

Avaliação da impressão 3D com matéria prima polycast SP802C para modelos de fundição

3D print evaluation with polycast SP802C raw material for foundry models

DOI:10.34117/bjdv6n11-121

Recebimento dos originais: 06/10/2020

Aceitação para publicação: 06/11/2020

Vitor Costa Colombo

Graduando em Bacharel em Engenharia Mecânica Faculdade SATC

Endereço: Rua Pascoal Meller 73, Bairro Universitário, CEP: 88805-380 – CP 323, Criciúma - S.C.

E-mail: vitorccolombo@gmail.com

Anderson Daleffe

Professor Dr. Faculdade SATC e Pós-Graduação SATC

Endereço: Rua Pascoal Meller 73, Bairro Universitário, CEP: 88805-380 – CP 323, Criciúma - S.C.

E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

Jovani Castelan

Professor Dr. Faculdade SATC e Pós-Graduação SATC

Endereço: Rua Pascoal Meller 73, Bairro Universitário, CEP: 88805-380 – CP 323, Criciúma - S.C.

E-mail: jovani.castelan@satc.edu.br

Daniel Fritzen

Professor Dr. Faculdade SATC e Pós-Graduação SATC

Endereço: Rua Pascoal Meller 73, Bairro Universitário, CEP: 88805-380 – CP 323, Criciúma - S.C.

E-mail: Daniel.fritzen@satc.edu.br

Emerson Maximiano Gonsalves

Professor Dr. Faculdade SATC e Pós-Graduação SATC

Endereço: Rua Pascoal Meller 73, Bairro Universitário, CEP: 88805-380 – CP 323, Criciúma - S.C.

E-mail: emerson.maxgoncalves@gmail.com

Alexandre Milanez

Professor Dr. Faculdade SATC e Pós-Graduação SATC

Endereço: Rua Pascoal Meller 73, Bairro Universitário, CEP: 88805-380 – CP 323, Criciúma - S.C.

E-mail: alexandre.milanez@satc.edu.br

Fabio Peruch

Professor da Faculdade SATC e Pós-Graduação SATC

Endereço: Rua Pascoal Meller 73, Bairro Universitário, CEP: 88805-380 – CP 323, Criciúma - S.C.

E-mail: fabio.peruch@satc.edu.br

RESUMO

Por consequência da característica abrasiva da areia verde, matéria prima utilizada na moldagem de fundição, moldes e modelos da ferramentaria fundiária sofrem desgaste com o passar do tempo, assim exigindo a substituição dos mesmos. A utilização da impressão 3D no desenvolvimento de protótipos e modelos elaborados proporciona estudar uma forma moderna de evitar imperfeições e desgastes dos modelos. Atualmente os moldes e modelos são comumente fabricados de alumínio e madeira, pela fácil usinabilidade. Porém, como uma alternativa de melhoria, estuda-se a substituição desses materiais com o emprego da matéria prima SP802C (Polymaker), filamento aplicado na impressão 3D. Foi avaliada a resistência ao desgaste abrasivo dos materiais base acima citados para comparar a suas características de durabilidade e custo em relação aos respectivos meios de fabricação. Foram abordadas as variáveis envolvidas em um processo de desgaste, sendo dureza do material abrasivo, rugosidade superficial e abrasão linear. Para os ensaios em laboratório, foram produzidos corpos de prova para cada material, todos submetidos aos ensaios de micro dureza e rugosidade, e submetidos ao teste de abrasão linear por areia seca e roda de borracha, padronizado conforme norma ASTM G65. Após os testes realizados alcançamos resultados satisfatórios em resistência ao desgaste, melhora no acabamento do modelo transferida diretamente aos moldes de areia verde, diminuindo a adesão de areia ao modelo, melhorando a finalização de geometrias complexas, e consequentemente melhorando o nível de rebarbas na peça pronta. Visto que a análise em laboratório obteve resultados satisfatórios, foi implantado um projeto real em uma indústria, com dois modelos analisados, o teste prático se apresentou resistente a esforços e impactos, com boa durabilidade.

Palavras-chave: Desgaste, impressão 3D, modelos, análise, resistência.

ABSTRACT

As a consequence of the abrasive characteristic of green sand, raw material used in casting, molds and models of land tooling suffer wear and tear over time, thus requiring their replacement. The use of 3D printing in the development of prototypes and elaborate models provides a modern way to avoid imperfections and model wear. Currently, molds and models are commonly made of aluminum and wood, due to their easy machinability. However, as an alternative for improvement, the substitution of these materials is studied with the use of the raw material SP802C (Polymaker), filament applied in 3D printing. The abrasive wear resistance of the above mentioned base materials was evaluated in order to compare their durability and cost characteristics with the respective manufacturing means. The variables involved in a wear process were addressed, being abrasive material hardness, surface roughness and linear abrasion. For laboratory tests, test bodies were produced for each material, all submitted to micro hardness and roughness tests, and submitted to linear abrasion test by dry sand and rubber wheel, standardized according to ASTM G65 standard. After the tests we achieved satisfactory results in wear resistance, improving the finish of the model transferred directly to the green sand molds, reducing the adhesion of sand to the model, improving the completion of complex geometries, and consequently improving the level of burrs in the finished part. Since the laboratory analysis obtained satisfactory results, a real project was implemented in an industry, with two models analyzed, the practical test was resistant to stress and impact, with good durability.

