

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

Metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva e destinadas a aplicações industriais

Arthur Gomes Lima França



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

Arthur Gomes Lima França

**Metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes
elegíveis para manufatura aditiva e destinadas a aplicações industriais**

Dissertação de Mestrado

Salvador, 2024

ARTHUR GOMES LIMA FRANÇA

Metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes elegíveis
para manufatura aditiva e destinadas a aplicações industriais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu
do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção
do título de Mestre em GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL.

Orientador: Prof. Dr. Valter Estevão Beal

Salvador, 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

F814m França, Arthur Gomes Lima

Metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva e destinadas a aplicações industriais. / Arthur Gomes Lima França. – Salvador, 2024.

163 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Valter Estevão Beal.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2024.

Inclui referências.

1. Manufatura aditiva. 2. Impressão 3D. 3. Peças sobressalentes. 4. AHP. 5. Metodologia. 6. Classificação. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Beal, Valter Estevão. III. Título.

CDD 005.1068

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC**Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada “**Metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva destinadas a aplicações industriais**” apresentada no dia 12 de agosto de 2024, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Assinado eletronicamente por:
Valter Estevão Beal
CPF: ***.452.669-**
Data: 12/08/2024 17:17:23 -03:00

Orientador:

Prof. Dr. Valter Estevão Beal
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Alex Álisson Bandeira Santos
CPF: ***.191.765-**
Data: 12/08/2024 16:45:52 -03:00

Membro Interno:

Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Cristiano Vasconcellos Ferreira
CPF: ***.867.289-**
Data: 13/08/2024 09:15:05 -03:00

Membro Interno:

Prof. Dr. Cristiano Vasconcellos Ferreira
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Neri Volpato
CPF: ***.261.709-**
Data: 13/08/2024 07:54:25 -03:00

Membro Externo:

Prof. Dr. Neri Volpato
UTFPR

"Dream until your dreams come true".

(Steven Tyler)

Agradecimentos

Aos meus pais, Josué e Tânia, aos meus irmãos, Ayrton e Ana Luíza, e à minha noiva Priscilla, agradeço imensamente pela incrível compreensão e generosidade por me oferecerem, sem reivindicações, momentos de solitude e foco quando necessitava, por se fazerem constantemente presentes e pelo incansável apoio, encorajando-me nos momentos e decisões mais difíceis. Sou profundamente grato por sempre desejarem o melhor para mim, pelos árduos esforços em ajudar-me a superar cada desafio e, sobretudo, pelo amor inabalável que têm por mim.

Ao meu orientador Professor Doutor Valter Beal, pelo empenho, paciência, boas ideias, debates e correções que me ajudaram bastante a realizar esta dissertação e as publicações feitas sem nunca me desmotivar. Os seus comentários contribuíram significativamente para o aprimoramento do meu trabalho e para o meu desenvolvimento profissional.

Aos membros da banca examinadora, Professor PhD Neri Volpato, Professor Doutor Alex Álisson, Professor Doutor Cristiano Ferreira, agradeço pelo interesse em aceitarem o convite para avaliar esta dissertação, pelo tempo dedicado para revisar meu trabalho, pelos valiosos *insights* e pelo rigor acadêmico demonstrado durante a sessão de defesa.

Aos colegas do SENAI CIMATEC e SENAI ITED pela disponibilidade, vontade e suporte necessários para a concretização deste trabalho.

