

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Considerações sobre a utilização de manufatura aditiva (método FDM) na fabricação de componentes com requisito de estanqueidade

AUTORES:

João Facco de Andrade¹, Daniel Juchem Regner¹, Diego Tiburcio Fabre¹, Leonardo Sales¹, Alice Weza Fava Bilbao¹, Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto¹, Armando Albertazzi Gonçalves Júnior¹

INSTITUIÇÃO:

LABMETRO / EMC / Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

CONSIDERAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DE MANUFATURA ADITIVA (MÉTODO FDM) NA FABRICAÇÃO DE COMPONENTES COM REQUISITO DE ESTANQUEIDADE

Resumo

A utilização de manufatura aditiva via método FDM (*Fused Deposition Modeling*), a mais empregada em impressoras 3D comerciais, já conquistou um lugar de destaque no âmbito de inovação e desenvolvimento de produtos. A acessibilidade, flexibilidade e agilidade possibilitadas pela tecnologia de impressão 3D em seu presente estado da arte, fazem desse cativante processo um diferencial competitivo significativo. Seja na rápida obtenção de protótipos ou na composição de sistemas experimentais, a fabricação de componentes via manufatura aditiva traz ainda mais vantagens no contexto de projetos de P&D, onde mudanças e adaptações são constantes e necessárias ao progresso. No entanto, seja qual for o contexto de utilização, é preciso ponderar onde e quando o emprego de componentes fabricados via impressão 3D é tecnicamente viável. Tal viabilidade está atrelada tanto aos requisitos técnicos quanto ao grau de severidade de uma possível falha. Dentre os diversos requisitos existentes, a estanqueidade consiste em um requisito crítico no setor de petróleo e gás. Além dos diversos tipos de dutos de transporte e vasos de processamento e armazenagem, vários sistemas e equipamentos empregados na fabricação, monitoramento e inspeção contam com componentes onde a estanqueidade é um requisito crítico. O presente trabalho está imerso em um projeto intitulado “Veículo Operado Remotamente para Inspeção Submarina - VORIS” cujo objetivo geral é o desenvolvimento de um veículo de inspeção subaquático ao qual serão integrados quatro sistemas ópticos de medição 3D. O sistema será composto por um ROV (*Remotely Operated underwater Vehicle*) comercial onde serão integrados os sistemas ópticos em desenvolvimento. Dentre os equipamentos a serem embarcados estão câmeras, projetores e outros periféricos eletrônicos e ópticos os quais precisam ser protegidos por invólucros estanques. Peças fabricadas por manufatura aditiva via método FDM, tipicamente, não são estanques por conta de certas características do processo. Tais características foram descritas e diferentes abordagens para obtenção da estanqueidade foram analisadas, possibilitando a elaboração e compilação de considerações pertinentes. Tais considerações podem apoiar a seleção do método mais apropriado e a análise de viabilidade da impressão 3D em componentes com requisito de estanqueidade, tanto no contexto específico do projeto, quanto em outras áreas e projetos de pesquisa no setor de petróleo e gás.

Palavras-chave: estanqueidade, impermeabilidade, ROV, impressão 3D, FDM, FFF, *offshore*.

Abstract

The use of FDM (*Fused Deposition Modeling*) additive manufacturing, the most used in commercial 3D printers, has already gained a prominent place in the scope of innovation and product development. The accessibility, flexibility and agility made possible by 3D printing technology in its current state of the art, make this captivating process a significant competitive differentiator. Whether quickly obtaining prototypes or composing experimental systems, manufacturing components via additive manufacturing brings even more advantages in the context of R&D projects, where changes and adaptations are constant and necessary for progress. However, whatever the context of use, it is necessary to consider where and when the use of components manufactured via 3D printing is technically viable. Such feasibility is linked to both technical requirements and the degree of severity of a possible failure. Among the various existing requirements, tightness is a critical requirement in the oil and gas sector. In

addition to the different types of transport pipelines and processing and storage vessels, various systems and equipment used in manufacturing, monitoring and inspection have components where tightness is a critical requirement. The present work is immersed in a project entitled “Remotely Operated Vehicle for Underwater Inspection - VORIS” whose general objective is the development of an underwater inspection vehicle to which four 3D optical measurement systems will be integrated. The system will consist of a commercial ROV (Remotely Operated underwater Vehicle) where the optical systems under development will be integrated. Among the equipment to be submerged are cameras, projectors and other electronic and optical peripherals which need to be protected by watertight enclosures. Parts manufactured by additive manufacturing via the FDM method are typically not watertight due to certain characteristics of the process. Such characteristics were described and different approaches to obtaining watertightness were analyzed, enabling the elaboration and compilation of relevant considerations. Such considerations can support the selection of the most appropriate method and the feasibility analysis of 3D printing in components with tightness requirements, both in the specific project context and in other areas and research projects in the oil and gas sector.

