **35**

4.4 DECERAGEM **41**

4.5 CALCINAÇÃO **42**

4.6 VAZAMENTO DO METAL LÍQUIDO **43**

4.7 ENSAIO DO MÓDULO DE RUPTURA DAS CASCAS CERÂMICAS **43**

4.8 ENSAIO DE PERMEABILIDADE DAS CASCAS CERÂMICAS **44**

4.9 ANÁLISE DIMENSIONAL **46**

4.10 ANÁLISE DE RUGOSIDADE..... 47

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 49

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE TELHAS..... 49

5.1.1 Análise granulométrica do pó de telhas..... **49**

5.1.2 Análise química por espectrometria de fluorescência de raios x..... **50**

5.1.3 Análise por difração de raios x..... **50**

5.2 ENSAIO DO MÓDULO DE RUPTURA DAS CASCAS CERÂMICAS..... 51

5.3 ENSAIO DE PERMEABILIDADE DAS CASCAS CERÂMICAS..... 53

5.4 DECERAGEM..... 53

5.5 CALCINAÇÃO..... 54

5.6 VAZAMENTO DO METAL LÍQUIDO..... 55

5.7 ANÁLISE DIMENSIONAL..... 57

5.7 ANÁLISE DE RUGOSIDADE..... 58

6 CONCLUSÕES..... 59

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 61

1 INTRODUÇÃO

Devido as crescentes demandas de componentes para sistemas de engenharia avançadas e leves, especialmente na indústria aeroespacial, os processos de fabricação estão se tornando cada vez mais complexos. A exigência global por menor consumo de combustível e baixa emissão de poluentes estão fazendo com que aumente a necessidade de redução no peso das peças fundidas. A capacidade de produzir peças com menor espessura de parede em diversas ligas, especialmente as ligas leves e resistentes ao calor, não só ajudará a reduzir o custo de produção mas também trará melhorias na eficiência dos sistemas de engenharia, resultando em menor consumo de combustível e menores emissões de poluentes para o meio ambiente (WILLIANS, HIRST, 2016).

Nas últimas décadas, com o avanço tecnológico de diversos setores da indústria a demanda de peças com desenhos complexos e fundidas com ligas especiais de alto ponto de fusão vem se intensificando. A busca por processos capazes de se obter peças em seu formato final é constante, a complexidade das formas e a dificuldade de usinagem que muitas ligas apresentam fazem com que a tendência natural do mercado seja a de buscar substituição dos processos convencionais como a fundição em areia e os processos de usinagem para migrar aos processos de resposta rápida e que entreguem as peças praticamente prontas, como é o caso da microfusão (PATTNAIK et al., 2012).

O processo de microfusão produz peças das mais variadas formas. De origem milenar, este processo veio se desenvolvendo através dos séculos, na idade do bronze foi muito utilizado para produção de utensílios domésticos e armas de caça, durante o império romano teve grande importância para confecção de obras de arte e esculturas, passando pelo cinquecento italiano comandado por Michelangelo e seu grande discípulo Benvenuto Chellini os quais produziram grandes esculturas.

Durante a 2° guerra mundial o conceito da fundição por cera perdida se industrializou devido a necessidade de se obter peças com ligas de alta resistência ao calor e com desenhos que não permitiam usinagem, com isso, o processo se desenvolveu visando atender o setor aeroespacial e de geração de energia, recebendo neste novo momento o nome de fundição de precisão ou no inglês

“investment casting”. Através deste processo também é possível se obter peças para o setor de implantes cirúrgicos, próteses dentárias, joias e armamentos.

O processo de fundição de precisão por cera perdida favorece a obtenção de peças complexas fundidas nas mais variadas ligas pois utiliza um método em que a cera tem a capacidade de copiar todos os detalhes da peça e reproduzi-los através do molde em formato de casca cerâmica. Os materiais utilizados na casca cerâmica fazem com que ela tenha características e propriedades que permitam obter peças com ótimo acabamento superficial e dimensões dentro das tolerâncias determinadas pelas normas sem a necessidade de usinagem (HIRST, 2010).

Um dos grandes desafios das empresas de fundição de precisão é obter cascas cerâmicas com resistência mecânica suficiente para suportar o manuseio durante o processo de fabricação, deceragem, sinterização, e ao mesmo tempo com permeabilidade suficiente para possibilitar a saída dos gases durante o vazamento do metal líquido. Outro grande desafio é o de reduzir o custo de processamento da casca cerâmica sem afetar a qualidade final da peça fundida e o meio ambiente.

O aumento dos trabalhos apresentados nos últimos anos em congressos internacionais específicos do setor de fundição de precisão reflete a importância do controle de parâmetros no processo e a busca por matérias primas alternativas para a produção de cascas cerâmicas. Historicamente, foi possível observar a ênfase dada para aumentar a resistência mecânica das cascas com o objetivo de reduzir trincas na deceragem e o número de camadas aplicadas (BRASCOMB, 2002).

No Brasil ainda são poucos os trabalhos direcionados ao estudo dos materiais aplicados a produção de cascas cerâmicas para o processo de fundição de precisão, principalmente em relação a materiais alternativos para o processamento das cascas cerâmicas. Assim como para a maioria dos materiais, o conhecimento da relação entre processamento, microestrutura, propriedades das cascas cerâmicas e seu comportamento em campo é de fundamental importância para o desenvolvimento de novas possibilidades de matérias primas e de adequação das mesmas em diferentes situações.

Com o crescente aumento dos valores das matérias primas refratárias empregadas para a confecção das lamas cerâmicas, principal produto para o processamento das cascas cerâmicas no processo de microfusão, foi investigado a utilização do pó de telhas em substituição a zirconita e a sílica eletrofundida visando a manutenção da qualidade da casca cerâmica com custos mais baixos.

A zirconita é o refratário mais utilizado para produção de lamas cerâmicas primárias por apresentar baixa reatividade com a maioria dos metais e ligas devido ao seu alto ponto de fusão (2480 °C). A sílica eletrofundida é utilizada como componente das lamas cerâmicas secundárias e como refratário granulado tanto para peças ferrosas como também não ferrosas, é obtida através de processo sintético, o qual eleva seu custo.

O material proposto para esta substituição é o pó de telhas (cerâmica vermelha), o qual é obtido por meio do processamento dos cacos cerâmicos descartados durante a produção das telhas na indústria cerâmica (IDROGO et al., 2016). Portanto, partem de telhas de alta qualidade, queimadas em alta temperatura (1000°C), oferecendo estabilidade térmica e isenção de contaminantes. Estas propriedades são de fundamental importância para credenciar este material a ser testado quanto a sua utilização na produção de lamas cerâmicas para o processo de fundição de precisão.

As empresas que fornecem o pó de telhas trabalham com demandas baixas de produção. Seus estoques giram em torno de 200 toneladas por mês e uma retaguarda de 2 mil toneladas de cacos de telhas para serem processados. Foi observado que existe uma quantidade significativa de cacos de telhas que estão ociosos em aterros esperando para serem processados por não terem um mercado que absorva estes grandes volumes, estas quantidades referentes a retaguarda tendem a aumentar com o passar dos anos.

A partir deste cenário, este estudo se torna importante pois verifica a possibilidade da aplicação do pó de telhas como matéria-prima refratária para o setor de fundição de precisão, além de vislumbrar um nicho importante de negócio para os resíduos da indústria ceramista.

O comportamento das cascas cerâmicas durante o processo, o conhecimento de suas propriedades físicas, comparativos com cascas cerâmicas utilizadas na indústria foram estudados neste trabalho visando a redução de custos de fabricação das cascas cerâmicas, diminuição do peso dos moldes, manutenção da qualidade superficial e a aplicação desta matéria-prima por empresas que produzam peças em ligas de alumínio, ligas de cobre (bronze ou latão) e ferros fundidos.

Como está apresentado com detalhes na revisão bibliográfica, este estudo tem aspectos inéditos, os trabalhos estudados na literatura relacionados ao processamento de cascas cerâmicas mostram preocupação em melhorar o

gradiente térmico adicionando entre 15-20% de grafite na composição das lamas cerâmicas secundárias visando aumentar a permeabilidade das cascas e facilitar o processo de deceragem.

Outra linha de pesquisa tem o objetivo de entender o comportamento do módulo de ruptura da casca cerâmica fazendo comparativos entre o antes e o depois do processo de deceragem.

Um estudo bastante interessante mostra a substituição do ligante à base de sílica colidal, componente bastante utilizado atualmente nas empresas, por um ligante livre de sílica, a base de um composto de organoalumínio o qual permite obter cascas cerâmicas com maior resistência à temperatura devido a formação da alumina na estrutura. Contudo, não foi verificado nenhum estudo específico relacionado à substituição das matérias primas refratárias utilizadas para confecção das lamas cerâmicas por materiais alternativos e nem sobre o comportamento destas mudanças durante o processo.

2 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo a obtenção e caracterização de cascas cerâmicas para o processo de fundição de precisão confeccionadas a partir de lamas cerâmicas primárias e secundárias utilizando pó de telhas.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o pó de telhas através de ensaios de granulometria, espectrometria de fluorescência de raios x e difração de raios x para evidenciar suas propriedades.
- Avaliar o comportamento das propriedades físicas das cascas cerâmicas produzidas com lamas de pó de telha, por meio da realização dos ensaios de módulo de ruptura e permeabilidade.
- Avaliar o comportamento das cascas cerâmicas utilizando lamas de pó de telhas durante o processo de produção das cascas e no vazamento do metal líquido por meio da fundição das ligas de alumínio, bronze e ferro fundido.
- Avaliar se as peças fundidas obtidas por meio dos moldes cerâmicos produzidos com lamas de pó de telhas estão conforme as tolerâncias dimensionais estabelecidas pela norma ABNT NBR 15990 / Peças fundidas pelo processo de microfusão – Requisitos de fabricação, características e propriedades, por meio da análise dimensional utilizando-se um escanner 3D.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 HISTÓRICO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA

O processo de fundição por cera perdida, possui vestígios desde 5000 anos A.C. e tem sido aplicado com sucesso para produção de fundidos de arte e joias por vários séculos e até hoje. O processo foi trilhado da Tailândia para a Índia, Egito, África e Europa, sendo também muito utilizado por colombianos e astecas (HORTON, 1998). No século XVI o processo foi largamente aplicado por artistas e escultores. Benvenuto Cellini produziu muitos trabalhos de arte por este processo, sendo de grande projeção a estátua de bronze de “Perseus e a cabeça da Medusa” e o “saleiro” em ouro, roubado do museu de História da Arte de Viena. Esta peça foi comparada à Monalisa de Leonardo Da Vinci por sua raridade, beleza e história, em 1568, Cellini publicou uma descrição sobre o processo utilizado (BIDWELL, 1997).

O Laboratório Austenal nos Estados Unidos realizou a partir de 1932 diversos desenvolvimentos. Com a Segunda Guerra Mundial, metalurgistas desenvolveram ligas capazes de resistir a elevadas tensões e temperaturas, mas impossíveis de serem forjadas e usinadas, levando à utilização do processo de microfusão para produção de palhetas para turbinas (BIDWELL, 1997).

Entre 1949 e 1957 os moldes cerâmicos em casca começaram a substituir os moldes sólidos e se desenvolveram tanto para aplicações aeroespaciais quanto para outras aplicações comerciais.

No processo atual as lamas cerâmicas são produzidas com materiais refratários de custo elevado e que possuem densidades altas, no caso a zirconita e sílica eletrofundida, resultando numa casca cerâmica pesada e que acaba provocando o afastamento de operadores do processo produtivo das empresas devido a LER (Lesões por esforços repetitivos). As empresas vem buscando investimentos para adquirir novos equipamentos que possam reduzir estes problemas mas a variação do dólar e aos custos de importação muitas vezes inviabilizam estas importações.

O desenvolvimento de materiais refratários que possibilitem a redução do peso das cascas e mantenha suas características compatíveis com os materiais atuais se encaixam perfeitamente nesta necessidade, possibilitando a redução do peso das cascas cerâmicas.

A qualidade superficial e as tolerâncias dimensionais estreitas são exigências primordiais para uma casca cerâmica (LIU, 2015), pois isso garante uma peça fundida com todas as características exigidas pelo cliente final. A zirconita e a sílica eletrofundida são materiais já tradicionais no processo de microfusão e vem atendendo estas exigências a muitos anos, porém, principalmente a sílica eletrofundida vem recebendo na sua composição aditivos muito interessantes, tais como, aditivo para aceleração de secagem e de aumento de resistência (KRUMREI, 2015), principalmente para atender as demandas de ligas especiais fundidas a altas temperaturas, como ligas de cobalto e aços especiais, mas estas inovações acabam refletindo num aumento muito significativo no custo final do material refratário inviabilizando a aquisição por muitas das empresas de microfusão no Brasil.

Desenvolver um material refratário que possa substituir os já existentes no mercado, mantendo as exigências de qualidade superficial e de tolerância dimensional estreita é um desafio grande para a indústria de microfusão nacional. Apesar do número de empresas ter triplicado nos últimos quinze anos, a falta de disseminação do processo nos cursos técnicos e universidades fez com que existisse uma defasagem de mão de obra especializada muito grande, consequentemente, poucos trabalhos acadêmicos foram produzidos objetivando buscar desenvolvimentos tanto de matéria prima como de processos para o setor.

Nos anos das décadas de 1970, 1980 e meados dos anos 1990 o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo desenvolveu uma série de trabalhos em parceria com empresas, buscando desenvolver e disseminar o processo de microfusão no Brasil.

No exterior, principalmente nos Estados Unidos, China e Índia se concentram os principais estudos referentes ao processo de microfusão, anualmente são realizados congressos onde são apresentados os trabalhos que cada universidade ou empresa vem desenvolvendo (LIU, 2015).

Muitos trabalhos apresentados em congressos internacionais abordam o interesse de melhorar o desempenho das cascas cerâmicas através da melhoria das propriedades de seus componentes e aditivos analisando o resultado do comportamento das cascas cerâmicas através dos ensaios de resistência à flexão (módulo de ruptura) e permeabilidade mas não foram encontrados artigos abordando melhorias ou substituição das matérias primas refratárias que serão utilizadas para confeccionar as lamas primárias e secundárias.

Uma justificativa para este fato, pode ser que, pelos materiais já existentes e as tecnologias disponíveis no exterior fazem com que o foco seja no desenvolvimento de novas ligas e processos de alta agregação de valor no produto final, como por exemplo, obtenção de palhetas de turbina formada por monocristal “single Crystal” o qual confere a peça uma elevada resistência mecânica de tração (ZABA et al., 2014).

A possibilidade da utilização do pó de telhas como matéria-prima para o setor de microfusão pode trazer impactos interessantes, pois trata-se de um material ainda não testado para este fim. Algumas das indústrias que normalmente utilizam peças produzidas pelo processo cera perdida são a aeroespacial, automobilística, eletrônica, alimentícia, agrícola, petroquímica, mecânica, têxtil, marítima, nuclear, médica e odontológica, lazer, equipamentos óticos. É importante ressaltar que esta lista de aplicações não está esgotada (ZABA et al., 2014).