Resumo

Manufatura Aditiva (do inglês, *Additive Manufacturing* - AM) refere-se à família de tecnologias de manufatura capazes de fabricar produtos físicos a partir de modelos digitais através da adição de material, camada por camada. A AM está em contínua evolução tecnológica e tem sido amplamente empregada para aprimorar o gerenciamento de peças sobressalentes (*Spare Parts Management* - SPM) em empresas, através da redução de custos, estoque e tempo de inatividade dessas peças. Periódicos têm sido publicados, e *softwares* comercializados, para identificar, classificar e selecionar peças sobressalentes (PS) apropriadas para a aplicação da AM. Entretanto, para atingir este propósito, existem poucas metodologias consolidadas e *softwares* específicos. Ademais, os *softwares* existentes possuem elevado custo de aquisição, fator que pode inviabilizar o desenvolvimento de determinados projetos. Portanto, o objetivo deste trabalho é elaborar uma metodologia para classificação e seleção de PS elegíveis para AM e destinadas a aplicações industriais. Para elaborá-la, foram coletados, com base em uma revisão da literatura, os critérios utilizados para identificação das PS elegíveis para AM. Posteriormente, foi desenvolvida uma sistematização para identificar e adequar os critérios de elegibilidade de acordo com a necessidade de cada empresa interessada em adotar a AM como alternativa para o SPM. Para atingir este objetivo, os critérios de elegibilidade foram filtrados e classificados em critérios estratégicos (CE) e critérios técnicos de engenharia (CT). Além disso, os CEs foram agrupados segundo os interesses mais comuns das companhias para adotar a AM como alternativa para o SPM: inovação, garantia de suprimentos, redução de custos e manutenção de peças. A metodologia possui processos definidos para selecionar decisores, filtrar PS, escolher e normatizar os CEs e CTs, além de conter uma matriz capaz de categorizar as PS em *Design for Additive Manufacturing* (DfAM), manufatura convencional (MC), MC aliada à AM (MC + AM) e AM. Para validar a ferramenta concebida, foram realizados cinco estudos de caso em duas companhias de ramos industriais distintos. Para auxiliar as tomadas de decisões dos participantes dos cases, definiu-se o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Obteve-se como resultado da aplicação da metodologia três PS elegíveis para MA, duas categorizadas como MC + AM e uma no limiar entre AM e MC + AM. Após a implementação dos estudos de caso, os responsáveis responderam um formulário para avaliar o grau de contentamento com a metodologia desenvolvida, a qual obteve 98% de satisfação. Esta metodologia e os resultados dos cases foram comparados com metodologias publicadas e *softwares* disponíveis. Após a análise dos resultados obtidos e das comparações realizadas, verificou-se que a metodologia desenvolvida pode ser considerada como uma ferramenta analítica promissora, capaz de identificar, classificar e selecionar PS elegíveis para AM destinadas a aplicações industriais, contribuindo para o aperfeiçoamento da SPM.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Impressão 3D; Peças sobressalentes; AHP; Metodologia; Classificação.

METHODOLOGY FOR CLASSIFYING AND SELECTING SPARE PARTS ELIGIBLE FOR ADDITIVE MANUFACTURING AND INTENDED FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS.

Additive Manufacturing (AM) refers to the family of manufacturing technologies capable of manufacturing physical products from digital models by adding material, layer by layer. AM is in continuous technological evolution and has been widely used to improve spare parts management (SPM) in companies, by reducing costs, inventory and downtime of these parts. Periodicals have been published, and software have been commercialized, to identify, classify, and select appropriate spare parts (SP) for AM application. However, to achieve this purpose, there are few consolidated methodologies and specific software. Furthermore, existing software has a high acquisition cost, a factor that can make the development of certain projects unfeasible. Therefore, the aim of this work is to develop a methodology for classifying and selecting SP eligible for AM and intended for industrial applications. To prepare it, based on a literature review, the criteria used to identify PS eligible for AM were collected. Subsequently, a systematization was developed to identify and adapt the eligibility criteria according to the needs of each company interested in adopting AM as an alternative to SPM. To achieve that goal, the eligibility criteria were filtered and classified into strategic criteria (SC) and technical engineering criteria (TC). Furthermore, the SCs were grouped according to the companies' most common interests in adopting AM as an alternative to SPM: innovation, supply assurance, cost reduction and parts maintenance. The methodology has defined processes to select decision makers, filter SP, choose and normalize SCs and TCs, in addition to containing a matrix capable of categorizing SP into Design for Additive Manufacturing (DfAM), conventional manufacturing (CM), CM combined with AM (CM + AM) and AM. To validate the designed tool, five case studies were carried out in two companies from different industrial sectors. To assist case participants in making decisions, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method was defined. As a result of applying the methodology, three SP eligible for AM were obtained, two categorized as CM + AM and one on the threshold between AM and CM + AM. After implementing the case studies, those responsible completed a form to assess the degree of satisfaction with the methodology developed, which obtained 98% satisfaction. This methodology and the results of the cases were compared with published methodologies and available software. After analyzing the results obtained and the comparisons made, it was verified that the methodology developed can be considered as a promising analytical tool capable of identifying, classifying and selecting SP eligible for AM intended for industrial applications, contributing to the improvement of SPM.

Keywords: Additive manufacturing; 3D printing; Spare parts; AHP; Methodology; Classification.