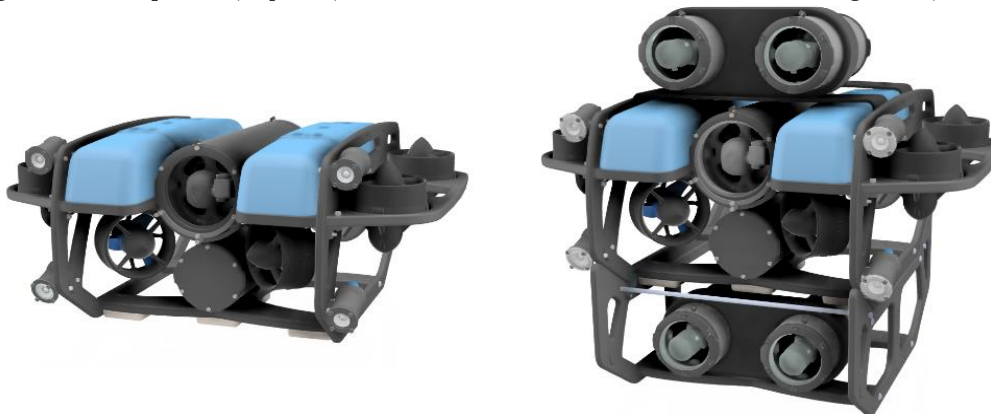
Keywords: tightness, watertight, ROV, 3D printing, FDM, FFF, offshore.

Introdução

A impressão 3D, mais especificamente via extrusão de material, foi inventada e patenteada em 1989 por S. Scott Crump, co-fundador da empresa Stratasys. No documento original consta que a invenção consiste em “[...] processo e aparelho por meio dos quais um objeto tridimensional pode ser criado em uma estação de trabalho de escritório de uma forma muito econômica em termos de tempo e custo. Prevê-se que a invenção será particularmente útil na fabricação de protótipos” e que “[...] os objetos tridimensionais são produzidos pela deposição de repetidas camadas de material” (CRUMP, 1989). O termo FDM (*Fused Deposition Modeling*), marca registrada da Stratasys, refere-se a mesma tecnologia associada ao termo de uso irrestrito FFF (*Fused Filament Fabrication*). Tal tecnologia integra o grupo de processos de manufatura aditiva, que engloba diversas técnicas e materiais. A Stratasys vem, desde sua fundação, desenvolvendo e comercializando máquinas e serviços de impressão 3D profissionais com foco principal na indústria. Antes da patente de invenção de S. Scott Crump expirar em 2009, um importante projeto teve um marco importante em 2008, quando a RepRap, uma impressora 3D de baixo custo, *open-source* e replicável produziu o seu primeiro “filho” (JONES, 2011). Dois anos e meio depois foi estimado que existiam cerca de 4500 máquinas derivadas ao redor do mundo (JONES, 2011). Esses dois marcos (difusão da tecnologia através de equipamentos “faça-você-mesmo” e o fim da proteção intelectual da patente citada) são considerados determinantes na história e evolução das impressoras 3D como conhecemos hoje (ULTIMAKER, 2023). A oferta da tecnologia que teve início de forma centralizada em apenas uma empresa, deu lugar a uma pluralidade de desenvolvedores e fornecedores espalhados por todo o mundo. Impressoras sofisticadas restritas apenas para usuários profissionais (alto investimento) passaram a dividir espaço com impressoras comerciais de construção simplificada e recursos mais enxutos, as quais alavancaram o mercado por meio de valores acessíveis e facilidade de uso. Tal disponibilidade e facilidade foram também fundamentais para a popularização e difusão dessa versátil tecnologia nos mais variados setores. Dentro do setor de ensino, na UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, em sua condição de ICT (Instituição Científica, Tecnológica e de Inovação), são realizados diversos projetos de pesquisa.

O presente trabalho está imerso em um projeto intitulado “Veículo Operado Remotamente para Inspeção Submarina - VORIS” sendo executado no LABMETRO – Laboratório de Metrologia e Automação, que faz parte do departamento de Engenharia Mecânica. Na Figura 1 é apresentada uma modelagem parcial do sistema em desenvolvimento com base no BlueROV2 da Blue Robotics.

Figura 1 – ROV padrão (esquerda) e ROV com dois sistemas de visão estéreo integrados (direita).



Fonte: Dos autores.

