

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL ATRAVÉS DE PREENCHIMENTO INTELIGENTE EM MANUFATURA ADITIVA POR FUSED FILAMENT FABRICATION (FFF)_

Congresso Brasileiro De Manufatura Aditiva, 1ª edição, de 30/11/2020 a 01/12/2020
ISBN dos Anais: 978-65-86861-62-4

SANTOS; Marcelo Otávio dos ¹, AURICCHIO; Paulo de Souza Chohfi ², CASTRO; Pedro Henrique Lara de ³, PEGINI; Víctor Ros ⁴, AVEDISSIAN; Nicholas Queiroz ⁵

RESUMO

Resumo. O objetivo desse trabalho foi desenvolver uma metodologia de otimização estrutural durante o preenchimento de peças no processo de manufatura aditiva por FFF, denominada Preenchimento Inteligente. Buscou-se otimizar a resistência da peça em estudo de acordo com as solicitações apenas mudando a estrutura do preenchimento, sem que houvesse a necessidade de trocar ou utilizar mais deposição de material para obter os resultados. Foram escolhidos quatro materiais para análise no software de CAE chamado MSC Digimat AM, específico para manufatura aditiva, considerando as tensões residuais, fusão entre camadas e preenchimento interno envolvidos no processo. A partir dos resultados computacionais, a mesma peça foi impressa com o preenchimento inteligente e com preenchimento padrão, e desta maneira foram comparadas por meio de testes mecânicos para cada material. Dessa maneira, foram obtidos resultados compatíveis com as análises computacionais, comprovando a eficiência do método de preenchimento desenvolvido, que permitiu uma melhora significativa na resistência mecânica da peça, mantendo a massa e a estrutura externa inalteradas.

Introdução

O advento da manufatura aditiva na sociedade moderna tem sido um tema de discussão cada vez mais recorrente, enquanto o uso desse método de manufatura tem sido um poderoso aliado aos métodos tradicionais de produção industrial, essa tecnologia também está sendo implementada para usos domésticos em uma proporção na qual leva-se a crer que terá um potencial para ser altamente disruptiva para o modelo de negócio atual (RAYNA; STRIUKOVA, 2015).

Devido à facilidade de produzir ampla diversidade de objetos, a impressão 3D pode ser utilizada para produzir desde protótipos e moldes até carros e casas. A *startup* americana Local Motors produziu o primeiro automóvel a partir da impressão 3D totalmente funcional, denominado *Strati*, o conversível elétrico de dois lugares chega a 65 km/h e possui autonomia de 193 quilômetros, foi construído após 44 horas seguidas de impressão com um filamento constituído pelo polímero ABS e fibra de carbono (CONSIGLIO, 2014).

Os diversos tipos de manufatura aditiva são capazes de atender as variadas exigências de flexibilidade da manufatura avançada, com alto grau de personalização e solicitações estruturais (PORTO, 2016). Para o aprimoramento do comportamento mecânico dos produtos, a otimização estrutural objetiva a melhora do comportamento mecânico com base em modificações na estrutura do componente (BENDSOE; SIGMUND, 2003).

Os materiais disponíveis para a manufatura aditiva, apesar do avanço recente, ainda são escassos se comparado a quantidade de opções de matérias-primas disponíveis nos processos convencionais. Além disso, a disponibilidade de dados técnicos do material fica limitada a critério do produtor, sendo necessário recorrer ao contato direto com o fabricante ou a testes mecânicos seguindo normas de testes de materiais poliméricos (BUENO, 2012). Segundo Zhai, Lados e Lagoy (2014), a evolução da manufatura aditiva é a otimização de processos e materiais, desenvolvendo metodologias de produção de matéria prima e produto, a fim de aprimorar as propriedades mecânicas das matérias primas, assim como o comportamento mecânico dos produtos.