Lista de Tabelas

Tabela 1. Categorias de processos de manufatura aditiva.	11
Tabela 2. Fatores motrizes e barreiras para a adoção da manufatura aditiva (continua).	17
Tabela 3. Normas técnicas de manufatura aditiva vigentes e aplicadas à qualificação e certificação.	20
Tabela 4. Critérios estratégicos para classificação de peças sobressalentes elegíveis para AM e alinhamento com objetivos estratégicos da companhia (continua).	28
Tabela 5. Critérios técnicos de engenharia para seleção de peças sobressalentes elegíveis para AM (continua).	38
Tabela 6. Operadores de pesquisa empregados nas bases de dados científicos definidas para busca da literatura.	49
Tabela 7. Critérios de inclusão e exclusão dos materiais de referência para a revisão da literatura.	49
Tabela 8. Quantidade de materiais de referência obtidos nas bases de dados científicos definidas para busca da literatura.	50
Tabela 9. Matriz de normalização para critérios subjetivos.	54
Tabela 10. Escala do Índice de Satisfação (I.S.) da metodologia desenvolvida.	60
Tabela 11. Detalhamento do perfil profissional dos decisores dos estudos de caso.	68
Tabela 12. Número de tentativas do método AHP para CEs e CTs dos cases feitos para o CIMATEC.	69
Tabela 13. Informações técnicas das peças dos cases 4 e 5.	76
Tabela 14. Número de tentativas do método AHP para CEs e CTs dos cases feitos para a PAVNORTE.	77
Tabela 15. Resumo dos resultados dos cases.	79
Tabela 16. Resumo dos resultados obtidos do CASTOR.	83
Tabela 17. Comparação entre metodologias e <i>software</i> CASTOR aplicados para seleção de peças elegíveis para AM.	85
Tabela 18. Comparação entre metodologia desenvolvida e <i>softwares</i> para seleção de PS elegíveis para AM.	86
Tabela 19. Estimativa de investimento para aplicação da metodologia para um case.	87
Tabela 20. Escala fundamental de números absolutos do método AHP.	121
Tabela 21. Índice randômico do método AHP.	121

Lista de Figuras

Figura 1. Primeiro objeto impresso por Kodama em 1981.....	6
Figura 2. Primeira máquina SLA construída por Charles Hull, em 1983, e o seu primeiro objeto impresso.	7
Figura 3. Modelo CAD de uma alavanca (1) e sua representação em malha triangular refinada contendo 30.208 triângulos com arestas de até 5 mm, 15.094 vértices e armazenada em formato STL (2).	8
Figura 4. Etapas para fabricação de produto por manufatura aditiva	9
Figura 5. Estrutura ISO/ASTM para normas de manufatura aditiva.	21
Figura 6. Fluxograma do processo de qualificação da API STD 20S.....	24
Figura 7. Métodos mais utilizados para classificação de peças sobressalentes.	42
Figura 8. Delimitação da pesquisa.	46
Figura 9. Metodologia da pesquisa.	48
Figura 10. Definição dos critérios de classificação das peças sobressalentes.	51
Figura 11. Definição do método para classificação e categorização de peças sobressalentes.	52
Figura 12. Avaliação <i>Go/No-Go</i>	58
Figura 13. Método <i>Delphi</i>	59
Figura 14. Definição dos critérios para aplicação dos estudos de caso.	60
Figura 15. Avaliação profissional.	62
Figura 16. Metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva e destinadas a aplicações industriais.	64
Figura 17. Matriz de categorização com as peças sobressalentes dos estudos de caso realizados.	69
Figura 18. Meia hélice esquerda.	73
Figura 19. Engrenagem do esticador esquerdo.....	74
Figura 20. Vibradora BOMAG VDA 400 <i>dual concept</i>	75
Figura 21. Página <i>on-line</i> do teste gratuito do <i>software</i> CASTOR.	82
Figura 22. Matriz de comparações pareadas do método AHP.	120

Lista de Siglas e Abreviaturas

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AHP – *Analytic Hierarchy Process*
- AM – *Additive Manufacturing*, Manufatura Aditiva
- API – *American Petroleum Institute*
- API 20S – *API Standard 20S*
- API STD 20S – *API Standard 20S*
- CE – Critério Estratégico
- CT – Critério Técnico de Engenharia
- DfAM – *Design for Additive Manufacturing*
- DNV GL – *Det Norske Veritas group*
- DNV-ST-B203 – *DNV Standard B203*
- IEC – *International Electrotechnical Commission*
- I.S. – Índice de Satisfação
- MC – Manufatura Convencional
- MCDM – *Multi-criteria Decision Making*
- PS – Peça Sobressalente
- SPM – Gerenciamento de Peças Sobressalentes