O projeto consiste no desenvolvimento de quatro sistemas ópticos de medição 3D a serem integrados em um ROV (*remotely operated underwater vehicle*) visando operações de inspeção subaquática. O projeto é financiado pela FINEP e tem como objetivo geral o desenvolvimento tecnológico e inovação em tecnologias *offshore*, em especial, para aplicações *subsea* no setor de petróleo e gás. Nessa primeira interação estão previstos testes e a validação do sistema em uma piscina de ensaios experimentais com profundidade de 6 metros. Dentre os equipamentos a serem integrados ao ROV estão câmeras, lentes, projetores e outros periféricos eletrônicos e ópticos os quais precisam ser protegidos por invólucros estanques. É oportuno, tratando-se de um projeto de pesquisa, variar parâmetros e componentes para verificar os respectivos impactos nos resultados experimentais. No caso de sistemas de medição 3D baseados em visão estéreo, os quais estão em desenvolvimento no projeto, diversos parâmetros geométricos e ópticos influenciam na capacidade e qualidade das medições. A complexidade associada a um sistema de medição que deverá operar submerso é ainda maior, sendo salutar a realização de múltiplas interações no desenvolvimento e validação dos sistemas. A aquisição de invólucros adequados ou mesmo a fabricação de peças para invólucros personalizados mediante processos convencionais como a usinagem, por exemplo, demandam alto investimento de tempo e recursos financeiros. Peças feitas via impressão 3D, em contrapartida, podem ser fabricadas rapidamente e com baixo dispêndio de recursos. Dessa forma, a fase experimental do projeto tende a ganhar uma dinâmica aprimorada potencializando, por exemplo, a exploração de ideias antes consideradas inviáveis por conta do tempo e custo. Com isso o potencial de inovação é favorecido e os recursos são utilizados de modo mais assertivo, aplicando os processos de fabricação convencionais principalmente nas fases finais do projeto após a devida evolução e validação dos protótipos intermediários. No entanto, mesmo diante dos vários benefícios e vantagens associados ao uso dessa tecnologia, é necessário ponderar onde e quando o emprego de componentes fabricados via impressão 3D é tecnicamente viável. Tal viabilidade está atrelada tanto aos requisitos técnicos quanto ao grau de severidade de uma possível falha. No presente contexto em que existe o requisito de estanqueidade, a falha é caracterizada quando uma quantidade significativa de água entra nos invólucros, o que pode, no pior caso, comprometer a integridade dos componentes eletrônicos e ópticos embarcados.

Apesar da utilização de impressão 3D em projetos de pesquisa não ser algo recente (OLIVEIRA, 2008), verifica-se, com base no número de publicações relacionadas (SAGGIOMO, 2020 e WICKRAMASINGHE *et al.*, 2020), que a partir de 2013-2014 essa técnica tem ganhado muito espaço no âmbito científico. Dentre as publicações verifica-se uma profusão de aplicações do método FDM na fabricação de peças e sistemas com requisito de estanqueidade em contextos análogos ao do presente trabalho (FERNANDES, 2016; MENDONÇA, TELES e MENDES, 2020; WRIGHT *et al.*, 2020; TAN e CHEN, 2020; PIRES, 2021). O conceito de estanqueidade é utilizado em diversas áreas (mecânica, civil, química, ...) e, por esse motivo, possui definições ligeiramente distintas e com diferentes níveis de profundidade de acordo com o âmbito de aplicação. No âmbito industrial, diretamente associado à área de conhecimento da engenharia mecânica, cenários típicos onde estanqueidade é necessária compreendem: armazenagem e transporte de fluidos; processos produtivos onde fluidos compõem a matéria-prima, produtos ou subprodutos; sistemas onde o fluido é parte integrante de seu funcionamento (lubrificação, troca térmica, mudança de fase, pneumática, ...); proteção de um sistema (ou parte dele) de fluidos presentes no ambiente de operação. Considera-se nesses casos e no presente trabalho que um sistema é estanque se, quando submetido às condições de operação para o qual foi projetado, for capaz de impedir uma vazão significativa de um determinado fluido entre duas regiões. Para que um sistema seja estanque duas condições precisam ser satisfeitas: as peças que compõem as fronteiras devem ser compostas de materiais suficientemente impermeáveis ao fluido em questão; a interface entre as peças deve ser tal que não permita vazão significativa do fluido através dos caminhos livres eventualmente ou inevitavelmente presentes (macro ou microscópicos). Peças fabricadas por manufatura aditiva via método FDM, tipicamente, não satisfazem estas condições a menos que técnicas especiais sejam utilizadas.

Metodologia

Para a elaboração de considerações sobre a utilização da impressão 3D na fabricação de componentes com requisito de estanqueidade, foi realizada uma breve descrição das características fundamentais do processo de impressão e vedação. Na sequência foi realizada uma pesquisa seguida de uma avaliação sobre as principais técnicas aplicáveis resultando na compilação das considerações pertinentes. Com o intuito de delimitar a abrangência do trabalho e potencializar a utilização da impressão 3D no projeto de pesquisa dentro do qual esse trabalho está situado, optou-se por maior foco no cenário de utilização onde é necessário proteger um sistema (ou parte dele) de fluidos presentes no ambiente de operação. Tal cenário, dentre aqueles citados na introdução, é o mais propício para a utilização de peças impressas, tanto por conta da menor severidade dos requisitos quanto pelo menor porte das peças quando comparado aos demais. A pesquisa bibliográfica foi realizada buscando trabalhos contendo alguma menção do uso de manufatura aditiva via método FDM em contextos em que a estanqueidade é relevante, principalmente quando na constituição de invólucros. De forma complementar, visto que a condição de estanqueidade é diretamente associada à presença, quantidade e tipo de defeitos, foi realizada uma busca por trabalhos associados a técnicas e diretrizes para a redução e/ou eliminação de defeitos em peças impressas.