¹ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, marcelo.santos@maua.br

² Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, paulo.souza0708@gmail.com

³ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, pedrolara_castro@hotmail.com

⁴ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, victorrospegini@gmail.com

⁵ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, nicholas.avedissian@hexagon.com

Enquanto a prototipagem rápida era no início, devido ao custo, utilizada principalmente pelas grandes corporações, a diminuição progressiva do preço levou a uma adoção mais ampla. Hoje em dia, grande parte das impressoras 3D na faixa de U\$1,000 à U\$4,000 são destinadas a pequenas e médias empresas e empresários que utilizam prototipagem rápida. A qualidade da prototipagem também melhorou e, hoje em dia, as impressoras de gama superior, que custam a partir de U\$200 mil, são capazes de construir protótipos multi-material totalmente funcionais de uma só vez. (RAYNA; STRIUKOVA, 2015).

Atualmente existem milhares de impressoras sendo vendidas por startups em vários países do mundo. Um ponto de inflexão para difusão da tecnologia foi o RepRap Project de 2005, elaborado por Adrian Bowyer, professor de engenharia mecânica da universidade de Bath, na Inglaterra, em que de acordo com a RepRap Org (2020), foi a primeira máquina auto replicável disponível para a população geral, sua estrutura construtiva foi desenvolvida utilizando peças impressas pela própria máquina, desta forma, foi possível, pela primeira vez, criar uma impressora de baixo custo capaz de produzir componente plásticos variados e também componentes para sua própria forma construtiva. A iniciativa atraiu novos usuários que criaram uma comunidade, que por sua vez, contribuiu tanto no aprimoramento do software de impressões quanto na geometria do equipamento (DABAGUE, 2014).

O desenvolvimento de técnicas de otimização estrutural, como a otimização topológica e a crescente utilização de softwares comerciais têm permitido também grandes avanços em manufatura aditiva. A otimização topológica é um campo de pesquisa da engenharia que tem o objetivo de projetar a topologia ótima de estruturas segundo determinado conjunto de critérios de projeto, podendo ser a procura do menor peso da estrutura, ou a restrição a um dado valor limite de tensão, deslocamento ou de frequência do projeto (ALMEIDA; SIMONETTI; NEVES, 2014).

O método de otimização topológica padrão consiste primeiramente na definição do domínio físico da peça que deverá ser analisada, definindo onde estarão localizadas as forças solicitantes e as restrições. Após isso é realizado o modelamento da estrutura em software CAE, para discretização do elemento em malha de elementos finitos. Para o terceiro passo é utilizado um software de otimização topológica, sendo realizada a análise da melhor distribuição de material para atender os objetivos da estrutura. Nesse passo pode ocorrer um fenômeno denominado tabuleiro de xadrez, que consiste no posicionamento alternado de material e espaço vazio, sendo necessário analisar o resultado da otimização topológica para ver se é possível fabricar o produto ou se deve ser mudado os parâmetros da análise para evitar o acontecimento do fenômeno. A quarta etapa refere-se a análise da peça otimizada no software para confirmar se a nova estrutura suporta os esforços necessários. A última etapa é a fabricação da peça para análise experimental do novo produto (MORIGUCHI; ALMEIDA, 2018).

A utilização da manufatura aditiva pela sociedade contemporânea é composta principalmente para usos em prototipagem industrial e produtos de baixa responsabilidade, porém pode-se observar que existe uma tendência no uso de impressoras 3D para inovação e melhorias na eficiência do setor industrial e corporativo. Considerando a tendência mundial para o avanço da manufatura aditiva nos modelos de negócio futuros, este trabalho pretende criar uma metodologia que permita o uso de impressoras para novas áreas onde as vantagens de imprimir sejam combinadas à resistência mecânica otimizada, obtendo peças complexas de maneira rápida, mas que também sejam viáveis ao funcionamento direto de mecanismos de responsabilidade estrutural.

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um método de aprimoramento do comportamento mecânico de componentes obtidos por manufatura aditiva, através da otimização estrutural do seu preenchimento interno, buscando assim, melhorar a resistência mecânica do componente otimizado em relação ao impresso de maneira convencional mantendo sua massa.

Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento da metodologia de otimização por preenchimento inteligente, foi realizada uma adaptação do conceito de otimização topológica, integrando os conceitos de preenchimento já difundidos na literatura para uso em componentes produzidos por impressoras 3D.