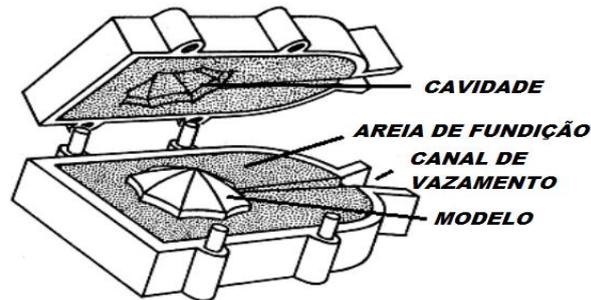
Keywords: Wear, 3D printing, models, analysis, resistance.

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D é um método de manufatura revolucionário onde materiais são depositados em camadas conforme especificações configuradas por *softwares* criando assim, um objeto 3D. Os materiais e diferentes tipos de deposição dos mesmos fez com que, atualmente, se possibilite alto grau de acabamento e de precisão dimensional. A facilidade e ganho de custo em relação à fabricação de protótipos e modelos é um atrativo desta manufatura, podendo assim, agilizar processos e promover desenvolvimentos com menos riscos (SCHUBERT *et al.* 2013).

O modelamento e a prototipagem tradicionalmente utilizados na área de fundição Fig. 1 são elaborados conforme os meios de usinagem limitados, com geometrias sem muito detalhamento com custos elevados, e podendo gerar defeitos ou desgaste precário, consequências essas do processo de fabricação, material empregado e forma de utilização. Os defeitos em fundidos geram refugo de produtos, aumento do tempo de produção de um determinado lote e conseqüentemente o aumento do custo de produção (TAMEGA, 2017).

Figura 1. Caixa de Moldar em Areia Verde (Bombana *et al.*, 2017).



A utilização da impressão 3D no desenvolvimento de protótipos e modelos elaborados proporciona estudar uma forma moderna de evitar essas imperfeições e desgastes excessivos dos modelos. É importante avaliar a substituição dos materiais tradicionais (madeira, alumínio) usados no processo de fabricação de modelos para fundição pela aplicação da manufatura aditiva em impressão 3D, visando aumentar a vida útil dos mesmos, comparar seus percentuais de desgaste através de ensaios abrasivos relacionados aos materiais da fabricação utilizando também, geometrias complexas em manufatura 3D para reduzir meios de incrustações no molde e defeitos no produto (BOMBANA *et al.*, 2017)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

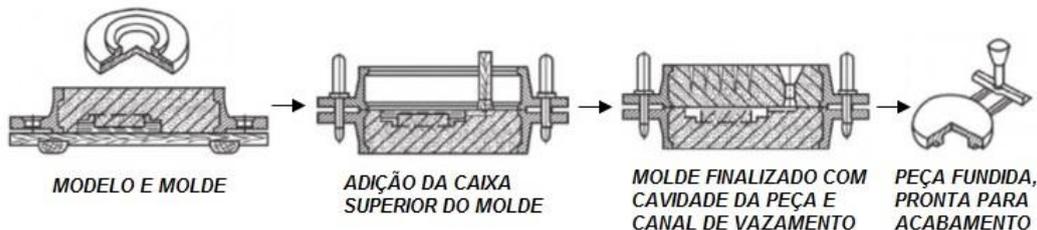
Este capítulo tem por finalidade apresentar uma revisão da literatura a respeito de desgastes ocorridos em moldes e modelos para fundições, utilizando meios de prototipagem rápida (estereolitografia) para fabricação de ferramental de fundição dimensionamento de formas construtivas para moldes de areia.

2.1 METODOLOGIA DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE

Fundição é um processo de fabricação pelo qual um material fluido é normalmente colocado em um molde, conforme Fig. 2, que mantém um espaço vazio na forma final desejada e depois é dado o tempo necessário de espera para a solidificação de acordo com o material utilizado (LIMA, 2007). A fundição é regularmente utilizada para produzir peças com formas que podem ser problemáticas ou não econômicas para fazer por metodologias de fabricação diferentes.

Areia verde é a nomenclatura dada a mistura utilizada nessa prática, um processo em que a areia, geralmente silicosa, é misturada com argila (bentonita) e água. Para Tamega (2017), dos métodos de fundição existentes, a fundição em moldes de areia é a mais usada no mundo pela sua facilidade de aplicação em pequenas escalas e possibilidade de automatização para produções em largas escalas.

Figura 2. Esquemático tradicional de fundição com Modelos Caixa de Macho (Tamega, 2017).



Uma das etapas do processo de fundição em areia a verde é a confecção dos modelos Fig. 2. Nas dimensões dos modelos, devem ser considerados os fatores de contração volumétrica das peças fundidas e também, o sobremetal para usinagem. Segundo Silva (2018), analisar o produto a ser construído é a primeira etapa a se seguir em um projeto a se desenvolver, pois é nesta etapa que identificamos possíveis transtornos em relação à divisão de modelos, suas geometrias complexas, encaixes e detalhes necessários, e identificamos geometrias no produto que podem atrasar o processo de desenvolvimento do projeto.

2.2 MANUFATURA ADITIVA

A prototipagem é uma prática antiga que tem por objetivo materializar fisicamente uma ideia, podendo assim, fazer avaliações físicas de como está sua forma, montagem e usos, e estudar os melhores métodos para fabricação (linha de produção, lista de ferramental, gabaritos, entre outros). Dessa forma, um protótipo é usualmente necessário antes de uma fabricação em larga escala (GRELLMANN, 2001), (Araújo, *et al.* 2019)

No sistema de impressão tridimensional o modelo é projetado em um software de desenvolvimento 3D e posteriormente convertido em uma linguagem cuja máquina seja capaz de interpretar, através de sistemas de coordenadas e realizar a impressão do modelo físico (BOMBANA *et al.* ,2017). Modelagem e prototipagem estão diretamente ligadas auxiliando no desenvolvimento de ideias e produtos novos para diferentes setores do mercado, sendo esse conjunto um dos principais pilares para os avanços tecnológicos da indústria (PASSINI, 2005 apud SILVA, 2018).

