

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE ENGRENAGENS FABRICADAS PELO
MÉTODO DE MANUFATURA ADITIVA: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

Gabriel de Jesus Soares

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Ferreira

RESUMO

As engrenagens são um dos principais elementos mecânicos utilizados desde os primeiros passos da engenharia até os dias de hoje na 4ª revolução industrial. O aparecimento de tecnologias da mais recente transformação da indústria traz a manufatura aditiva como um de seus pilares, promovendo a inovação e a agilidade de processos. Este trabalho tem como objetivo revisar a literatura mencionando aplicações de engrenagens fabricadas por métodos de impressão 3D, a fim de analisar a viabilidade desta utilização. Foram buscados trabalhos científicos de acesso livre na plataforma Google Scholar, entre os anos de 2017 e 2023. Os principais resultados encontrados foram a predominância do processo de impressão 3D por modelagem de fusão e deposição (FDM), enriquecimento de propriedades mecânicas através da inclusão de ligas, e obtenção de engrenagens classe 7 em métodos híbridos (PBF+Usinagem) e classe 11 e 12 em métodos aditivos. Embora sejam apresentados resultados promissores, conclui-se que a utilização de engrenagens fabricadas por manufatura aditiva não se apresenta viável além de aplicações demonstrativas, de baixa solicitação mecânica e de produtividade.

Palavras-chave: Engrenagens, impressão 3D, processos de fabricação

INTRODUÇÃO

Com a finalidade de transmitir torque e velocidade angular de um eixo, as engrenagens são elementos de máquinas amplamente utilizados em diversas aplicações. As engrenagens são montadas em pares, o que possibilita a transferência de movimento devido ao atrito dos dentes, de uma engrenagem motora e uma engrenagem movida. Para que o engrenamento ocorra corretamente, é mandatório que os dentes do par de engrenagens sejam construídos apropriadamente. Embora existam vários perfis de dentes de engrenagens, a maioria utiliza-se de dentes com forma involuta. (BUDYNAS, 2011)

A forma involuta permite a transmissão de movimento pelo rolamento de um ponto de referência em uma circunferência de referência, denominada como circunferência primitiva. Quando o par está engrenado, a somatória dos raios de cada circunferência primitiva resulta na distância entre centros. Dessa forma, a distância entre centros não se trata de uma característica da engrenagem, e sim do par engrenado, que por consequência do perfil dos dentes, lhes são atribuídas tais circunferências de referência. (MAZZO, 2013)

A formação dos dentes de engrenagem pode sofrer variações dimensionais conforme seu processo e tolerâncias de fabricação. Essas variações podem trazer alterações do ponto de referência projetado, resultando em uma variação da distância entre centros. A localização do ponto de referência fora do projetado, pode acarretar folgas exageradas, excesso de tensão ou interferência na montagem. (MAZZO, 2013)

Durante sua aplicação, as engrenagens são submetidas a tensões de flexão e tensões superficiais. As falhas ocorridas por flexão são geralmente mais tardias, devido à alta resistência dos materiais ferrosos aplicadas em um projeto adequado. (NORTON, 2013)

Com a versatilidade dos materiais metálicos, são encontradas na indústria geral, engrenagens próprias para as mais diversas aplicações e solicitações de carga, geralmente fabricadas por métodos de remoção de material, usinadas em fresadoras especiais com dispositivos e ferramentas próprias para gerar dentes ou em máquinas CNC. (MAZZO, 2013)

Por outro lado, a manufatura aditiva evidenciou-se entre as tecnologias da mais recente revolução industrial: a indústria 4.0. Popularmente conhecida como impressão 3D, este processo de fabricação permite a geração de objetos a partir de modelos 3D virtuais através da deposição de material em camadas. No início de sua concepção, empregava-se somente para a prototipagem rápida, devido a sua agilidade em relação à cadeia de processos para obtenção do produto. No entanto, com o avanço da tecnologia e desenvolvimento de materiais, passa a crescer o número de aplicações na indústria. (ARAÚJO, 2021)

Dessa forma, a facilidade, rapidez e economia que pode ser obtida através do emprego de componentes fabricados através da manufatura aditiva,

instiga a avaliação do comportamento dessa tecnologia, levantando a seguinte questão: A aplicação de engrenagens fabricadas através da manufatura aditiva apresenta vantagens sobre engrenagens fabricadas por métodos convencionais?

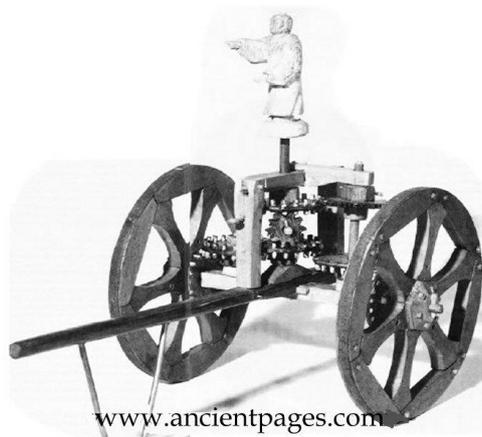
O objetivo deste trabalho é apresentar as mais recentes tecnologias acerca das aplicações de engrenagens geradas através do método de manufatura aditiva.

REFERENCIAL TEÓRICO

Engrenagens

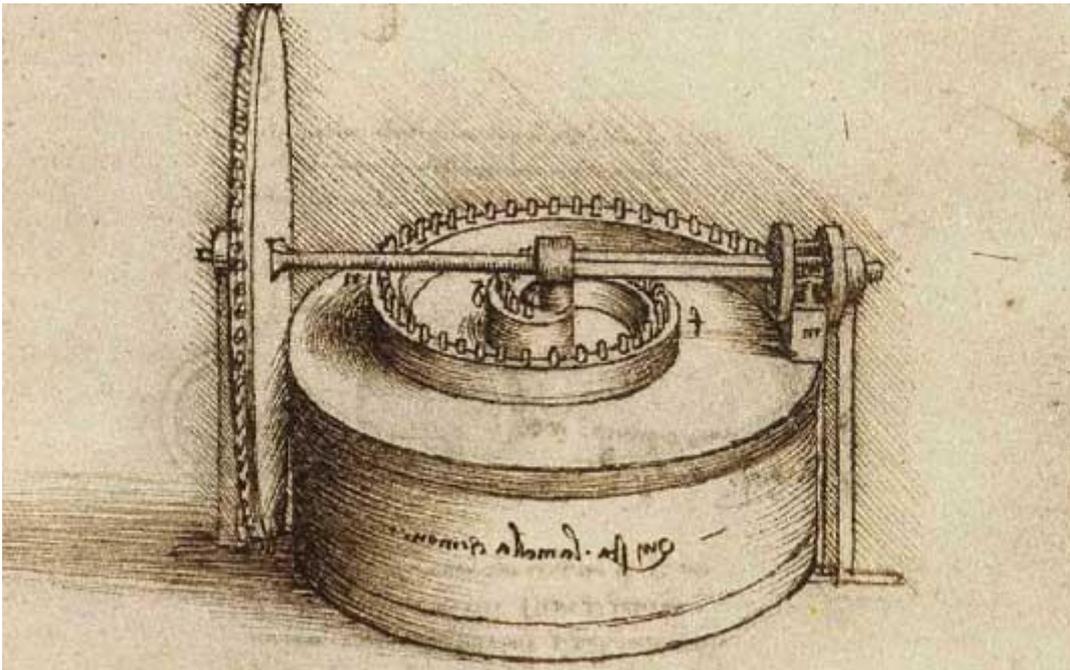
As engrenagens são elementos mecânicos fundamentais em diversos mecanismos com a finalidade de transmitir torque e velocidade angular entre eixos. São componentes que indubitavelmente contribuíram para o desenvolvimento humano ao longo de séculos, bem como foram aprimorados no decorrer do aperfeiçoamento tecnológico da mecânica. É possível conceber a utilização das engrenagens rudimentares fabricadas em madeira cerca de 1000 A.C pelas carroças chinesas apontando para o sul (figura 1), e não tão distante assim, no início da idade moderna, Leonardo da Vinci já estudava mecanismos utilizando estes elementos (figura 2). (NORTON, 2013)

Figura 1 - Carruagem chinesa apontando para o sul



Fonte: Remarkable South-Pointing Chariot – Ancient Cybernetic Machine Invented 1,700 Years Ago Is An Engineering Masterpiece. Disponível em <<http://www.ancientpages.com>> Acesso em 23/10/2023

Figura 2 - Desenho de sistema de engrenamento de Leonardo DaVinci



Fonte: Manuscritos de Leonardo da Vinci. Disponível em <<http://www.oswaldoeduardo.blogspot.com>>
Acesso em 22/10/2023

Para transmitir movimento entre eixos da forma mais simples possível, bastaria dois cilindros em contato se houvesse atrito suficiente para proporcionar o torque desejado no eixo movido. No entanto, a transmissão por rolamento entre cilindros possui alta limitação de transmissão de torque e a possibilidade de ocorrência de escorregamento, dessa forma retirando o sincronismo do movimento dos eixos, muitas vezes desejado nos sistemas mecânicos. Portanto, são adicionados dentes aos cilindros, que formarão o par de engrenagens, prevenindo o escorregamento dos cilindros e resistindo a maiores forças e promovendo maior transmissão de torque. (NORTON, 2013)

Os vários tipos de engrenagens existentes permitem o aumento ou redução de potência ou velocidade angular em eixos paralelos ou perpendiculares, conforme ilustrado na figura 3. A transmissão de potência e velocidade angular entre eixos paralelos é dada por engrenagens cilíndricas de dentes retos, que são entre estes modelos, as mais simples e utilizadas como referência para desenvolvimento de formas do dente. (BUDYNAS, 2011)

Figura 3 - Tipos de engrenagem

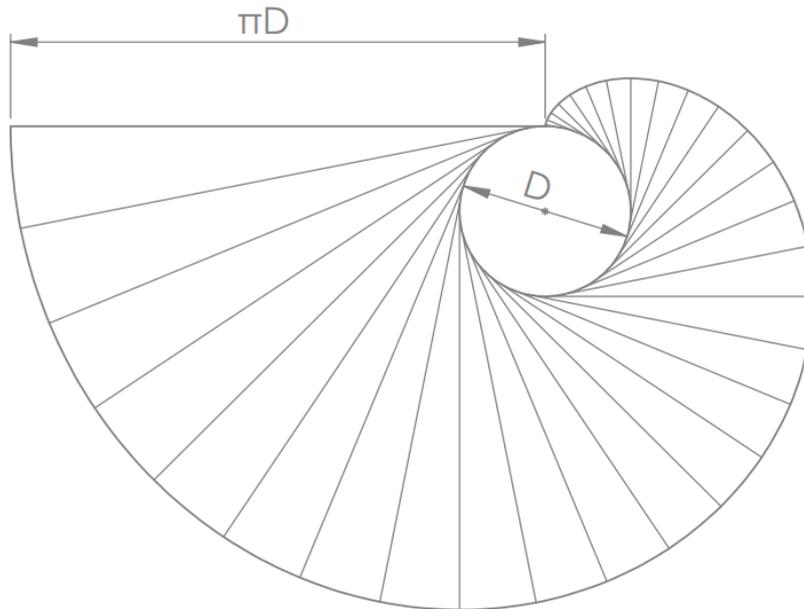


Fonte: O autor. Adaptado de Mazzo (2013)