A otimização por preenchimento inteligente consiste na redistribuição do material em um domínio pré-definido pela topologia otimizada da estrutura buscando maximizar as propriedades mecânicas finais da peça em função das solicitações de trabalho. A utilização de softwares de elementos finitos para análise dos esforços, combinado ao estudo das propriedades mecânicas dos materiais impressos, possibilita quantificar e localizar qual parte do domínio físico que será necessário trabalhar com mais ou menos material.

Buscando atingir os objetivos e resultados esperados desse trabalho, faz-se necessário que sejam definidas as etapas a seguir:

- Definição da geometria que será estudada;
- As condições de contorno consideradas nas simulações de topologia e estruturais dos métodos convencionais e otimizados de impressão;
- Criação dos materiais através de propriedades mecânicas conhecidas;
- Estratégias de impressão adotadas para cada material no método convencional;

¹ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, marcelo.santos@maua.br

² Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, paulo.souza0708@gmail.com

³ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, pedrolara_castro@hotmail.com

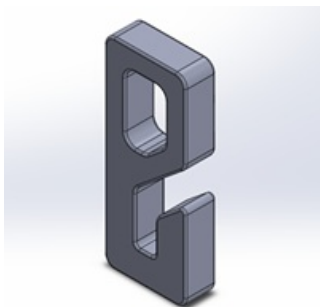
⁴ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, victorrospegini@gmail.com

⁵ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, nicholas.avedissian@hexagon.com

- Obtenção de uma topologia otimizada da geometria escolhida;
- Determinação da estratégia de impressão do preenchimento inteligente;
- Obter e discutir os resultados simulados de ambas as estratégias;

Ao passo que o trabalho propõe o desenvolvimento de um método de otimização e não o estudo de um componente complexo em que as variáveis são de difícil controle, o conceito empregado na escolha e concepção de uma geometria em forma de gancho (Fig. 1), chamada peça teste, é de ser uma peça estrutural com geometria simples e comportamento mecânico previsível, que no momento de manufatura aditiva seja de fácil orientação e posicionamento na mesa e que permita obter resultados rápidos e confiáveis na simulação topológica.

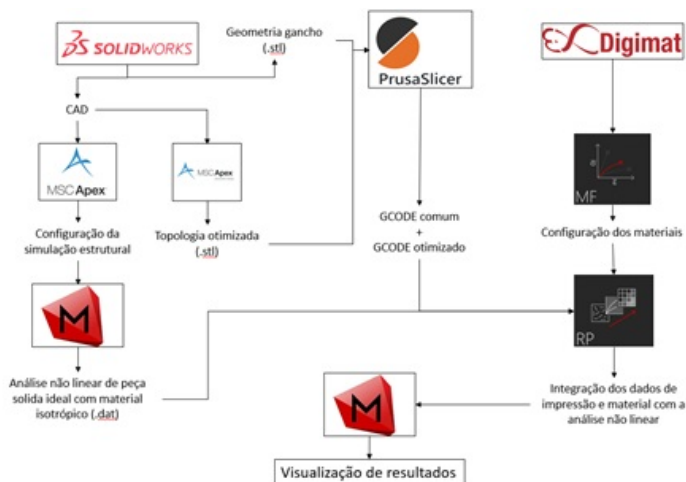
Figura 1 – Vista isométrica da geometria da peça teste



A peça teste da Figura 1 tem as seguintes dimensões: altura de 100 mm, largura de 40 mm e espessura de 15 mm. Essas dimensões foram padronizadas a fim de obter um corpo de prova com tempo de impressão reduzido, otimizando o uso da mesa de impressão para maximizar o volume de peças impressas para realização de testes.

Para melhor compreensão da metodologia de simulações aplicada, segue um fluxograma ilustrando o processo de simulações realizados (Fig. 2).