Na Europa, o maior mercado é o Reino Unido devido à presença da Rolls-Royce, seguido da França, Alemanha e Itália. Na América do Norte, 95% da produção concentra-se nos Estados Unidos. Na África, as fundições produzem geralmente peças para comércio e artistas. Na Ásia destacam-se a China, Japão, Taiwan e países do sudoeste. O mercado da América do Sul não é muito conhecido mundialmente, mas vem crescendo de forma considerável. (FRITZ, 2010).

Considerando os estudos realizados por pesquisadores de vários países sobre as melhorias na casca cerâmica e o conhecimento de suas propriedades, cujas conclusões serão apresentadas a seguir, foi possível obter informações importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

LEE et al., (2017) estudaram a caracterização de corpos de prova retangulares de casca cerâmica através do ensaio de resistência a flexão adotando 2 baterias de testes e analisando o módulo de ruptura dos corpos de prova no estado denominado a verde, ou seja, logo após a sua confecção.

Na primeira bateria foram analisados corpos de prova secos e depois molhados com água para averiguar a influência nas propriedades, após o ensaio foi averiguado que os corpos de prova secos ficaram com resistência entre 11% e 54% maior que os corpos de prova que receberam água.

Na segunda bateria foram analisados corpos de prova decerados em autoclave (temp.:180 °C/ pressão: 0,8 MPa) e em refrigerador (temp.: 5 °C / tempo: 12 h), os resultados mostraram que os corpos de prova que foram decerados no autoclave

aumentaram seu módulo de ruptura em média 2,7 MPa em comparação aos decerados no refrigerador, uma das justificativas dos autores foi que a ação do vapor pressurizado com temperatura por volta de 180°C fez com que os sois de sílica curassem por coalescência e aumentassem o módulo de ruptura.

Kline (2010) inseriu percentuais de grafite na composição das lamas cerâmicas secundárias com o intuito de aumentar a permeabilidade do molde e melhorar o fluxo de saída de ar do interior das cascas, com os resultados obtidos ele percebeu, ao contrário do que imaginava, que no estado a verde, o grafite aumentou o módulo de ruptura em relação as cascas cerâmicas confeccionadas com lamas sem grafite. Não foram notadas alterações significativas na permeabilidade das cascas com a adição dos percentuais de grafite durante este estudo.

3.2 CERÂMICA VERMELHA

Historicamente o setor cerâmico ficou conhecido por denotar a atividade de produção de artefatos a partir de argilas e tem por objetivo fornecer insumos para as indústrias de energia, metal-mecânica e, principalmente, a produção de telhas, tijolos e blocos cerâmicos sendo fornecedor de materiais para a indústria da construção civil.

No Brasil, a produção cerâmica é feita, em sua maioria, por empresas de pequeno e médio porte. Dentre as diversas substâncias minerais consumidas, destacam-se, em razão do volume de produção atingido, as argilas de queima vermelha ou argilas comuns que respondem pelo maior consumo, sendo especialmente utilizadas na produção de cerâmica vermelha e de revestimento. Tais argilas são caracterizadas como matérias-primas de baixo valor unitário, o que não viabiliza o seu transporte a grandes distâncias, condicionando a instalação de unidades industriais cerâmicas nas proximidades das jazidas.

O Brasil dispõe de importantes jazidas de minerais de uso cerâmico, cuja produção está concentrada principalmente nas regiões sudeste e sul, onde estão localizados os maiores polos cerâmicos do país. No entanto, outras regiões têm apresentado certo desenvolvimento dessa indústria, em especial o nordeste, devido, principalmente, à existência de matéria-prima, energia viável e mercado consumidor em desenvolvimento. A produção do Nordeste do país representa 21% da produção nacional .

COELHO (2009) destaca dentre os diversos problemas presentes no setor de fabricação de cerâmica vermelha a caracterização do alto índice de empresas familiares, com mão de obra não qualificada, emissões gasosas oriundas da queima, falta de qualidade dos produtos, não utilização de técnicas modernas de produção e de normas técnicas sobre a qualidade o que gera variação significativa nos índices de produção, mais de modo geral, representa 30% de desperdício na indústria da cerâmica vermelha no Brasil.

Os desperdícios podem ser ocasionados por diferentes causas e são inerentes ao processo produtivo, porém, quanto maior o nível de perdas menos eficiente é o processo. Uma vez que a finalidade de uma organização é melhorar seus processos frente à concorrência, ampliar seus mercados, satisfazer seus clientes e aumentar sua receita e seu lucro, é extremamente relevante estudos que permitam análises em reduções de perdas (IDROGO et al., 2016).

Neste contexto as empresas percebem o desafio de aperfeiçoar seus processos produtivos, dispondo de investimento para a modernização do setor, os enquadrando às exigências das normas técnicas, para assim melhorar a qualidade, agregando valor aos seus produtos, satisfazendo seus clientes e obtendo vantagens competitivas sobre seus concorrentes (IDROGO et al., 2016)..

3.2.1 Processo de produção das telhas

O macroprocesso produtivo de fabricação das telhas compreende três processos: Maromba, queima e de expedição (IDROGO et al., 2016).

No Processo da Maromba a matéria prima (material rico em argila), chega ao processo por meio de um caminhão caçamba, onde é colocado em um depósito, denominado caixão alimentador (estocagem), precedido de dosagens necessárias de água para haver a mistura e assim facilitar as operações posteriores.

O processo de Maromba compreende os subprocessos de Mistura; Laminação; Extrusão, Corte, Prensagem e Secagem, a saber:

1) Subprocesso de Mistura - Do caixão alimentador, a matéria-prima é transportada por uma esteira onde recebe quantidades de água para adequar a umidade da argila, até o misturador, em que é quebrada, então segue por uma segunda esteira para o processo de laminação.

2) Subprocesso de Laminação - Este processo é responsável por um adensamento da matéria prima, para que sejam eliminados agregados restantes de

processos anteriores. Em seguida, ela é transportada por outra esteira até a máquina extrusora a vácuo.

3) Subprocesso de Extrusão - consiste em compactar o barro numa câmara de alta pressão, equipada com sistema de desaeração (vácuo), contra um molde (boquilha) com o formato de um bastão contínuo.

4) Subprocesso de Corte - O bloco de material extrudado é contínuo, então é cortado em dimensões padronizadas por meio de uma cortadeira automática, aderindo à forma de um bastão, que segue por uma esteira até a prensa.

5) Processo de Prensagem - Os bastões chegam através da esteira à prensa, em que são posicionados manualmente pelo operador e recebem a forma de determinada telha, podendo ser modelo Romana, América ou Capote.

6) Processo de Secagem - Em seguida as telhas são organizadas em gaiolas e são posicionadas através de um transferidor, na estufa de secagem industrial que é composta por dois secadores. Os secadores são alimentados pelo calor das câmaras e quando necessário para atingir a temperatura adequada, são abastecidos por lenha.

O processo de queima compreende os subprocessos de Enforna, de Queima e de Desenforna.

Subprocesso de Enforna - Após o processo de secagem, as telhas são levadas até o setor da enforna por carrinhos empurrados por funcionários, então são colocadas manualmente dentro dos fornos. Em seguida a porta do forno é fechada com tijolos e cimento e as telhas são aquecidas durante 48 horas, para que percam todo percentual de umidade, resultando na sua queima total. O calor que as telhas enfornadas recebem é proveniente de 18 fornos interligados e por eles passam calor e fogo.

Subprocesso de queima - A partir de 600 graus começa o abastecimento de lenha, e então depois de aquecida, as telhas são queimadas, em média durante 30 horas, em temperaturas que variam entre 800 a 1000°C para que assim alcancem as propriedades físicas esperadas.

Subprocesso de desenforna - Após a queima, as telhas são resfriadas naturalmente ou por ventiladores industriais para que possam ser manuseadas, e assim começar o processo de desenforna, que consiste na retirada manual das telhas queimadas das câmaras.

O processo de expedição pode ser subdividido nos seguintes subprocessos: Inspeção e Paletização; de Estocagem e de Entrega ao Cliente.

Subprocesso de Inspeção e Paletização - Depois de desenfornadas as telhas, as mesmas serão paletizadas. Neste momento ocorre o processo de inspeção, uma vez que são paletizadas as telhas boas e rejeitadas as telhas com algum defeito (trincas, quebras e queima em excesso), e telhas cruas (não queimaram o suficiente) voltando para o processo de queima (retrabalho).

Subprocesso de Estocagem - Depois de paletizados, as telhas são empilhadas nas áreas de expedição permanecendo no local até o carregamento para expedição.

Subprocesso de entrega ao Cliente - A logística de entrega ao cliente é realizada através de caminhões, utilizando veículos próprios e/ou terceirizados, ou os clientes levam em seus veículos.

Os desperdícios podem ser ocasionados por diferentes causas e são inerentes ao processo produtivo, porém quanto maior o nível de perdas menos eficiente é o processo. Uma vez que a finalidade de uma organização é melhorar seus processos frente à concorrência, ampliar seus mercados, satisfazer seus clientes e aumentar sua receita e seu lucro, é extremamente relevante estudos que permitam análises em reduções de perdas.

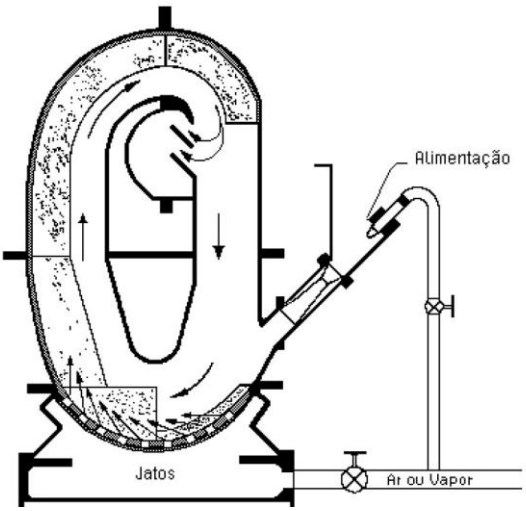
3.2.2 Processo de micronização do pó de telhas

Quando ocorre o descarte das telhas no processo produtivo, todo o material descartado é recolhido por empresas, geralmente mineradoras, as quais realizam o trabalho de moagem das telhas para revende-las como material de cobertura para quadras de tênis.

O material moído obtido por meio deste processo de moagem fornece um pó de telhas com distribuição granulométrica muito dispersa, necessitando de um trabalho de micronização para ajustar as granulometrias nas faixas desejadas.

No processo de micronização são utilizados moinhos a jato, este moinhos geralmente são usados em moagens fina e ultrafina a seco de materiais plásticos ou friáveis, pouco ou muito abrasivos, resistentes ou não resistentes à fragmentação. Logo, são adequados para moer materiais, tais como abrasivos, grafite para impressão, talco, resinas, farmacêuticos, cerâmicos e quartzo de alta pureza como mostra a figura 01.

Figura 01 – Desenho esquemático de um moinho a jato



Fonte: adaptado de KERBER 1993

A distribuição granulométrica do material na alimentação desses moinhos pode variar desde dezenas de micrometros a milímetros. Os moinhos têm capacidade entre 2 a 6000 kg/h na moagem ultrafina, obtendo-se um produto final com granulometria abaixo de 2 ou 3 µm.

Nesses equipamentos a energia cinética é transmitida às partículas por expansão de gás. Usa-se ar comprimido, vapor superaquecido ou gases inertes em algumas aplicações como meio energético. Usando ar, a pressão inicial varia na faixa de 5 - 15 bar, à temperatura ambiente, para moagens de materiais sensíveis ao calor. Devido ao efeito de resfriamento pela expansão adiabática, o material atinge apenas a temperatura do ambiente na descarga.

Alcançam-se maiores velocidades de jato e maior economia do processo usando-se vapor super aquecido, temperatura na faixa de 315-370 °C e pressão entre 14 e 20 bar. Nessas condições, a pressão na câmara de moagem varia entre 1,2 - 3 bar, sendo reduzida pela carga. Os materiais que apresentam ductilidade ou plasticidade podem ser moídos a jato, num processo criogênico (KERBER 1993).

Neste processo, o material da alimentação e o gás dos jatos são resfriados. Esse procedimento aumenta significativamente o consumo de energia da moagem, pois a velocidade dos jatos depende da temperatura do gás.

Num processo criogênico recente, apenas a câmara de moagem é resfriada por injeção de nitrogênio líquido. Esse processo caracteriza-se por consumos de energia reduzidos

A cominuição nos moinhos a jato ocorre por choques partícula-partícula, o que torna o processo praticamente livre de contaminação. Reduz-se ainda o baixo desgaste quando a câmara do moinho é revestida com materiais refratários, tais como metal duro, borrachas especiais ou elastômeros de poliuretano.

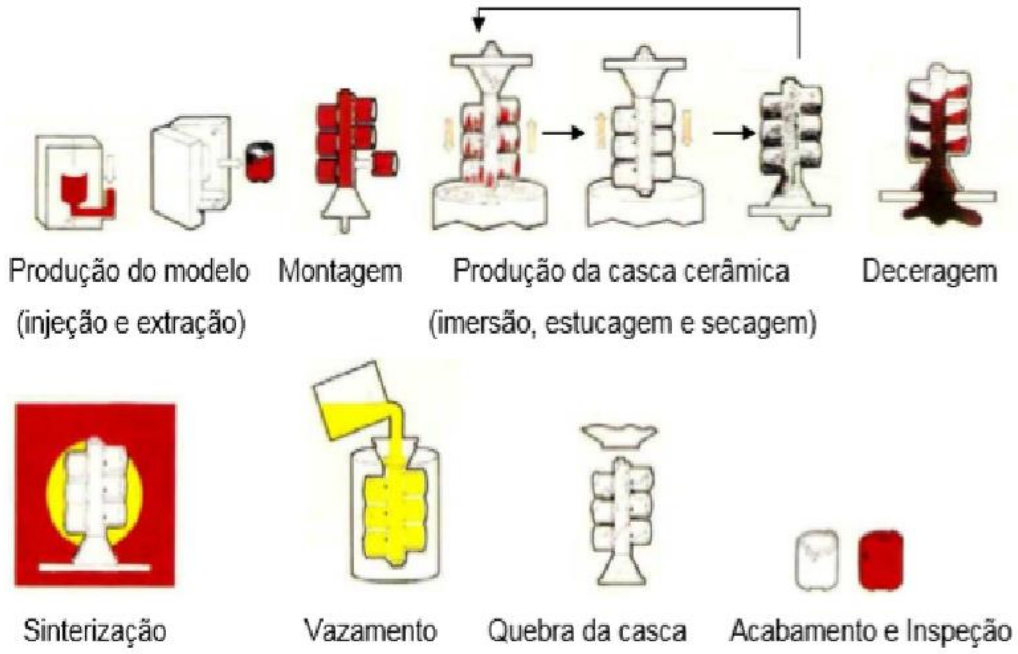
Quando são usados revestimentos de materiais plásticos, algumas medidas de descarregamento elétrico devem ser consideradas, tais como perfuração das superfícies planas e ligação do moinho à terra.

Os materiais passíveis de moagem a jato devem possuir valores agregados elevados frente aos consumos elevados de energia: 500 a 2.000 kWh/t na moagem ultrafina (KERBER 1993).