As engrenagens são geralmente montadas em eixos com distâncias pré-estabelecidas em projeto, sendo essa distância de centros o fator primordial para seu dimensionamento. A partir do espaço disponível para montagem das engrenagens, são considerados os requisitos de transmissão de torque e velocidade. (MAZZO, 2013)

A geometria ideal do dente da engrenagem permite uma transmissão de movimento suave e uniforme, sem que o haja a variação da razão de velocidade angular entre as engrenagens. A forma que atribui esta propriedade às engrenagens mais utilizada é uma curva evolvente traçada ao longo da trajetória da extremidade de uma linha desenrolada a partir de uma circunferência de base, esboçada como mostra a figura 4. (MAZZO, 2013)

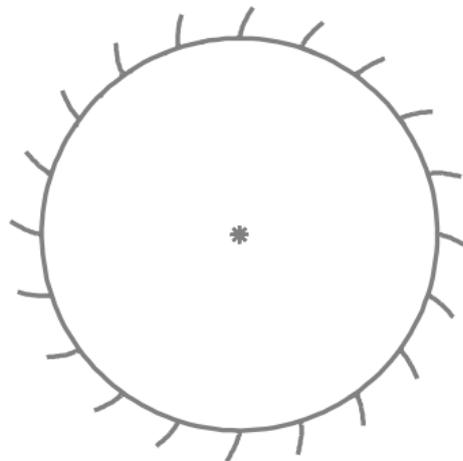
Figura 4 - Traçado da curva involuta



Fonte: O autor. Adaptado de Mazzo (2013)

Ao multiplicar a curva evolvente z vezes ao redor do eixo da circunferência em espaçamentos iguais, obtêm-se os flancos em um sentido de giro. A distância entre os mesmos pontos de duas curvas adjacentes define o passo p da engrenagem.

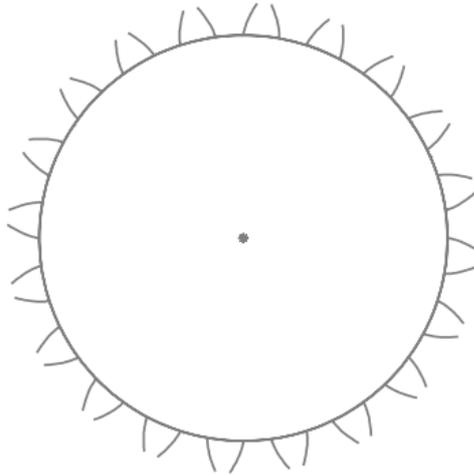
Figura 5 - Repetições da curva evolvente em um sentido de giro



Fonte: O autor. Adaptado de Mazzo (2013)

Para permitir a transmissão de movimento em ambos os sentidos, devem ser geradas as curvas evolventes opostas.

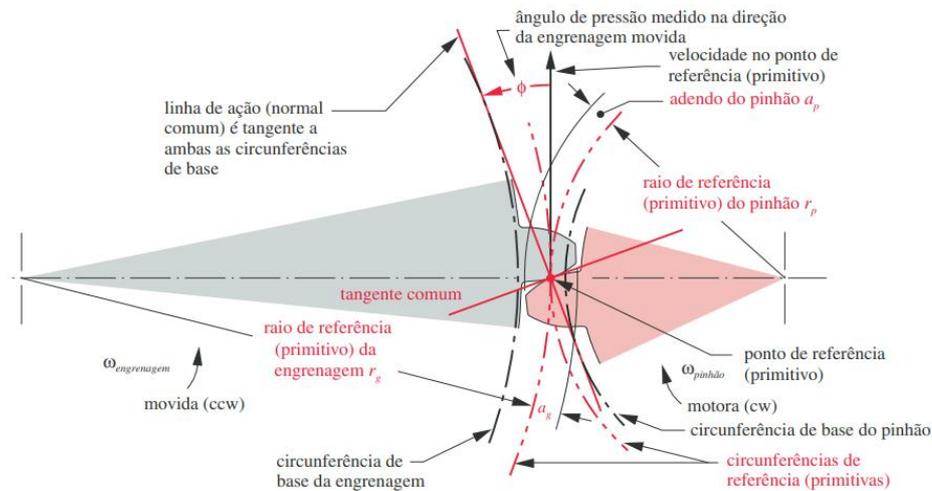
Figura 6 - Repetições da curva evolvente em ambos sentidos de giro



Fonte: O autor. Adaptado de Mazzo (2013)

Ao analisar um par engrenado, observa-se o contato entre as curvas evolventes de cada engrenagem. As extremidades das linhas que formaram os pontos da curva evolvente se interceptam em um ponto de referência. Dessa forma, em todos os pontos de contato ao longo da curva evolvente, a linha tangente às circunferências de base irá garantir a uniformidade da transmissão. A reta perpendicular a esta linha define o ângulo de pressão da engrenagem. A distância entre o centro de rotação e o ponto de referência determina o raio primitivo da engrenagem. (NORTON, 2013)

Figura 7 - Circunferência de referência (Primitiva)



Fonte: Norton (2013)

O traçado dos dentes da engrenagem no projeto, formará um perfil de dente que terá uma circunferência primitiva ideal quando o par for montado. No entanto, os processos de fabricação não são isentos de falhas e permitem variações dimensionais nessa formação. Nestes casos, a variação dimensional poderá resultar em desvios na espessura do dente, que influem no jogo entre flancos das engrenagens, afetando diretamente o funcionamento destas. É necessário que seja considerado uma diminuição da espessura do dente para garantir que não haja interferência aumentando a pressão entre os flancos e a folga apropriada para a aplicação. (MAZZO, 2013)

A norma DIN 3962 determina o índice de qualidade das engrenagens em função de sua aplicação, de onde se define a tolerância de folga entre os flancos, apresentados na tabela 1.

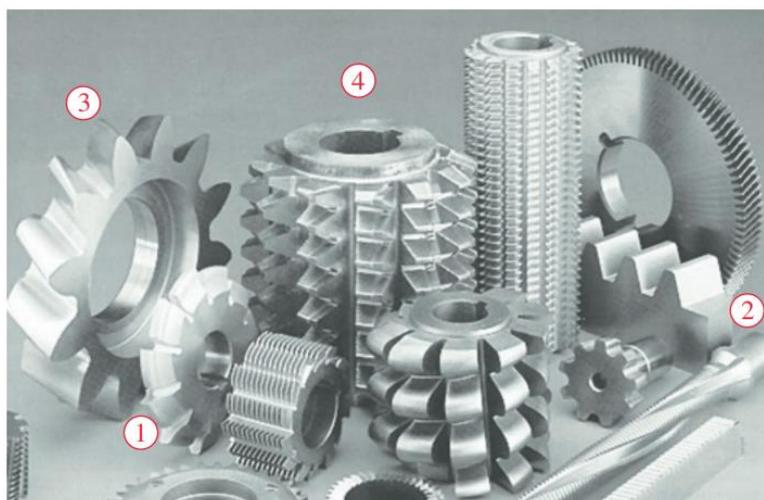
APLICAÇÃO	ÍNDICE DE QUALIDADE DIN 3962
Aparelhos de medição, controle e roda master	1 à 4
Velocidade tangencial acima de 25m/s	3 à 4
Máquinas em geral com boa precisão	6 à 8
Indústria automobilística e máquinas ferramenta	5 à 9
Emprego em geral, sem grande precisão	8 à 11

FONTE: MAZZO (2013)

Os dentes das engrenagens podem ser processados por métodos sem remoção de material, como fundição, deformação e injeção (manufatura aditiva); bem como métodos com remoção de material, subdividindo-se entre processamento por forma e processamento por geração. (MAZZO, 2013)

O processamento por forma abrange as operações que consistem no corte do material entre dois dentes adjacentes por meio de fresamento com ferramentas simples e operações como brochamento, eletroerosão a fio e corte a laser. Os processos de usinagem por geração incluem o fresamento com ferramentas especiais (figura 8) para a formação dos dentes de engrenagem, como a ferramenta tipo caracol (gear hob), utilizada em máquinas com sincronismo entre peça e ferramenta. (MAZZO, 2013)

Figura 8 - Ferramentas de usinagem de dentes: 1-Cortador tipo fresa módulo; 2-Cortador de cremalheira; 3-Cortador de geração; 4-Caracol (gear hob)



FONTE: MAZZO (2013)

Em ambos os processos, existe a divisão de pré-usinagem (fresamento) e usinagem de acabamento. Para obter melhor qualidade do perfil dos dentes de engrenagem, são aplicados os processos de rasqueteamento (shaving) e retífica após tratamento térmico capaz de deformar o flanco dos dentes. (MAZZO, 2013)

A tabela 2 apresenta o nível de dificuldade e possibilidade de fabricação oriundo de cada processo a fim de obter o respectivo grau de qualidade do dente.

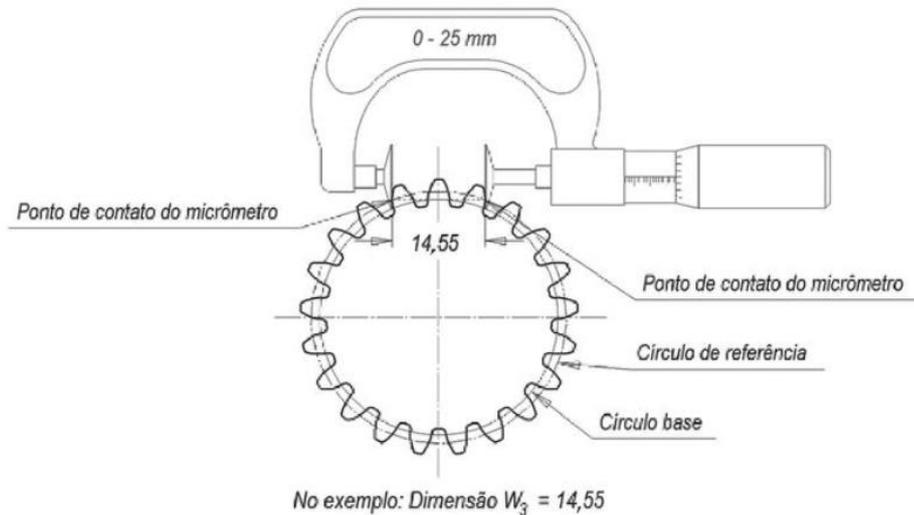
Tabela 2 - Dificuldade de obtenção da qualidade em função do processo de fabricação

QUALIDADE DO DENTADO		Retificado	Rasquetado	Fresado
DIN/ISO	AGMA			
1		Muito alto		
2		Muito alto		
3	15	Muito alto		
4	14	Alto	Muito alto	
5	13	Médio	Muito alto	
6	12	Baixo	Alto	Muito alto
7	11	Muito baixo	Médio	Muito alto
8	10		Baixo	Alto
9	9		Muito baixo	Médio
10	8			Baixo
11	7			Muito baixo
12	6			Muito baixo
	5			Muito baixo
	4			Muito baixo
	3			Muito baixo