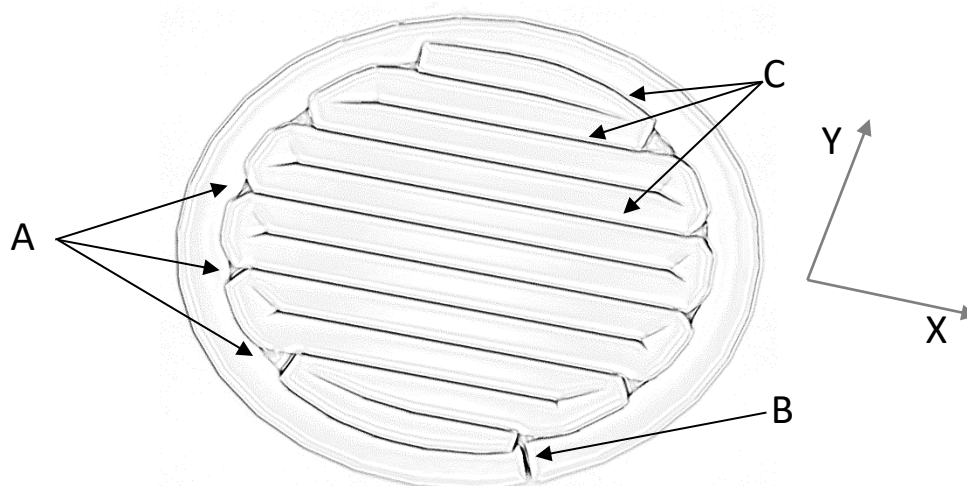
Resultados e Discussão

Conforme apresentado na introdução, as peças que compõem um sistema com requisito de estanqueidade devem impedir uma vazão significativa de fluido através de seu corpo e através das interfaces formadas com outras peças. Na sequência são apresentadas as características do processo de impressão 3D atrelados a cada uma das condições de estanqueidade estabelecidas.

Estanqueidade do corpo

Apesar da disponibilidade de materiais impermeáveis (ou suficientemente impermeáveis dependendo do fluido) para a fabricação via FDM, como os tradicionais PLA, ABS e PETG, características inerentes ao processo resultam em inúmeras interfaces em uma mesma peça. Isso ocorre ao passo que uma peça é formada por várias camadas empilhadas e, cada camada é formada por vários cordões (também chamados de trilhas ou linhas) adjacentes. Diferentemente de processos de soldagem (também aplicáveis em polímeros) onde são utilizados níveis mais altos de energia, o calor do material sendo adicionado na impressão 3D não é suficiente para, efetivamente, fundir o material base (cordões previamente depositados nesse caso). Tal fato resulta em ligações mais fracas, eventuais descontinuidades (geradas por oscilações na vazão instantânea de extrusão, por exemplo) e, fatalmente, em delaminações. Adicionalmente é gerado alto nível de anisotropia, de modo que a resistência da peça muda consideravelmente de acordo com a orientação dos esforços. Alguns trabalhos trazem alternativas para aumento da força de adesão entre as camadas, incluindo o uso, durante a extrusão, de maiores temperaturas no bico e mesa (ALIHEIDARI *et al.*, 2017), de vibração ultrassônica (ZHANG *et al.*, 2023) e aquecimento suplementar via laser (SABYROV *et al.*, 2020). Verifica-se uma relação de compromisso pois apesar da obtenção de ligações mais fortes quando utilizados maiores níveis de energia, existe menor controle sobre as dimensões e acabamento por conta da maior fluidez do material. Na maioria das aplicações ocorre preferência pelo acabamento e coesão dimensional em detrimento de uma maior integridade mecânica. Uma mesma peça pode ser composta por quantidades diferentes de camadas a depender do parâmetro “altura da camada”, sendo que valores maiores favorecem uma menor quantidade de interfaces. No entanto, menores alturas de camada, apesar do consequente maior número de interfaces, favorecem maior fidelidade geométrica em relação ao modelo e melhor coesão entre as camadas, conforme sugerido por Saniman *et al.* (2022). Além das inúmeras interfaces em uma mesma peça, as características do método FDM também tendem a gerar uma certa quantidade de lacunas e vazios a depender da estratégia de preenchimento e alguns parâmetros do processo. Tais parâmetros incluem, mas não se limitam a: altura da camada; largura do cordão; velocidade; temperaturas (do bico, da mesa e ambiente); fator de multiplicação da vazão de extrusão. Na Figura 2 é apresentada uma ilustração de uma estratégia de fabricação de uma camada em forma de disco via método FDM.