Sumário

Resumo	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Siglas e Abreviaturas	xix
1 Introdução	1
1.1 OBJETIVO	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	3
2 Revisão da Literatura	5
2.1 MANUFATURA ADITIVA	5
2.1.1 HISTÓRIA	6
2.1.2 PROCESSO PRODUTIVO	8
2.1.3 OPORTUNIDADES PARA AS INDÚSTRIAS	10
2.1.4 DESAFIOS PARA AS INDÚSTRIAS	13
2.1.5 NORMAS TÉCNICAS PARA QUALIFICAÇÃO E CERTIFICAÇÃO	18
2.2 PEÇAS SOBRESSALENTES	25
2.2.1 DEFINIÇÃO	25
2.2.2 GERENCIAMENTO	25
2.2.2.1 Métodos para Classificação de Peças Sobressalentes	27
2.2.2.2 Oportunidades para Manufatura Aditiva	41
2.3 MÉTODO MULTICRITÉRIO PARA TOMADA DE DECISÃO: AHP	43
3 Métodos e Materiais	45
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	45
3.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	45
3.3 METODOLOGIA DA PESQUISA	46
3.3.1 IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS	47
3.3.1.1 Materiais de Referência para Revisão da Literatura	48
3.4 CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DAS PEÇAS SOBRESSALENTES	50
3.5 CLASSIFICAÇÃO E CATEGORIZAÇÃO DAS PEÇAS SOBRESSALENTES	52
3.6 AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE SATISFAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA	58
3.7 CRITÉRIOS PARA APLICAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO	60
3.7.1.1 SENAI CIMATEC	61
3.7.1.2 PAVNORTE CONSTRUTORA	61
3.7.1.3 Seleção de Decisores da Companhia	61
4 Resultados	65
4.1 SENAI CIMATEC: RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASO	65
4.1.1 MACRO ETAPA INICIAÇÃO	65
4.1.2 MACRO ETAPA CARACTERIZAÇÃO	66
4.1.3 MACRO ETAPA ANÁLISE DE RESULTADOS	71
4.2 PAVNORTE: RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASO	72

4.2.1	MACRO ETAPA INICIAÇÃO	73
4.2.2	MACRO ETAPA CATEGORIZAÇÃO	74
4.2.3	MACRO ETAPA ANÁLISE DE RESULTADOS	78
4.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM <i>SOFTWARE</i> CASTOR	80
4.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OUTROS <i>SOFTWARES</i> E METODOLOGIAS	83
5	Conclusões	88
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
	Referências	91
	Anexo 1. Comparação entre os níveis de afinidade dos periódicos selecionados na literatura com os objetivos.	101
	Anexo 2. Critérios para filtragem de peças sobressalentes.	104
	Anexo 3. Resumo das Avaliações <i>Go/No-Go</i> dos estudos de caso.	105
	Anexo 4. Resultado do método <i>Delphi</i> e cálculo do CVR dos critérios de elegibilidade selecionados pelos decisores para os estudos de caso.	106
	Anexo 5. Formulário para avaliação da satisfação dos decisores com a metodologia desenvolvida.	109
	Anexo 6. Peso das perguntas do formulário de avaliação da satisfação dos decisores com metodologia.	112
	Anexo 7. Normalização das respostas do formulário de avaliação da satisfação dos decisores com a metodologia.	113
	Anexo 8. Análises dos <i>feedbacks</i> dos decisores após preenchimento do formulário de satisfação.	114
	Anexo 10. Resultados do <i>software</i> CASTOR para meia hélice esquerda.	116
	Anexo 11 - Resultados do <i>software</i> CASTOR para engrenagem do esticador esquerdo.	117
	Anexo 12. Resultados do <i>software</i> CASTOR para bucha da engrenagem do esticador esquerdo.	118
	Produção Técnica e Científica	123

1 Introdução

Manufatura aditiva, do inglês *Additive Manufacturing* (AM), também conhecida popularmente como impressão 3D, refere-se à família das tecnologias de manufatura capazes de adicionar material sequencialmente, isto é, camada a camada, permitindo, por conseguinte, a fabricação de produtos físicos discretos a partir de modelos digitais (LEARY, 2020; DNV, 2021). Desta maneira, esse novo método de fabricação diverge das tecnologias de manufatura convencional (MC), as quais empregam métodos subtrativos e formativos de materiais para produção de componentes (ISO/ASTM, 2021).