FONTE: MAZZO (2013)

Para definir a qualidade do dentado, são empregados métodos de medição padronizados. A medição da espessura do dente pode ser obtida através da verificação da medida W (entre flancos) e medida M (sobre rolos). A medida entre flancos é realizada pela medição do comprimento de uma linha tangente a circunferência de base, tomada por um micrômetro com discos especial para medição de flancos, cujo valor nominal é determinado a partir do número de dentes k necessários para medir cada engrenagem. (MAZZO, 2013)

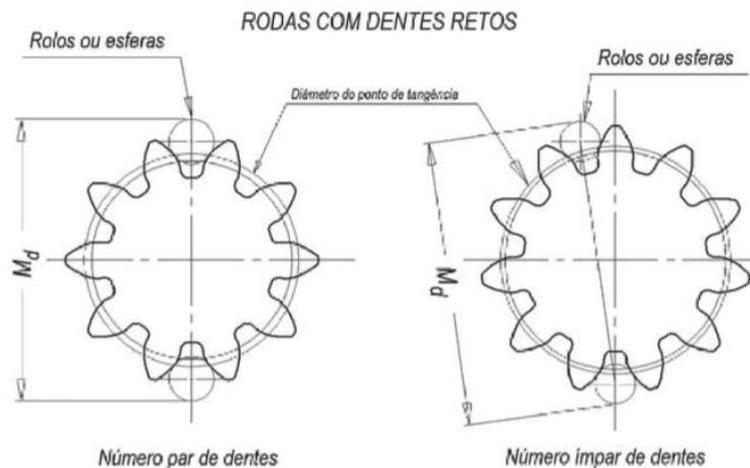
Figura 9 - Medição entre flancos



FONTE: Mazzo (2013)

A obtenção da medida M é efetuada pela medição de duas esferas ou rolos posicionados em vãos diametralmente opostos da engrenagem.

Figura 10 – Medição sobre rolos

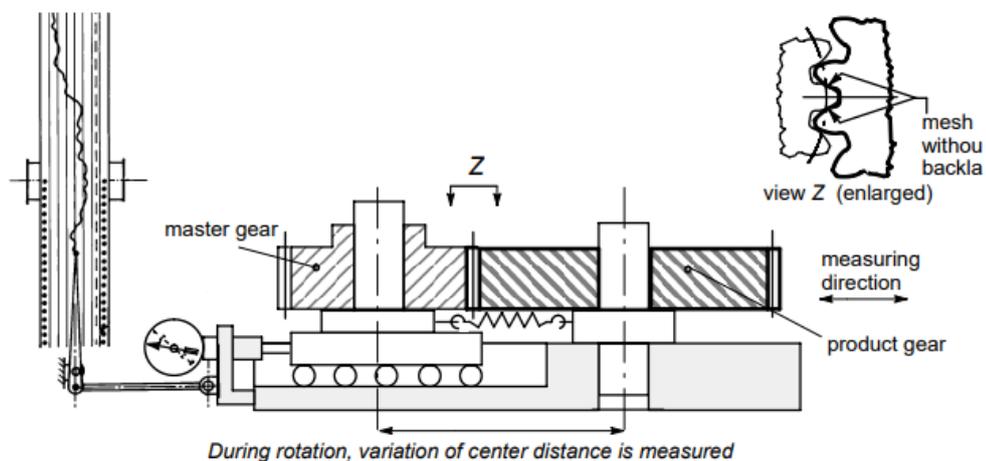


FONTE: Mazzo (2013)

Ambos os métodos de medição utilizados acima, não levam em consideração a excentricidade do perfil dos flancos. Os desvios de concentricidade podem resultar em jogo acima da tolerância requerida para a aplicação como interferência ou pressão excessiva na montagem nos eixos paralelos.

O teste de flanco duplo permite a verificação do desvio radial da distância entre centros de um par engrenado. Consiste em um sistema de dois eixos em que é montada uma engrenagem mestre (master gear) em um eixo livre apenas por rotação e uma engrenagem a ser testada (product gear) em um eixo livre para rotação e deslocamento no sentido radial (measuring direction). Uma carga conhecida deve ser aplicada para manter o contato entre os flancos, fazendo com que seja eliminada a folga entre os dentes. Ao rotacionar o par de engrenagens os raios de referência estarão em contato, o que no caso de um par teórico ideal, a soma destes deverá ser igual a distância entre centros projetada e a variação da distância entre centros nula. Sendo assim, é possível ser verificado através do deslocamento radial do eixo da engrenagem móvel os defeitos de fabricação que irão gerar folgas ou interferências no par engrenado. A figura 5 é uma representação esquemática do teste de rolagem de flanco duplo de pares de engrenagem. (MAZZO, 2013)

Figura 11 - Conceito do teste de flanco duplo de engrenagens

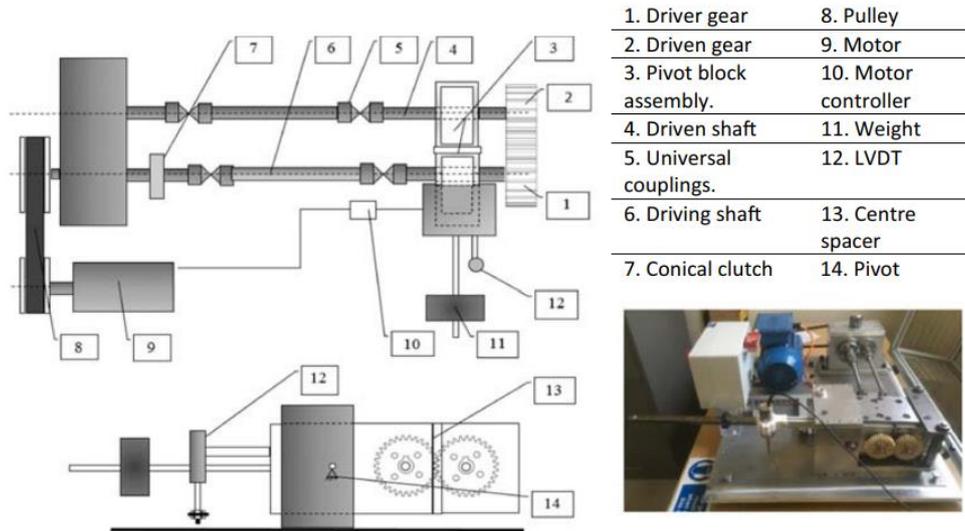


FONTE: AGMA (2005)

Ensaio conduzido para avaliação do desgaste em engrenagens são efetuados a partir de um dispositivo desenvolvido pela Universidade Tecnológica de Munique, mundialmente conhecido como FZG (Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebbau). Essa bancada de testes consiste em um sistema fechado onde um par de engrenagens é montado e solicitado a partir de rotações determinadas e um carregamento inserido no sistema através de um freio. Diversos centros de pesquisa atualmente desenvolvem suas próprias bancadas

de testes baseando-se no conceito original da FZG. A figura ilustra uma vista esquemática do dispositivo. (GOMES, 2019)

Figura 12 - Vista esquemática dispositivo FZG



Fonte: ZHANG (2019)

Através da utilização deste dispositivo é possível observar os mecanismos de falha oriundos da operação das engrenagens. A aplicação das engrenagens as submete a esforços de flexão e rolamento, gerando tensões de cisalhamento e superficiais, respectivamente. Quando estes esforços ultrapassam os limites de resistência do material ocorrem falhas por ruptura e desgaste. (NORTON, 2013)

Manufatura aditiva

A história da manufatura aditiva surge no final da década de 1980, mais conhecida por prototipagem rápida, com a finalidade majoritária de desenvolver protótipos, tendo em vista que a tecnologia da época era limitada para aplicações práticas. O processo realizado à época consistia no endurecimento de polímeros fotossensíveis através de radiação UV e devido aos elevados custos de equipamentos e materiais, não passou a ser comercializada. (ARAÚJO, 2021)

Na mesma década, passou a ser utilizado o processo de estereolitografia, que se utilizava da reação de cura de resinas líquidas através de raios

ultravioleta para formar modelos tridimensionais (SLA). Surge daí a fundação da 3D Systems, primeira empresa no ramo de impressão 3D, comercializando a primeira máquina de manufatura aditiva do mundo: a SLA-1. (ARAÚJO, 2021)

Na década de 1990 passa a ser comercializada a impressora 3D por camadas a partir de um filamento fundido extrudado, técnica que atualmente alcançou grande popularidade devido às impressoras 3D de mesa. (ARAÚJO, 2021)

Nas últimas décadas, foram criadas padronizações acerca das definições da manufatura aditiva pela ASTM (American Society for Testing and Materials) e ISO (International Organization for Standardization), categorizando os principais processos:

Tabela 3 - CATEGORIZAÇÃO ISO PARA MÉTODOS DE IMPRESSÃO

CATEGORIA	PROCESSO	SIGLA
FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA – VAT PHOTOPOLYMERIZATION	ESTERILITOGRAFIA	SLA
	PROCESSAMENTO DIGITAL DE LUZ	DLP
FUSÃO DE LEITO EM PÓ – POWDER BED FUSION (PBF)	SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER	SLS
	SINTERIZAÇÃO SELETIVA POR CALOR	SHS
	FUSÃO SELETIVA A LASER	SLM
	SINTERIZAÇÃO DIRETA A LASER DE METAL	DMLS
	FUSÃO POR FEIXE DE ELÉTRONS	EBM
JATEAMENTO DE AGLUTINANTE – BINDER JETTING (BJ)	JATEAMENTO DE AGLUTINANTE	BJ
JATEAMENTO DE MATERIAL – MATERIAL JETTING (MJ)	MODO CONTINUO	--
	DROP ON DEMAND	DOD
LAMINAÇÃO EM FOLHA – SHEET LAMINATION (SL)	MANUFATURA POR OBJETOS LAMINADOS	LOM
	MANUFATURA ADITIVA ULTRASSÔNICA	UAM
EXTRUSÃO DE MATERIAL – MATERIAL EXTRUSION (ME)	MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO	FDM
DEPOSIÇÃO DE ENERGIA DIRECIONADA – DIRECTED ENERGY DEPOSITION (DED)	DEPOSIÇÃO DE ENERGIA DIRECIONADA	DED

Fonte: Araújo (2021)

Fotopolimerização (VAT)