3.3 ETAPAS DO PROCESSO DE MICROFUSÃO

O processo de microfusão pode ser dividido nas seguintes etapas (BIDWELL, 1997), conforme ilustração na figura 02;

Figura 02 – Esquema gráfico das etapas do processo de microfusão



Fonte: Adaptado de BIDWELL, (1997)

- Obtenção do modelo de cera, por meio de injeção da cera em uma matriz metálica;
- Montagem da “árvore” ou cacho dos modelos em cera obtidos;
- Confecção do molde cerâmico em casca através de camadas obtidas por:
  - Imersão do cacho de cera no banho de lama cerâmica;
  - Estucagem ou chuveiramento que consiste no recobrimento posterior a lama com partículas refratárias;
  - Secagem dos moldes cerâmicos;
- Deceragem – Remoção da cera do interior da casca cerâmica;
- Sinterização da casca cerâmica visando aumento de resistência mecânica e remoção de resíduos;
- Fusão e Vazamento
- Desmoldagem (manual ou mecânica);
- Acabamento;
- Inspeção.

3.4 CONFECÇÃO DAS CASCAS CERÂMICAS

O processo de produção das cascas cerâmicas envolve a imersão do cacho dos modelos em cera dentro de um banho de lama cerâmica seguido de escoamento do excesso de lama e cobertura com material refratário fino (estucagem ou chuveiramento). Após secagem, este procedimento é repetido várias vezes, utilizando-se grãos progressivamente maiores até formação de uma casca refratária suficientemente forte para resistir a basicamente dois grandes esforços (HORTON, 1998):

- saída do material termoplástico (cera) sob ação do calor;
- entrada do metal líquido e suportá-lo até completa solidificação.

A espessura da casca cerâmica varia normalmente de 5 a 16 mm. A última camada, denominada como camada final, é normalmente deixada sem material refratário, para evitar perdas de partículas da superfície do molde e facilitar o exame visual para localização de trincas durante o processo. Algumas razões para se ter esta camada são: evitar perdas de grãos; evitar inclusões na peça fundida devido a

grãos de estuco que podem ir para dentro do molde; evitar contaminação da cera durante a deceragem na autoclave prejudicando sua recuperação; proporcionar maior aderência durante transporte da casca, principalmente quando está aquecida (HORACE, 2009).

A imersão, o escoamento e a estucagem da árvore, podem ser realizados manualmente, mecanicamente ou por robôs. O uso de robôs é crescente, visando aumentar a produtividade, possibilitar a produção de peças e cachos maiores e também reproduzir recobrimentos mais uniformes. Em geral a imersão é feita ao ar, porém o uso de vácuo é muito efetivo para peças com cavidades estreitas e para eliminar bolhas de ar.

O cacho, limpo e condicionado à sala de lama, deve ser mergulhado, manipulando-o de tal forma a produzir um recobrimento uniforme. A seguir aplicam-se as partículas de estuco, caindo sobre o cacho através de um chuveiro de areia, ou mergulha-se o cacho em um leito fluidizado. No leito fluidizado as partículas comportam-se como um líquido em ebulição devido à ação do ar pressurizado que passa por uma placa porosa localizada no fundo do tanque deste leito.

As lamas primárias contém o pó de refratário mais fino e as partículas de estucagem da primeira camada também são mais finas que as camadas de reforço. Estas características proporcionam um molde com superfície interna muito lisa, capaz de resistir à penetração do metal. As camadas subseqüentes (de reforço), devem promover elevada resistência e espessura mínima necessária.

O número de camadas aplicadas está relacionado com o tamanho do cacho, espessura das peças e o metal a ser vazado, podendo variar de 5 a 12 camadas. Para a maioria das aplicações, este número situa-se entre 6 a 9 (HORTON, 1998).

Entre cada camada, as lamas endurecem por secagem e gelificação. O método mais comum de secagem é a circulação de ar com temperatura e umidade controladas. Normalmente os cachos são colocados gancheiras ou em transportadores.

Os materiais utilizados nessa etapa suportam o metal fundido a altas temperaturas (em geral 1650°C) e são totalmente inertes, para evitar reações metal-molde.

A primeira camada fina de material cerâmico, forma a face interna do molde e reproduz todos os detalhes do modelo, incluindo sua superfície plana. Ela contém, também, o agente aglomerante que propicia a resistência mecânica da estrutura.

As partículas de estuco servem para impedir posteriormente o escoamento da lama, ajudar na prevenção de trincas, melhorar a aglomeração entre as camadas e constituir a espessura mais rapidamente. A espessura da casca aumenta com o aumento do tamanho de partículas da estucagem e com o aumento da viscosidade da lama (MALE et al., 2014).

A contração e a expansão térmica da cera durante a secagem pode promover o aparecimento de trincas na casca. Se a secagem é muito rápida, o efeito de resfriamento causa a contração do modelo (cera) enquanto o recobrimento ainda está molhado e solto. Quando o recobrimento ainda está contraindo, a cera começa a expandir. Isto provavelmente causará trincas na casca. Portanto a umidade recomendada, para as lamas à base de sílica coloidal, deve ser maior que 40%. Para condições normais, recomenda-se umidade de 50% como ideal. Um ponto essencial é que as variações tanto de temperatura quanto de umidade não sejam grandes.

A lama não necessita estar totalmente seca, mas o suficiente, para que a próxima camada possa ser aplicada sem retirar o anterior. Uma técnica alternativa é o uso de amônia para obter a gelificação química, muito comum em lamas com silicato de etila. Este método permite redução do tempo de obtenção das cascas. A gelificação pode ainda ser realizada pela adição de agentes ao estuco ou às lamas - alcalinas ou ácidas - carregados positiva e negativamente em uma sequência alternada de lamas (HORTON, A.H. 1998).

Os materiais utilizados para a produção da casca (lama e estuco) são: refratários, aglomerantes, agentes de molhamento, antiespumantes e outros aditivos.

Os refratários normalmente utilizados na lama e na estucagem são (YUAN et al., 2012):

Sílico-Aluminoso – Composto por cristais de mulita e sílica amorfa. O teor de alumina varia normalmente de 42 a 73%. A refratariedade aumenta com o aumento deste teor. A mulita ($3\ Al_2O_3\ 2\ SiO_2$) é um composto estável a altas temperaturas. Os refratários silico-aluminosos apresentam características moderadas de expansão térmica. Estes materiais são sinterizados, triturados e separados cuidadosamente para produzir faixas de tamanhos para uso em lamas (pós) e como estucos (grãos). Encontram-se disponíveis em várias faixas de tamanhos, sendo comum os tamanhos de 100 a 600 meshes.

Alumina - Constituído por alumina eletrofundida (99,5% Al_2O_3) ou tabular (mínimo 99,5% Al_2O_3). As principais impurezas incluem SiO_2, Fe_2O_3 e TiO_2. É altamente refratária, com um ponto de fusão de 2038 °C, e possui baixa reatividade com ligas à base de níquel e cobalto, sendo utilizada para superligas. É atacada por certos metais refratários tais como nióbio, zircônio e titânio. Sua expansão térmica é intermediária em relação aos demais materiais refratários utilizados em microfusão. O uso de alumina geralmente proporcionará uma camada de revestimento com alta condutividade térmica.

Cristobalita (SiO_2) – É produzida através do aquecimento de areias de sílica de alta pureza a uma temperatura acima de 1515 °C, e abaixo do ponto no qual o vidro de sílica é formado. Muito utilizada para não ferrosos, principalmente em indústrias de jóias e próteses dentárias devido à sua característica única de expansão térmica. Moldes cerâmicos nos quais a cristobalita é incorporada são autodestrutivos quando são mergulhados em água fria. A contração rápida do molde estraçalha-o, deixando a peça microfundida limpa.

Sílica Eletrofundida – Apresenta baixa expansão térmica. Comparada a outros refratários, possui condutividade térmica e densidade baixas. Utilizada como componente de lama e como estuco tanto para peças ferrosas como também não ferrosas. Para os ferrosos, as cascas são de fácil desmoldagem devido à fragilidade e solubilidade em soda cáustica.

Quartzo (99,5% SiO_2) - Grande disponibilidade e baixo custo. Para a microfusão, o teor indicado é tipicamente de 99,5% pura, contendo pequenas quantidades de Al_2O_3, Fe_2O_3 e traços de álcalis. Encontra-se em diversas faixas de tamanhos.

Zirconita – Sua expansão térmica é intermediária entre a alumina e a sílica eletrofundida. Contém geralmente em torno de 67% ZrO_2 e 33% SiO_2. Devido à sua alta densidade, o estuco de zircônio é normalmente aplicado com chuveiro. Os pós estão disponíveis em várias distribuições de tamanho de partícula e são usados em lamas primárias e secundárias. É o refratário mais utilizado em lamas primárias por apresentar baixa reatividade com a maioria dos metais e ligas (XU et al., 2016).

Os aglomerantes normalmente utilizados são a sílica coloidal ou silicato de etila. A sílica coloidal é uma dispersão de partículas esféricas de sílica amorfa, em água. O tamanho da partícula da sílica encontra-se dentro da variação coloidal de 10 a 10^3Å. Este tamanho resulta em uma partícula com alta razão área de

superfície/Volume. A partícula carrega uma carga iônica negativa, a qual juntamente com a elevada área de superfície, mantém as partículas em dispersão permanente na água.

A sílica coloidal é geralmente produzida em soluções aquosas de silicato de sódio com resinas trocadoras de íons. A alcalinidade é posteriormente ajustada para pH na faixa de 9,6 a 10,0. O teor de sílica está em torno de 30% em massa. Sob as condições normais, a sílica coloidal é muito estável, entretanto é sensível a várias condições que conduzem à gelificação.

Fatores como temperatura elevada, temperatura de congelamento, e alguns compostos químicos, tais como ácidos, alguns sais e orgânicos reduzem a habilidade de aglomeração da sílica coloidal, resultando em cascas cerâmicas frágeis (MALE et al., 2014).

Os agentes de molhamento, também denominados surfactantes, reduzem a tensão superficial da lama e permitem que esta, “molhe” os cachos de cera mais facilmente. Estes agentes devem ser escolhidos segundo os critérios de compatibilidade com o aglomerante e de tendência a formar espumas no topo da lama. A mínima quantidade de surfactantes, necessária para o molhamento, deve ser adicionada visando minimizar seus efeitos desfavoráveis no sistema de lama (KLINE, 2010).

Estas concentrações normalmente variam em torno de 0,1% em massa do ligante. São normalmente divididos em três categorias: - catiônicos, aniônicos e não iônicos. O agente catiônico nunca deve ser usado com a sílica coloidal, pois não são compatíveis. Geralmente o fabricante da sílica coloidal indica qual o surfactante mais adequado e recomenda-se realizar testes antes de se utilizá-lo (LEE et al., 2017)

Os antiespumantes são adicionados geralmente na primeira lama para eliminar o ar que tenha ficado retido, seja durante a operação de mistura dentro dos tanques de lama ou proveniente do próprio refratário. A presença do ar afeta as medidas de densidade e viscosidade, podendo também causar excesso de bolhas sobre a cera quando os cachos são mergulhados, impossibilitando um recobrimento uniforme. A introdução de agente de molhamento também aumenta a tendência à formação de espumas. Os antiespumantes reduzem a resistência das bolhas de ar, levando à sua fragmentação bem como ao escapamento da lama. Como são normalmente orgânicos, o efeito de “enfraquecimento da casca” ocorre após a sinterização desta (HORTON, 1998).

Os agentes nucleantes são aditivos que podem ser utilizados na lama para refinar o tamanho de grão na superfície da peça metálica. Óxido de cobalto, silicato de cobalto e aluminato de cobalto são alguns nucleantes típicos usados em lamas primárias, as quantidades normalmente utilizadas estão entre 0,5 a 10% em massa (HORTON, 1998).

A água pode apresentar variações em diferentes regiões quanto ao teor de minerais e o pH. Estes parâmetros influem nas características da água a ser utilizada na lama. Em geral, deve-se utilizar água destilada ou deionizada na lama. Água com alta dureza é indesejável já que cálcio e magnésio em pequenos teores desestabilizam a sílica coloidal.

Existem testes simples para os aditivos, são eles;

- Cor e odor – verificação da alteração;
- Acompanhamento do pH da lama – verificação de alteração;
- Teste de gelificação – verificação de alteração da viscosidade.

Outros aditivos podem ser usados para melhorar a resistência e permeabilidade da casca. Os aditivos que conferem resistência a verde para a casca, geralmente são materiais orgânicos formadores de filme suspenso em água (um “látex”). Eles melhoram a resistência a verde da casca e a tornam menos frágil contribuindo com um pequeno grau de plasticidade ao sistema cerâmico que é frágil. Estes materiais têm o efeito contrário na resistência da casca sinterizada, porque se queimam juntamente com os resíduos de cera.

A porosidade maior, aumenta a permeabilidade da casca. Estes aditivos são geralmente usados em baixos teores (cerca de 1 a 3%) (HORACE, 2009). O mais comum destes materiais é o látex, que se mistura facilmente com lamas de sílica coloidal à base de água. Copolímeros acrílicos e Estireno-Butadieno parecem ser os mais compatíveis com a sílica coloidal. Como nem todo látex é estável no ligante, a seleção deverá ser baseada em recomendações do fornecedor ou de acordo com a experiência do fundidor.

Estudos utilizando-se pó de grafite nas lamas, mostraram que o aumento da porosidade influi na permeabilidade das cascas. Materiais removíveis com a sinterização também podem ser utilizados junto com o estuco, porém surgem sempre problemas resultantes das diferenças entre as densidades destes materiais

e do estuco, que não permitem que estes materiais sejam incorporados homogeneamente às cascas (LEE et al., 2017).

A introdução de fibras na lama cerâmica foi investigada por BRASCOMB, (2002) onde estudou-se cascas cerâmicas com fibras de *nylon* visando o vazamento de alumínio. Estas cascas continham 8% em massa de polímero (em relação ao peso total de líquido) e fibras na proporção de 20 g/l (1,8% em relação ao volume).

3.5 CONTROLE DOS PARÂMETROS DE PROCESSO

A obtenção de peças de alta qualidade é resultante de um controle consistente do processo de confecção das cascas cerâmicas. Os controles devem ocorrer em todas as etapas do processo, desde a definição de critérios de projeto da matriz, até as etapas de fusão e acabamento.

Durante a produção da casca cerâmica, os fundidores devem desenvolver controles visando propriedades como resistência a verde, resistência da casca sinterizada, permeabilidade e facilidade de remoção da casca. O molde em casca deverá suportar às tensões de manuseio, pressões de deceragem e às forças (físicas e térmicas) do metal durante o vazamento.

A qualidade da casca depende das lamas e do processo pelo qual elas são produzidas. Alguns princípios básicos devem ser considerados na preparação da lama. Em primeiro lugar, deve-se produzir uma lama estável (BIJOVET, 2003).

No início da preparação, a viscosidade normalmente é muito alta e à medida que a lama vai sendo misturada, o refratário é “molhado” e tanto a quantidade de ar liberado quanto a viscosidade irão diminuir. Considera-se que a estabilidade da lama é alcançada quando os resultados das medidas de viscosidade, realizadas em intervalos de uma hora, apresentam variação menor que um segundo (em copo zahn ou similar). O tempo de estabilização depende de vários fatores que incluem o tipo de equipamento de mistura, a quantidade e o tipo de adições, a formulação da lama e procedimentos de preparação (BIJOVET, 2003).

