

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE CASCA CERÂMICA PRODUZIDA COM LAMA CERÂMICA PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA DE PÓ DE TELHA RECICLADO PARA UTILIZAÇÃO NO PROCESSO DE MICROFUSÃO

D. S. Leite¹, A. A. Couto^{2,3}, E. Togni¹

¹Escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo”

²Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP

³Universidade Presbiteriana Mackenzie - UPM

Rua Ari Barroso, 305 – Presidente Altino – Osasco/SP – CEP 06216-901

douglas.leite@sp.senai.br

RESUMO

O presente estudo buscou entender o comportamento das cascas cerâmicas confeccionadas com lama cerâmica primária e secundária utilizando como material refratário o pó de telha reciclado. Este material possui baixo custo e foi utilizado para substituir a zirconita e a sílica eletrofundida, principais materiais refratários utilizados na indústria de microfusão. Sendo assim, foram realizados testes de módulo de ruptura, deceragem, calcinação e vazamento do metal líquido com 3 ligas de metais diferentes, alumínio 356 (780°C), bronze Cu90Sn10 (1150°C) e Ferro fundido cinzento (1380°C). As cascas fabricadas com pó de telha apresentaram propriedades e características necessárias para substituir a zirconita e a sílica eletrofundida. Com isso, foi possível concluir que as cascas cerâmicas fabricadas com pó de telha podem ser uma alternativa viável para a aplicação na indústria de microfusão, pois possibilita uma significativa redução de custo da matéria-prima, redução do peso da casca e utilização de material reciclado.

Palavras Chave: Casca cerâmica, pó de telha, fundição de precisão, microfusão.

INTRODUÇÃO

Para se produzir peças das mais variadas formas destaca-se o processo de microfusão. De origem milenar e que veio se desenvolvendo através dos séculos até se industrializar após a 2ª guerra mundial, são produzidas peças

para o setor de geração de energia, implantes cirúrgicos metálicos, próteses dentárias metálicas, joias, armamentos, rotores de turbina automobilística e palhetas de turbina para motor a jato. Este processo, denominado também como fundição por cera perdida, oferece diversas vantagens como obtenção de formatos complexos, precisão dimensional, excelente acabamento superficial e aplicação para diferentes tipos de liga [1]. Diante disso, possibilita o fornecimento de peças para mercados com exigências múltiplas como, por exemplo, as indústrias automobilísticas, aeronáutica, têxtil, alimentícia, agrícola, petroquímica, médica, odontológica e de esportes.

Estreitas tolerâncias dimensionais, excelente acabamento superficial e formatos complexos podem ser obtidos devido à facilidade da cera (utilizada na confecção dos modelos) em copiar os detalhes e reproduzi-los através da casca cerâmica (utilizada como molde no processo de fundição por cera perdida). Um dos grandes desafios das microfusões é obter cascas cerâmicas com resistência mecânica suficiente para suportar à deceragem, manuseio, entrada do metal e ao mesmo tempo com permeabilidade que possibilite a saída dos gases durante o vazamento do metal [2], reduzindo também o custo sem afetar a qualidade final do produto e o meio ambiente. O aumento dos trabalhos apresentados nos últimos anos em congressos internacionais específicos da área reflete a importância do controle de parâmetros no processo e a busca de matérias primas alternativas para a produção de cascas cerâmicas. Verifica-se a ênfase dada para aumentar a resistência mecânica ou a tenacidade das cascas com o objetivo de reduzir trincas na deceragem e o número de camadas [3].

No Brasil ainda são poucos os trabalhos direcionados ao estudo dos materiais aplicados a produção de cascas cerâmicas para o processo de microfusão, principalmente quando se trata de estudar 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 [4]. Com o crescente aumento dos valores das matérias primas refratárias empregadas para a confecção das lamas cerâmicas, principal produto para a obtenção de moldes refratários tipo casca cerâmica no processo de microfusão, foi

investigado neste trabalho a utilização do pó de telhas em substituição da zirconita e da sílica eletrofundida.