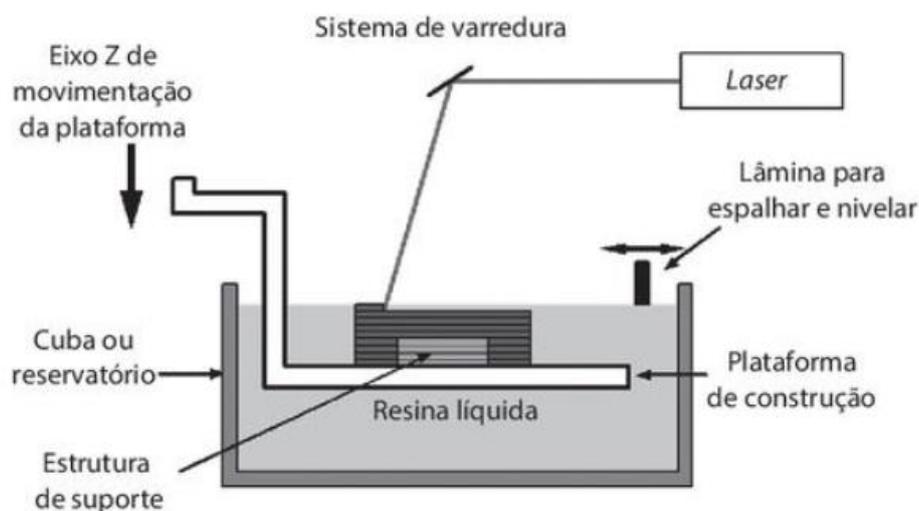
Os processos de impressão 3D baseados na fotopolimerização, consistem no modelamento de superfícies a partir da solidificação de resinas poliméricas fotossensíveis através da irradiação de uma fonte de luz ultravioleta. A absorção da luz promove uma reação química na resina em estado líquido, cujas partículas fotossensíveis absorvem energia que resulta na sua solidificação em um reservatório, conhecido como cuba. (VOLPATO, 2017)

Os principais métodos de impressão 3D por fotopolimerização são a estereolitografia (SLA) e o processamento digital de luz (DLP), que divergem no tipo de luz que incide sobre a resina líquida. (VOLPATO, 2017)

O método SLA utiliza-se de um escaneamento vetorial, onde um laser incide pontualmente sobre a superfície da plataforma de construção. Neste método, o feixe de luz deve ser deslocado em duas direções de um plano (XY), atingindo a superfície submersa em resina que se desloca na direção normal ao feixe (Z). A superfície solidificada é formada em camadas conforme o modelo fatiado. A figura esquematiza o método de SLA. (VOLPATO, 2017)

Após o processamento, é necessário encaminhar a peça para um pós-tratamento em forno UV, a fim de curar pontos em que o varredura do feixe de luz não alcança.

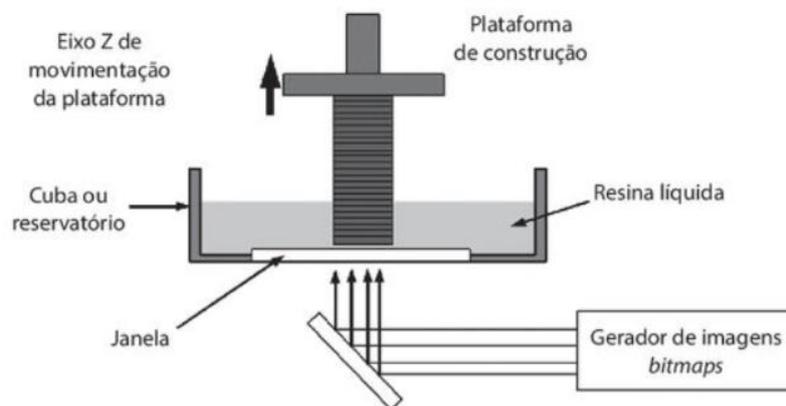
Figura 13 - Esquema de impressão 3D SLA



Fonte: Volpato (2017)

O método DLP se baseia no mesmo princípio do SL, tratando-se da mecânica do processo. No entanto, a luz emitida sobre a plataforma de construção, é a projeção da imagem de toda a superfície 2D de uma camada, proporcionando maior rapidez na solidificação. A figura 13 ilustra o esquema de impressão 3D DLP, em um funcionamento onde o eixo de movimentação da plataforma de construção se move de baixo para cima, processo que também pode ser aplicado para o SL. (VOLPATO, 2017)

Figura 14 - Esquema de impressão 3D DLP



Fonte: Volpato (2017)

Fusão de leito em pó (PBF)

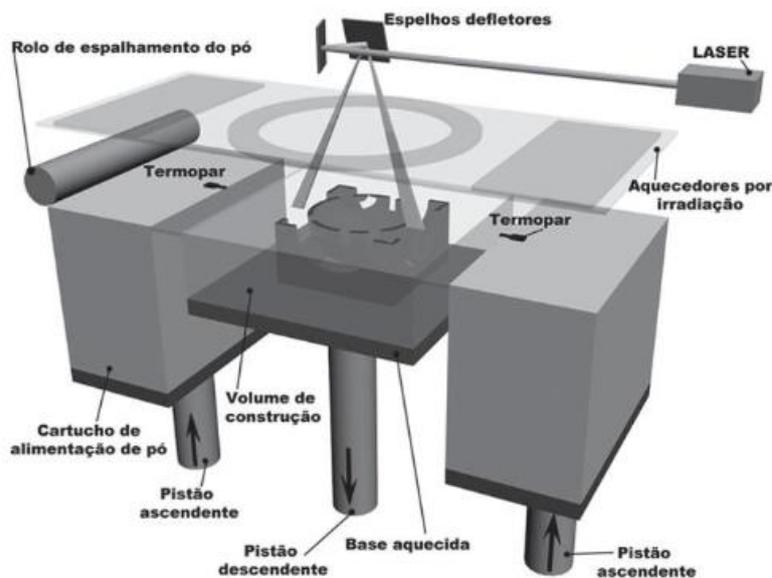
O método de manufatura aditiva por fusão de leito em pó compreende os processos que formam peças sólidas através da fusão de pó em camadas. Utiliza-se de uma fonte térmica direcionada para fundir partículas em uma magnitude centesimal de milímetros de diâmetro, não só de polímeros, mas também metais. Nesse processo, o material que não é atingido pela fonte de calor e não fundido acaba servindo de suporte para regiões em balanço do sólido. (VOLPATO, 2017)

Os processos que se incluem dentro dos métodos de fusão de leito em pó se diferem entre a forma de energia térmica para fusão do pó e a matéria-prima utilizada. O processo de sinterização seletiva a laser (SLS), é mais referido como a fusão de partículas poliméricas, enquanto a fusão seletiva a laser (SLM) e sinterização direta a laser de metal (DMLS) para fusão de metais. Ambos os

processos se utilizam de laser para promover a fusão e alinhamento das partículas. (ARAÚJO, 2021)

A figura 14 ilustra o esquema básico de fusão de leito em pó que representa os processos de SLS, SLM e DMLS.

Figura 15 - Esquema PBF

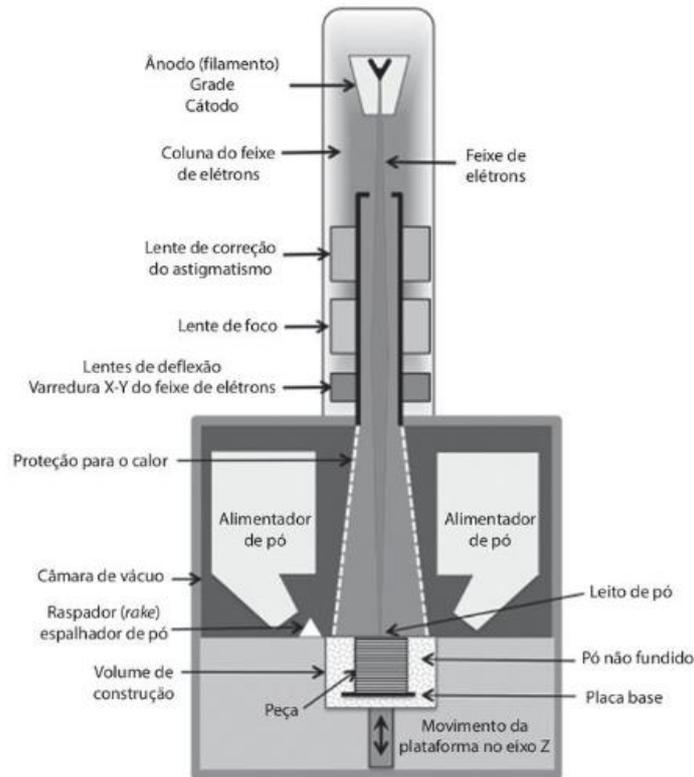


Fonte: Volpato, 2017

O processo de sinterização seletiva por calor (SHS) possui a estrutura similar ao SLM, diferindo-se pela fonte de energia para a fusão do pó metálico, sendo essa um cabeçote térmico de impressão. (BAUMERS, 2015)

A fusão por feixe de elétrons (EBM), é o processo de fusão de leito em pó que utiliza um feixe de elétrons de alta energia para fusão de pó metálico. Esse processo resulta em peças com menores tensões térmicas residuais devido a possibilidade de maior aproveitamento de energia e maior velocidade de impressão devido a capacidade de movimentação do feixe de elétrons, porém apresenta uma menor resolução comparando-se com os processos a laser em decorrência do maior diâmetro das partículas. A figura 15 apresenta o esquema de funcionamento da impressão 3D de fusão por feixe de elétrons. (ARAÚJO, 2013)

Figura 16 - Esquema EBM



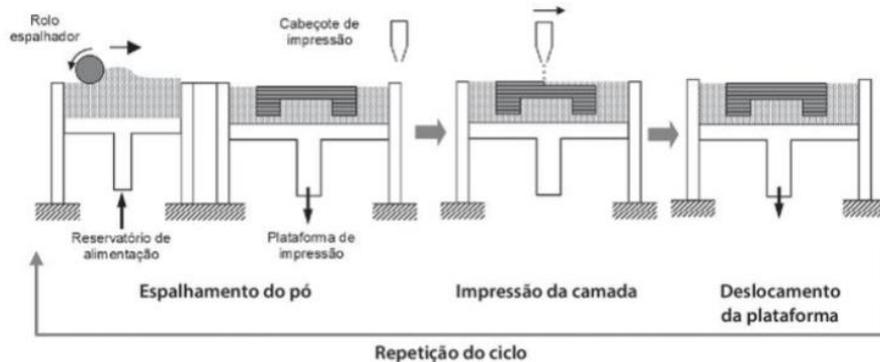
Fonte: Volpato, 2017

Jateamento de aglutinante (BJ)

O processo de jateamento de aglutinante é um método de impressão 3D que forma sólidos a partir da deposição de um material aglutinante sobre o leito de pó que faz a união da geometria desejada em camadas. Podem ser utilizados pó de material cerâmico ou metálico, formando peças de alta complexidade geométrica e baixo custo. Entretanto, possui deficiência em resistência mecânica, requerendo pós processamento para elevar suas propriedades. (ARAÚJO, 2011)

O esquema de impressão representado na figura 16 se assemelha a outros processos de PBF, diferindo-se pelo cabeçote de impressão que se desloca pela superfície de trabalho aplicando aglutinante sobre o leito de pó.