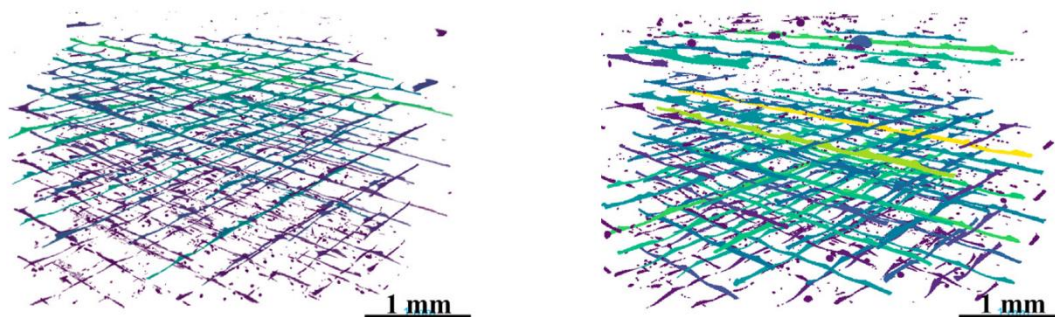
Figura 2 – Ilustração de uma camada impressa onde A, B e C representam algumas das posições com probabilidade de ocorrência de lacunas ou vazios.



Fonte: Dos autores.

A camada apresentada possui dois cordões, sendo um com trajetória circular que forma a casca externa e outro com trajetória em zigue-zague que forma o preenchimento “sólido” interno. As posições indicadas onde ocorre a inversão no sentido do preenchimento (A) assim como a descontinuidade entre o início e o fim do cordão da casca (B) caracterizam potenciais lacunas passantes (intracamada). Já nas fronteiras entre cordões adjacentes (C) existe uma tendência de formação de vales os quais, em geral, não são plenamente preenchidos pelos cordões da camada seguinte, potencializando assim a formação de vazios na forma de canais (intercamada). A existência, por si só, de descontinuidades, lacunas e canais não caracteriza a condição de permeabilidade a menos que exista: continuidade entre eles e as superfícies externas, formando um caminho livre ou uma rede com múltiplos caminhos; dimensões dos caminhos livres existentes suficientes para uma vazão significativa do fluido em questão. Dhakal *et al.* (2023) realizaram micro tomografias por raio-X em peças impressas com preenchimento “sólido” com diferentes parâmetros de impressão, possibilitando assim a quantificação e visualização dos vazios.

Figura 3 – Representação tridimensional resultante de micro tomografia por raio-X dos vazios gerados em peças impressas com diferentes parâmetros de velocidade (esquerda 20 mm/s, 2,67% de vazios e direita 50 mm/s resultando em 3,54% de vazios).



Fonte: Adaptado de Dhakal *et al.* (2023).

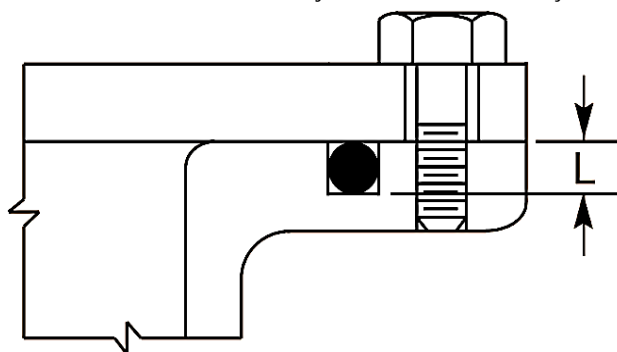
Estanqueidade da interface

Apesar da existência de casos em que sistemas com requisito de estanqueidade sejam compostos por peças únicas (boia, copo, vaso, ...), o mais comum em aplicações de engenharia é que existam duas ou mais peças (caixa e tampa, por exemplo). Desse modo é necessária atenção na estanqueidade da interface entre as peças, sendo que diversos elementos podem ser utilizados para promover a vedação de acordo com os requisitos do sistema. Tipicamente, um elemento flexível é inserido entre as duas peças para moldar-se entre os vales e cristas que compõem a rugosidade das superfícies, fechando ou reduzindo consideravelmente as dimensões dos caminhos livres. No caso de vedações estáticas, por exemplo, um dos elementos mais comumente utilizados são os anéis O-ring (onde o “O” refere-se ao formato da seção transversal do anel). Estes são comercializados com diferentes diâmetros, espessuras e materiais. Apesar da flexibilidade e variedade desses elementos, existe, de acordo com as características da aplicação, um valor de rugosidade limite até o qual é possível promover a vedação. A Parker, um proeminente fabricante de elementos de vedação, recomenda que em aplicações estáticas a rugosidade R_q (RMS) não ultrapasse $0,8 \mu\text{m}$ para líquidos e $0,4 \mu\text{m}$ para gases (PARKER, 2021). Em aplicações dinâmicas os requisitos são ainda mais severos, visto que além da estanqueidade o fator desgaste é crítico. Nessas aplicações a rugosidade recomendada é ainda menor e existe também um certo valor de dureza a ser atendido na superfície de deslizamento, visto que eventuais avarias na forma de riscos podem comprometer a vedação.