O pó de telhas reciclado é obtido por meio do processamento de cacos cerâmicos descartados durante a produção das telhas na indústria cerâmica. Portanto, partem de telhas de alta qualidade, queimadas em alta temperatura (acima de 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 lamelas cerâmicas para o processo de microfundição.

As empresas que fornecem esta matéria-prima não trabalham com demandas altas 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 ficam ociosos em aterros esperando para serem processados por não ter um mercado que absorva estes grandes volumes. As quantidades referentes a retaguarda tendem a aumentar com o passar dos anos.

A partir deste cenário, este estudo se torna importante pois verifica a viabilidade da aplicação do pó de telhas como matéria-prima refratária para o setor de microfundição, além de abrir um nicho importante de negócio para os resíduos da indústria ceramista. O comportamento das cascas cerâmicas em campo, propriedades físicas, comparativos com cascas cerâmicas utilizadas na indústria foram estudados neste trabalho com foco na redução de custos de fabricação, diminuição do peso dos moldes e na aplicação desta matéria-prima por empresas que produzam peças em ligas de alumínio, ligas de cobre (Bronze ou Latão) e ferros fundidos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo busca entender o comportamento das cascas cerâmicas confeccionadas com lamelas cerâmicas primárias e secundárias utilizando-se o pó de telhas reciclado como material refratário e submetê-las ao preenchimento com as ligas metálicas líquidas de alumínio 356 (780°C), bronze Cu90Sn10 (1150°C) e Ferro Fundido Cinzento (1380°C) para obtenção de peças microfundidas. Este material é comercializado para aplicação em pisos de quadras de tênis. Portanto não há um rigor quanto a sua classificação

granulométrica. Para a caracterização deste material 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.

O processo de micronização do pó de telha foi iniciado no laboratório de areias da escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo”, mas devido à baixa produtividade dos equipamentos foi necessário terceirizar o trabalho junto a uma empresa especializada neste processo. Após realizado o processo de micronização, seguindo as especificações requeridas, foram obtidos os materiais para o estudo conforme desejado, ou seja, pó de telhas na malha #325 mesh e pó de telhas na malha #200 mesh.

A composição química do material foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios x no laboratório de Ensaio Químicos pertencente ao Núcleo de Tecnologia Cerâmica da escola SENAI “Mário Amato”, utilizando-se um equipamento da marca Shimadzu, modelo XRF-1800. Para identificação das fases presentes na amostra do pó de telhas foi utilizada a técnica de difração de raios x através de um difratômetro Multiplex, da marca Rigaku.

A empresa de microfusão Fundimazza cedeu as peças em cera para que fossem realizadas as montagens dos cachos de peças e os corpos de prova para realização do ensaio do módulo de ruptura, que foram revestidos com as lamas cerâmicas e os materiais refratários utilizados neste trabalho. A peça revestida se refere a um suporte utilizado nas redes elétricas e foram montados 6 cachos com 9 peças cada para se ter uma amostragem representativa durante a realização das análises. Para os corpos de prova de módulo de ruptura foram montados 2 cachos com 6 placas cada, como foram utilizadas as duas faces para o revestimento, foi obtido 12 corpos de prova.

As lamas cerâmicas foram produzidas no laboratório de microfusão da escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo”, seguindo-se o padrão de mistura industrial constituída de parte líquida mais parte sólida. Os componentes da parte líquida da lama em peso são: sílica coloidal (29%), polímero (1%), tensoativo (1 mL/5kgs) e antiespumante (1 mL/5kgs). A parte sólida da lama foi elaborada com pó de telha reciclado #325 mesh para lama primária (70%) e pó de telha reciclado #200 mesh (65%) para lama secundária. A mistura das partes líquida e sólida foi feita com o auxílio de um agitador mecânico de hélice da marca Ika. Após a mistura, as lamas cerâmicas foram deixadas em agitação constante durante 48

horas em tanques misturadores da marca Cecomatec para o total molhamento das partículas antes de sua utilização [5].