Figura 17 - Esquema de impressão 3D BJ



Fonte: Volpato, 2017

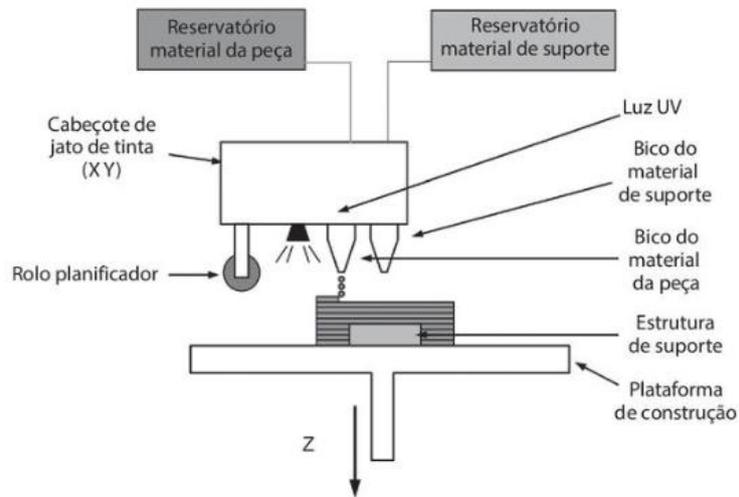
Jateamento de material (MJ)

O processo de jateamento de material é análogo a impressão de jato de tinta. Esse método aplica gotículas de material, geralmente fotopolimérico ou termoplástico, que serão solidificadas camada por camada por meio de luz UV ou temperatura ambiente. É possível obter grande precisão dimensional devido ao tamanho das gotículas que são geradas no cabeçote de impressão, e também a flexibilidade de utilizar materiais com propriedades variadas. (VOLPATO, 2017)

O jateamento de material possui duas vertentes: Modo contínuo e sob demanda (DOD). No modo contínuo, é gerado um fluxo de gotículas que são carregadas seletivamente e direcionadas por placas defletoras para o bico de impressão. No modo sob demanda as gotículas são geradas somente no ponto de interesse de aplicação do material, promovendo melhor reprodutibilidade e menor desperdício de material. (ARAÚJO, 2011)

A tecnologia multijet printing (MJP) desenvolvida pela 3D Systems, ilustrada na figura 17, utiliza um sistema de jateamento de material DOD com dois cabeçotes de impressão, um para aplicação de material de formação da peça e outro para formação dos suportes, formando o sólido sobre uma plataforma com deslocamento vertical, contando com a exposição de luz UV para solidificação da resina e um rolo laminador para nivelamento da camada superior impressa. (VOLPATO, 2017)

Figura 18 - Esquema impressão 3D MJ - MJP

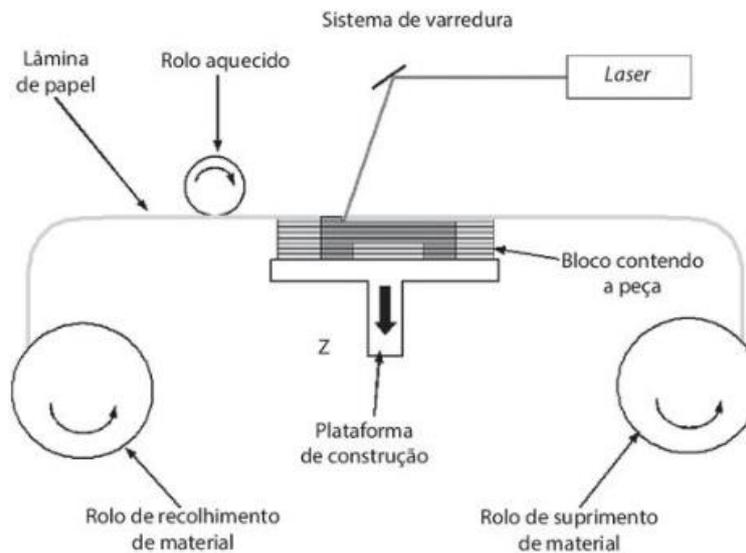


Fonte: Volpato (2017)

Laminação em folha – Manufatura de Objetos Laminados (LOM)

As tecnologias de manufatura aditiva acerca da laminação em folha, consistem em processos que se utilizam do empilhamento de lâminas adesivas cortadas por laser ou ferramentas de corte conforme a geometria desejada, combinando assim métodos aditivos e subtrativos para formação de sólidos. Conforme ilustrado na figura 18, as folhas são alimentadas por bobinas, e prensadas por um rolo térmico, que ativa a adesão de um polímero adesivo sobre as camadas inferiores na plataforma de construção. Em seguida, a folha é cortada por um feixe de laser ou lâmina de corte e ao final a plataforma de construção é deslocada para dar início a construção de uma nova camada. O material que não compõe a peça desejada, serve de suporte para a estrutura, possibilitando ganho de tempo no planejamento da construção da impressão. (VOLPATO, 2017)

Figura 19 - Esquema de impressão 3D - LOM



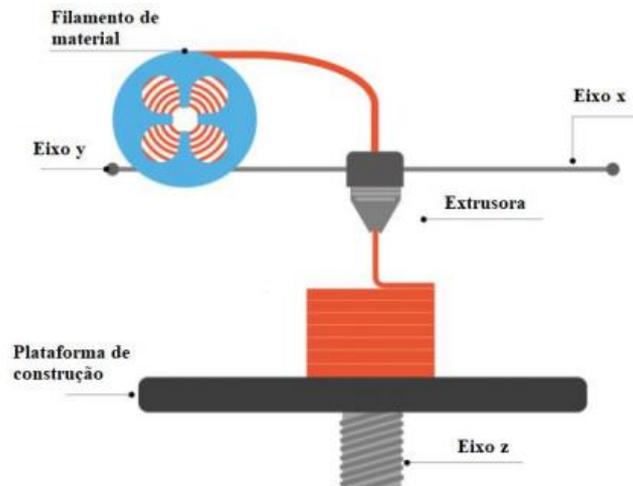
Fonte: Volpato (2017)

Extrusão de material – Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

O processo de impressão 3D por fusão e deposição (FDM) é um processo amplamente acessível comercialmente, possuindo atualmente uma grande variedade de equipamentos de baixo custo e pesquisas de desenvolvimento de materiais. (VOLPATO, 2017)

Este método de modelagem se utiliza de um filamento de material termoplástico, extrudado em um bico de injeção aquecido a ponto de fundir o material em uma forma pastosa. Os equipamentos são geralmente compostos de sistema de fusos de precisão para movimentação do cabeçote de impressão conforme a geometria da peça e deslocamento da plataforma de construção, na altura de cada camada de deposição, cuja também deve possuir um sistema de aquecimento para otimizar a adesão do material. A figura 19 ilustra o funcionamento básico da impressão 3D FDM (ARAUJO, 2021)

Figura 20 - Esquema de impressão 3D - FDM



Fonte: Araújo (2021)

Possui grande versatilidade para seleção de materiais para trabalho, incluindo plásticos de engenharia de alto desempenho como Poli-Eter-Eter-Cetona (PEEK) e Polieterimida (PEI). (ARAÚJO, 2021)

O diâmetro do bico de extrusão é um limitante para a resolução e qualidade do sólido modelado, cujo deve ser propriamente definido de acordo com o material que está sendo utilizado. Devido a estes fatores, a precisão dimensional é uma propriedade inferior comparada a outros métodos de impressão 3D. É imprescindível a construção de suportes em regiões da peça suspensa e negativas, o que resulta em um tempo maior de impressão e pós processamento para eliminação das rebarbas. (VOLPATO, 2017)

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho de conclusão de curso trata-se de uma pesquisa bibliográfica de natureza básica e objetivos descritivos, pois busca analisar, interpretar e relacionar aplicações diversas de uma tecnologia. (LEÃO, 2019)

É composta de uma abordagem qualitativa pois é composta de redução, categorização e interpretação de dados previamente à redação do relatório de resultados e discussão. (GIL, 2002)

O procedimento de coleta de dados consiste na busca de livros, publicações periódicas e impressos diversos. Foram utilizadas majoritariamente

obras de referência para o levantamento bibliográfico preliminar e periódicos científicos, teses e dissertações para formulação dos resultados.

O método de busca utilizado para formulação da base de dados abrange obras publicadas em português ou inglês, publicadas entre os anos 2017 e 2023, na plataforma Google Acadêmico e com acesso aberto.

A busca consiste na seguinte estrutura de palavras-chave:

Impressão 3D + Engrenagens + **[Método de impressão]**

Em inglês:

3D printing + Gears + **[Método de impressão]**

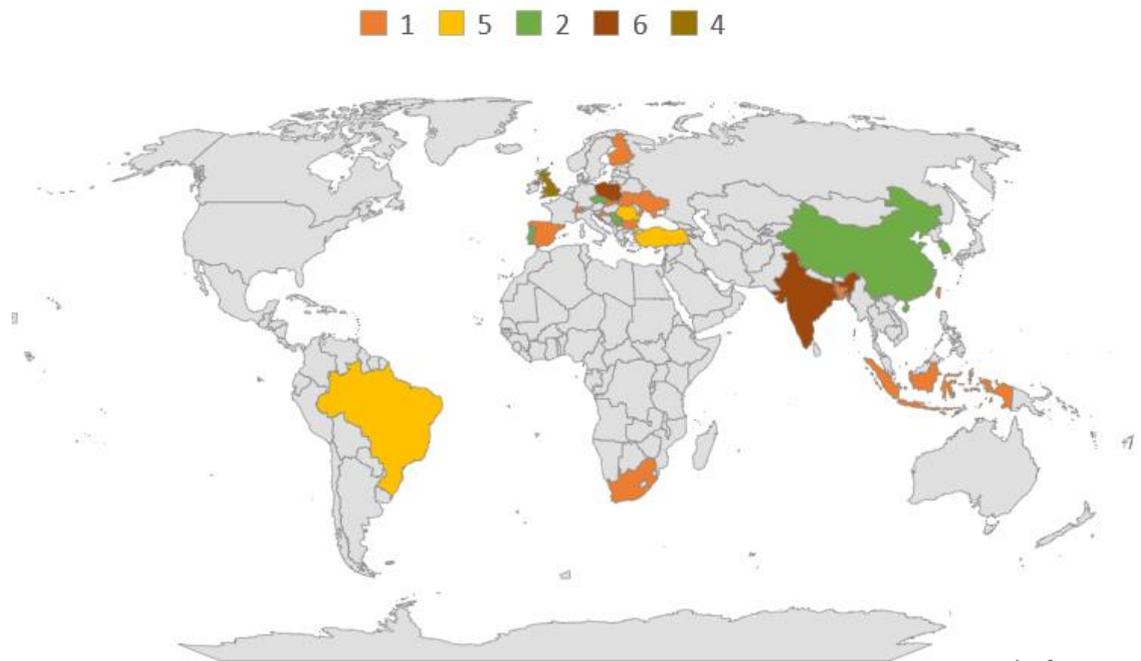
O campo método de impressão é preenchido conforme a sigla do processo elencado na tabela 3.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram incluídos o total de 53 trabalhos de pesquisa envolvendo o tema de interesse, desenvolvidos em 23 países, distribuídos conforme ilustrado na figura 20. Dentre estas referências incluídas, 66% (n=36) abordam o método FDM, ora comparativo com outros métodos ou análise de materiais. A figura 21 demonstra a distribuição dos processos analisados no estudo, relacionando os conjuntos em suas respectivas interseções. Estudos do Brasil correspondem a 9% (n=5) da amostra sendo 80% deste grupo (n=4), análises sobre FDM. Os processos por fusão de leito em pó e fotopolimerização fazem parte de respectivamente, 27% (n=15) e 16% (n=9), enquanto apenas 6% (n=3) incluem o método de jateamento de material. Não foram encontrados estudos avaliando processos de jateamento de aglutinante, laminação em folha ou deposição de luz direta contendo os critérios de busca.