Por estes motivos, peças fabricadas via impressão 3D não são apropriadas para aplicações com vedação dinâmica. Wright *et al.* (2020) diante desse problema, implementaram um anel usinado de aço inoxidável colado na extremidade das peças impressas, de modo a prover uma superfície com as condições necessárias na interface de vedação, mesmo em uma condição dinâmica. Da Figura 2 é possível inferir, do ponto de vista da provável rugosidade da face superior do disco, valores distintos de acordo com a direção avaliada, sendo mínima na direção X e máxima na direção Y. Na base da peça a rugosidade tende a ficar similar à rugosidade da plataforma de impressão, variando pouco conforme a direção. Já nas laterais, considerando várias camadas empilhadas, a rugosidade tende a ser máxima na direção Z (altura da peça) e mínima na direção do vetor tangente ao perfil da peça contido no plano XY. Além da questão da rugosidade, as eventuais lacunas (passantes ou não) podem representar locais de vales demasiadamente profundos para o devido preenchimento com o elemento de vedação.

De forma complementar à rugosidade, as dimensões do alojamento do elemento de vedação devem atender certas tolerâncias para que a compressão do elemento fique dentro de sua faixa de operação. A tolerância está atrelada à espessura do elemento de vedação, de modo que quanto mais fino o elemento mais estreitas são as tolerâncias de seu alojamento. Para um anel O-ring de 1,78 mm de espessura em uma vedação de face, por exemplo, a recomendação do manual da Parker (2021) é que a profundidade L (conforme ilustrado na Figura 4) do alojamento fique entre 1,27 e 1,37 mm (permitindo 0,10 mm de variação). Já para uma espessura de anel de 5,33 mm, a profundidade deve ficar entre 3,86 e 4,11 mm (permitindo 0,25 mm de variação).

Figura 4 – Vista de detalhe do alojamento em uma vedação de face.



Fonte: Adaptado de Parker (2021).

A precisão dimensional de uma peça feita via impressão 3D depende de uma série de fatores, tais como: qualidade da impressora; propriedades do material utilizado (como o coeficiente de expansão térmica, por exemplo); geometria da peça; parâmetros de impressão; direção avaliada (no plano XY ou em Z). Em geral, uma parcela do erro dimensional da peça pode ser compensada (parte sistemática), possibilitando modificações no modelo e/ou no software fatiador para melhor coerência dimensional. A parcela do erro de natureza aleatória, por outro lado, é associada a flutuações inerentes ao processo, podendo estar atreladas à impressora, à matéria prima e ao ambiente de operação. Impressoras e filamentos de melhor qualidade assim como um melhor controle sobre o ambiente de operação, tendem a gerar resultados mais consistentes do ponto de vista da precisão dimensional. Pires (2021) precisou realizar diversas interações variando as dimensões do alojamento para a obtenção da estanqueidade em um conjunto de peças impressas. No entanto, como tentou utilizar o componente em uma aplicação com caráter dinâmico, acabou não obtendo êxito por conta do demasiado atrito gerado na interface de vedação, o que impossibilitou a correta movimentação do conjunto.

Pesquisa bibliográfica

A pesquisa realizada evidenciou a existência de diversas abordagens, métodos e diretrizes para o enfrentamento do problema da estanqueidade em peças impressas. A própria Stratasys (2014) elaborou e publicou um guia técnico apresentando uma comparação entre diferentes métodos de pós-processamento visando a selagem. Os métodos podem ser classificados em dois grandes grupos denominados no presente trabalho como pré-impressão e pós-impressão. Métodos classificados como de pré-impressão têm a prerrogativa de que é possível a obtenção da estanqueidade mediante a manipulação de um, ou mais, parâmetros de impressão de forma associada à correta seleção de estratégias de preenchimento e configurações do software fatiador. Já nos métodos classificados como de pós-impressão, é proposta a utilização de produtos e procedimentos capazes de conferir a propriedade de estanqueidade à peças impressas com parâmetros típicos. Os dois métodos mais representativos de cada grupo são apresentados na sequência, seguidos das respectivas análises e considerações.

Métodos de pré-impressão

Utilização de maior número de cascas e camadas sólidas - Essa diretriz é pertinente tanto para a estanqueidade de corpo quanto de interface, mas, por si só, não tende a garantir a estanqueidade. Do ponto de vista da estanqueidade de corpo, um número maior de cascas e camadas sólidas aumenta a probabilidade de que exista uma delas sem defeitos/lacunas e, de que os defeitos/lacunas existentes não se conectem. Mendonça (2019) testou quatro protótipos de válvulas com número de cascas variando entre 3 e 6, obtendo resultados estanques para 5 e 6 cascas. No entanto, dependendo das configurações escolhidas no software fatiador, é possível que exista o alinhamento dos pontos de provável existência de lacunas, como a posição de início e fim das cascas, por exemplo. Essa configuração é usualmente chamada de “posição da costura” e, por padrão, é definida como “alinhada” ao invés de “aleatória”, sendo esta última mais pertinente no tocante da estanqueidade. Em relação à estanqueidade de interface, um maior número de cascas e camadas sólidas permite um maior suporte e conseqüente rigidez da superfície externa contra a qual um elemento, como um anel O-ring, será pressionado. Isso é salutar pois, para que ocorra a vedação, a deformação deve ser no elemento de vedação, e não na peça.