Para se manter a qualidade da lama são indicados os seguintes controles (CAPADONA 1989) :

- Matérias primas (visual/odor, faixa de tamanhos de grãos, densidade volumétrica, composição química, pH, entre outros);
- Equipamento de lama (tempo para ocorrer molhamento dos refratários na lama e desaerar);

- Procedimentos de fábrica (treinamento de pessoal, comparação dos procedimentos da prática com o padrão, entre outros);
- Controle da lama durante mistura (relação Pó/Aglomerante, temperatura da lama, viscosidade, gravidade específica, densidade, pH, peso de retenção de lama em placa de cobre, entre outros);
- Controle diário da lama (temperatura, gravidade específica, peso de retenção da lama cerâmica em placa de cobre ou bronze e viscosidade);
- Controle da lama a longo prazo (teor de água, teor de sílica, pH, condutividade, teor de sólidos, gelificação, visual);
- Controle da casca pronta (peso do molde, módulo de ruptura e permeabilidade).

HIRST (2010) cita os seguintes controles como essenciais:

- Controle da umidade relativa da sala, determinando-se valores entre 45 e 60%;
- Controle da temperatura na sala de secagem em faixas de variação de ± 2°C;
- Controle do pH, viscosidade e percentual de SiO2.

Este e outros controles são padronizados pelo ICI – Investment Casting Institute.

Os aglomerantes na lama podem ser ácidos ou básicos. As estabilidades máximas ocorrem em pH 2 e 10. Vários são os fatores que podem afetar o pH da lama. Recomenda-se minimizar possíveis contaminantes, provenientes de aditivos e estes devem sempre ser avaliados cuidadosamente antes de serem introduzidos (HIRST, 2010). O pH do aglomerante deve ser monitorado regularmente e medido no aglomerante separado da lama.

O aglomerante deve ser separado do refratário para proporcionar a leitura mais precisa e prolongar a vida do eletrodo de medição. O pH pode ser aumentado por meio de adições de hidróxido de amônia diluído e trietanoamina (BIJOVET, 2003).

A gelificação da sílica coloidal ocorre rapidamente quando em contato com álcool. Como existem desengraxantes (para a limpeza do cacho) à base de álcool, é importante certificar que não há resíduos de álcool sobre o cacho, durante a imersão na lama.

Quanto ao controle da viscosidade, adotou-se nas microfusões o copo zahn, que é um viscosímetro desenvolvido pela indústria de tinta que possibilita simplicidade e precisão de medidas.

Este copo contém um orifício de determinado diâmetro (números 4 e 5) e o teste consiste em mergulhá-lo dentro da lama até enchê-lo completamente. A seguir retira-se o copo da lama e neste momento dispara-se o cronômetro, medindo-se o tempo de escoamento pelo orifício, até que o fluxo seja interrompido à altura de 1 polegada do copo. Os ajustes podem ser realizados utilizando-se água ou aglomerante para redução, e refratário para aumento da viscosidade (RODRIGUEZ, 2014).

A sílica coloidal é uma suspensão de partículas finas de sílica em água. Estas partículas permanecem suspensas em razão de suas cargas de superfície, que causam repulsão entre elas. A elevação do teor de sólidos do aglomerante é causada pela evaporação da água da lama, o que afeta diretamente a sua vida útil (BIJOVET, 2003). Manter o teor de SiO_2 constante na lama é importante por dois motivos (LEE et al., 2017).

1) A concentração insuficiente de SiO_2 leva à formação de “pontes” fracas na casca a verde;

2) A concentração elevada aumenta o contato de partículas de SiO_2, levando a uma gelificação prematura.

Além destes testes para controle durante a produção da casca, ressalta-se também algumas recomendações importantes como (BIJOVET, 2003):

- Controlar sempre as quantidades de ingredientes utilizados na lama;
- Realizar sempre pré-misturas de novas lamas em um tanque separado e antes de adicioná-las ao tanque de produção, aguardar tempo suficiente para ocorrer o molhamento dos grãos do refratário;
- Adicionar freqüentemente lama nova aos tanques de produção para minimizar o efeito de algum material não molhado. Sempre que possível

adicionar lama fresca e solventes, para compensar as perdas por evaporação ao final de cada dia;

- Não utilizar elevada energia de mistura, buscando manter uniforme a suspensão dos refratários e controlar variações de temperatura em 5 °C em relação à temperatura ambiente;
- Usar uma lama cuja reologia produzirá uma casca de espessura uniforme e manterá a lama molhada até a aplicação do estuco;
- Controlar aspectos mecânicos da construção da casca, isto é, tempo de imersão na lama e tempo de drenagem antes da aplicação do estuco;
- Manter sob controle o tamanho e distribuição do grão;
- Avaliar as características das cascas cerâmicas como módulo de ruptura e densidade.

KLINE (2010) sugere a seguinte periodicidade para alguns testes:

- Teor de sólidos do aglomerante: semanal;
- pH: semanal;
- Teste de gel: semanal;
- Temperatura: diário;
- Viscosidade: a cada turno de produção;
- Densidade: diário;
- Teor de sólidos totais: semanal;

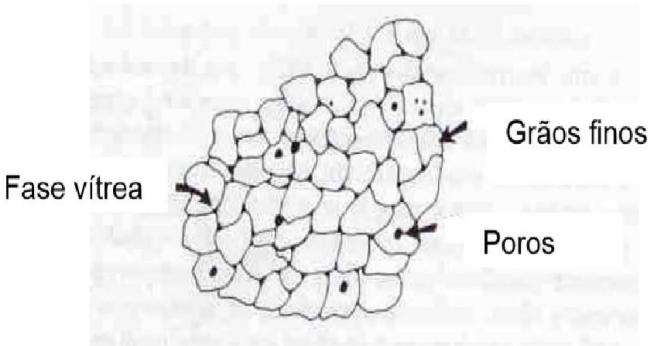
3.6 MICROESTRUTURAS DE CASCAS CERÂMICAS

O processamento convencional de materiais cerâmicos geralmente envolve a produção do pó, de composição e pureza desejada. Este pó apresenta normalmente alta pureza e uma fase com partículas de pequeno tamanho e mesma distribuição por tamanho. A densidade final do componente sinterizado é cerca de 96-98% mais denso. Geralmente estes componentes são pequenos (comprimento da ordem de mm até 10 cm, máximo de 500 g).

A densificação é promovida pelos finos e ocorre em sua maioria na etapa de queima quando ocorre sinterização dos pós no estado sólido ou com a formação de líquido tal que haja contração, às vezes acima de 50% em volume (17% linear).

As figuras 03 e 04 mostram a microestrutura típica de um material cerâmico contendo grãos finos, ocasionalmente poros e fase vítrea (aglomerante) nos contornos de grãos. Os grãos formam a fase primária, enquanto a fase aglomerante é a secundária. Normalmente poros menores são desejáveis para se obter elevada resistência e minimizar falhas (LEE et al., 2017).

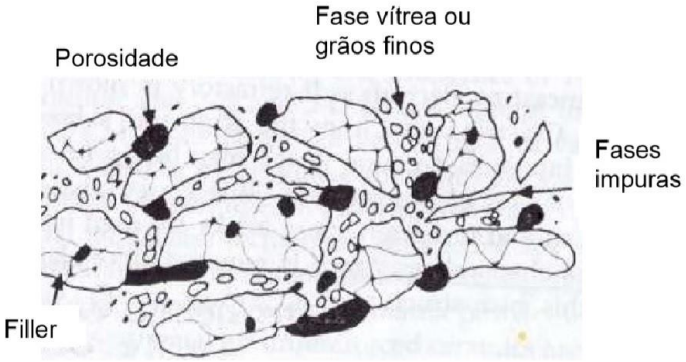
Figura 03 – Microestrutura típica de um material cerâmico denso



Fonte: Adaptado de LEE et al., (2017)

A produção de refratários combina diferentes tipos de materiais tais como óxidos e resinas poliméricas para se obter o produto final. Os pós não apresentam pureza tão elevada quanto nos materiais cerâmicos e possuem maior distribuição granulométrica permitindo que pequenas partículas (submicrons) se empacotem entre os vazios das maiores (acima de mm) tal que a maior parte da densificação ocorre na etapa de conformação, em torno de 80 a 85%.

Figura 04- Diagrama esquemático da microestrutura de um refratário, composta por um agregado (filler) de grãos refratários unidos pela fase aglomerante (matriz). Microestrutura de um refratário

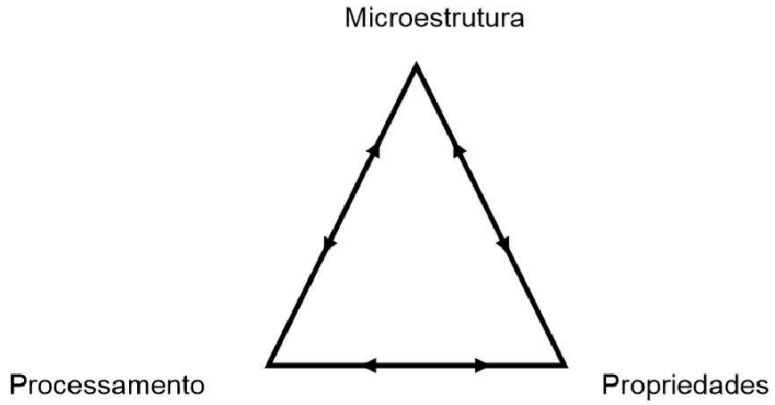


Fonte: Adaptado de LEE et al., (2017).

Os refratários apresentam grãos grosseiros e elevada porosidade em relação aos cerâmicos.

O triângulo da Figura 05 ilustra a relação entre as propriedades, processamento e a microestrutura de materiais cerâmicos. As propriedades dos materiais cerâmicos são em geral controladas pela microestrutura e a microestrutura pelo processamento indicando que a escolha criteriosa de pós e do processamento que levam à microestrutura, permite controlar as propriedades do material (LEE et al., 2017).

Figura 05 – Relação entre processamento, microestrutura e propriedades



Fonte: Adaptado de LEE et al., (2017)

A microestrutura de um material pode ser conceituada como um agregado tridimensional de fases cristalinas e/ou não-cristalinas. A descrição da natureza da microestrutura passa pela caracterização de sua composição química e avaliação das fases presentes, incluindo os vazios e poros.

Por sua vez, a descrição da geometria da microestrutura deve considerar as regiões tridimensionais preenchidas com sólidos ou vazios. Dessa forma é necessária a descrição dos aspectos geométricos associados aos poros, devido à freqüente presença de poros na microestrutura de cerâmicas, os quais são decorrentes do processamento (LIU, 2014).

Em relação ao comportamento mecânico, a presença de poros comumente implica em diminuição da resistência, no entanto, a presença de uma porosidade controlada é essencial para funções como membranas, filtros, adsorventes, materiais isolantes, entre outros. (LIU, 2014).

3.7 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CASCAS CERÂMICAS

3.7.1 Permeabilidade

A casca deve ser suficientemente permeável para permitir a saída do ar da cavidade do molde durante o preenchimento do metal líquido. A obtenção de fundidos com geometrias complexas, paredes finas e detalhes superficiais depende, para dadas condições de aquecimento do metal e do molde, da permeabilidade deste. Se a casca for permeável demais, a sua resistência e estabilidade dimensionais poderão ser sacrificadas, porém, a baixa permeabilidade pode provocar defeitos como, junta (ou gota) fria, gases, ar retido e preenchimento incompleto (classificação conforme Investment Casting Institute – ICI, citado por HORACE, 2009).

Segundo HORACE (2009) há outras causas para estes mesmos defeitos, principalmente para junta fria e gases, as quais estão geralmente relacionadas ao metal.

Diversos tipos de testes de permeabilidade (cascas planas; corpos de prova cônicos; casca construída sobre tubo de sílica e bola de cera) foram desenvolvidos para cascas cerâmicas. Atualmente o teste mais utilizado é o desenvolvido pelo “Investment Casting Institute”, o qual consiste em construir uma casca cerâmica ao redor de uma esfera de plástico, presa na ponta de um tubo de quartzo de aproximadamente 50 cm de comprimento e em torno de 1cm de diâmetro.

A seguir coloca-se os corpos de prova num forno, com as extremidades dos tubos de quartzo para fora e calcina-se a casca. Nesta etapa a esfera de plástico é eliminada. Passa-se então um fluxo de gás nitrogênio a 5,2cm de Hg de pressão por um rotâmetro e pelo tubo de quartzo que contém o corpo de prova e lê-se no rotâmetro a vazão permitida pela porosidade dos corpos de prova, conforme desenho esquemático da figura 06.

A permeabilidade é calculada pela equação abaixo;

$$Q = KDA\Delta P/L$$

Onde:

Q = vazão do fluido através do meio poroso (m^3/s);

KD = coeficiente de permeabilidade de Darcy (m^2);

A = área da amostra (área interna da bolinha) (m^2);

ΔP = diferença de pressão (N/m^2); L = espessura da casca (m).

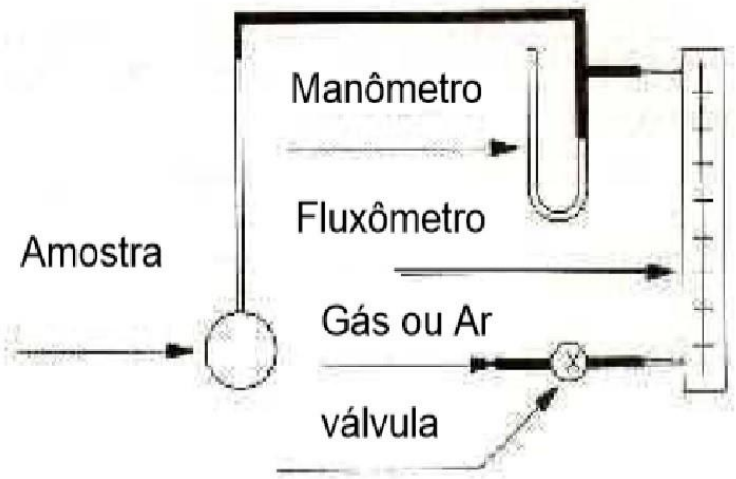
Normalizando a equação para a viscosidade (η) do fluido utilizado, para se ter a permeabilidade específica (Kp), comumente chamada de “Permeabilidade”, para simplicidade dos textos tem-se a equação;

$$Kp = \eta\ Q\ L\ /\ A\ \Delta P$$

η = viscosidade do gás na temperatura do teste (Ns/m^2)

A permeabilidade a quente é uma medida da permeabilidade do molde sob as condições de temperatura durante o vazamento da peça, como mostra a figura 06.

Figura 06 - Desenho esquemático do teste de permeabilidade recomendado pelo Investment Casting Institute (ICI).



Fonte: Adaptado de KLINE (2010)

Segundo KLINE (2010), este teste apresenta resultados eficientes, porém as bolinhas plásticas encontradas no mercado podem deixar resíduos indesejáveis e maiores do que o esperado no interior das cascas, bem como não promover adequadamente a queima dos modelos.