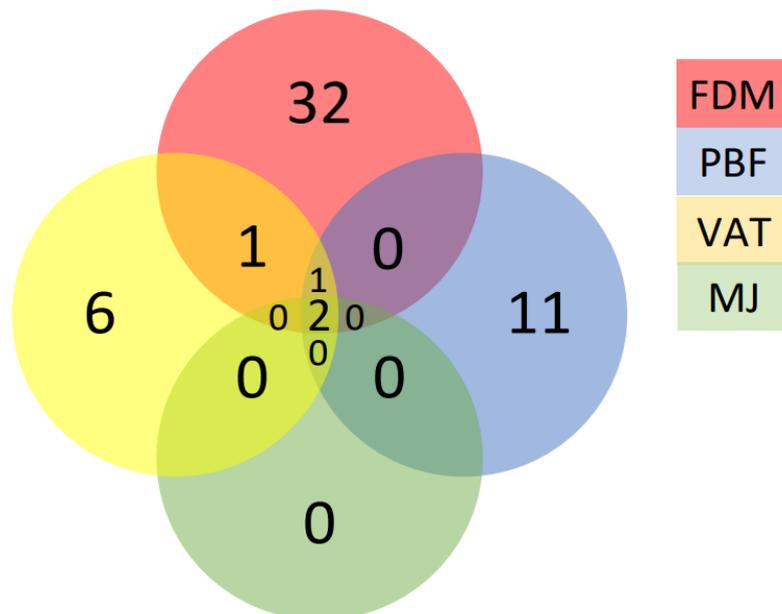
CENTRO UNIVERSITÁRIO UNICURITIBA

Figura 21 - Representação cartográfica dos estudos incluídos por país



Fonte: O Autor (2023)

Figura 22 - Diagrama de Venn - Distribuição dos processos analisados dos estudos

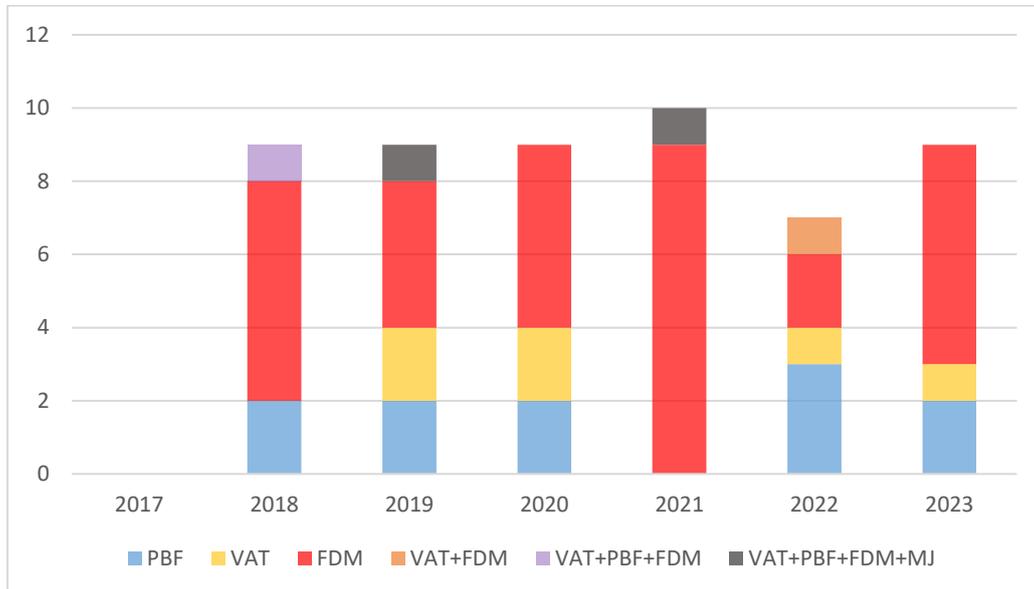


Fonte: O Autor (2023)

Em relação à cronologia dos estudos incluídos, não foram encontrados resultados no ano de 2017 que combinaram com o critério de busca desenvolvido. Nos anos subsequentes, o número de publicações por ano se manteve em uma média

aproximada de 9 trabalhos, apresentando variação conforme o tipo de processo analisado e predominância do método de FDM.

Figura 23 - Gráfico de distribuição cronológica



Fonte: O Autor (2023)

Engrenagens manufaturadas no processo FDM

Dos 32 estudos incluídos sobre o processo de engrenagens por processo FDM, 53% (n=17) correspondem a estudos comparativos, entre diferentes materiais de filamento ou processos de fabricação. Oito estudos sobre FDM tiveram como objetivo estudos de caso, verificando a resistência ao desgaste e análise dimensional das engrenagens. Foram incluídos seis estudos de desenvolvimento de protótipos que utilizaram o processo de modelagem por extrusão. Os materiais de filamentos mais abordados dentre esta amostra são os polímeros PLA e ABS, com 18 e 15 menções, respectivamente. Outros polímeros de engenharia como Nylon, PETG, PEEK e PEI, também são citados.

Dimic (2018) efetuou um teste comparativo em dispositivo de teste de fadiga FZG com dois pares de engrenagem, impressas em PLA e ABS. Aplicando um torque de 20N.m a engrenagem em ABS apresentou ruptura por flexão do dente após 30 minutos de operação, alcançando 600rpm, enquanto a engrenagem em PLA suportou 90 minutos de teste, sendo os últimos 30 minutos à 1400rpm, apresentando somente desgastes de fadiga de superfície. Zisopol (2022) obteve resultados aproximados, com engrenagens impressas em PLA, resistindo a torques de até 24N.m, sugerindo que o maior preenchimento das camadas contribui diretamente para o aumento de resistência a flexão. Um estudo realizado por Costa (2021) utilizando engrenagens com filamentos

de material patenteado em desenvolvimento, apresentou resultados de teste de bancada, com aplicação de torque 10N.m por mais de 1×10^6 ciclos. Acrescendo o torque para 16N.m obteve-se redução para em média $1,6 \times 10^5$ ciclos

Kothkar (2018) realizou um comparativo entre os resultados teóricos e experimentais de resistência a flexão de engrenagens impressas em PLA, ABS, Nylon e PC, apresentando superioridade do Nylon e PC. Tal resultado corrobora com o obtido por Harsha (2021) que comparou ABS, Nylon e PLA utilizando um dispositivo FZG, similar ao utilizado por Dimic (2018), onde as engrenagens de Nylon apresentaram menor taxa de desgaste que as de ABS e PLA, tendo esta última a romper-se à 1200rpm com um torque de 1,2N.m. Destaca-se que enquanto Dimic utilizou engrenagens de módulo 4 e 23 dentes, Harsha aplicou engrenagens de módulo 2 e 17 dentes, o que provavelmente justifica a diferença de performance. Tunalioglu (2021) realizou o teste de engrenamento com engrenagens de PLA de módulo 6 aplicando 1,5N.m em 900rpm, destacando que o aumento da rotação reduziu a taxa de desgaste de superfície devido a redução do tempo de contato entre as superfícies. Em um estudo mais recente, Tunalioglu (2023) mostrou o desgaste de engrenagens operando nos mesmos parâmetros que seu estudo anterior, apresentando um maior ciclo de operação do PETG em relação ao ABS e PLA.

Um estudo comparativo desenvolvido por Kuo (2021) relacionou o desgaste de engrenagens impressas em polímeros PC, PA, ABS, PLA e compósitos como PLA reforçados com 10% de fibra de carbono e PLA com 10% fibra de vidro, além de engrenagens fabricadas pelo processo de injeção à vácuo. Observou-se que as engrenagens em PC, PA e ABS apresentaram grandes deformações de planicidade devido a contração do material. Aplicou-se um teste de rotação em dispositivo análogo ao FZG, com rotação de 3000rpm por 120 minutos, e medido o desgaste por abrasão das engrenagens através da diferença de massa. Verificou-se que as engrenagens em ABS e PLA reforçadas foram as que menos desenvolveram desgaste de superfície (0,17% e 0,15%, respectivamente). De forma semelhante, no estudo comparativo de Dennig (2021), apresentou-se uma análise dimensional e de resistência de engrenagens em PLA, ABS, PA e PA reforçado com fibra de carbono, onde destaca maior variação dimensional das engrenagens de PA, porém com maior ciclo de vida sob maior tensão das engrenagens reforçadas com fibra de carbono.

Outro estudo que apresenta a impressão 3D de engrenagens com filamentos compósitos foi desenvolvido por Bodaghi (2023) que comparou 4 ligas de ABS com fibra de vidro (0%, 5%, 10% e 15%). As amostras reforçadas com 5% apresentaram

resistência à flexão 44% a mais que as amostras com ABS padrão, e 61% a mais de resistência ao desgaste, através da perda de massa após teste de engrenamento. Verificou-se também que a operação das engrenagens em banho de óleo e maiores temperaturas (100°C) diminuem o desgaste de superfície, embora provoque alteração na forma do dente devido ao aumento da plasticidade do material. Gbadeyan (2020) realizou uma análise sobre a inclusão de nanoargila sobre as camadas impressas de ABS, notando melhora na resistência a flexão. Diferentes filamentos compósitos de Nylon foram utilizados por Zhang (2019) em um estudo comparativo, mostrando que o compósito Nylon 618 revelou-se mais resistente ao desgaste do que engrenagens injetadas.

Plásticos de alto desempenho como PEI e PEEK também foram utilizados nos estudos de Pisula (2021). Comparando os resultados de desgaste após ensaio em bancada de teste FZG, apresentou melhor desempenho as engrenagens impressas a partir do filamento de PEEK, enquanto as engrenagens de PEI apresentaram resistência menor que o esperado e grande variação dimensional. Avaliou-se a variação dimensional das engrenagens fabricadas, atribuindo qualidade DIN 12 para a geometria obtida.

A análise da acurácia dimensional foi o objetivo de 6 dos 32 estudos do processo de FDM. Uzun (2018) verificou através de escaneamento 3D variação dimensional no perfil do dente de até 0,6mm de engrenagens $m=6$ e $z=15$ impressas em ABS utilizando resolução de camada de 0,125mm. De forma semelhante, Masovic (2019) avaliou engrenagens de ABS e PA, inclusive a mudança da direção de empilhamento das camadas de impressão, verificando que a impressão no sentido horizontal (normal ao eixo da engrenagem) garante melhor estabilidade dimensional. Rizescu (2019) conduziu uma análise dimensional de engrenagens em PLA e ABS utilizando teste de flanco duplo para verificação do batimento radial, determinando classe 4 na escala DIN/ISO, o que corresponde a um batimento de 0,014mm nas engrenagens de ABS, próximo ao valor encontrado para engrenagens de aço utilizadas no mesmo estudo.

Buj-Corral (2023) analisou engrenagens impressas em PLA e Nylon com diferentes módulos, inferindo que módulos maiores garantem menor variação dimensional, e apresentando superioridade da estabilidade dimensional do PLA (variação até 0,15%). Zisopol (2023) investigou a variação dimensional dos diâmetros internos de engrenagens impressas em PLA, destacando a relação entre os parâmetros de impressão e a variação dimensional, concluindo que a menor variação dimensional (0,05mm) é obtida com camada de 0,1mm e 50% de preenchimento.