2.3 CARACTERÍSTICAS DA RESINA POLYCAST™ SP802C

O *PolyCast™ SP802C* é um filamento para impressão 3D, projetado especificamente para aplicação de fundição. Possui uma queima completa e limpa para deposição, com propriedades físicas e mecânicas que mostram ótimos valores para trabalho (Tab. 1). *SP802C* é compatível com a mais diversa gama de máquinas de impressão 3D, também é compatível com o processo de fundição por cera perdida, onde, após uma deposição desse material para fabricação da árvore de cera e revestido com a casca de sílica e cerâmica sinterizada, a resina é queimada do molde sem deixar resíduos (POLYMAKER, 2018).

Tabela 1: Propriedades da Resina SP802C (Polymaker Industrial, 2018).

Propriedade	Norma	Valor
Temp. Escoamento	ASTM D1525	60°C
Temp. Decomposição	TGA, 20 ° C/min	260°C
Resistencia a Tração	ASTM D638	35.7 ± 1.7 MPa
Alongamento à Ruptura	ASTM D638	5.8 ± 0.9%
Resistência à flexão	ASTM D790	60.2±1.6 MPa

2.4 MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO

Desgaste pode ser descrito como “o dano em uma superfície sólida, envolvendo perda progressiva de massa devido ao movimento relativo entre a superfície e o contato com outro material ou materiais” (ASTM G65-16) (ASTM G105-16). O desgaste abrasivo é dividido em dois tipos,

desgaste abrasivo entre dois corpos e desgaste entre três corpos (HUTCHINGS, 2017). Na abrasão entre dois corpos, uma partícula dura referente a microestrutura do material 1 danifica a superfície do material 2 mais dúctil através do atrito e contato das superfícies, deformando-a plasticamente, segundo Zum Gahr (1987) a taxa de desgaste no caso de dois corpos, Fig. 4, é geralmente mais agressiva.

As partículas duras podem ser incorporadas no material propositalmente, como em rebolos e materiais reforçados com cerâmica afim de garantir que o desgaste seja na superfície oposta, ou podem ser provenientes do próprio ambiente, como uma contaminação por areia (STRAFFELINI, 2015).

2.4.1 Dureza do Abrasivo

Conforme Stoeterau (2004) pesquisadores como Kruschov e Babichev mostraram que a proporcionalidade inversa entre resistência abrasiva e dureza da superfície atacada é válida enquanto o abrasivo detém maior dureza que o material em contato. No outro lado da balança está a relação de quando a dureza do material desgastado ultrapassa a dureza do abrasivo, o volume de material desgastado cai rapidamente, tendendo a zero. Esse fato pode ser explicado por uma característica do processo de desgaste por abrasão que “nenhum abrasivo cortara algo mais duro que ele mesmo” (STOETERAU, 2004).

Ainda segundo Stoeterau (2004), essa limitação é a base da conhecida escala de dureza de MOHS, usada por mineralogistas. Se o mineral A é mais duro que o mineral B, A risca B (isto é, desgasta por abrasão), mas não é riscado por ele. Assim, Mohs propôs uma escala simples de dureza crescente de 1 a 10, onde 1 seria o Talco considerado o material sólido de menor dureza e 10 seria o Diamante, mineral mais duro encontrado.

2.4.2 Atrito e Rugosidade Superficial

Conforme Stoeterau (2004), todos os processos de fabricação induzem erros, mesmo que imperceptíveis a olho nu, que são traduzidos sob a forma de desvios dimensionais e geométricos, sendo que nenhum processo de fabricação existente até o presente permite produzir superfícies perfeitamente lisas. Em termos microscópios cada processo deixa suas marcas características, um tipo de assinatura (LEMM, 2015). As rugosidades das superfícies em contato influenciam no atrito e conseqüentemente no desgaste abrasivo entre dois materiais, onde a força aplicada sobre uma pequena área aumenta a pressão de contato desses pontos protuberantes o que faz com que partículas duras mais aparentes penetrem em cavidades dúcteis (TSCHIPTSCHIN, 2019).

2.4.3 Velocidade e Abrasão Linear

Stoeterau (2004), indica que o volume de material removido por abrasão aumenta rapidamente com a velocidade de deslizamento até 2,5 m/s. Entretanto, em contrapartida, a dependência do desgaste abrasivo da distância de deslizamento é complexa. Em situações onde a abrasão ocorre sempre com novas partículas abrasivas, o desgaste continua perdendo um volume constante ao longo do tempo.

Conforme Tschiptschin (2019) e ainda Stoeterau (2004), quando o sistema de escorregamento contém uma quantidade limitada de abrasivo, que é reutilizada continuamente durante o deslizamento, o desgaste tende a diminuir enquanto o deslizamento continua. Isso ocorre pela influência do entupimento do elemento abrasivo por partículas do material desgastado (TSCHIPTSCHIN, 2019).

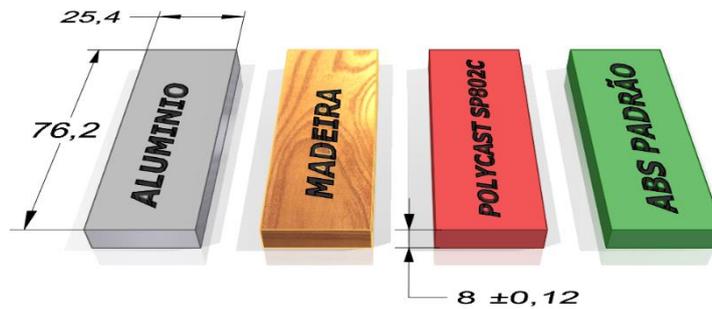
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com os assuntos pertinentes ao desenvolvimento das pesquisas abordadas na revisão bibliográfica, podem-se iniciar os procedimentos experimentais. Nesse tópico, serão apresentados os desenvolvimentos dos ensaios e análises tribológicas para análise das matérias primas em teste, também os procedimentos de projeto e aplicação industrial para comparação concluindo os estudos.