Estudos têm mostrado que a primeira camada é a que exerce a maior influência sobre a permeabilidade da casca (oito vezes maior em testes sem a primeira camada). Outros estudos também apontaram que os principais fatores que afetam a permeabilidade são o refratário da lama primária, o estuco da camada primária, a temperatura de sinterização e o tamanho de grão do estuco da camada

secundária, o pó de madeira também pode aumentar a permeabilidade (PATTNAIK, 2015).

LEE et al., 2017 observaram que a permeabilidade é ligeiramente maior quando se utiliza uma viscosidade menor (8 segundos; copo zahn número 04) em lamas secundárias, comparando-se com outras viscosidades (12, 16 e 19 segundos; copo zahn número 04).

Ao invés de aumentar a resistência da casca, KUMAR et al., (2015) investigaram a possibilidade de reduzir as tensões geradas pela expansão da cera durante a deceragem. Portanto a cera deve ter fluidez e a casca deve apresentar permeabilidade suficiente para a penetração da cera, sem afetar o acabamento da peça fundida.

3.7.2 Resistência das cascas cerâmicas

O conhecimento do módulo de ruptura de materiais é uma maneira de descrever sua resistência. No caso das cascas cerâmicas para microfusão, existem três determinações de resistência que podem ser de interesse (TRYTEK et al, 2010):

- Resistência a verde, quando se necessita no mínimo que os cachos sejam manipulados;
- Resistência a quente (na temperatura de vazamento do metal), onde deve ser suficientemente alta para não haver rompimento da casca;
- Resistência após sinterização, quando a resistência deve ser relativamente baixa, para a casca ser facilmente removida da peça.

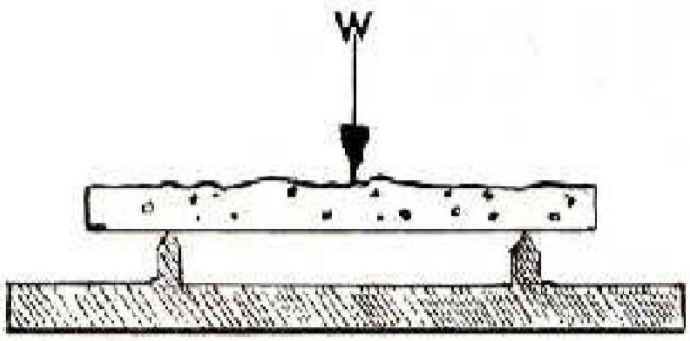
O procedimento para realizar o teste do módulo de ruptura é recomendado pelo Investment Casting Institute e consiste basicamente em construir uma casca cerâmica da maneira usual na forma de uma barra de dimensões especificadas. A seguir, usando uma máquina de ensaios universal que produza uma carga a uma velocidade uniforme, aplica-se a carga transversalmente aos corpos de prova colocados sobre um suporte de dois pontos, de modo a executar um teste de resistência à flexão de três pontos. As cargas são aplicadas em ângulo reto sobre a superfície superior do corpo de prova, uniformemente e a uma velocidade capaz de romper a barra cerâmica em aproximadamente 30 segundos. Calcula-se o módulo de ruptura pela Equação:

$$MOR = \frac{3wl}{2bd^2}$$

MOR = módulo de ruptura (MPa);
W = carga de ruptura (N);
l = distância entre os suportes (m);
b = largura da barra cerâmica (m);
d = espessura da barra cerâmica (m).

Quanto ao erro das medidas de módulo de ruptura, salienta-se o da medida de espessura da casca, a qual é bastante irregular em uma das faces devido ao relevo causado pelos grãos de estuco, o que ainda fica mais acentuado no cálculo, pois esta medida está elevada ao expoente 2.

Figura 07 - Ilustra o esquema utilizado para realização do teste de resistência à flexão



Fonte: Adaptado de KUMAR, (2015)

Existem diversos trabalhos realizados medindo-se o módulo de ruptura das cascas cerâmicas. RODRIGUEZ. (2014) observou que o módulo de ruptura da casca não varia significativamente com aumento de viscosidade ou do tamanho do estuco (faixas de tamanho: 0,3 – 0,8 mm; 0,4 - 0,8 mm e 0,6 -1,0 mm). A maior variação foi de 1,6 MPa para a casca sinterizada, ao passar da faixa de tamanho de estuco de 0,6 a 1,0 mm para a faixa de 0,3 a 0,8 mm.

A resistência a verde é muito significativa. Segundo LEE et al., 2017, se uma casca sobrevive às tensões associadas ao processamento e à deceragem,

provavelmente ela sobreviverá à sinterização e ao vazamento. Porém o módulo de ruptura não retrata completamente a resistência a trincas da casca cerâmica durante a deceragem (“autoclavibilidade”), sendo necessário realizar técnicas alternativas para determinar a resistência das cascas cerâmicas. Através do teste de flexão obtiveram além do módulo de ruptura, carga de fratura, curvas tensão-deformação e calcularam a tenacidade das cascas cerâmicas.

RODRIGUEZ (2014) utilizou um teste de cunha (“edge test”), desenvolvido para determinar a resistência da casca cerâmica, simulando regiões que apresentam tendência ao aparecimento de trincas durante a deceragem e o vazamento. Nas condições de teste semelhantes à da autoclave (corpo de prova umedecido), a casca com fibra apresentou menor redução da resistência à flexão e maior índice de fratura, tanto no corpo de prova padrão (barra) como no teste da cunha, possibilitando reduzir o número de camadas e conseqüentemente, o custo.

ZABA et al., (2014) também citam o uso recente de alguns ensaios mecânicos em cascas cerâmicas como o módulo de elasticidade (MOE, quanto maior seu valor, menor a tendência a aparecimento de trincas), o índice de fratura (medida de tendência a trincas), a tenacidade à fratura (tendência a propagação de trincas), o crescimento de trincas (velocidade de propagação de trincas em autoclave), a fluência (resistência ao movimento sob cargas a altas temperaturas) e o módulo de ruptura a quente (mede a resistência do molde a quente, visando prevenir contra quebras durante o vazamento do metal).

3.7.3 Aspectos térmicos das cascas cerâmicas

Além da permeabilidade e resistência mecânica, considera-se importante também o comportamento térmico da casca cerâmica. Alguns estudos visam avaliar sua influência na microestrutura e propriedades do metal.

XU et al., (2016) avaliaram o efeito da zirconita na taxa de solidificação e fluidez, comparando diferentes composições de lamas primárias (100% de zirconita; 100% de sílica eletrofundida; zirconita e sílica eletrofundida na proporção de 50% cada uma). Através de termopares inseridos nas paredes das cascas e na região do metal, foram obtidos ciclos térmicos em moldes produzidos a partir de um bloco escalonado, com seções de ¼”, ½” e ¾” de espessura, visando verificar a sensibilidade do tamanho da seção. Avaliaram vários parâmetros, em função do tipo de lama e de espessura, como por exemplo a temperatura máxima no molde e o

tempo necessário para atingi-la, a taxa de resfriamento do molde, o tempo de solidificação do metal, o espaçamento interdendrítico e a fluidez medida em espirais de diferentes diâmetros.

Algumas expectativas, baseadas em propriedades térmicas dos refratários utilizados (zirconita e sílica), foram observadas. A camada com 100% de zirconita, transfere calor para a casca mais rápido que a camada com 100% de sílica, produzindo um pico de temperatura menor. Entretanto, as camadas contendo 50% de cada um dos refratários, não apresentaram comportamento intermediário em relação aos resultados obtidos com 100% de zirconita e 100% de sílica.

A temperatura máxima para essas camadas (denominadas 50/50) foi mais baixa, o tempo para atingir a temperatura máxima foi maior e o tempo de solidificação também foi maior. A microestrutura das camadas 50/50 apresentavam grandes porosidades, reduzindo significativamente a capacidade de transferência de calor da camada primária. da comparação entre densidades volumétricas e verdadeiras.

A porosidade para os moldes com 100% de zirconita foi de aproximadamente 15%. Os moldes produzidos com 50/50, apresentaram 30% de porosidade, sendo esta porosidade causada pela combinação de partículas de sílica fundida de formato angular e partículas arredondadas de zirconita. A alta porosidade no recobrimento 50/50 e a distribuição da porosidade em forma de camadas, proporcionaram um efeito isolante que predominou sobre o efeito da zirconita.

Os efeitos térmicos das camadas primárias estão limitados somente à primeira fase do ciclo térmico. Após aquecimento da primeira camada, não foram observadas diferenças no comportamento do recobrimento.

A fluidez medida em espirais de maior diâmetro, indicou melhor preenchimento nos moldes com zirconita, devido às características de não molhamento deste refratário. Entretanto em espirais de pequeno diâmetro, o efeito do resfriamento predomina sobre as características de não molhamento. O efeito da zirconita é altamente dependente do tamanho da seção do fundido e pode ser dramaticamente influenciado pela porosidade nas camadas primárias. Devido a estes efeitos, recobrimentos primários com zirconita podem ter efeito prejudicial no preenchimento de seções muito finas onde o efeito de resfriamento predomina sobre as características de não molhamento (XU et al., 2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados no trabalho foram basicamente para confecção de cascas cerâmicas, para isso, utilizou-se:

Modelos em cera para a realização das montagens de árvores para posteriormente receber os revestimentos cerâmicos, gentilmente cedidos pela empresa Fundimazza.

Lama cerâmica primária de pó de telha constituída de sílica coloidal (30% da massa total), polímero (1%), tensoativo (1 mL/5 kg), antiespumante (1 mL/5 kg) e pó de telha reciclado #325 mesh (70% da massa total). Estes materiais foram gentilmente cedidos por Nalco Ecolab, Grupo Curimbaba, Fundimazza e Jandinox.

Lama cerâmica secundária de pó de telha constituída de sílica coloidal (35% da massa total), polímero (1% da massa de sílica coloidal), tensoativo (1mL/5kg), antiespumante (1mL/5kg), pó de telha reciclado #200 mesh (65% da massa total). Estes materiais foram gentilmente cedidos por Nalco Ecolab, Grupo Curimbaba, Fundimazza e Jandinox.

Material refratário granulado para estucagem da lama primária composto de areia de zircônio #70-#140) gentilmente cedido pela empresa Fundimazza.

Material refratário granulado para estucagem da lama secundária composto de chamote silico - aluminoso #18-#40 e #30-#80 gentilmente cedidos pela empresa Curimbaba.

Cascas cerâmicas e seus respectivos corpos de prova para ensaio de módulo de ruptura e permeabilidade confeccionadas com as lamas de pó de telha.

Cascas cerâmicas industriais e seus respectivos corpos de prova para realização dos ensaios de módulo de ruptura e permeabilidade gentilmente cedidos pela empresa Fundimazza.

As tabelas 01 e 02 mostram a formulação das lamas utilizadas nas cascas cerâmicas industriais:

Tabela 01- Composição das lamas cerâmicas primárias utilizadas na indústria

Componentes lama primária	**(% em massa)**
Zirconita (#325)	70
Sílica coloidal	30

Fonte: Adaptado de LEE et al., (2017)

Tabela 02 - Composição das lamas cerâmicas secundárias utilizadas na indústria

Componentes lama secundária	**(% em massa)**
Zirconita (#200)	65
Sílica coloidal	35

Fonte: Adaptado de LEE et al., (2017)

Juntamente aos componentes das lamas cerâmicas primárias e secundárias são adicionados os aditivos; polímero (1% da massa total de sílica coloidal), tensoativos (1 mL/5 kg) e antiespumante (1 mL/5 kg).

Para a realização da estucagem das lamas cerâmicas após serem aplicadas foram utilizados os mesmos materiais refratários utilizados na confecção das cascas cerâmicas utilizando lamas de pó de telha.

YUAN et al., (2012) mostram em seus estudos que os resultados médios encontrados nos ensaios de módulo de ruptura e permeabilidade para cascas cerâmicas industriais são apresentados na tabela 03:

Tabela 03 – Resultados médios do módulo de ruptura e permeabilidade encontrados na indústria

	A verde	Calcinado
Módulo de ruptura	2,7 ± 0,11 MPa	6,0 ± 0,48 MPa
Permeabilidade	Não se aplica	Mínimo 3,5 L/mín.

Fonte: Adaptado de YUAN et al., (2012)

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE TELHAS

4.2.1 Análise granulométrica

Para caracterização do pó de telhas quanto ao seu perfil granulométrico foi realizado o ensaio de granulometria com o auxílio de um agitador de peneiras da marca RO-TAP - modelo Testing Sieve Shaker, seguindo a norma NBR 7217- Determinação da composição granulométrica, nas dependências do laboratório de areias da Escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo”.

4.2.2 Análise química por espectrometria de fluorescência de raios x

A composição química do material foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios x nas dependências do laboratório de Ensaios Químicos pertencente ao Núcleo de Tecnologia Cerâmica da escola SENAI “Mário Amato”, utilizando-se um equipamento da marca Shimadzu, modelo XRF-1800.

4.2.3 Análise por difração de raios x

Para identificação das fases presentes na amostra do pó de telhas foi utilizada a técnica de difração de raios x através de um difratômetro de raios x Multiplex, da marca Rigaku pertencente ao laboratório de nanotecnologia do IPEN.

4.2.4 Micronização

A granulometria do pó de telhas foi ajustada nas faixas especificadas para este trabalho por meio do processo de micronização. Foi utilizado um moinho a jato do tipo espiral da marca Hosokawa alpine pertencente a empresa micro service micronização e processos.

4.3 CONFECÇÃO DAS CASCAS CERÂMICAS E CORPOS DE PROVA

Para realizar a confecção das cascas cerâmicas foi necessário, primeiramente, montar os modelos em cera em uma estrutura chamada de “árvore ou cacho” onde ficarão fixadas. Esta fixação é realizada através do aquecimento da região do modelo onde se localiza o canal de ligação com a estrutura conforme mostra a figura 08.

Figura 08 – Árvore de modelos em cera sendo montada para receber o revestimento cerâmico para formação da casca cerâmica

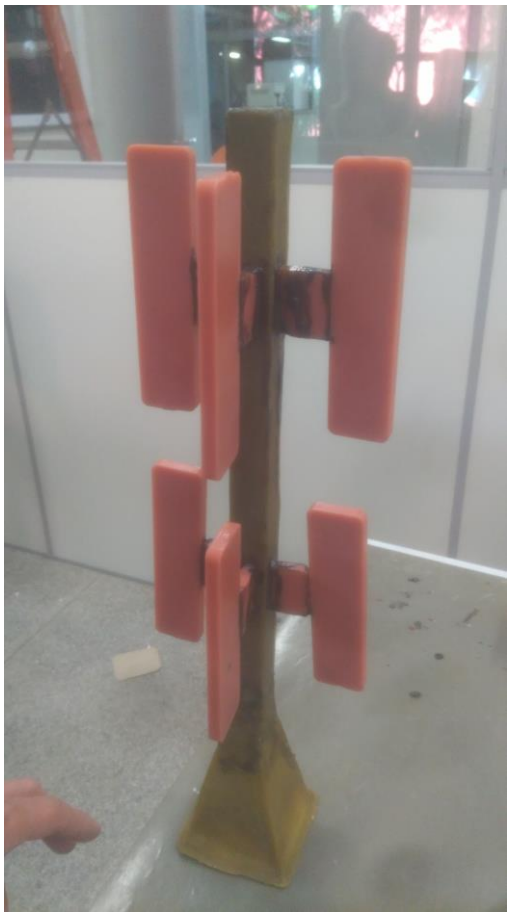
Fonte: Autor 2019

A peça a ser revestida se refere a um suporte metálico utilizado nas redes elétricas e para isso foram montadas 6 árvores com 9 modelos em cera cada uma, visando ter amostragem representativa para a realização das análises de seu comportamento no processo.