Em meio aos estudos relacionados a medição de parâmetros funcionais, foram encontradas publicações acerca de desenvolvimentos de protótipos funcionais e didáticos. Plath (2018) desenvolveu um sistema didático de cames e seguidores aplicados a teares, utilizando filamento em PLA. Santos (2018) projetou uma garra de 3 dedos utilizando filamento de PLA, relatando dificuldade em utilizar o filamento de ABS devido a variações dimensionais. Bastos (2020) realizou a impressão de uma engrenagem em PLA com fibra de carbono para a construção de um redutor de engrenagens para fins didáticos. Rocha (2021) apresentou um projeto de articulação para braços robóticos que inclui um redutor planetário totalmente impresso por FDM. Moldovan (2023) desenvolveu um planetário com engrenagens de PLA e simulou sua aplicação com cargas de até 18N suportando até 855000 ciclos.

Engrenagens manufaturadas no processo VAT

Dos nove estudos contendo os processos baseados em estereolitografia, 33% (n=3) desenvolveram metodologias comparativas. Outros dois estudos apresentaram análises de resinas que podem contribuir para melhores propriedades mecânicas de engrenagens fabricadas por este processo. O restante da amostra é composto por duas revisões de literatura e um estudo de desenvolvimento, elaborando um protótipo de uma caixa de transmissão utilizando o processo de SLA para impressão das engrenagens.

X Liu (2017) investigou a aplicação de uma liga cerâmica (zircônia-alumina) com a resina fotocurável, que possibilitou a impressão de uma engrenagem com elevadas propriedades mecânicas. De forma semelhante, Wu (2021) apresentou o desenvolvimento de uma resina de ester isocianato, para impressão de diversas peças além de engrenagens por meio de DLP obtendo variação dimensional de superfície de $\pm 5\mu\text{m}$.

Vasilescu (2019) realizou a impressão de engrenagens através de DLP comparando a posição de formação das camadas impressas, concluindo que a variação dimensional é reduzida ao utilizar pequenas inclinações da engrenagem em relação a direção de impressão. O estudo de Michal (2020) corrobora com a conclusão anterior, analisando a impressão de engrenagens com inclinação de 45° e variação máxima de 0,28%. Pisula (2019) efetuou um estudo comparativo entre os 4 principais métodos de impressão, em que as engrenagens impressas por DLP resultaram em menores desvios dimensionais que engrenagens feitas por FDM ou PBF.

Engrenagens manufaturadas no processo PBF

Dos 14 estudos que mencionam os métodos de manufatura aditiva baseados em PBF, cinco abordam o processo de DMLS, quatro o processo de SLM e dois o processo de SLS. Constam também nas análises realizadas o desenvolvimento de processos híbridos, incluindo métodos de fabricação convencionais, como fresamento e hobbing de engrenagens após sinterização. As análises abordam parâmetros variados como análise dimensional, resistência ao desgaste, rugosidade superficial e estruturas otimizadas para redução de vibração.

Ramadani (2018) realizou um estudo comparativo sobre o nível de ruído no engrenamento entre peças impressas sólidas e com estrutura de preenchimento treliçadas, semelhante ao preenchimento de estrutura dos processos baseados em FDM, através do processo de SLM. Verificou-se que as engrenagens impressas com preenchimento treliçado e com os espaços preenchidos com polímero emitem cerca de metade do ruído gerado com um par de engrenagens sólidas produzidas com o mesmo material, bem como a redução de massa da peça. Foi utilizado o pó de liga de titânio Ti-6Al-V, em um ensaio parametrizado com 310rpm e torque de 60N.m. Outro estudo avaliando a redução do preenchimento sólido realizou impressões de engrenagens com estrutura interna baseada em colmeia, apresentando redução de 29% na massa da peça final. (CHUL-KYU, 2023)

Uma comparação do ciclo de vida incluindo engrenagens impressas pelo processo de SLM e usinadas, conclui que o consumo de energia para fabricação por meio da manufatura aditiva chega a 3 vezes mais do que métodos convencionais, mostrando ainda uma perda maior de material, embora a engrenagem impressa utilizou-se de estrutura treliçada resultando em uma peça 40% mais leve. (SILVA, 2023)

Tezel (2019) comparou o desempenho de engrenagens impressas no processo de DMLS e fabricadas por métodos convencionais, aplicando teste de engrenamento em bancada com rotações de 500 a 1000 rpm com variações de torque 0,25 à 0,50Nm. Sugere-se que as engrenagens impressas por pós de ligas de alumínio (Al-Si-10Mg) e titânio (Ti-6Al-V) podem substituir engrenagens fabricadas no mesmo material por métodos convencionais em aplicações leves. Verificou-se também que o incremento rotacional proporciona maior durabilidade em relação ao desgaste superficial devido à diminuição do tempo de contato, como infere Tunalioglu (2021).

Um estudo comparativo entre engrenagens ($z=20$; $m=1$) impressas em aço inox AISI 420 e fabricadas por hobbing, aplicou em bancada de teste rotações de 250 à 1000rpm com torques de 0,25N.m à 0,5N.m. Mostrou-se que as engrenagens impressas alcançam dureza superficial similares as usinadas, além de taxa de desgaste similar em

rotações entre 500 e 1000rpm. O desgaste superficial é maior nas engrenagens impressas em torques elevados e na primeira faixa de aumento de rotação. Sugere-se que a maior parte do desgaste das engrenagens impressas seja por falta de sinterização em pequenas regiões do dente, provocando fissuras que se propagam com o aumento de pressão. Também é indicado o polimento da superfície do dente como forma de preservar do desgaste de superfície. (TEZEL, 2020)

A aplicação de uma engrenagem impressa em aço maraging pelo processo de DMLS ($z=18$; $m=2,5$) foi analisada através do método de elementos finitos auxiliado por computador, investigando tensões de flexão sob o torque de 135N.m, validando a aplicação sob este parâmetro, segundo Apparao (2020).

Budzik (2018) realizou um ensaio comparativo de engrenagens ($z=19$; $m=3$) impressas pelo processo de DMLS utilizando pó de aço inoxidável equivalente AISI 630, efetuando uma análise dimensional através de métodos óticos e por toque, bem como a análise de rugosidade superficial. Foi apresentado resultados de rugosidade entre as peças impressas, com jateamento de areia e com acabamento em fresamento CNC, e peças usinadas. O jateamento mostrou-se eficaz na redução da rugosidade da peça impressa, enquanto a engrenagem impressa com usinagem de acabamento, mostrou-se ligeiramente melhor que a própria engrenagem totalmente usinada. A análise macro geométrica através de escaneamento ótico, apresentou resultados de desvio similares entre os processos de manufatura aditiva e convencionais.

Um estudo avaliou a aplicação da técnica de laser peening na fabricação de engrenagens de pequenas dimensões ($z=10$; $m=0,8$) em aço inox 316 pelo processo de SLM, aprimorando as tensões residuais geradas pelo processo de sinterização, segundo Pathak (2022). A aplicação deste tratamento superficial também foi analisada em outro estudo do mesmo autor, com a impressão de engrenagens helicoidais com mesmo módulo e número de dentes. Destaca-se a melhora no contorno da superfície do dente pela diminuição da rugosidade, o que corrobora com a diminuição de tensões de contato.

A impressão de engrenagens poliméricas pelo método de PBF é analisada por Kalani (2022), através da simulação de engrenamento em bancada de testes. Foi verificado o desgaste superficial relacionando com a temperatura nos dentes das engrenagens de Nylon ($Z=20$; $M=2$), sugerindo equivalência no comportamento térmico entre engrenagens poliméricas injetadas. Comparando o desgaste de superfície entre as peças geradas por métodos de fabricações distintos, foi mostrado superioridade a engrenagem de nylon impressa com aplicação de torque de 1,6 e 2 N.m.

CONCLUSÃO

A partir desta revisão de literatura, foram encontrados diversos estudos mencionando a manufatura aditiva de engrenagens, avaliando uma série de parâmetros de impressão. Destacou-se o processo de modelamento de deposição fundida com maior número de resultados. As análises realizadas indicam a capacidade de carga dos materiais através de simulações de engrenamento e ensaios destrutivos, caracterizando os processos e materiais empregados. A análise dimensional e rugosidade superficial também foram citadas em boa parte dos estudos.

As análises sobre o processo de FDM indicam os principais materiais utilizados como PLA, ABS e Nylon, onde nos estudos comparativos é apresentado menor desgaste de superfície nas engrenagens de Nylon, enquanto as engrenagens de PLA apresentam melhor estabilidade dimensional. São estudados também o enriquecimento de propriedades mecânicas através da infusão de materiais cerâmicos, como fibra de carbono e fibra de vidro.

Das referências encontradas acerca dos processos oriundos da fotopolimerização, pouco se pode concluir através das análises efetuadas, devido a ausência de métodos de avaliação do engrenamento e desgaste de superfície. No entanto, a precisão dimensional é um fator que pode colaborar positivamente com a fabricação de engrenagens, assim como a inclusão de materiais cerâmicos na resina fotossensível propõe um aumento na resistência mecânica das peças.

Os resultados produzidos sobre os processos de fusão de leito em pó sugerem boa perspectiva sobre a utilização das engrenagens fabricadas por manufatura aditiva, devido a empregabilidade de materiais metálicos. Contudo, apesar de obter boas propriedades mecânicas e possibilitar um preenchimento sólido dos dentes das engrenagens, a precisão dimensional só é satisfatoriamente obtida a partir do acabamento em métodos convencionais, diminuindo a eficiência do processo.

Conclui-se que a aplicação prática das engrenagens fabricadas por manufatura aditiva é ainda limitada pelos fatores de precisão dimensional e vida útil, definidos por limites teóricos. Dessa forma, sua utilização é majoritariamente incluída em projetos demonstrativos e didáticos ou sob baixa solicitação mecânica.

A praticidade da manufatura aditiva obtida para fabricação de peças em outros fins, não é observada na fabricação de engrenagens, pois para tal se faz necessária a

aplicação de tecnologias ainda distantes dos usuários, como filamentos e materiais especiais, bem como métodos de pós processamento para obter resultados sólidos.

Espera-se que o presente estudo possa auxiliar futuros trabalhos na seleção de materiais e métodos envolvendo a impressão 3D de engrenagens.

Sugere-se para trabalhos futuros o desenvolvimento de dispositivos práticos com a aplicação de engrenagens, simulando situações reais de operação ao invés de simulações forçadas de desgaste em bancadas de testes.

REFERÊNCIAS

AHMED, Minhaz et al. **Comparative Analysis of Additive and Subtractive Manufacturing Processes through the Fabrication of a Spur Gear**. 2020.

APPARAO, D.; RAJU, MV Jagannadha. Design and analysis of spur gear manufactured by DMLS process. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 149-153, 2021.

ARAÚJO, Vinicius Cavalcante. **Manufatura aditiva e suas aplicações na indústria: uma revisão de literatura**. 2021.

BASTOS, Rodrigo Corrêa Leite.; MARTINS, Maxwell Rodrigues.; ARAUJO, Roberto Verardo.; WILLY ANK, Moraes. Impressão 3d de engrenagens com polímeros reforçados com fibra para redutor didático. **XVII Simpósio Internacional de Ciências Integradas da UNAERP** - Campus Guarujá, 2020.