3.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para os ensaios em laboratório, foram produzidos quatro corpos de prova para cada material, sendo eles Alumínio, Madeira de Eucalipto, Polycast SP802C e ABS Comum, totalizando 16 corpos de prova. As dimensões das peças estão expostas na Fig. 7, conforme norma utilizada para ensaio, à superfície de teste deve ser plana dentro de uma tolerância $\pm 0,12\text{mm}$ no máximo, imagens reais das peças disposta na imagem Fig. 8 (ASTM-G65,2016). Os custos destes corpos de prova estão relacionados a confecção dos mesmos, ao projeto dos corpos de prova, a aquisição dos materiais, a usinagem para esquadreamento, ao corte e preparo de cada superfície e a impressão dos corpos em resina.

Figura 7. Corpos de prova com os materiais que serão ensaiados(Do autor, 2019).



3.2 MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE

Utilizou-se um rugosímetro digital portátil SJ-310, fabricado pela empresa Mitutoyo. O princípio de medição mecânica digital da rugosidade de uma superfície segue o princípio de apalpadores, estes em geral fabricados em material de altíssima dureza e resistência ao desgaste (ex.: diamante), percorrem o comprimento total de medição, sofrendo uma amplificação por meio de mecanismos (alavancas, cremalheiras, etc.) que fornece um sinal de saída proporcional ao deslocamento sofrido pelo apalpador, quando aplicado sobre vales na superfície da peça (STOETERAU, 2004).

Antes das medições, foi necessário calibrar o equipamento usando uma base padrão com uma rugosidade especificada na certificação de calibração. As medições seguiram uma *cut-off* (λ_c) inicial selecionado de 0.25mm, sendo estabelecido a faixa de rugosidade alta no equipamento, foi selecionado λ_3 com variações de até 80 μ m, pois como as amostras não foram retificadas as superfícies poderiam conter diferenças altas entre os vales de medição. A escala de medição utilizada foi Ra, assim fornecendo as medições dos vales em micrometros.

3.3 ENSAIO DE DESGASTE POR RODA DE BORRACHA

Os ensaios segundo a norma “ASTM G65-16, 2016”, desgaste com roda de borracha e areia seca, Fig. 8, irão analisar de forma padrão o desgaste por abrasão, com o objetivo de quantificar a taxa de desgaste comparativa entre os materiais. Este ensaio simula a abrasão entre corpos atuantes nos processos de fabricação de moldes de areia verde. Como mostrado na Fig. 8, ele envolve uma amostra de tamanho padrão aprisionada em um braço mecânico onde uma corrente de abrasivos (areia) em queda livre é depositada entre a amostra de desgaste e uma roda rotativa, que deve ser revestida com borracha para que os grãos não fiquem incrustados entre os corpos.

Figura 8. Equipamento para desgaste abrasivo (Do autor, 2019)



O estudo se baseia no padrão de teste nível D da norma ASTM-G65, este ensaio classifica resultados para materiais de baixa resistência à abrasão. Ainda segundo a ASTM-G65 (2016), a Tab. 2 padroniza os parâmetros de regulação do ensaio, a areia utilizada para se assemelhar mais com a prática real, foi a areia verde de fundição, o fluxo de areia de 300-400 (g/min) deve ser seguido.

Tabela 2: Parâmetros do ensaio de desgaste (Baseada ASTM-G65, 2018).

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
Vazão de areia	325 g/min	Granulometria da areia	30 mesch
Carga Aplicada	45 N	Rotação da roda	200 rpm
Tempo de cada ensaio	30 min	Diâmetro da roda	228,6 mm
Corpos de Prova por Material	4	Abrasão Linear	4309 m

Para dar sequência aos procedimentos experimentais, foi realizado a limpeza dos corpos de prova para retirar as impurezas. Foi utilizado álcool etílico hidratado 92,8°GL, com um pincel limpo e umedecido na solução e um soprador térmico para secagem, em seguida, secos e pesados, em balança de precisão com capacidade de 210g e resolução de 0,001g. A versão padrão do ensaio para classificação de desgastes em materiais, utiliza a Eq. 1 da norma especificada para encontrar a perda de volume da matéria desgastada (ASTM G65, 2016).

$$V = \frac{M}{\rho} \times 1000 [mm^3]$$

(1)

Onde:

M = Perda de massa (g)

 ρ = Densidade (g/cm³)V = Perda de volume (mm³)

O coeficiente de desgaste pode ser obtido das perdas de volume através da equação de Archard (1953), que relaciona o volume perdido acumulado, com a dureza superficial do material por unidade de abrasão linear percorrida e a carga padronizada aplicada sobre o corpo de prova, Eq. 2.

$$V = \frac{K * F_n * S}{H}$$

(2)

Onde:

V = Perda de volume acumulada (mm³)

S = Deslizamento linear (mm)

F_n = Carga nominal aplicada (N)

H = Dureza do material mais mole (N/mm²)

K = Coeficiente de desgaste (adimensional e menor que 1)

Derivando diretamente da equação de Archard temos equação de Czichos, Eq. (3), que será utilizada neste estudo, porém Czichos utiliza uma taxa de desgaste (k), esta taxa de desgaste correlaciona as propriedades de desgaste e de dureza, pois ambas revelam a resposta do material ao desgaste sofrido (Silva, 2014).