A formação da casca cerâmica se deu através da aplicação de 7 camadas de revestimento cerâmico nos cachos de peças e dos corpos de prova que foram montados. Cada camada foi composta por lama cerâmica + material granulado refratário, seguindo a seguinte sequência de aplicação: 1ª Camada – Lama Primária (#325) + refratário granulado (#70-#140) + 1 hora de secagem; 2ª Camada – Lama Primária (#325) + refratário granulado (#70-#140) + 2 horas de secagem; 3ª Camada – Lama Secundária (#200) + refratário granulado (#30-#80) + 4 horas de secagem; 4ª Camada – Lama Secundária (#200) + refratário granulado (#20-#40) + 4 horas de secagem; 5ª Camada – Lama Secundária (#200) + refratário granulado (#20-#40) + 4 horas de secagem; 6ª Camada – Lama Secundária (#200) + refratário granulado (#20-#40) + 4 horas de secagem; 7ª Camada – Lama Secundária para banho final. Cada camada das camadas foi aplicada sobre a superfície em cera do cacho de peças por meio da imersão num banho de lama cerâmica e posterior chuveiramento de material refratário granulado. Após a aplicação da camada foi respeitado o tempo de secagem especificado para que na sequência pudesse ser aplicada a camada seguinte e assim sucessivamente até a formação da casca cerâmica com as 7 camadas.

As cascas cerâmicas passaram pelo teste de deceragem na empresa de microfusão Jandinox. Para este processo foi utilizado um boilerclave (caldeira conjugado a um vaso de pressão) da marca FERLEX, modelo C, 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. Os parâmetros adotados para este processo foram os mesmos utilizados na indústria, ou seja; pressão de vapor de 9 kgf/cm², tempo de pressurização de 12 minutos e temperatura de 175°C. Finalizado o processo de deceragem as cascas cerâmicas foram calcinadas num forno Brasimet, modelo mufla no laboratório de fundição da escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo”. O ciclo de calcinação utilizado para este trabalho foi temperatura de 1050°C/2 horas.

Após serem calcinadas, as cascas cerâmicas foram submetidas ao vazamento do metal líquido no laboratório de fundição da escola SENAI “Nadir Dias de Figueiredo”. 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 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. Na medição das temperaturas dos metais líquidos foi utilizado um pirômetro de imersão da marca Ecil.

Ensaio de flexão foram realizados numa máquina universal de ensaios da marca Engenharia Oswaldo Filizola, modelo AME-5 KN pertencente ao laboratório de microfusão da escola Senai Nadir Dias de Figueiredo. Foram determinados nos ensaios de flexão o módulo de ruptura a verde e a quente (após o vazamento do metal líquido). Os corpos de prova para os ensaios de flexão foram moldados juntamente com as cascas cerâmicas seguindo o mesmo número de camadas. Foram ensaiados 5 corpos de prova em cada condição. As análises dimensionais dos corpos de prova 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.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do ensaio de granulometria do pó de telhas são apresentados na tabela 1. As especificações granulométricas dos refratários utilizados para a produção das lamas cerâmicas empregadas para confecção das cascas cerâmicas 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 alta dispersão granulométrica do pó de telhas disponível no mercado (#20 - #325) foi necessário ajustá-lo nas granulometrias ideais para a produção das lamas cerâmicas por meio do processo de micronização. Os resultados da análise química por fluorescência de raios x são apresentados na tabela 2. Foi possível identificar nesta análise percentual considerável dos compostos refratários sílica (63,65%) e alumina (15,80%), que confirmam a capacidade refratária do pó de telha.

Tabela 1: Ensaio granulométrico do pó de telhas.

ENSAIO GRANULOMÉTRICO			
Pen.	Mat.Retido	Conc.	Módulo

1	2	3	4	5	6
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

Tabela 2: Resultados da análise química do pó de telha por espectrometria de fluorescência de raios x.