BAUMERS, M.; TUCK, C.; HAGUE, R. Selective heat sintering versus laser sintering: comparison of deposition rate, process energy consumption and cost performance. In: **2014 International Solid Freeform Fabrication Symposium**. University of Texas at Austin, 2015.

BODAGHI, Mahdi et al. Glass fiber reinforced acrylonitrile butadiene styrene composite gears by FDM 3D printing. **Advanced Materials Interfaces**, v. 10, n. 27, p. 2300337, 2023.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETH, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 8ed. Porto Alegre: AMGH, 211.

BUDZIK, Grzegorz et al. Analysis of 3D printing parameters of gears for hybrid manufacturing. In: **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing, 2018.

BUJ-CORRAL, Irene; ZAYAS-FIGUERAS, Enrique Ernesto. Comparative study about dimensional accuracy and form errors of FFF printed spur gears using PLA and Nylon. **Polymer Testing**, v. 117, p. 107862, 2023.

COSTA, Rafael Victor Pires. **Caracterização do comportamento mecânico de engrenagens poliméricas produzidas por manufatura aditiva**. Ouro Preto, 2021.

DA COSTA, Jonathan et al. DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS PARA FABRICAÇÃO DE ENGRANAGENS POR MANUFATURA ADITIVA. **REVISTA DE EXTENSÃO E INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNISOCIESC**, v. 8, n. 3, 2021.

DENNIG, Hans-Jörg; ZUMOFEN, Livia; KIRCHHEIM, Andreas. Feasibility investigation of gears manufactured by fused filament fabrication. In: *Industrializing Additive Manufacturing: Proceedings of AMPA2020*. **Springer International Publishing**, p. 304-320, 2021.

DEVSHETTE, A. R. et al. MODELING AND FABRICATION OF 5-SPEED GEARBOX USING 3D PRINTING WITH OPTIMUM WEIGHT. **International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology**, v.8, n.1, p.213-219, 2023.

DIMIĆ, Aleksandar et al. The influence of material on the operational characteristics of spur gears manufactured by the 3D printing technology. **Strojnícky časopis-Journal of Mechanical Engineering**, v. 68, n. 3, p. 261-270, 2018.

DZIUBEK, Tomasz. Application of coordination measuring methods for assessing the performance properties of polymer gears. **Polimery**, v. 63, n. 1, p. 49-52, 2018.

GBADEYAN, Oluwatoyin Joseph; MOHAN, T. P.; KANNY, K. Processing and characterization of 3D-printed nanoclay/acrylonitrile butadiene styrene (abs)

nanocomposite gear. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 109, p. 619-627, 2020.

GIL, Antonio Carlos et al. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2017.

GOMES, Ramon Brunow. **Análise macroscópica e microscópica de tensões de contato em engrenagens**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

HARSHA, K. Mohan et al. Comparison of wear behaviour of polymer spur gears using FDM process. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, p. 012028, 2021.

JIN, Chul-Kyu. Design of the Spur Gear with Honeycomb Lattice Structure and PBF Printing. **Journal of the Korean Society of Industry Convergence**, v. 26, n. 4_1, p. 529-536, 2023.

KALANI, Anand et al. Investigation of thermal and wear behaviour of 3D printed PA-12 nylon polymer spur gears. **El-Cezeri**, v. 9, n. 3, p. 1121-1135, 2022.

KOTKAR, Tanmay et al. Modelling and testing of spur gear made of different 3D printed materials. **Int. JS Res. Sci. Eng**, v. 4, p. 1389-1394, 2018.

KUO, Chil-Chyuan et al. Characterizations of polymer gears fabricated by differential pressure vacuum casting and fused deposition modeling. **Polymers**, v. 13, n. 23, p. 4126, 2021.

LAZUARDI, LAZUARDI. The effect of 3D printing parameters on the tensile strength of acrylonitrile butadiene styrene filament for designing CNC router machine gears. **Jurnal Polimesin**, v. 21, n. 5, p. 79-84, 2023.

LEÃO, Lourdes Meireles. **Metodologia do estudo e pesquisa: facilitando a vida dos estudantes, professores e pesquisadores**. Editora Vozes, 2019.

LI, CHENXIAO; LEE, CHUL-HEE. Surface Durability Study of 3D Printed Gears Using Two Different Materials. **Materiale Plactice**, v. 60, n. 2, 2023.

LIU, Xiaoyan et al. The preparation of ZrO₂-Al₂O₃ composite ceramic by SLA-3D printing and sintering processing. **Ceramics International**, v. 46, n. 1, p. 937-944, 2020.

ŁUSZCZEK, Jakub. Review of methods of designing and additive manufacturing of gears. **Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej**, v. 70, n. 2, 2021.

MAHIR, U. Z. U. N.; YILMAZ, G. Ü. R.; USCA, Üsame Ali. Manufacturing of new type curvilinear tooth profiled involute gears using 3D printing. **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, v. 20, n. 1, p. 278-286, 2018.

MAŠOVIĆ, Robert et al. Analysis of printing direction impact on dimensional accuracy of spur gears. In: **Advances in Mechanism and Machine Science: Proceedings of the 15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science 15**. Springer International Publishing, p. 1111-1120, 2019.

MAZZO, Norberto. **Engrenagens cilíndricas: da concepção à fabricação**. Editora Blucher, 2013.

MICHAL, Dávid et al. Analysis of shape and dimensional deformation of the gear made by digital light processing (Dlp) additive technology and measured by industrial tomography. In: **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications Ltd, p. 205-212, 2020.

MILUSHEVA, P.; RUSEV, D. TECHNOLOGY FOR INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF THE SURFACE OF POLYMER GEAR TEETH. **Journal of the Balkan Tribological Association**, v. 27, n. 4, 2021.

MITROVIC, Radivoje et al. Determination of optimal parameters for rapid prototyping of the involute gears. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2018. p. 012105.

MOLDOVAN, Cristian; STICLARU, Carmen. Performance Analysis of Polymer Additive Manufactured Gear Bearings. **Applied Sciences**, v. 13, n. 22, p. 12383, 2023.

NAIKWADI, Sushil S.; LONARE, G. M. **Cost optimization of Helical Gear of Transmission System Using Additive Manufacturing**. 2018.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**. Bookman editora, 2013.

NUNES, João Caio Souza et al. **Máquina de cura para impressoras SLA com o uso de manufatura aditiva**. Manaus, 2022.

PATHAK, Sunil et al. Microstructure and surface quality of SLM printed miniature helical gear in LSPwC. **Surface Engineering**, v. 39, n. 2, p. 229-237, 2023.

PATHAK, Sunil et al. Surface integrity of SLM manufactured meso-size gears in laser shock peening without coating. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 85, p. 764-773, 2023.

PISULA, Jadwiga et al. An analysis of polymer gear wear in a spur gear train made using FDM and FFF methods based on tooth surface topography assessment. **Polymers**, v. 13, n. 10, p. 1649, 2021.

PISULA, Jadwiga Małgorzata; BUDZIK, Grzegorz; PRZESZŁOWSKI, Łukasz. An Analysis of the Surface Geometric Structure and Geometric Accuracy of Cylindrical Gear Teeth Manufactured with the Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Method. **Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering**, v. 65, n. 2, 2019.

PISULA, Jadwiga. The geometric accuracy analysis of polymer spiral bevel gears carried out in a measurement system based on the Industry 4.0 structure. **Polimery**, v. 64, n. 5, p. 353-360, 2019.

PLATH, Guilherme Felipe Souza. **Sistema didático de cames e seguidores aplicados a teares**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

PRADO, Adolpho Nilson; DO AMARAL MATTOS, Érica Cristina; DA SILVA RODRIGUES, Fábio. MANUFATURA ADITIVA: conceitos, aplicações e impactos na gestão. **Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)**, v. 3, n. 1, 2019.

RAMADANI, R. et al. Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. **Int. J. Simul. Model**, v. 17, n. 1, p. 92-104, 2018.

RIZESCU, C. I.; CIOBANU, R. R.; RIZESCU, D. Double Flank Gear Roll Inspection of Spur Gears Manufactured using Fused Deposition Modeling. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, p. 012031, 2019.

ROCHA, Marco António Mendonça. **Articulação Modular para Braços Robóticos**. Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto, 2021.

SANTOS, João Victor Gomes. **Desenvolvimento de Gripper Low Cost para manipulador robótico baseado em impressão 3D**. Tese de Doutorado. Instituto Politecnico de Braganca (Portugal). 2018.

SILVA, Juan et al. **Comparative life cycle inventory of CNC machining and powder bed fusion additive manufacturing**. 2023.

SILVA, Lenine Marques de Castro. **Projeto, fabricação, construção e testes de um tribômetro FZG reduzido com carregamento variável**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2021.

TEZEL, Tugce; TOPAL, Eyup Sabri; KOVAN, Volkan. Characterising the wear behaviour of DMLS-manufactured gears under certain operating conditions. **Wear**, v. 440, p. 203106, 2019.

TEZEL, Tugce; TOPAL, Eyup Sabri; KOVAN, Volkan. Failure analysis of 3D-printed steel gears. **Engineering Failure Analysis**, v. 110, p. 104411, 2020.

TUNALIOGLU, Mert Safak; AGCA, Bekir Volkan. Wear and Service Life of 3-D Printed Polymeric Gears. **Polymers**, v. 14, n. 10, p. 2064, 2022.

TUNALIOGLU, Mert Safak; TORUN, Turgut. The investigation of wear on three-dimensional printed spur gears. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, v. 235, n. 6, p. 2027-2034, 2021.

VASILESCU, Mircea Dorin. Constructiv and technological consideration on the generation of gear made by the DLP 3D-printed methode. **Mat. Plast**, v. 56, p. 440-444, 2019.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. Editora Blucher, 2021.

VOROPAY, Alexey et al. OPTIMIZATION OF MACHINE PARTS MODELS FOR 3D PRINTING. **International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry**, v. 6, n. 3, p. 511-520, 2022.

WU, Tao et al. 3D Printing of High-Performance Isocyanate Ester Thermosets. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 305, n. 11, p. 2000397, 2020.

ZHANG, Ye et al. A parametric study of 3D printed polymer gears. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, p. 4481-4492, 2020.

ZHANG, Ye et al. A physical investigation of wear and thermal characteristics of 3D printed nylon spur gears. **Tribology International**, v. 141, p. 105953, 2020.

ZHANG, Ye. **Intelligent Manufacturing Applied to Additive Manufactured Polymer Gears**. Tese de Doutorado. University of Warwick. 2020.

ZISOPOL, Dragos Gabriel; IACOB, Dragos Valentin; PORTOACA, Alexandra-Ileana. A Theoretical-Experimental Study of the Influence of FDM Parameters on PLA Spur Gear Stiffness. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 12, n. 5, p. 9329-9335, 2022.

ZISOPOL, Dragos Gabriel; MINESCU, Mihail; IACOB, Dragos Valentin. A Theoretical-Experimental Study on the Influence of FDM Parameters on the Dimensions of Cylindrical Spur Gears Made of PLA. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 13, n. 2, p. 10471-10477, 2023.