$$k = \frac{K}{H}$$

(3)

Unindo a Eq. (2) na Eq. (3), obtém-se uma variante das mesmas, representada na Eq. (4), Com essa equação é possível então, determinar a taxa de desgaste em cada material:

$$Q = \frac{V}{N * S}$$

(4)

Onde:

V = Volume perdido (mm³);

Q = Taxa de desgaste (mm³/Nm);

N = Carga aplicada (N);

S = Distância de deslizamento (m);

3.4 ANÁLISES DE CUSTOS

Analisaremos o preço de custo da fabricação do modelo em alumínio conforme o preço por quilograma de material, a utilização do maquinário para usinagem, a ajustagem necessária e o emplacamento do modelo. Para os custos da impressão levaremos em conta o custo de minutos máquina de impressão, o custo do quilograma do material depositado, ajustes feitos e emplacamento do modelo. Todos os valores de custos estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3: Custos de Fabricação (Do autor, 2019)

Setor/Máq.	Usinagem (Aluminio)	Impressão (SP802C)
Material (Kg)	R\$ 17,00	R\$ 1000,00
Projeto (Min)	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Usin/Impress. (Min)	R\$ 1,20	R\$ 0,20
Ajustagem (Min)	R\$ 0,90	R\$ 0,30

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados serão apresentados por capítulos, iniciando pela caracterização dos corpos de prova através de ensaios do sistema tribológico, ensaios destrutivos de desgaste, e finalizando com a análise dos modelos aplicados industrialmente para avaliação comportamental real.

4.1 RUGOSIDADE

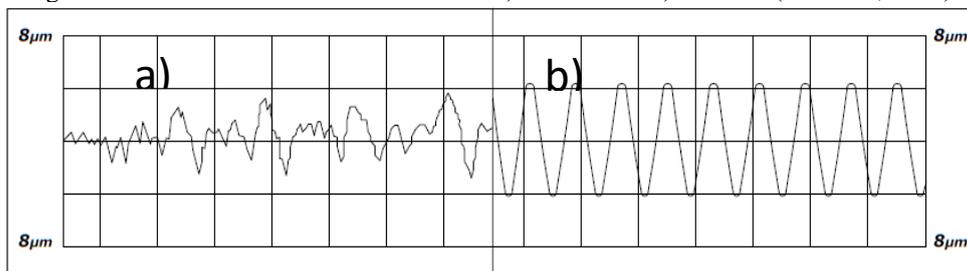
Fez-se necessário obter os valores de rugosidade da superfície de cada corpo de prova que futuramente iriam ser ensaiados por desgaste abrasivo, com as três medições em cada corpo de prova foi possível determinar a rugosidade média de cada material e seus respectivos desvios padrões. Na Tab. 4 é possível ver os valores encontrados para cada amostra. Preferiu-se não retificar as peças ensaiadas para que a superfície medida se assemelhe mais à superfície dos modelos finalizados feitos a partir dos processos de fabricação relativos a cada material, a necessidade de fazer os ensaios laboratoriais foi a fim de comparar a influência desta variável.

Tabela 4: Rugosidade das amostras (Do autor, 2019)

Amostras	Média (μm)	Desvio padrão (μm)
Aluminio	0,915	$\pm 0,073$
Madeira (Eucalipto)	2,933	$\pm 0,254$
SP802C	3,056	$\pm 0,061$
ABS Padrão	2,262	$\pm 0,167$

Conforme Fig.10, pode-se verificar a uniformidade relativa da superfície dos materiais depositados por impressão comparados ao perfil de vales inconsistente do Alumínio usinado, o que se mostrou, apesar de sua rugosidade superior, sendo uma variável importante ao material Polycast SP802C e a sua resistência ao desgaste, equivalendo-se ao Alumínio, expostos ao mesmo ensaio.

Figura 10. Perfil dos Vales das amostras de a) Alumínio e b) SP802C (Do autor, 2019).



4.2 RESISTÊNCIA AO DESGASTE (ASTM G65)

Para traçar a perda de volume das peças com o ensaio de roda de borracha, analisou-se a taxa de desgaste pela fórmula de Czichos. Foi necessário encontrar a densidade específica de cada amostra, calculadas a partir da relação entre a variação de massa e o volume, com a densidade encontrada e com as análises de rugosidades feitas, determinou-se a taxa de desgaste de cada corpo de prova utilizando a equação derivada de Czichos e Archad, o aumento de volume perdido conforme a distância de abrasão da roda de borracha pode ser visualizada na Fig. 11, e a perda total de volume pode ser observada na Fig. 12. Com o gráfico, é possível retirar os valores da taxa de desgaste, conforme Tab. 8, e analisar a influência da rugosidade nos ensaios de desgaste.

Figura 11. Análise da taxa de desgaste (Do autor, 2019).