Figura 2 – Fluxograma do processo de simulação



O ponto de partida para o desenvolvimento do projeto é a geometria, para tal, usou-se o SolidWorks para gerar a peça virtual e exportar para duas finalidades diferentes. A primeira é a geometria exportada na extensão “.STL” que será destinada para o *Prusa Slicer*, Software fatiador que gera o caminho de impressão através de um modelo 3D. A segunda finalidade é a exportação para o *MSC Apex*, um ambiente CAE unificado para desenvolvimento de produtos virtuais e dentro da interface do Software existem duas etapas que devem ser realizadas, a primeira etapa é uma simulação de topologia estática através do módulo “*Generative Design*”, esse tem a função de identificar as regiões que precisam de material e que efetivamente foram otimizadas para a carga proposta, sua

¹ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, marcelo.santos@maua.br
² Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, paulo.souza0708@gmail.com
³ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, pedrolara_castro@hotmail.com
⁴ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, victorrospagini@gmail.com
⁵ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, nicholas.avedissian@hexagon.com

função é gerar a geometria que mais pra frente será utilizada como preenchimento inteligente. A segunda etapa é configurar a simulação estrutural que será utilizada para todos os estudos propostos, porém não é resolvido dentro dessa interface, essa configuração das condições de contorno é utilizada pelo Software subsequente, o MSC Marc.

O MSC Marc possui mais precisão e conta com a tecnologia de solucionador não linear FEA, como o ensaio e análise proposto pelo trabalho era compreender e analisar o comportamento de peças impressas como um todo, incluindo a região elástica e plástica da peça de confiança adotada, faz-se necessário simular esforços na geometria até a ruptura entrando assim em um regime não linear de simulação. Para que seja possível a integração com as particularidades do processo de manufatura aditiva, primeiro soluciona-se a geometria em uma situação não linear, porém com uma peça sólida ideal e material isotrópico e, posteriormente, é recalculado integrando o material, a estrutura de preenchimento e o processo de impressão.

Em paralelo com a primeira etapa do uso do MSC Marc, deve-se gerar através do Prusa Slicer os arquivos que determinam o caminho de impressão, que possuem extensão “.GCODE”. Nessa etapa é onde ocorre as estratégias de impressão e as condições de processamento discutidas na revisão bibliográfica. Esses arquivos serão usados no mesmo processo de integração já comentado anteriormente para a simulação não linear.

Para finalizar, o uso do principal software, o Digimat, que possui uma metodologia que as ferramentas clássicas de projeto não conseguem descrever com precisão, o comportamento local do material fabricado por manufatura aditiva, sendo um material composto ou não, se integram perfeitamente ao processo atual da FEA através das ferramentas Digimat, fazendo a ponte entre o processo de fabricação e a análise estrutural, isso leva à redução de fatores de segurança e aumento da credibilidade em peças de confiança em um projeto que utiliza desses materiais.

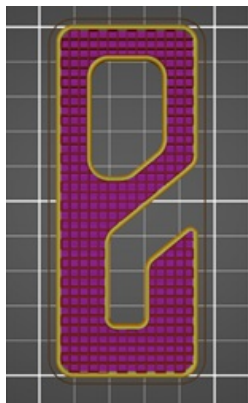
Porém, há necessidade de se criar o arquivo que descreve o material que deseja simular através do módulo MF do Digimat, uma vez que a biblioteca da licença obtida não é muito ampla no quesito de materiais exclusivos para manufatura polimérica, fez-se necessidade de modelá-los para integrar no último módulo, o RP.

O RP é responsável por integrar a simulação prévia realizada pelo Marc com os dados de material (MF) e de fabricação (GCODE). E assim recalcula a simulação prévia, realizada com uma peça sólida, para coletar os resultados considerando os parâmetros e características referentes à manufatura aditiva.

Para que exista parâmetros de comparação entre a metodologia convencional de impressão e a otimizada, foram impressos corpos de prova com a mesma massa, porém aplicando os diferentes métodos propostos de impressão. Para isso foram produzidos corpos de prova conforme citados nas Figuras 3 à 6:

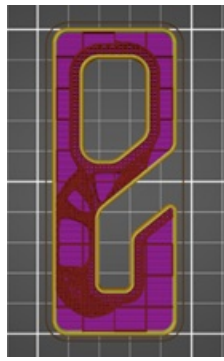
- Peça teste de 24 gramas com preenchimento convencional 30% (Fig. 3).