Utilização de maior “multiplicador de extrusão” - Essa diretriz é pertinente para a obtenção da estanqueidade de corpo, mas tende a prejudicar a de interface. Do ponto de vista da estanqueidade de corpo, quanto maior o denominado “multiplicador de extrusão”, menor a probabilidade de existência de lacunas e vazios, visto que é adicionado mais material do que o calculado como ideal pelo software fatiador. Por outro lado, um provável excesso de material precisa se acomodar em algum lugar, de modo que são gerados ressaltos irregulares que tendem a comprometer o acabamento (consequentemente aumentando a rugosidade) e a precisão dimensional da peça, conforme observado por Gordeev *et al.* (2018) quando utilizados multiplicadores maiores que 1. No entanto, do ponto de vista da rugosidade, mesmo com a utilização um “multiplicador de extrusão” padrão não é trivial a obtenção da rugosidade recomendada para o assentamento do elemento de vedação, de modo que operações posteriores de acabamento podem ser inevitáveis.

Métodos de pós-impressão

Aplicação de resina epóxi - Esse procedimento é pertinente para a obtenção da estanqueidade de corpo mas não necessariamente a de interface. Nesse método uma mistura relativamente viscosa formada pela resina e o componente endurecedor, em uma proporção bem estabelecida, é aplicada sobre

a superfície por meio de um pincel de cerdas ou de espuma. Após um determinado tempo de cura ocorre o endurecimento e a consequente formação de uma camada sólida estanque sobre a superfície da peça. A espessura efetiva (da ordem de décimos de milímetro) e homogeneidade dessa camada, no entanto, dependem da destreza de quem realiza o procedimento e da complexidade geométrica da peça. Desse modo, apesar da rugosidade da superfície externa resultante ter uma tendência a ser bem menor do que a original, ocorrem variações dimensionais não uniformes, prejudicando a obtenção da estanqueidade de interface. Mireles *et al.* (2011) obtiveram bons resultados na manutenção de pequenas variações dimensionais aplicando diferentes produtos via infiltração a vácuo.

Aplicação de selante polimérico a base de água - Esse procedimento é pertinente tanto para a estanqueidade de corpo quanto de interface. Nesse método a peça recebe duas ou mais demãos aplicadas com pincel ou é imersa no produto, o qual consiste em um líquido de baixa viscosidade e alta capilaridade, capaz de alcançar defeitos e lacunas mais distantes da superfície. Após a secagem e um determinado tempo de cura ocorre o endurecimento e o consequente preenchimento de defeitos e lacunas. Adicionalmente, é formada uma fina camada (da ordem de milésimos de milímetro) sobre a superfície da peça, reduzindo a rugosidade, conforme avaliado por Zhu *et al.* (2015) em experimentos com revestimentos poliméricos a base de água. No entanto, por conta dessa fina camada decorrente da baixa viscosidade e a consequente evaporação de parte do produto durante a secagem, lacunas e defeitos mais grosseiros tendem a não ser preenchidos.

Conclusões

Diante da versatilidade provida por métodos de manufatura aditiva, em especial pela acessibilidade de impressoras tipo FDM, são claros os benefícios dessa tecnologia em projetos de pesquisa e desenvolvimento. No entanto, características inerentes ao processo, as quais foram descritas e ilustradas, demandam atenção em contextos de aplicação onde existe o requisito de estanqueidade. Tal requisito foi conceituado e desdobrado em duas componentes, a estanqueidade de corpo e a estanqueidade de interface, permitindo a consideração e ponderação de fatores determinantes em aplicações de engenharia. Dentre os possíveis métodos encontrados na literatura visando a obtenção da estanqueidade, foi proposta uma divisão em dois grupos, os métodos de pré-impressão e os de pós-impressão, sendo quatro deles apresentados e analisados. Métodos de pré-impressão requerem, além de múltiplas interações, maior conhecimento sobre os parâmetros de impressão e o respectivo domínio das opções e configurações no software fatiador. Os métodos de pós-impressão, por outro lado, requerem apenas o conhecimento básico necessário para a obtenção de peças isentas de defeitos grosseiros. Em contrapartida, a viabilidade e facilidade de aplicação dos métodos de pós-impressão dependem da acessibilidade a produtos de qualidade e características apropriadas. Convenientemente, existem resinas e selantes dedicados para aplicação em peças impressas como a resina XTC-3D, desenvolvida pela Smooth-on, e o selante Dichtol AM Hydro, desenvolvido pela Diamant Polymer. Seja qual for o método utilizado (ou combinação de métodos), é fundamental a realização de testes de validação conforme as diretrizes da norma pertinente e o contexto de operação prospectado.

Conforme o grau de severidade de uma possível falha, é recomendável a adoção de medidas adicionais para mitigar riscos. No projeto dentro do qual o presente trabalho está imerso, mesmo nos invólucros sem peças impressas, serão utilizados sensores possibilitando a imediata identificação de vazamentos e a consequente intervenção para preservar a integridade dos componentes embarcados em caso de falha.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a FINEP pelo apoio financeiro ao projeto VORIS, à bolsa de estudos do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI e ao Labmetro da UFSC pelo espaço fornecido para desenvolvimento de pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALIHEIDARI, Nahal. *et al.* **The impact of nozzle and bed temperatures on the fracture resistance of FDM printed materials.** SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring Conference, Oregon, Estados Unidos, 2017.