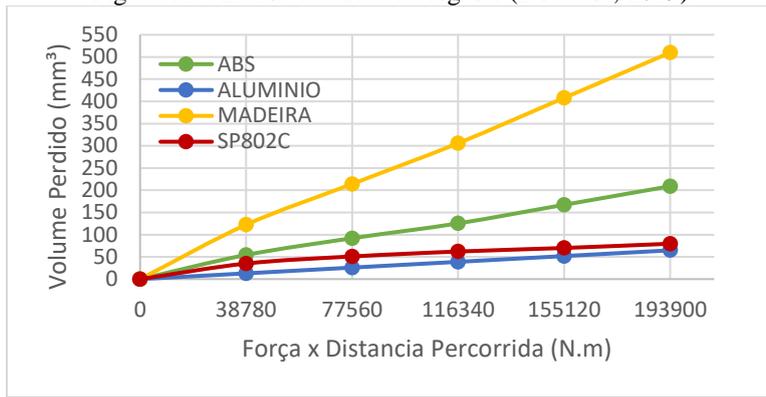
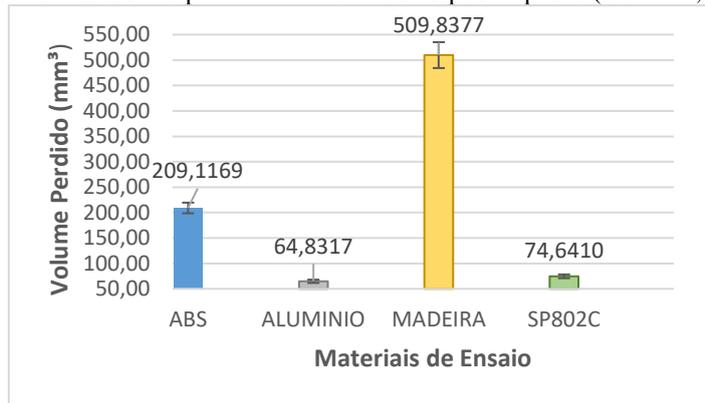


Figura 12. Análise da perda de volume dos corpos de prova (Do autor, 2019).



Através da Tab. 5 é possível então determinar que o material em estudo, Polycast SP802C, se comportou de maneira satisfatória perante ao ensaio de abrasão. Se forem organizados de forma crescente teremos a madeira como o material que menos resistiu a perda de volume abrasiva, subsequente teremos o ABS com 48,5 % a menos de desgaste aparente, em seguida o SP802C apresentando 85,2 % de desgaste inferior a maior perda, e finalmente o alumínio comparado, com 90,3 % de taxa inferior.

Tabela 5: Resultados encontrados do ensaio de desgaste acelerado (Do autor, 2019)

Amostras/Liga	Taxa de Desgaste	Taxa de Desgaste
Aluminio	0,0002538	$2,539 \times 10^{-4}$
Madeira (Eucalipto)	0,0026293	$26,293 \times 10^{-4}$
SP802C	0,0003895	$3,895 \times 10^{-4}$
ABS Padrão	0,0013567	$13,567 \times 10^{-4}$

As Fig. 11 e 12 e a Tab. 5, indicam o que ganho do SP802C em relação ao desgaste sofrido na madeira é notável, e a equivalência dele com Alumínio em relação a mesma variável é de uma diferença de 5,1 % entre as perdas. A resina SP802C obteve um desempenho satisfatório ao sistema tribológico

submetido, obtendo uma taxa de desgaste média de $0,00038\text{mm}^3/\text{m}$, um ganho de aproximadamente 6,8 vezes em relação à madeira comumente utilizada que obteve uma taxa média de $0,00263\text{mm}^3/\text{m}$, e a resina SP802C se equivaleu ao Alumínio também utilizado na fabricação de modelos, com uma taxa média de $0,00025\text{mm}^3/\text{m}$, com cerca de 1,15 vezes mais resistente que o SP802C, essa equivalência entre os dois materiais só não se tornou mais evidente pela maior perda de volume do material impresso devido a sua alta rugosidade inicial, sem nenhum tratamento específico para alisamento da superfície, processo que poderia ter deixado o material com um desgaste mais próximo dos valores obtidos para o Alumínio.

Figura 13. Perfis de desgaste deixados após os ensaios (Do autor, 2019).

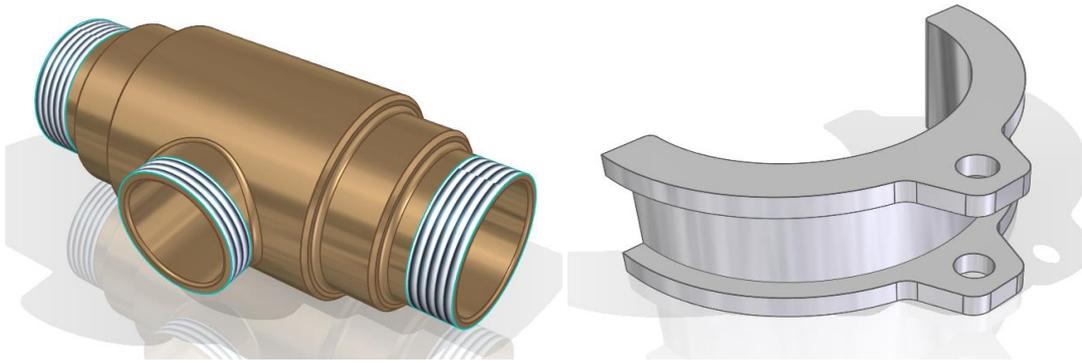


A Fig. 13 expõe os perfis deixados nas amostras após os ensaios, nota-se que somente pelos perfis deixados é possível identificar que o material mais desgastado foi a amostra de Madeira, e o material menos desgastado em relação aos demais foi a amostra de Alumínio.