Figura 3: Preenchimento de 30% na vista do Fatiador *Prusa Slicer*



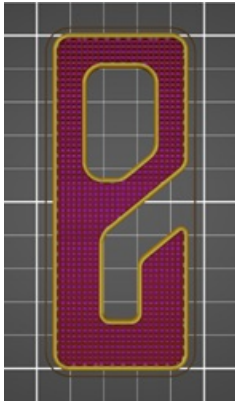
- Peça teste de 24 gramas com preenchimento convencional 8% e otimizado de 61% (Fig. 4).

Figura 4: Preenchimento de 8 e 61% na vista do Fatiador *Prusa Slicer*



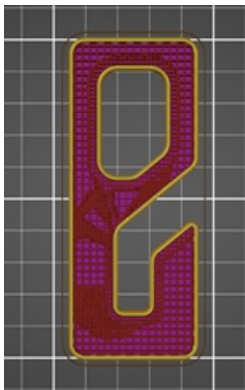
- Peça teste com 31 gramas com preenchimento convencional 50% (Fig. 5).

Figura 5: Preenchimento de 50% na vista do Fatiador *Prusa Slicer*



- Peça teste com 31 gramas com preenchimento convencional de 36% e otimizado de 60% (Fig. 6).

Figura 6: Preenchimento de 36 e 60% na vista do Fatiador *Prusa Slicer*



Todos os ensaios experimentais e simulações foram realizados utilizando o material ABS como referência, com 40 MPa de resistência a tração e $1,04 \text{ g/cm}^3$ de densidade, por ser muito utilizado na indústria e de fácil acesso na manufatura aditiva, pois o mesmo apresenta condições para impressão pouco complexas e boa repetibilidade de resultados.

Com o objetivo de validar a metodologia computacional, e determinar se o preenchimento inteligente condiz na prática com o estimado pela simulação, foram executados testes de tração até a ruptura e testes não destrutivos para medição de deformações localizadas em pontos críticos da peça teste através da extensometria elétrica. Ambos os testes seguem as normas para polímeros descritas pela ABNT e foram executados nos laboratórios do Instituto Mauá de Tecnologia seguindo procedimentos e normas internas, para que assim haja confiabilidade nos resultados obtidos.

Para o teste de tração, foi executado esforço solicitante até a ruptura com uma taxa de avanço de 100 mm/min, valor definido a partir da força de ruptura esperada na simulação computacional, para que assim haja coerência no resultado obtido sem a interferência de movimentos inerciais, que

¹ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, marcelo.santos@maua.br
² Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, paulo.souza0708@gmail.com
³ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, pedrolara_castro@hotmail.com
⁴ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, victorrospagini@gmail.com
⁵ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, nicholas.avedissian@hexagon.com

podem influenciar em testes com taxa de avanço muito alta em relação a força que ocorre a falha do material dos corpos de prova. A fixação foi feita a partir de cabos de aço, como visto na Figura 7.

Figura 7: Corpo de prova fixado na máquina de tração



O teste de extensometria foi realizado para medir a deformação localizada ocasionada quando a peça é submetida a esforços de tração. Para obtenção dos resultados os corpos de prova foram solicitados por uma massa de 12 kg e foram obtidos a partir de um extensômetro elétrico unidirecional PA-xx-250BA-120L da fabricante Excel, colocado na região crítica da peça, conforme analisado na simulação computacional na qual demonstra a maior tensão ocorrendo nesta região e comprovado pelo teste de tração como a seção de falha da peça. O equipamento utilizado para aquisição dos resultados de micro deformações foi o indicador de deformações P3 da fabricante Micro-Measurements (Fig. 8).

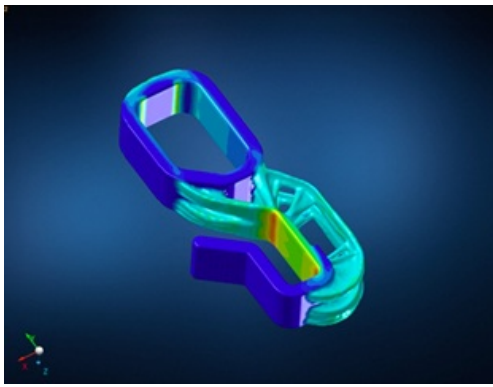
Figura 8: Corpo de prova fixado na máquina de tração



Resultados e Discussões

A primeira simulação realizada foi a de otimização da topologia através do “Generative Desing” visando maximizar a rigidez mantendo por volta de 25% da massa original, sendo as condições de fixação e de força atuante iguais as das demais simulações apresentadas no trabalho, dessa forma, a geometria obtida é mostrada na Figura 9.