Ensaio	Resultados (%)	Ensaio	Resultados
Perda ao fogo	0,97	MgO	2,70
SiO ₂	63,65	Na ₂ O	0,85
Al ₂ O ₃	15,80	K ₂ O	2,21
Fe ₂ O ₃	5,26	MnO	<0,01
TiO ₂	0,76	P ₂ O ₅	0,11
CaO	7,70	-----	-----

Além da análise química, foi realizada uma análise por difração de raios x do pó de telhas para identificação dos compostos. O difratograma obtido para a amostra de pó de telha é apresentado na figura 1. Como determinado na análise química, a análise por difração de raios x mostrou as fases sílica (em cor azul) e alumina (em cor verde) em maior intensidade. A fase sílica apresentou uma intensidade de 68% e a alumina 21% por difração de raios x. Estes valores estão bem próximos dos determinados por fluorescência de raios x. Além dessas fases majoritárias, a análise por difração de raios x detectou também os compostos TiO₂, MgO₃Ti, Fe₂O₃ e K₂O, como também determinado por fluorescência de raios x.

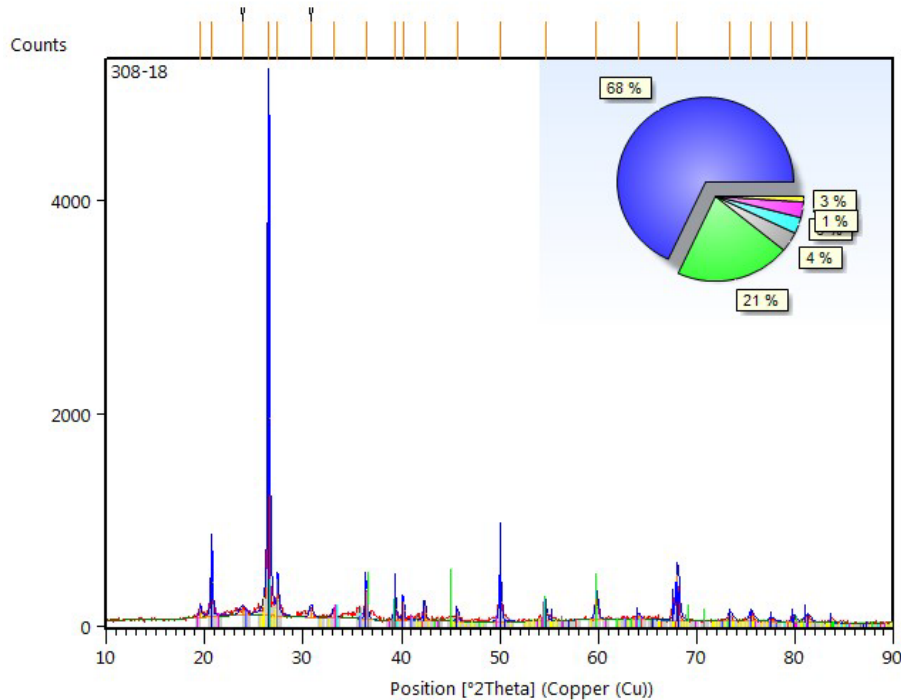


Figura 1: Difratoograma de raios x da amostra de pó de telha com a indicação das porcentagens de fases.

Os resultados do módulo de ruptura das cascas cerâmicas produzidas com lamelas de pó de telha reciclado são apresentados na figura 2. Os resultados são comparados com os valores de módulo de ruptura obtidos industrialmente em cascas produzidas com lamelas de zirconita e sílica eletrofundida utilizadas no processo de microfusão. Os resultados mostram que a casca cerâmica obtida com as lamelas de pó de telha reciclado durante o seu processamento (à verde) se apresenta com resistência inferior (1,02 MPa) as utilizadas na indústria (2,48 MPa). Porém, após a calcinação, os resultados estão relativamente mais próximos (4,95 e 5,7 MPa) e não ocorreram quebras no molde. A diferença de densidade dos materiais pode ser um fator determinante para o resultado ruim do módulo de ruptura a verde. O pó de telha apresenta densidade de $1,16 \text{ g/cm}^3$ enquanto a zirconita e a sílica eletrofundida apresentam $4,5 \text{ g/cm}^3$ e $2,91 \text{ g/cm}^3$ respectivamente. Após a calcinação em temperaturas elevadas (1050°C) ocorre o fechamento de poros por difusão, consolidando o material cerâmico e aumentando assim seu módulo de ruptura.