4.3 APLICAÇÃO PRÁTICA INDUSTRIAL

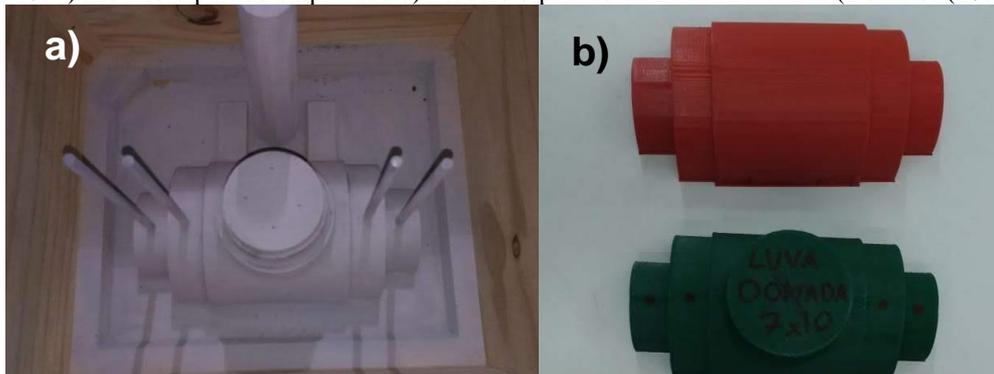
Todos os valores encontrados no momento são laboratoriais, em conjunto aos testes em laboratório, deu-se início a um desenvolvimento prático industrial para obter-se uma comparação entre a aproximação teórica que o laboratório realiza com a prática do estudo. As peças utilizadas nas análises práticas foram uma Luva Metálica Hidráulica e um Mancal Bipartido apresentadas na Fig. 14, peças cedidas por uma indústria da região para análises dos processos. Com os dados adquiridos de utilização e necessidades da peça em análise, foi possível projetar a peça no software SolidEdge®. Todo o projeto desenvolvido para fabricação da peça servirá como base para desenvolvimento dos modelos com as devidas proporções.

Figura 14. Luva Hidráulica e Mancal Bipartido desenhados em *software* CAD (Do autor, 2019).



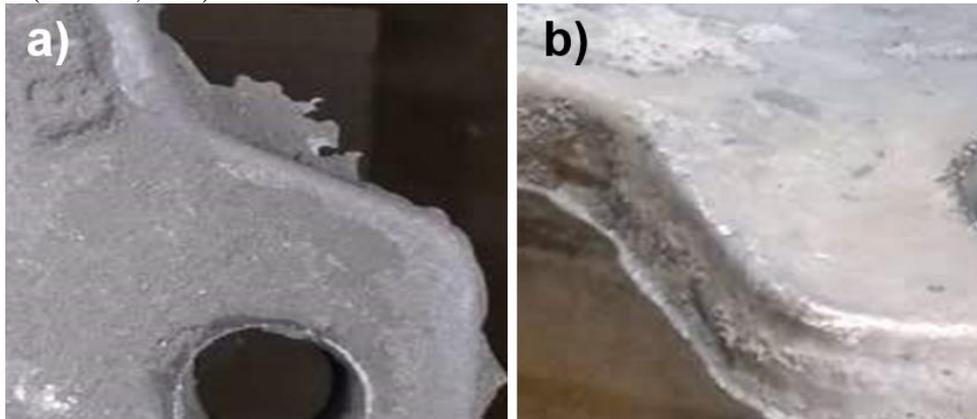
A fabricação do modelo requer uma linha de apartação bipartindo a peça ao longo de seu eixo (Fig. 15 “b”). Para uma posterior usinagem será feita uma adição nas medidas de precisão da peça de 5mm e, o modelo também devesse conter um percentual para cada material de dilatação. A Fig. 15 “a”, mostra o modelo já emplacado e pronto para moldagem.

Figura 15. a) Modelo bipartido emplacado b) Modelo bipartido da Luva Hidráulica (Do autor (2019).



O acabamento foi uma característica que inicialmente não atendeu as exigências do processo de fundição, peças impressas com baixa qualidade tiveram um baixo desempenho em processo produtivo, porém após pesquisas sobre métodos de diminuir a rugosidade do material e alguns testes realizados alcançamos resultados bastante satisfatórios de melhora no acabamento do modelo. Essa melhora é transferida diretamente aos moldes de areia verde, diminuindo a adesão de areia ao modelo no momento da desmoldagem, melhorando finalização de geometrias complexas, e conseqüentemente melhorando o nível de rebarbas na peça pronta, conforme salientado na Fig.16.

Figura 16. a) Rebarba em mancal fundido com modelo convencional em madeira; b) Rebarba em mancal fundido com modelo impresso (Do autor, 2019)



Até o presente momento, a partir das pesquisas bibliográficas de autores como Bombana (2017) e Lencina *et al* (2003), e visitas a empresas do ramo foi concluído que utilizar modelos impressos em 3D no processo de fundição em areia verde e areia aglomerada injetada é um processo viável na indústria metalúrgica, pela facilidade e ganhos que ele traz em relação aos modelos fabricados em madeira e a sua equivalência aos modelos em alumínio.

Visto que a análise em laboratório obteve melhora no desgaste, o teste prático se apresentou bastante resistente a esforços e impactos, com boa durabilidade, pois o mesmo não sofreu nenhum processo de oxidação, o que se torna vantajoso quando comparados aos modelos convencionais de aço. Foi comparado os acabamentos das peças fundidas com o uso dos modelos e também os desgastes ocorridos nos modelos impressos.

4.4 COMPARAÇÕES DE CUSTOS

Seguindo os valores de mão de obra definidos em cada etapa do processo, pôde ser exposta uma comparação real de custos em relação aos materiais de melhor comportamento, o Alumínio e a resina SP802C. Foi estudado o tempo necessário em cada etapa de desenvolvimento e a quantidade de material necessária para cada processo, após determinados os valores de produção e os tempos para fabricação, sendo eles para modelo da Luva Hidráulica e do Mancal Bipartido (vide Fig.14), chegou-se aos valores expostos na Tabela 6.