Comparison of Sealing Methods for FDM Materials. **Stratasys**, Eden Prairie, Minnesota, 2014. Disponível em: https://www.stratasys.com/siteassets/3dlc/higher-education/tag_fdm_sealing_en_1015_web.pdf?v=48f56f. Acesso em: 29 jul. 2024.

CRUMP, S. Scott. **Apparatus and method for creating three-dimensional objects.** Depositante: Stratasys, Inc, Minneapolis, Minn. US005121329A. Depósito: 30 out. 1989. Concessão: 9 jun. 1992. Disponível em: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/023701397/publication/US5121329A?q=pn%3DUS5121329A>. Acesso em: 29 jul. 2024.

DHAKAL, Nayan. *et al.* Impact of processing defects on microstructure, surface quality, and tribological performance in 3D printed polymers. **Journal of materials research and technology**, v. 23, p 1252-1272. ELSEVIER, 2023.

FERNANDES, Pedro Miguel de Castro. **Projeto e Construção de um Veleiro Autônomo, utilizando materiais compósitos, Impressão a 3D e Aprendizagem Máquina.** Dissertação (Mestrado em Ciências Militares Navais) – Escola Naval Afeite, Lisboa - Portugal, 2016.

GORDEEV, Evgeniy G.; GALUSHKO, Alexey S.; ANANIKOV, Valentine P. Improvement of quality of 3D printed objects by elimination of microscopic structural defects in fused deposition modeling. **PLOS ONE**, v. 13(6) e0198370. PLOS, 2018.

JONES, Rhys. *et al.* RepRap – the replicating rapid prototype. **Robotica**, v. 29, p 177–191. Cambridge University Press, 2011.

MENDONÇA, Emerson Coelho; TELES, Adams Soares; MENDES, Vilson Berilli. Desenvolvimento de um veículo submarino autônomo de baixo custo utilizando manufatura aditiva. **Revista Pesquisa Naval**, n. 32, p 10-16. Marinha do Brasil, 2020.

MENDONÇA, Thiago Macedo. **Projeto, construção e calibração de músculo pneumático artificial de McKibben.** Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

MIRELES, Jorge. *et al.* **Analysis of Sealing Methods for FDM-fabricated Parts**. 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011.

OLIVEIRA, Marcelo Fernandes de. **Aplicações da prototipagem rápida em projetos de Pesquisa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

Parker O-Ring Handbook ORD 5700. Parker Hannifin Corporation, Cleveland, Ohio, 2021. Disponível em: <https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/O-Ring-Division-Literature/ORD-5700.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2024.

PIRES, Ricardo Jorge Moreira Barbarroxa de Araújo. **Projeto SABUVIS II – Desenvolvimento do Projeto e Construção de um Protótipo de Veículo Não Tripulado de Subsuperfície**. Dissertação (Mestrado em Ciências Militares Navais) – Escola Naval Afeite, Lisboa - Portugal, 2021.

SABYROV, Nurbol. ABILGAZIYEV, Anuar. ALI, Md. Hazrat. Enhancing interlayer bonding strength of FDM 3D printing technology by diode laser-assisted system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 108, p 603–611. Springer, 2020.

SAGGIOMO, Vittorio. **3D Printed Devices for Catalytic Systems**. Catalyst Immobilization – Methods and Applications, 1ª ed, p 369-408. Wiley-VCH, 2020.

SANIMAN, Muhammad Nur Farhan. *et al.* **Water Retention Properties of a Fused Deposition Modeling Based 3D Printed Polylactic Acid Vessel**. Advanced Maritime Technologies and Applications. Advanced Structured Materials, v. 166. Springer, 2022.

TAN, Yu Herng; CHEN, Ben M. **A Lightweight Waterproof Casing for an Aquatic UAV using Rapid Prototyping**. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) Athenas, Grecia, 2020.

The complete history of 3D printing. **Ultimaker**, 2023. Disponível em: <https://ultimaker.com/learn/the-complete-history-of-3d-printing/>. Acesso em: 29 jul. 2024.

WICKRAMASINGHE, Sachini; DO, Truong; TRAN, Phuong. **FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments**. Polymers 2020, v. 12(7) n. 1529. MDPI, 2020.

WRIGHT, Marvin. *et al.* **Multi-actuated AUV Body for Windfarm Inspection: Lessons from the Bio-inspired RoboFish Field Trials**. IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV). IEEE, 2020.

ZHANG, Run. *et al.* **Amelioration of interfacial properties for CGF/PA6 composites fabricated by ultrasound-assisted FDM 3D printing**. Composites Communications, v. 39, 2023.

ZHU, Jiayi. *et al.* Water-based Coatings for 3D Printed Parts. **Journal of Coatings Technology and Research** v. 12(5). Springer, 2015.