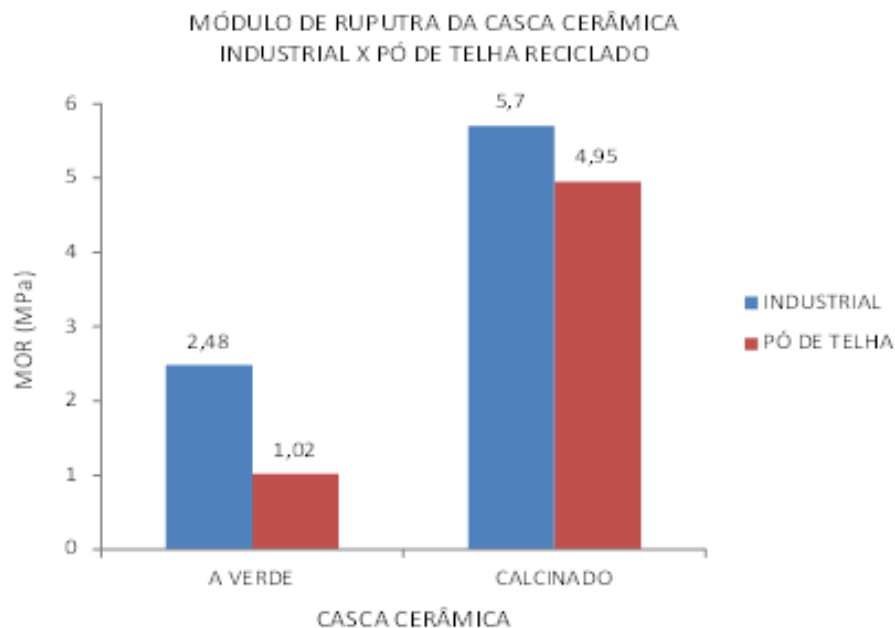


Figura 2: Valores comparativos dos módulos de ruptura a verde e após calcinação de cascas produzidas industrialmente e com pó de telha.

Após a deceragem, as cascas cerâmicas produzidas com pó de telha não apresentaram trincas. Este foi um indicativo de fundamental importância, pois mostra 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, mesmo estando com o módulo de ruptura abaixo das cascas cerâmicas industriais. Além disto, não foi observado nenhum tipo de trinca nas cascas cerâmicas produzidas com pó de telha após a calcinação. Este fato deve ter ocorrido pelo teor elevado de sílica (63,65%) no pó de telha, que fornece a capacidade refratária nas cascas. Isto foi confirmado durante o vazamento do metal líquido, pois não houve o rompimento das cascas cerâmicas.

Durante o preenchimento das cascas cerâmicas com o metal líquido não ocorreu nenhum tipo de rompimento da casca devido à pressão exercida pelo metal dentro do molde. Vale lembrar que, com exceção da liga de alumínio 356 que tem uma densidade baixa ($2,7 \text{ g/cm}^3$), as outras ligas utilizadas neste trabalho tem densidade bem mais elevada (bronze: $8,9 \text{ g/cm}^3$ e ferro fundido: $7,8 \text{ g/cm}^3$) e, portanto, exigem uma resistência mecânica maior da casca cerâmica. Após a solidificação do metal, a casca cerâmica foi removida facilmente, toda a parte externa soltou-se através de vibração. Nos furos e nos 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. Quando isso ocorre, defeitos positivos aparecem na superfície da peça devido a penetração do metal líquido na interface com o refratário.