Figura 9: Resultado obtido pela otimização topológica da peça teste



Essa geometria foi impressa com o propósito de visualização e compreensão do comportamento estrutural, sendo então utilizada como modificador de preenchimento na peça original apenas.

Os corpos de prova da peça teste foram sempre impressos sendo quatro peças por lote de operação, orientadas conforme mostra a Figura 10.

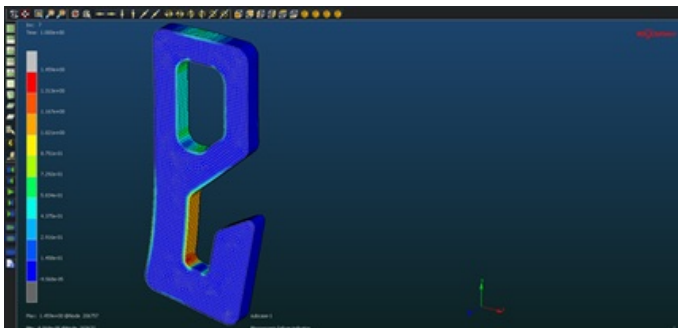
Figura 10: Lote de peças testes sendo impressas



A simulação realizada foi do tipo não linear até a falha, onde há a necessidade de inserir uma força como condição de fim de iterações nos cálculos. A simulação apresentou sete iterações dentro do modelo atribuído, e para se determinar qual foi a força real simulada que gerou a falha, o software apresenta o resultado de indicador de falha, esse sendo um coeficiente que divide a força aplicada.

Para a peça teste com 30% de preenchimento, obteve-se indicador de falha 1,459, como visto na Figura 11.

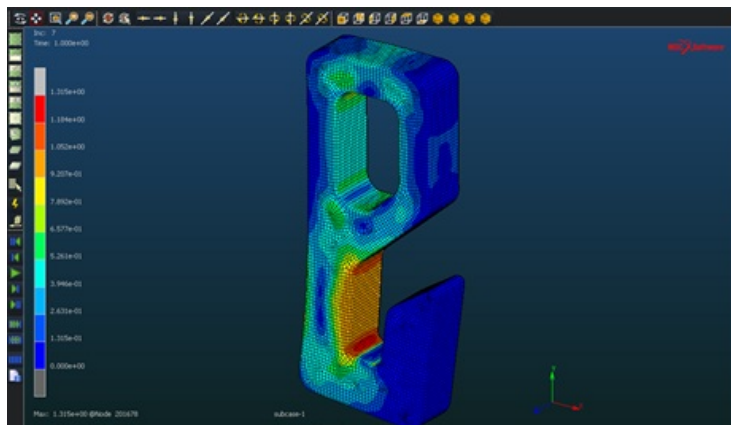
Figura 11: Visualização do indicador de falha no software MSC Marc – teste 1



Para a peça teste otimizada com 8% e 61% obteve-se indicador de falha de 1,315, conforme indicado na Figura 12.

¹ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, marcelo.santos@maua.br
² Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, paulo.souza0708@gmail.com
³ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, pedrolara_castro@hotmail.com
⁴ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, victorrospagini@gmail.com
⁵ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, nicholas.avedissian@hexagon.com

Figura 12: Visualização do indicador de falha no software MSC Marc – teste 2



Desta forma, para uma força aplicada de 1250N dividido pelo indicador de falha obtido para os modelos simulados acima (Fig. 11 e Fig. 12), os resultados em comparação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Comparativo de desempenho estrutural simulado

	ABS normal	ABS otimizado	ABS normal	ABS otimiza
Tipo de preenchimento (-)	grade	grade	grade	grade
Preenchimento (%)	50	36	30	8
Preenchimento otimizado (%)	0	60	0	61
altura de camada (mm)	0,2	0,2	0,2	0,2
camada superior (unid)	5	5	5	5
camada inferior (Unid)	5	5	5	5
Contorno (unid)	3	3	3	3
tempo de impressão (h)	2h15	2h43	1h51	2h14
massa total (g)	31,68	31,62	24,43	24,43
força de falha - simulação	-	-	856,751	950,570