Para realização do ensaio do módulo de ruptura, os corpos de prova foram confeccionados através de placas de cera com dimensões especificadas na norma ASTM C674-88 montadas em uma árvore, sendo posteriormente revestidas com as lamas cerâmicas e os materiais refratários utilizados neste trabalho.

Foram montadas 2 árvores com 6 placas de cera cada uma, conforme mostra a figura 09. Foram utilizadas as duas faces das placas para o revestimento, logo foram obtidos 12 corpos de prova.

Figura 09 – Árvore de modelos em cera para corpos de prova para o ensaio de módulo de ruptura sendo montados para receber o revestimento cerâmico para formação da casca cerâmica



Fonte: Autor 2019

Os corpos de prova para o ensaio de permeabilidade foram confeccionados seguindo as recomendações do Ceramics Testing Guidebook do ICI, como ilustrado na figura 10. Para confeccioná-lo foi utilizado uma esfera de plástico padronizada e um tubo de quartzo com dimensões de 10 cm de comprimento x 8 mm de diâmetro, a ponta do tubo foi aquecida (5 mm) e inserida na esfera de plástico, logo após foi fixada com cera pastosa para não deixar vazios. Após esta montagem, como mostra a figura 8, iniciou-se a aplicação das camadas para formação da casca cerâmica ao seu redor.

Figura 10 - Corpo de prova para ensaio de permeabilidade sendo preparado para receber o revestimento cerâmico

Fonte: Autor 2019

Após a montagem das árvores de modelos em cera que representam a peça que será acompanhada neste estudo e dos corpos de prova para os ensaios de módulo de ruptura e permeabilidade, foi iniciada a preparação das lamas cerâmicas que foram utilizadas no processo de revestimento para a formação da casca cerâmica. As lamas cerâmicas foram produzidas no laboratório de microfusão da escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo” seguindo o padrão de mistura constituído de parte sólida e parte líquida.

Os componentes da parte líquida da lama foram misturados a parte sólida com o auxílio de um agitador mecânico de hélice da marca Ika, conforme figura 11, após a mistura as lamas cerâmicas, toda a massa foi deixada em agitação constante durante 48 horas em tanques misturadores da marca Cecomatec como pode ser visto na figura 12, para o total molhamento das partículas antes de sua utilização (RODRIGUEZ , 2014).

Figura 11 – Material refratário (parte sólida) sendo misturado a parte líquida da lama (sílica coloidal, polímero e aditivos)

Fonte: Autor 2019

Figura 12 – Material refratário (parte sólida) sendo misturado a parte líquida da lama (sílica coloidal, polímero e aditivos)

Fonte: Autor 2019

A formação da casca cerâmica se deu através da aplicação de 7 camadas de revestimento cerâmico nos cachos que continham os modelos em cera e também nos cachos que continham os corpos de prova, o número de camadas aplicadas seguiu o padrão das cascas cerâmicas industriais que serviram de comparativo neste trabalho. Cada camada de revestimento cerâmico devemos considerar que é composta por lama cerâmica somada ao material granulado refratário, seguindo a seguinte sequência de aplicação;

1° Camada - Lama Primária (#325) + refratário granulado (#70-#140) + 1 hora de secagem;

2° Camada - Lama Primária (#325) + refratário granulado (#70-#140) + 2 horas de secagem;

3° Camada - Lama Secundária (#200) + refratário granulado (#30-#80) + 4 horas de secagem;

4° Camada - Lama Secundária (#200) + refratário granulado (#30-#80) + 4 horas de secagem;

5° Camada - Lama Secundária (#200) + refratário granulado (#20-#40) + 4 horas de secagem;

6° Camada - Lama Secundária (#200) + refratário granulado (#20-#40) + 4 horas de secagem;

7° Camada - Lama Secundária (#200) + refratário granulado (#20-#40) + 4 horas de secagem;

Banho final - Aplicação somente da lama cerâmica secundária com o objetivo de fixar o refratário granulado aplicado na camada anterior para evitar que ele se desprenda durante o manuseio.

Cada camada foi constituída sobre a superfície dos cachos de modelos em cera através de imersão em banho de lama cerâmica e posterior estucagem (chuveiramento) de material refratário granulado. Após a aplicação de cada camada foi respeitado um tempo de secagem especificado para que na sequência pudesse ser aplicada a camada seguinte e assim sucessivamente, conforme ilustra a figura 13, até a formação da casca cerâmica com as 7 camadas e a aplicação do banho final.

Figura 13 - Sequência de aplicação das camadas de revestimento cerâmico até a formação da casca cerâmica.

Fonte: Autor 2019

4.4 DECERAGEM

As cascas cerâmicas foram deceradas na empresa de microfusão Jandinox, para este processo foi utilizado um equipamento chamado boilerclave (caldeira elétrica conjugada a um vaso de pressão) da marca FERLEX, modelo C conforme figura 14, onde as cascas cerâmicas foram submetidas a um ambiente com condições pré-estabelecidas de tempo, temperatura e pressão para que a cera contida em seu interior fosse removida sem causar trincas ou rompimento.

Figura 14 - Casca cerâmica confeccionada neste trabalho sendo exposta as mesmas condições de deceragem que as cascas cerâmicas com padrão industrial

Fonte: Autor 2019

O processo de deceragem se dá pela passagem do vapor em alta pressão pelos poros da casca cerâmica até atingir a interface com os modelos em cera, quando isso ocorre, a camada de cera que está em contato com a casca se derrete rapidamente e evita que o restante da massa de cera se expanda e pressione a casca cerâmica, o que pode gerar trincas, e dependendo da intensidade, o seu rompimento total (BRASCOMB, 2002).

Os parâmetros adotados para este processo foram os mesmos utilizados na indústria, ou seja, pressão de vapor: 9 kgf/cm², tempo de pressurização: 12 minutos, temperatura: 180 °C.

4.5 CALCINAÇÃO

O processo de calcinação das cascas cerâmicas foi realizado no laboratório de fundição da escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo”, foi utilizado um forno Brasimet, modelo mufla, ilustrado na figura 15. O ciclo de calcinação utilizado para este trabalho foi o mesmo utilizado na indústria, ou seja, temperatura: 1050 °C, tempo: 2 horas

Figura 15 – Processo de calcinação sendo finalizado e a casca cerâmica sendo retirada do forno

Fonte: Autor 2019

A metodologia de trabalho também seguiu o padrão utilizado na indústria, as cascas cerâmicas em temperatura ambiente foram colocadas no forno de calcinação com a temperatura já a 1050 °C e depois de decorrido o tempo de 2 horas estas cascas foram retiradas e colocadas ao ambiente para que pudessem receber o metal líquido.

Toda esta ação de inserir e retirar a casca cerâmica do forno exige uma grande resistência ao choque térmico por parte dos materiais cerâmicos, pois qualquer formação de trincas pode causar o rompimento da casca cerâmica durante a entrada do metal líquido fazendo com que se perca todo o trabalho.

4.6 VAZAMENTO DO METAL LÍQUIDO

Após serem calcinadas, as cascas cerâmicas foram submetidas ao vazamento do metal líquido no laboratório de fundição da escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo” conforme figura 16. Para realizar este procedimento foram utilizados 2 tipos de fornos, um forno a gás da marca DJ fornos para realizar a fusão da liga de alumínio 356 com vazamento à temperatura de 780 °C e também da liga de bronze com vazamento à temperatura de 1150 °C e um forno a indução eletromagnética da marca Inductotherm para realizar a fusão do ferro fundido cinzento e vazamento à 1380 °C, além de um pirômetro de imersão da marca Ecil para monitorar a temperatura do metal líquido.

Figura 16 – Casca cerâmica já calcinada recebendo o metal líquido para seu preenchimento

Fonte: Autor 2019

4.7 ENSAIO DO MÓDULO DE RUPTURA DAS CASCAS CERÂMICAS

O ensaio do módulo de ruptura foi realizado com o auxílio de uma máquina universal de ensaios da marca Engenharia Oswaldo Filizola, modelo AME-5 KN, como é apresentado na figura17.

Os corpos de prova foram ensaiados conforme orientações do Ceramics Testing Guidebook do ICI, o qual segue como referência a norma ASTM C674-88.

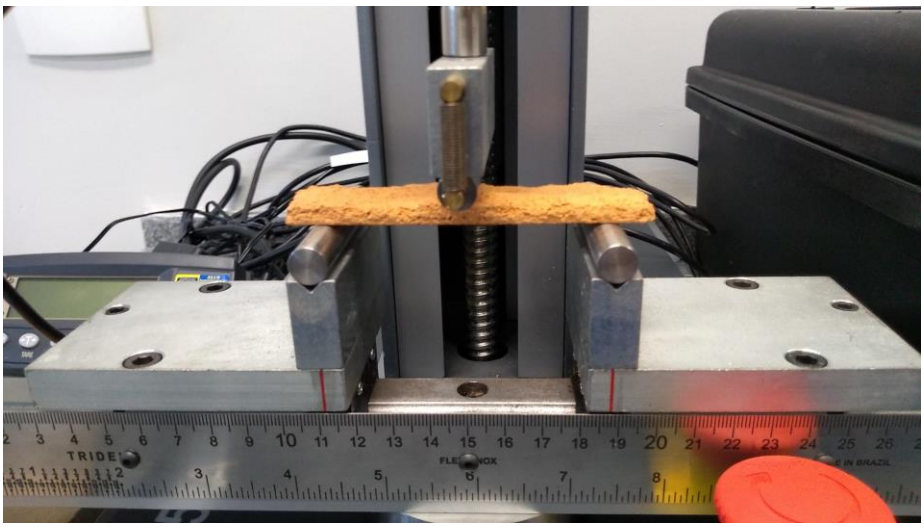
Foram ensaiadas 5 amostras em cada condição para se obter um resultado baseado em uma média com o objetivo de conhecer o módulo de ruptura das cascas cerâmicas produzidas com lamas de pó de telhas e estabelecer comparativos com os resultados já conhecidos na indústria e na literatura (LEE et al., 2017).

O conhecimento do módulo de ruptura das cascas cerâmicas é uma maneira de descrever sua resistência mecânica. Neste caso particular existem duas determinações;

Módulo de ruptura a verde: representa a resistência mecânica que as cascas cerâmicas apresentam logo após serem confeccionadas e precisam ser manipuladas sem haver quebras.

Módulo de ruptura a quente: representa a resistência mecânica que as cascas cerâmicas apresentam no momento do preenchimento com o metal líquido, onde deve ser satisfatória para não haver trincas.

Figura 17 - Ensaio do módulo de ruptura sendo realizado em corpo de prova de casca cerâmica



Fonte: Autor 2019

4.8 ENSAIO DE PERMEABILIDADE DAS CASCAS CERÂMICAS

Os ensaios de permeabilidade foram realizados no laboratório de microfusão da empresa FUPRESA, como mostra a figura 18, os procedimentos foram auxiliados por um aparato montado específicamente para medição de permeabilidade o qual é composto por válvula reguladora de pressão, coluna de vazão (0,5 a 4,0 L/min.) e coluna de mercúrio em U (graduação de -100 a +100)

como é mostrado na figura 19, o qual segue as orientações do Ceramics Testing Guidebook do ICI.

Foram ensaiados 3 corpos de prova para se obter uma média e estabelecer um comparativo com os resultados na indústria. Este ensaio é de fundamental importância pois a casca deve ser suficientemente permeável para permitir a passagem do vapor aquecido no momento da deceragem e facilitar a saída dos gases da cavidade do molde durante o preenchimento com o metal líquido.

Basicamente passa-se um fluxo de nitrogênio a 5,2 cm de Hg de pressão por um rotâmetro e pelo tubo de quarzo que contém o corpo de prova com o formato de uma esfera e lê-se no rotâmetro a vazão permitida pela porosidade da casca.

A obtenção de fundidos com geometrias complexas, paredes finas e detalhes superficiais dependem da permeabilidade das cascas cerâmicas e das condições de temperatura do metal.

Figura 18 – Corpo de prova de permeabilidade sendo preparado para realização do ensaio

Fonte: Autor 2019

Figura 19.- Corpo de prova de permeabilidade sendo conectado no aparato para ser ensaiado

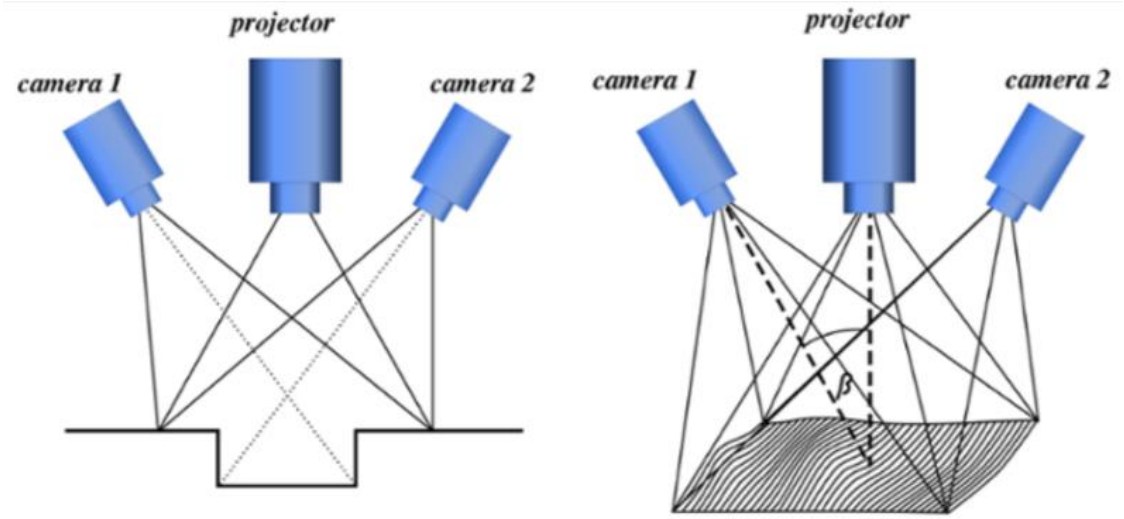
Fonte: Autor 2019

4.9 ANÁLISE DIMENSIONAL

As análises dimensionais foram realizadas no laboratório de metrologia da escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo” com o auxílio de um scanner 3D da marca Zeiss Comet Led 3D.

Este equipamento realiza a medição através da projeção um padrão de luz estruturada em um objeto e depois filma com pelo menos uma câmera (geralmente duas câmeras) para capturar as formas que o padrão de luz é deformado pelo objeto, conforme mostra a figura 20.