Os resultados da análise dimensional realizada em scanner 3D são mostrados na tabela 3. Foram utilizadas como referência as cotas de comprimento e altura total para realizar a avaliação das peças. Estas medidas foram escolhidas por serem as medidas mais críticas devido as grandes massas de metal que estão sujeitas a contrações de solidificação ou até mesmo do aumento de dimensões devido a flexão da casca cerâmica durante o preenchimento com metal líquido. Portanto, estas medidas serviram de referência para verificar a eficiência do refratário no que diz respeito a manter as dimensões estabelecidas em desenho. Os resultados da tabela 3 mostram que as análises dimensionais das peças fundidas em alumínio 356, bronze Cu90Sn10 e ferro fundido cinzento com as cascas cerâmicas produzidas com lamas de pó de telhas não apresentaram diferenças significativas em relação às dimensões do desenho, nem com relação aos resultados obtidos com a casca industrial. Portanto, as cascas estariam aprovadas conforme desenho para serem encaminhadas para a fundição.

Tabela 3: Análise dimensional das peças fundidas em casca cerâmica Industrial e em cascas produzidas com pó de telha.

	Medida do desenho (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	108,28
	Medida do desenho (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

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que as cascas cerâmicas produzidas com lamas de pó de telhas reciclado apresentaram um módulo de ruptura inferior as cascas cerâmicas utilizadas na indústria, principalmente no estado à verde. Porém, foi suficiente para que pudesse ser manuseada e suportasse a pressão de vapor e temperatura do processo de deceragem. Após a calcinação ocorreu um aumento significativo do módulo de ruptura das cascas produzidas com pó de telha. Após o vazamento e solidificação do metal líquido, as cascas cerâmicas produzidas com pó de telha apresentaram fácil desmoldagem, isenção de trincas e reações com o molde, mostrando que o refratário atende as temperaturas empregadas neste trabalho. Com isso foi possível obter peças metálicas em ligas de Alumínio 356, Bronze Cu90/Sn10 e Ferro Fundido cinzento, com excelente acabamento superficial e com suas dimensões aprovadas. O estudo contribui para as indústrias de microfusão, assim como para o meio ambiente, podendo criar um novo nicho de mercado para utilização do pó de telha na fabricação de cascas cerâmicas para microfusão, sem comprometer a qualidade do produto final, aliado à redução significativa do valor de matéria-prima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hirst, R. Understanding investment casting wax. Blayson Olefines, UK. 2010
2. Krumrei, Thomas. Dimensional Stability of Ceramic Shell Mould Systems, 61st Technical Conference & Equipment Expo, USA, 2014
3. BRASCOMB, T. The importance of green mor for autoclave cracking. In: TECHNICAL CONFERENCE. 50, 2002. Chicago. Proceedings...Chicago: ICI, 2002. Paper n.21.
4. BI JVOET, Mark. Preparação e controle da lama da casca de investment casting. Fundação e Serviços, v. 13, n. 126, p. 56-62, jun. 2003.
5. Xu, Mingzhi; Lekakh, Simon; Richars Von. Thermal Property Database for investment casting Shells, International Journal of Metal Casting, 2016, Vol.10(3), pp.329-337

EVALUATION OF THE USE OF CERAMIC SHELL PRODUCED WITH PRIMARY AND SECONDARY CERAMIC LAMA OF RECYCLED TILE POWDER FOR USE IN THE INVESTMENT CASTING

ABSTRACT

The present work was developed to understand the behavior of the ceramic shells produced with primary and secondary ceramic slurries using recycled tile powder as a refractory material. Tile powder has a low cost and was carried out to replace zirconite and the electrofused silica, which are applied as main refractory materials in investment casting industry. Following tests were performed such as modulus of rupture, dewaxing, calcination and casting of liquid metal with three different metal alloys and temperatures, aluminum alloy 356 (780°C), Cu90Sn10 bronze (1150°C) and gray cast iron (1380°C). Tests were completed with the dimensional verification through 3D scanner to evaluate the efficiency of the ceramic shells. It was possible to conclude that ceramic shells made with tile powder can be an alternative for in the investment casting process, proportioning significant cost reduction of the raw material, as well as ceramic shells weight and use this recycled material without loss of casting characteristics.

Keywords: *ceramic shell, tile powder, investment casting.*