Os testes experimentais de tração nas peças testes impressas apresentaram resultados significativos mediante a melhora das capacidades mecânicas da peça, como podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2: Comparativo de desempenho estrutural experimental

	ABS normal	ABS otimizado	ABS normal	ABS otimi
Tipo de preenchimento (-)	grade	grade	grade	grade
Preenchimento (%)	50	36	30	8
Preenchimento otimizado (%)	0	60	0	61
altura de camada (mm)	0,2	0,2	0,2	0,2
camada superior (unid)	5	5	5	5
camada inferior (unid)	5	5	5	5
Contorno (unid)	3	3	3	3
tempo de impressão (h)	2h15	2h43	1h51	2h14
massa total (g)	31,68	31,62	24,43	24,43
força de falha - teste (N)	871,660	1084,035	602,3	962,46

¹ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, marcelo.santos@maua.br

² Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, paulo.souza0708@gmail.com

³ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, pedrolara_castro@hotmail.com

⁴ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, victorrospegini@gmail.com

⁵ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, nicholas.avedissian@hexagon.com

Analisando os resultados obtidos e apresentados nas Tabelas 1 e 2, verifica-se que a metodologia apresentou-se promissora, uma vez que as simulações condizem com os resultados obtidos na prática, apresentando uma variação média de 21,75% de diferença entre a prática e o simulado.

Além disso, para as peças de massa de 31g, houve uma melhora de 24,36% e entre as peças de 24g houve uma melhora de 59,79% na resistência mecânica da peça, conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3: Comparativo de desempenho estrutural total

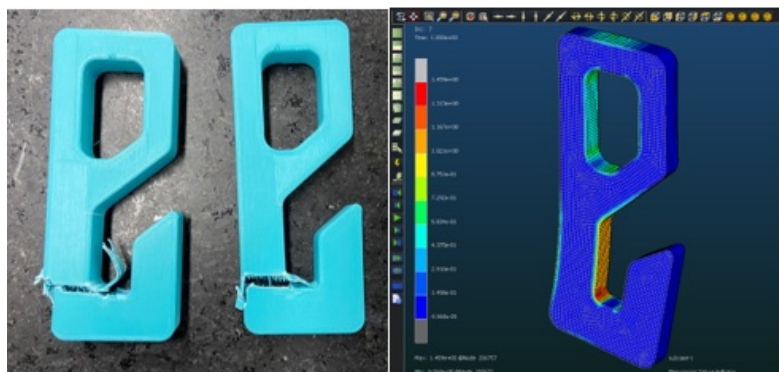
	ABS normal	ABS otimizado	ABS normal	ABS otimi
Tipo de preenchimento (-)	grade	grade	grade	grade
Preenchimento (%)	50	36	30	8
Preenchimento otimizado (%)	0	60	0	61
massa total (g)	31,68	31,62	24,43	24,43
força de falha - simulação	-	-	856,751	950,570
força de falha - teste (N)	871,660	1084,035	602,3	962,46
Ganho obtido - Simulação (%)	-	-	10,95%	-
Ganho Obtido - Ensaio (%)	24,36%	-	59,80%	-

Acima disso, houve o resultado de que a peça sem otimização de 31g apresenta força necessária para ruptura (871,66 N) menor que a peça otimizada de 24,43g (962,46N), sendo assim, uma redução de 22,89% na massa e uma melhora de 10,42% na força de ruptura obtida através do teste de tração.

Conclusões

Analisando os resultados obtidos, pode-se dizer que um dos fatores que indicam sucesso nas condições de contorno adotadas na simulação é que a simulação apresentou o indicador de falha mais crítico na mesma região que ocorreu as rupturas durante os ensaios experimentais, conforme mostra a Figura 13.