Tabela 6. Processos de Fabricação (Do autor, 2019)

Setor/Máq.	Aluminio	SP802C
Material	R\$ 195,00	R\$ 580,00
Projeto	R\$ 40,00	R\$ 40,00
Usin/Impress	R\$ 682,00	R\$ 245,00
Ajustagem	R\$ 14,00	-
Soma de Custos	R\$ 931,00	R\$ 865,00

O custo de fabricação do modelo impresso, com valor de R\$865,00 mostrou um ganho de 8 % em relação ao custo da usinagem em Alumínio, percentual esse que tende a ter grandes avanços comparados a geometrias elaboradas, que exijam mais processos de usinagem e conseqüentemente mais tempo de produção. Enquanto a impressão tem um valor de custo fixo agregado ao seu tempo e a quantidade de material depositado, a usinagem tem valores variáveis dependendo da geometria trabalhada, pois são maquinas e processos fabris diferentes envolvidos em cada tipo de modelo.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos estudos teóricos e experimentais, pôde-se inferir algumas conclusões:

- Os ensaios de desgastes por norma padrão tiveram resultados satisfatórios em ganho de vida útil da resina SP802C em relação aos materiais comparados, sua taxa de desgaste foi 5,1% acima do Alumínio e 85,2% vezes menor que a Madeira, comparados ao mesmo esforço, mostrou que o ABS teve uma melhora significativa também em relação a Madeira, com 48,5% de melhora;
- A rugosidade superficial dos materiais influenciou ativamente o nível de desgaste inicial dos materiais, o desenvolvimento da Polycast SP802C teve uma equivalência satisfatória com a do alumínio, porém não teve uma correspondência mais satisfatória devido à perda de volume inicial acentuada;
- A partir de estudos e aplicações em indústrias de fundição da região foi concluído que utilizar modelos impressos em 3D no processo de fundição em areia verde é um processo que melhora os acabamentos das peças quando tratado de forma correta;
- Com a aplicação real dos modelos impressos em SP802C e ABS, obteve-se uma melhora em relação à redução de rebarbas, por consequência disso melhorou-se o tempo de produção das peças fundidas;
- Foi obtido o custo de fabricação do modelo impresso, o comparativo mostrou que a redução do custo de fabricação dos modelos impressos chega a 8% do valor em modelos simples, percentual que tende a aumentar com modelos elaborados e geometrias complexas.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. N.; DROZDA, F. O;. **Evaluation of the wear of parts produced by additive manufacture FDM**. Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 5, n. 12, p. 32099-32110, dec. 2019. ISSN 2525-8761
- SCHUBERT, C. *et al.* **Innovations in 3D printing: a 3D overview from optics to organs**. Engineer Department, University of Utah. Salt Lake City. Utah. USA. 2013.
- PASSINI, A. **Estudo de Caso Para o Cálculo dos Sistemas de Alimentação e Enchimento em Moldes de Fundição**. Monografia de graduação, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis. SC. Brasil. 2005. 69 p.
- SILVA, E. M. **Os Pilares Tecnológicos da Indústria 4.0**. Revista Ferramental, Editora Gravo Ltda., Joinville, SC, Brasil, 2018, pp. 14-16 (julho-agosto).
- TAMEGA, F. **Fundição e Processos Siderúrgicos**. Editora Educacional S.A. Londrina. PR. Brasil. 2017. 200p. ISBN 978-85-8482-818-0
- LIMA, V.T. **Fundição**. Processos Mecânicos e Metalúrgicos de Fabricação, Rio Verde, FESURV – Universidade de Rio Verde. 2007.
- BOMBANA, G. A., Assad, N., Coelho, T. M., 2017. **Produção de Modelos Impressos em 3D para Fabricação de Moldes de Fundição do Alumínio**. Anais do V Simpósio de Engenharia de Produção - SIMEP 2017 - ISSN: 2318-9258
- GRELLMANN, D. A. **Utilização das tecnologias de estereolitografia e micro fusão para aplicações em prototipagem rápida e ferramental rápido**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis-SC, Brasil. 2001.
- CATÁLOGO: SP802C TECHNICAL DATA SHEET. Polymaker Industrial. New York. USA. Janeiro. 2018. 2p.
- ASTM G65-16. **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. West Conshohocken. Pennsylvania. 2016.
- ASTM G105-16. **Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests**. West Conshohocken, Pennsylvania, 2016.
- BALL, A. **The mechanisms of wear, and the performance of engineering materials**. Vol. 86. n. 1. Ed. J.S. Afr. Inst. Min. Metall. 1986. 1-13p.
- STOETERAU, R. L. et al. **Tribologia – Apostila de Graduação**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Departamento de Engenharia Mecânica. Florianópolis. SC. Brasil. 2004. p. 110-180.
- LEMM, J. D. *et al.* **The influence of surface hardness on the fretting wear of steel pairs - Its role in debris retention in the contact**. Tribology International, Vol. 81, 2015. pp 258-266. ISSN: 0301-679X.

HUTCHINGS, Ian M.; SHIPWAY, Phipip. **Friction and wear of engineering materials**. Ed. 2. Massachusetts: Butterworth–Heinemann. 2017. 412 p. ISBN 9780081009109.

ZUM GAHR, Karl-Heinz. **Microstructure and Wear of Materials**. 1 ed. Amsterdam: North Holland. 1987. 559 p. ISBN 9780444427540.

STRAFFELINI, Giovanni. **Friction and wear methodologies for design and control**. Vol. 1. New York: Springer. 2015. 283 p. ISBN 9783319359311.

TSCHIPTSCHIN, A, P. **Falhas por Desgaste: Análise de falhas III**. Universidade de São Paulo – USP. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2792745/mod_resource/content/2/Aula%203.pdf>. Acesso em: 12 de Março de 2019.

ARCHAD, J. F.; Contact and Rubbing of Flat Surface. **Journal of Applied Physics**. p. 981–988, 1953.

SILVA, Tiago Pinho. **Estudo dos efeitos de acumulação de dano por desgaste**. Monografia de graduação – Universidade de Coimbra. Coimbra. 2014. 50p.