Figura 20 - Ilustração do sistema de captação por câmeras utilizados no scanner 3D

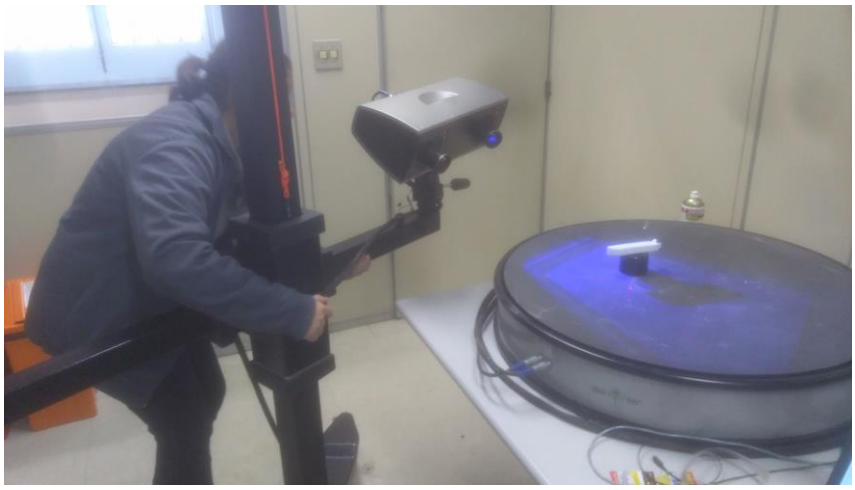


Fonte: Adaptado de ZABA et al., (2014)

Triangulando imagens múltiplas do escaneamento, é possível calcular as dimensões do objeto em toda a sua complexidade.

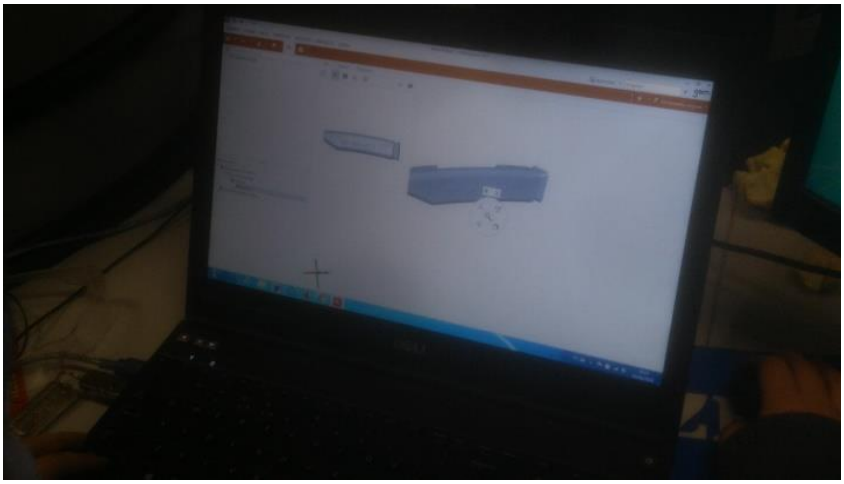
A câmara fotográfica digital proporciona uma resolução de pelo menos 20 milhões de pixels, este equipamento garante que a qualidade de imagem seja adequada para a realização de seu processamento, como mostram as figuras 21 e 22.

Figura 21 **-** Peças fundidas sendo escaneadas para geração do arquivo digital



Fonte: Autor 2019

Figura 22 - Verificação das dimensões através do comparativo com o desenho original



Fonte: Autor 2019

4.10 **ANÁLISE DA RUGOSIDADE**

As análises de rugosidade foram realizadas no laboratório de metrologia da escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo” com o auxílio de um rugosímetro modelo handsur F E 35-B da marca Zeiss.

O processo de medição que define a rugosidade da superfície, consiste em percorrer a superfície que será analisada com o apalpador (que carrega a agulha apalpadora), acompanhado por uma guia que auxilia ele a se mover na mesma direção, como mostra a figura 23.

Figura 23 – Verificação da rugosidade na escala Ra em uma peça fundida em bronze utilizando um rugosímetro.

Fonte: Autor 2019

O movimento da agulha é transformado em impulsos elétricos e, a partir disso, é registrado no display (digital ou analógico) e, se for o caso, também no gráfico.

A maioria dos rugosímetros tem os valores determinados em RA, sigla para Rugosidade Aritmética Principal, e em µm (micrômetros), unidade de medida usada para dimensões diminutas.

A principal objetivo é analisar as variações de relevo da superfície metálica verificando se os resultados expressados na unidade “Ra”, estão conforme as determinações de uma norma ou especificação do cliente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE TELHAS

5.1.1 Análise granulométrica do pó de telhas

A tabela 04 mostra os resultados da análise granulométrica do pó de telhas. As especificações granulométricas dos refratários utilizados para a produção das lamas cerâmicas empregadas na indústria de microfusão estão nas faixas de #325 mesh para a lama primária e #200 mesh para a lama secundária.

Com isso, devido à heterogeneidade granulométrica do pó de telhas disponível no mercado (#20 - #325) foi necessário ajustá-lo nas granulometrias ideais para a produção das lamas cerâmicas, #325 para lama primária e #200 para lama secundária, por meio do processo de micronização.

Tabela 04 – Resultados de análise granulométrica do pó de telhas

Pen.	Massa Retida		Conc.	Módulo	
mesh	Gr	%	%	Coef.	Prod.
6	0,00	0,00		3	0,00
12	0,00	0,00		5	0,00
20	13,62	28,18		10	281,81
30	6,67	13,80		20	276,02
40	6,61	13,68		30	410,30
50	4,58	9,48	13,62	40	379,06
70	5,21	10,78	6,67	50	539,00
100	3,30	6,83	6,61	70	477,96
140	2,30	4,76		100	475,89
200	1,76	3,64		140	509,83
270	1,52	3,15		200	629,01
325	2,76	5,71		300	1713,22
TOTAL	48,33	100,00	26,90		5692,12

Fonte: Autor 2019

5.1.2 Análise química por espectrometria de fluorescência de raios-x

Os resultados da análise são apresentados na tabela 05. Foram verificados percentuais em massa consideráveis de elementos químicos como o silício (63,65%) e o alumínio (15,80%), estes resultados indicam que provavelmente temos a presença de compostos refratários como sílica e até mesmo da alumina, foi possível observar também a baixa perda de massa quando submetido ao fogo, confirmando que o material já foi calcinado previamente.

Tabela 05 – Resultados do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios x realizado em uma amostra de pó de telhas

Óxidos	Resultados (%)
SiO_2	63,65
Al_2O_3	15,80
Fe_2O_3	5,26
TiO_2	0,76
CaO	7,70
MgO	2,70
Na_2O	0,85
K_2O	2,21
MnO	<0,01

Fonte: Autor 2019

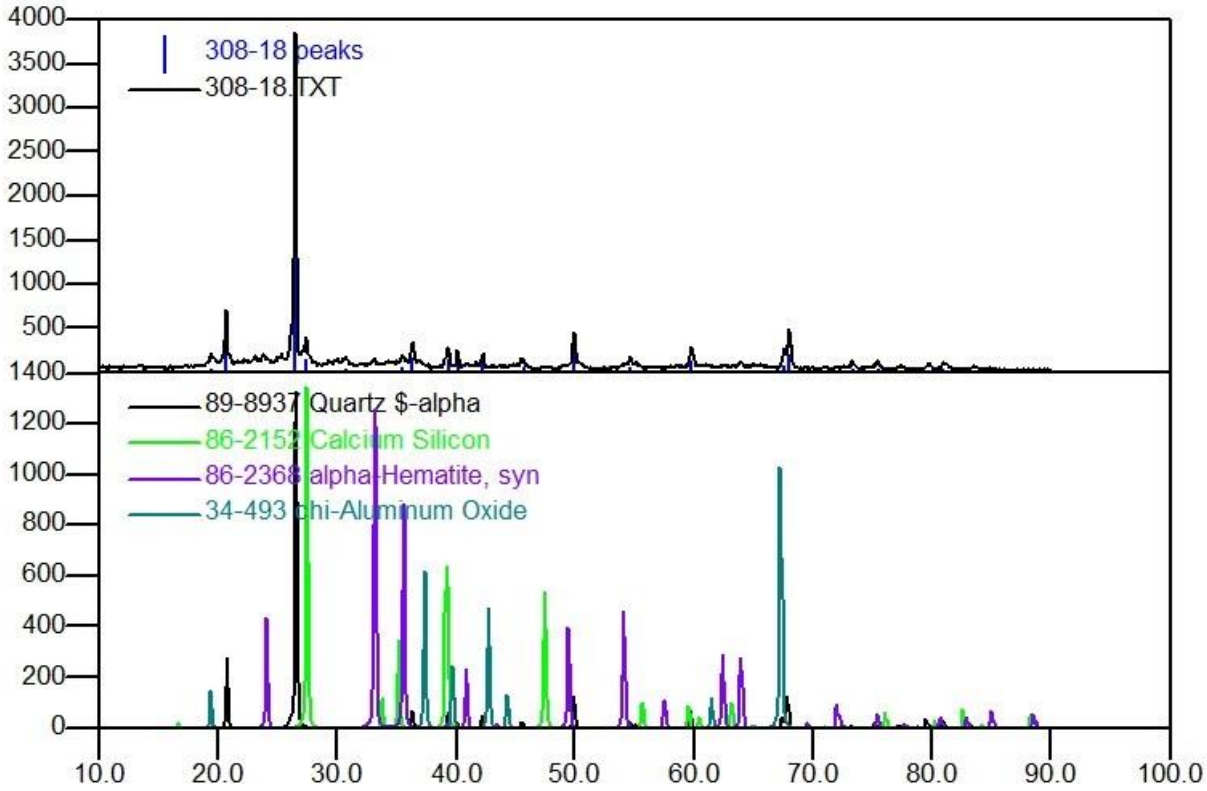
5.1.3 Análise de difração de raios x

Foi realizada uma análise por difração de raios x no pó de telhas para identificação dos compostos e suas fases cristalinas para finalizar as caracterizações do material.

O difratograma obtido por meio da amostra de pó de telhas é apresentado na figura 24. Na parte superior do difratograma, encontram-se os picos de intensidade relativos aos compostos identificados na amostra de pó de telhas e na parte inferior os picos de intensidade obtidos por meio de padrões dos compostos de referência. É

possível notar que os picos referentes a sílica (quartzo) tanto da amostra quanto do padrão coincidem perfeitamente, assim como os picos da hematita e do silicato de cálcio, confirmando a existência dos compostos na amostra. Os picos de intensidade referentes ao óxido de alumínio ficam ligeiramente deslocados, com isso, não é possível afirmar que se trata de alumina, será necessário aprofundar os estudos para identificar este composto em estudos posteriores.

Figura 24 – Difratograma de raios x obtidos na amostra de pó de telhas mostrando a identificação dos compostos presentes.



Fonte: Autor 2019

5.2 ENSAIO DO MÓDULO DE RUPTURA DA CASCA CERÂMICA

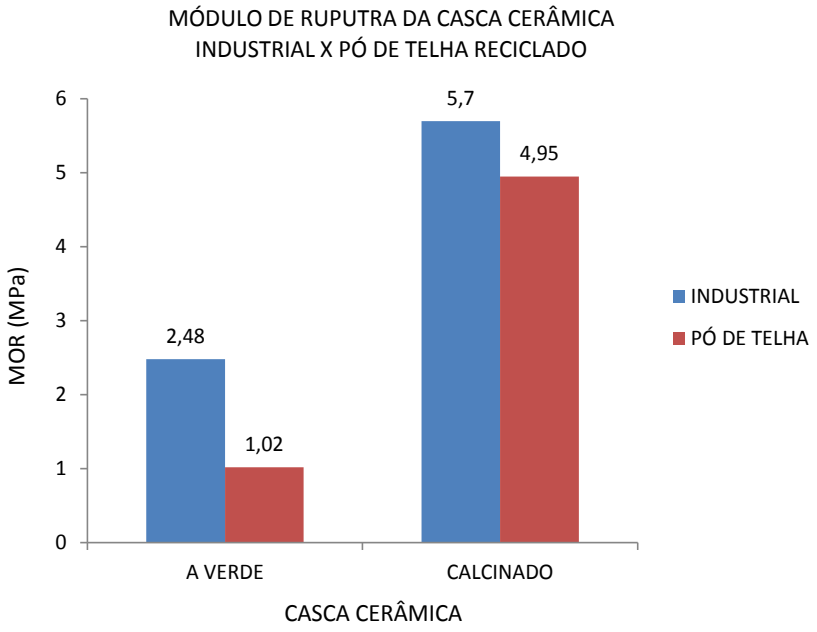
Os resultados do módulo de ruptura das cascas cerâmicas produzidas com lamas de pó de telha reciclado são apresentados na figura 25 comparativamente com os resultados das cascas produzidas com lamas de zirconita e sílica eletrofundida utilizadas na indústria de microfusão.

Os resultados mostram que a casca cerâmica obtida com as lamas de pó de telha durante o seu processamento (a verde) se apresenta com resistência inferior (1,02 MPa) as utilizadas na indústria (2,48 MPa).

A diferença de densidade dos materiais pode ser um fator determinante para este dado, pois o pó de telha apresenta densidade de 1,16 g/cm^3 enquanto a zirconita e a sílica eletrofundida apresentam 4,5 g/cm^3 e 2,91 g/cm^3 respectivamente, evidenciando ser mais leve e consequentemente deter uma quantidade menor de sólidos refratários por centímetro cúbico, porém, durante o processamento em escala laboratorial se mostrou suficiente e não ocorreram quebras no molde.

Quando as cascas cerâmicas com lamas de pó de telhas foram submetidas ao processo de calcinação para que os resíduos provenientes da cera e a água residual fossem eliminados e através da ação do calor ganhar resistência mecânica para receber o metal líquido, foi verificado que o seu módulo de ruptura aumentou consideravelmente (4,95 MPa) e ficou muito próximo das cascas industriais (5,7 MPa), devido à alta temperatura de calcinação (1050°C), ocorre o processo de difusão das partículas refratárias consolidando o material cerâmico, aumentando assim sua resistência.

Figura 25 – Resultados do ensaio de módulo de ruptura realizados nas cascas cerâmicas confeccionadas com pó de telha comparados as resultados de cascas industriais



Fonte: Autor 2019

5.3 ENSAIO DE PERMEABILIDADE DAS CASCAS CERÂMICAS

Os resultados dos testes de permeabilidade mostraram conforme a tabela 06 que as cascas cerâmicas produzidas com lamas de pó de telha apresentaram permeabilidade média de 4,2 L/min., já as cascas cerâmicas utilizadas na indústria confeccionadas com lamas de zirconita e sílica eletrofundida apresentaram em média uma permeabilidade de 3,8 L/min. Realizando um comparativo com os valores da especificação do ICI (Investment casting institute), o qual é adotado e seguido na indústria, ambas as cascas atendem o especificado, porém, as cascas cerâmicas com lamas de pó de telha ficaram com permeabilidade 15,55 % superior em relação as utilizadas na indústria, se mostrando mais permeáveis.