Figura 13: Comparação da região de falha experimental com região de falha na peça simulada



Verificou-se também que quanto maior o preenchimento, mais assertiva é a simulação, ao passo que para a peça que apresentava a região otimizada com preenchimento de 61% houve erro de aproximadamente 2% entre o simulado e o ensaiado, porém, para a peça de preenchimento baixo (30%) o erro entre a simulação (865,75N) e o ensaio (602,30N) foi de 43,74%, isso pode se dever por alguns fatores.

Observa-se que a metodologia apresentou-se interessante financeiramente, uma vez que a peça otimizada com 24,43g apresentou aproximadamente 10% mais resistência que a peça impressão com 50% de preenchimento e sem otimização, além disso, foram impressas na mesma quantidade

¹ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, marcelo.santos@maua.br
² Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, paulo.souza0708@gmail.com
³ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, pedrolara_castro@hotmail.com
⁴ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, victorrospegini@gmail.com
⁵ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, nicholas.avedissian@hexagon.com

de tempo, ou seja, economizou material, obteve-se mais resistência e não diminuiu a capacidade produtiva de um lote de peças.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Mauá de Tecnologia pela disponibilização de Laboratórios e equipamentos, e à Empresa MSC Software pelo fornecimento de licenças dos softwares e suporte utilizados neste trabalho.

Referências

AHN, S. H.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K. **Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS**. Rapid Prototyping Journal, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 248-257, 2002.

ALMEIDA, V.S.; SIMONETTI, H.L.; NEVES, F. **Seleção de topologias ótimas de estruturas elásticas 2D com restrição de tensão**: via Smooth Evolutionary Structural Optimization. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, www.sciencedirect.com, p. 69776, 13 abr. 2014. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0213131514000182?token=6BBD11595A49FC37F5CE71ED3FF5C75D23908A74405B879D54F73F4716C755123E90176C823272EDC881FD7691EE189E>. Acesso em: 25 mar. 2020.

KENJI MORIGUCHI, Sergio; GIMENES, Renann. **Aplicação de técnicas de otimização topológica via software**. In: KENJI MORIGUCHI, Sergio; GIMENES, Renann. APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA VIA SOFTWARE. Orientador: Sergio Kenji Moriguchi. 2018. Iniciação Científica (Engenharia Mecânica) - Instituto Mauá de Tecnologia, [S. l.], 2018.

PORTO, Thomás Monteiro Sobrino. **Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3D e da sua aplicação na construção civil**, Rio de Janeiro/ PORTO, T. M. S. - Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2016.

SHAHRUBUDIN, N. et al. **An Overview on 3D Printing Technology: Technological Materials and applications**. Elsevier, Science Direct, p. 1286-1296, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919308169>. Acesso em: 30 out. 2020.

SIMONETTI, H.L.; ALMEIDA, V.S.; OLIVEIRA NETO, L. **A influência do peso próprio na otimização topológica de estruturas elásticas 2D** - via técnica numérica Smooth Evolutionary Structural Optimization (SESO). Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, www.sciencedirect.com, p. 2717280, 9 set. 2014. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0213131513000722?token=28BD6E7621C7CFE9354C1649C65B25D76798FE737901B42857AD02083F51C41920626CE1BA52494DC6B5B7262A5101AB>. Acesso em: 25 mar. 2020.

STRIUKOVA, Ludmila; RAYNA, Thierry. **From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation**. Technological Forecasting & Social Change, Science Direct, p. 214-224, 1 set. 2015. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: 25 mar. 2020.

SIGMUND, Ole; BENDSOE, Martin P. **TOPOLOGY optimization : theory, methods, and applications**. In: Topology optimisation : theory, methods, and applications. [S. l.: s. n.], 2003.

ZHAI, Yuwei; A. LADOS, Diana; LAGOY, Jane L. **Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation**. The Minerals, Metals & Materials Society, [s. l.], 11 mar. 2014. DOI 10.1007/s11837-014-0886-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-014-0886-2>. Acesso em: 29 out. 2020.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura aditiva FFF, otimização estrutural, preenchimento inteligente, simulação computacional.

¹ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, marcelo.santos@maua.br

² Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, paulo.souza0708@gmail.com

³ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, pedrolara_castro@hotmail.com

⁴ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, victorrospegini@gmail.com

⁵ Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, nicholas.avedissian@hexagon.com