Tabela 06 – Comparativo dos resultados de permeabilidade obtidos na casca cerâmica industrial x casca cerâmica com pó de telha

	Especificação	Casca cerâmica Industrial	Casca cerâmica pó de telha
Permeabilidade	Mínimo 3,5 L/min.	3,8 L/min.	4,2 L/min.

Fonte: Autor 2019

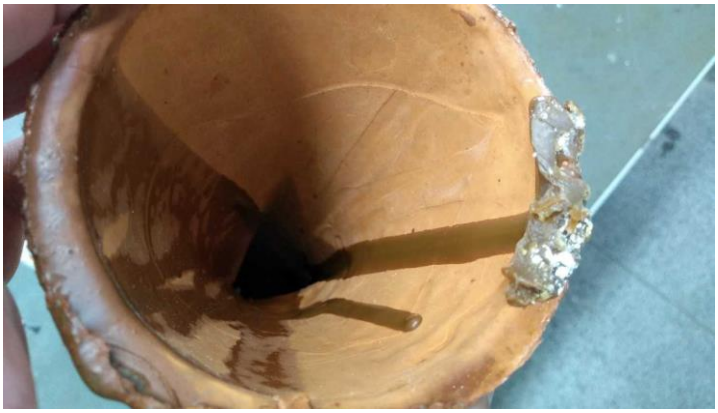
Apesar das cascas cerâmicas com lamas de pó de telhas apresentarem maior permeabilidade, o que na prática representa uma maior facilidade da penetração do vapor pressurizado na cascas para remoção da cera no processo de deceragem, isso também facilita a saída dos gases no momento do vazamento do metal líquido (KLINE, 2010). Altas permeabilidades em contra partida, podem gerar problemas superficiais nas peças fundidas, tais como, rugosidades excessivas e em alguns casos mais extremos, defeitos positivos que podem gerar retrabalho dependendo da especificação e exigência do cliente final (SATA et al., 2017).

5.4 - DECERAGEM

As cascas cerâmicas não apresentaram trincas após o processo de deceragem conforme mostra a figura 26. Esse foi um indicativo de fundamental importância, pois confirma os dados obtidos no ensaio de permeabilidade mostrando que a casca está suficientemente permeável para permitir a ação do vapor na retirada da cera do seu interior e com resistência mecânica suficiente para suportar a pressão exercida durante o processo de deceragem, mesmo estando com o

módulo de ruptura abaixo das cascas cerâmicas industriais, conforme os dados da figura 25.

Figura.26 - Casca cerâmica decerada evidenciando apenas resíduos de cera



Fonte: Autor 2019

5.5 - CALCINAÇÃO

Após o processo de calcinação nas cascas cerâmicas, não foi visualizado nenhum tipo de trincas superficiais, mesmo com a entrada e a saída da casca cerâmica a alta temperatura (1050°C) do forno, como mostra a figura 27.

Por estar presente em grande quantidade na composição do pó de telhas a presença da sílica justifica esta capacidade refratária que dá o suporte térmico as cascas cerâmicas com lamas de pó de telhas, fato que foi confirmado durante o vazamento do metal líquido, pois não houve rompimento das cascas cerâmicas.

Figura 27 - Casca cerâmica isenta de trincas após o processo de calcinação posicionada para o vazamento do metal líquido

Fonte: Autor 2019

5.6 VAZAMENTO DO METAL LÍQUIDO

Durante o preenchimento das cascas cerâmicas com o metal líquido não ocorreu nenhum tipo de rompimento devido à pressão exercida pelo metal dentro do molde conforme mostra a figura 28, vale ressaltar que, com exceção da liga de alumínio 356 (2,7 g/cm^3) que possui massa específica baixa, as outras ligas utilizadas neste trabalho, como o bronze (8,9 g/cm^3) e o ferro fundido (7,8 g/cm^3) exigem uma resistência mecânica maior da casca cerâmica devido a maior massa específica.

Figura 28 – Casca cerâmica preenchida com metal líquido, neste caso, bronze Cu90Sn10 com temperatura de 1150 °C

Fonte: Autor 2019

Após a solidificação do metal a casca cerâmica foi removida facilmente como ilustra a figura 29, toda a parte externa soltou-se através de vibração conforme mostra a figura 30, e nos furos e detalhes mais intrínsecos utilizou-se o jateamento com microesferas de vidro para a sua remoção.

Com as peças fundidas totalmente limpas foi realizado um exame visual em sua superfície e não foi constatada nenhuma reação entre metal e molde conforme figura 31. Quando isso ocorre, defeitos positivos aparecem na superfície da peça devido a difusão do metal líquido na interface com o refratário.

Figura 29– Casca cerâmica preenchida com alumínio sendo desmoldada

Fonte: Autor 2019

Figura 30 – Casca cerâmica preenchida com bronze sendo desmoldada

Fonte: Autor 2019

Figura 31 – Casca cerâmica preenchida com ferro fundido parcialmente desmoldada

Fonte: Autor 2019

5.7 ANÁLISE DIMENSIONAL

As dimensões das peças fundidas com as cascas cerâmicas produzidas com as lamas de pó de telhas foram inspecionadas por um scanner 3D e avaliadas conforme desenho para verificar sua conformidade com a norma ABNT NBR 15990.

Foram utilizados como referências as cotas de comprimento e altura total para realizar a avaliação das peças, por serem as medidas mais críticas devido as grandes massas de metal que estão sujeitas a contrações de solidificação durante o preenchimento com metal líquido.

Os resultados da tabela 07 mostram que as dimensões das peças fundidas em alumínio 356, bronze Cu90Sn10 e ferro fundido cinzento com as cascas cerâmicas produzidas com lamas de pó de telhas estão conforme as tolerâncias estabelecidas na norma ABNT NBR 15990, indicando que as cascas cerâmicas cumprirarm seu papel de manter o dimensional da peça fundida.

Tabela 07 - Dimensões das peças fundidas com cascas cerâmicas confeccionadas com lamas de pó de telhas comparadas as peças fundidas com cascas cerâmicas industriais

	Medida do comprimento (mm)	**Tolerância (mm)**	**Alumínio (mm)**	**Bronze (mm)**	**Ferro Fundido Cinzento (mm)**
Peça fundida em casca industrial	107,50	± 1,10	108,03	108,31	108,09
Peça fundida em casca c/ pó de telha	107,50	± 1,10	107,96	107,94	107,98
	Medida da Altura (mm)	**Tolerância (mm)**	**Alumínio (mm)**	**Bronze (mm)**	**Ferro Fundido Cinzento (mm)**
Peça fundida em casca industrial	25,00	± 0,52	25,49	25,10	25,10
Peça fundida em casca c/ pó de telha	25,00	± 0,52	24,93	24,98	24,96

Fonte: Autor 2019

5.8 ANÁLISE DE RUGOSIDADE

A rugosidade das peças fundidas com as cascas cerâmicas produzidas com as lamas de pó de telhas foram inspecionadas por um rugosímetro e avaliadas conforme desenho para verificar sua conformidade com a norma ABNT NBR 15990.

Foram utilizadas como referência as superfícies planas das peças fundidas por apresentarem uma maior área, facilitando assim a realização das medições.

Os resultados da tabela 08 mostram que a rugosidade das peças fundidas em alumínio 356, bronze Cu90Sn10 e ferro fundido cinzento com as cascas cerâmicas produzidas com lamas de pó de telhas está conforme as tolerâncias estabelecidas pela norma ABNT NBR 15990, indicando que as cascas cerâmicas cumprirarm seu papel de manter o bom acabamento da peça fundida.

Tabela 08 - Rugosidade das peças fundidas com cascas cerâmicas confeccionadas com lamas de pó de telhas comparadas com a especificação da norma ABNT NBR 15990.

	Tolerância	**Alumínio**	**Bronze**	**Ferro Fundido**
Resultados	6,3 Ra	4,53 Ra	3,72 Ra	2,48 Ra

Fonte: Autor 2019

6. CONCLUSÕES

O estudo da obtenção e caracterização de cascas cerâmicas para o processo de fundição de precisão confeccionadas a partir de lamas cerâmicas primárias e secundárias utilizando pó de telhas permitiu concluir que;

- A granulometria do pó de telha que é comercializado atualmente não permite a sua utilização direta na produção de lamas cerâmicas para o processo de microfusão, fazendo-se necessária a sua adequação as faixas de #325 e #200 mesh utilizando-se o processo de micronização, isto se deve a sua alta heterogeneidade granulométrica.
- As análises químicas e de difração de raios x realizadas no material mostraram que em sua composição existem teores significativos de compostos refratários importantes como a sílica (63,65%), credenciando este material a ser testado como componente refratário para confecção de lamas cerâmicas.
- Os resultados do ensaio de módulo de ruptura dos corpos de prova da casca cerâmica confeccionada com lamas de pó de telhas, apresentaram-se inferiores as cascas cerâmicas utilizadas na indústria, confeccionadas com as lamas de zirconita e sílica eletrofundida, principalmente no estado a verde,
- Os resultados de permeabilidade mostram que, as cascas produzidas com lamas de pó de telha, tem capacidade de permear gases maior do que as cascas industriais.
- A cascas cerâmicas após o vazamento e solidificação do metal líquido apresentaram como resultados; uma fácil desmoldagem, não aparecimento de trincas referentes ao processamento das cascas e também não foram observadas reações entre metal e a área de contato com a casca cerâmica, mostrando que o refratário atende as temperaturas de 780°C a 1380°C empregadas neste trabalho. Com isso foi possível obter peças metálicas em ligas de Alumínio 356, Bronze Cu90/Sn10 e Ferro Fundido cinzento com tolerâncias dimensionais e de rugosidade que atendem a norma ABNT NBR 15990.
- O presente estudo conclui que as cascas cerâmicas confeccionadas com lamas cerâmicas primárias e secundárias utilizando pó de telhas, podem ser

uma alternativa viável para as empresas de microfusão que trabalham com ligas de alumínio, bronze e ferro fundido, assim como para o meio ambiente, podendo criar uma nova oportunidade de negócio para utilização desta matéria-prima que hoje é um rejeito industrial, sem comprometer a qualidade do produto final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 15990, ***Peças fundidas pelo processo de microfusão – Requisitos de fabricação, características e propriedades***, 2011

BIDWELL, H. T., ***Investment casting handbook***, American Foundrymen´s society Dallas, ICI, 123p., 1997

BIJVOET, M., ***Preparação e controle da lama da casca de investment casting***, Fundição e Serviços, v. 13, n. 126, p. 56-62, jun. 2003.

COELHO, C. B. T. ***Antecipações gerenciais para a inserção de atividades facilitadoras na execução de alvenaria de tijolos cerâmicos****:* análise dos relatos de agentes do processo. Universidade Federal do Paraná, 2009.

BRASCOMB, T. ***The importance of green MOR for autoclave cracking***. Technical conference, Paper n.21, Chicago, 2002.

CAPADONA, J. A. ***Slurry process control in a production environment***, How to avoid shell cracking – a symposium, Birmingham, may 1-3, AL, 1989.

FRITZ, J., ***North American Market Outlook***, 14th World Conference on Investment Casting Le Palais des Congrès de Paris, France, 2016

HIRST, R., ***Understanding investment casting wax***, Blayson Olefines, UK. 2010

HORACE, I. M., ***Latest trends in investment casting technology*****,** Brno University of technology, CZ. 2009

HORTON, A. H., ***Investment casting***, In Annual Handbook: casting. Metal Park, v. 15, p. 253-269, 1998

IDROGO, A. A. A., BEZERRA, M. C. C., ACUNA, G. S., ***Estudo sobre os desperdícios presentes no processo de fabricação de telhas em uma indústria de cerâmica vermelha,*** XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Producão, João Pessoa/PB, Brasil, de 03 a 06 de outubro de 2016.

KLINE, D. M., ***Controlling strength and permeability of silica investment casting molds,*** Masters Theses, 4866, 2010

KERBER, A. **Moagem dos Materiais Resistentes Carbeto de Silício e Corindon para Aplicações em Refratários, Abrasivos e Cerâmicas** (Mahlung der Hartstoffe Siliciumcarbid und Korund für Feuerfest-, Schleifmittel- und Keramikanwendungen). *Preprints* GVC Dezembertagung 1993, chapter 12, GVC-VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 1993

KRUMREI, T. ***Dimensional Stability of Ceramic Shell Mould Systems***, 61st Technical Conference & Equipment Expo, USA, 2014

KUMAR, P., SINGH R., AHUJA I.P.S, ***Investigations on dimensional accuracy of the components prepared by hybrid investment casting*****,** Journal of manufacturing process, p. 525-533, 2015

LEE K., BLACKBURNA S., WELCHB S., ***A more representative mechanical testing of green state investment casting shell,*** Ceramics International, pg. 268-274, 2017.

LIU, C.; JIN, S.; LAI, X., HE, B. O., LI, F., ***Influence of complex structure on the shrinkage of part in investment casting process***, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.77(5), pp.1191-1203, 2015

YUAN C., JONES S., BLACKBURN S., ***Development of a New Ferrous Aluminosilicate Refractory Material for Investment Casting of Aluminum Alloys*****,** Metals & Materials Society and ASM International, pg. 5232-5243, 2012.

MALE M., WIŚNIEWSKI P., MATYSIAK H., ZAGÓRSKA M., KURZYDŁOWSKI K.J., ***Technological properties of sic-based ceramic slurries for manufacturing investment casting shell moulds*****,** archives of metallurgy and materials, volume 59, pg. 1059 – 1563, 2014.

PATTNAIK S., KARUNAKAR D. B., JHA, P. K., ***Developments in investment casting process – A review,*** Journal of manufacturing process, pg. 2332-2348, 2012

RODRIGUEZ, E., ***Ceramic Shell Manufacturing Systems****,* 61st Technical Conference & Equipment Expo, USA, 2014

SATA A., RAVI B., ***Bayesian inference-based investment-casting defect analysis system for industrial application*****,** Int. J. Adv. Manuf. Technol, pg. 3301–3315, Springer-Verlag, London, 2017

TRYTEK A.; NAWROCKI J.; SAREK D., ***Lost wax Process – Mould Properties*****.** Archives of Foundry Engineering, 01 January 2010, Vol.10(SI 1), pp.427.

VARFOLOMEEVA M. S., MOISEEVA V. S., SHCHERBAKOVAB G. I., STOROZHENKOB P. A., AND SHATUNOV V. V., ***High Refractory Corundum Molds Based on a Silica Free Binder,*** Inorganic Materials, 2015, Vol. 51, No. 1, pp. 76–81. Pleiades Publishing, Ltd., 2015.

WILLIANS, R., HIRST, R., ***World Investment Casting Market Review***, 14th World Conference on Investment Casting Le Palais des Congrès de Paris, France. 2016

XU, M., LEKAKH, S., RICHARS, V., ***Thermal Property Database for investment casting Shells***, International Journal of Metal casting, Vol.10, pp.329-337, 2016.

ZABA K., NOWAK S., KWIATKOWSKI M., NOWOSIELSKI M., KITA P., SIOMA A. ***Application of non-destructive methods to quality assessment of pattern assembly and ceramic mould in the investment casting elements of aircraft engines,*** archives of metallurgy and materials, volume 59, p. 1518 – 1524, 2014