A AM encontra-se em um processo contínuo de aprimoramento tecnológico e comercial. Sua história inicia-se em 1981, com o registro da primeira patente de prototipagem rápida desenvolvida pelo Professor Hideo Kodama, no Japão (KODAMA, 1981). Passados três anos, o físico estadunidense Charles W. Hull, fundador da empresa multinacional *3D Systems Corporation*, registrou a patente considerada mais significativa, denominada de estereolitografia - do inglês, *stereolithography apparatus* (SLA) -, pois resultou na comercialização da AM (GROOVER, 2017), a qual emergiu em 1987, a partir do processo produtivo SLA (WOHLERS e GORNET, 2016). Com o avanço acadêmico, tecnológico e comercial envolvendo a AM, em 2018, a companhia automotiva alemã BMW anunciou o seu milionésimo componente fabricado em série a partir da MA (VANEKER et al., 2020). Reportou-se, em 2021, que as instituições brasileiras PETROBRAS, SENAI Joinville e Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a empresa alemã *ZEISS Group* reuniram-se em projeto de pesquisa cujo objeto de estudo foi um trocador de calor compacto feito em aço AISI 316L e fabricado por AM (METAL AM, 2021). Além desses exemplos, levando em consideração a base de dados do *Science Direct*, no íterim compreendido entre 1999 e 2023, a quantidade de publicações com o termo "*Additive Manufacturing*" aumentou 467.330%. Logo, percebe-se que, ao longo dos anos, a AM e seus benefícios estão sendo explorados nos meios acadêmicos e industriais, além de ser difundidos pela mídia e por círculos políticos (BLÖSCH-PAIDOSH e SHEA, 2017).

Destacam-se como benefícios da AM em comparação à MC: fabricação de pequenos lotes de peças personalizadas, consolidação de componentes, possibilidade de criação de designs mais leves e eficientes (WIBERG, PERSSON e ÖLVANDER, 2021). Ademais, evidenciam-se vantagens na utilização da AM para gestão de peças sobressalentes (PS), como redução nos custos de manufatura, melhoria na capacidade de resposta da cadeia de suprimentos, redução de estoque e seus custos inerentes, além de minimizar custos com transporte, energia, tempo de inatividade, dentre outros benefícios (KNOFIUS, van der HEIJDEN e ZIJM, 2016; CHAUDHURI et al., 2020). Consequentemente, estudos têm sido publicados com o intuito de identificar, classificar e selecionar PS elegíveis para AM.

LINDEMANN et al. (2015) desenvolveram uma metodologia para identificação de peças candidatas adequadas para reprojeto e fabricação a partir das tecnologias de AM considerando todo o ciclo de vida da PS. KNOFIUS, van der HEIJDEN e ZIJM (2016) discutiram

as discrepâncias entre o valor da MA para o setor logístico e a sua aplicação prática, além de desenvolver um método para simplificar a identificação de casos de negócios economicamente valiosos e tecnologicamente viáveis através da AM. FRANDSEN et al. (2019) geraram uma base de dados para que as empresas possam utilizá-la com o intuito de desenvolver metodologias capazes de identificar as peças de reposição mais adequadas para AM. DIAS (2020) apresentou um modelo para seleção de peças sobressalentes de componentes aeronáuticos no contexto dos reparos de danos de combate em aeronaves. CHAUDHURI et al. (2020) elaboraram um processo para identificar as PS elegíveis para AM a partir de um portfólio com cerca de 64 mil peças de reposição disponíveis. SGARBOSSA et al. (2021) abordaram uma comparação estatística entre a gestão de estoque de PS fabricadas por MC e por AM. GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022) apresentaram uma abordagem sistemática para auxiliar na seleção de peças sobressalentes que sejam tecnicamente compatíveis com AM do ponto de vista da competitividade do negócio. LASTRA et al. (2022) identificaram a aplicabilidade da AM para PS na indústria automobilística, especificamente na área de manutenção preventiva. CORUZZOLO, BALUGANI e GAMBERINI (2022), através de uma crítica revisão da literatura, esclareceram o estado da arte relacionado à AM tendo em vista o gerenciamento de PS com foco em modelos, suas hipóteses subjacentes, descobertas e limitações. CARDEAL, LEITE e RIBEIRO (2023), com o objetivo de contribuir para a adoção em larga escala da MA, desenvolveram um método para dar suporte nas tomadas de decisões. Este foi projetado para identificar PS adequadas para AM, além de fornecer apoio para a definição de novas e otimizadas estratégias de gestão de estoque.

Portanto, é perceptível um latente engajamento científico por metodologias destinadas ao gerenciamento de PS através da AM no âmbito industrial. Ainda assim, existem oportunidades a serem exploradas, as quais baseiam as justificativas para o presente projeto de pesquisa, como o baixo número de *softwares* comerciais destinados para avaliar elegibilidade de peças sobressalentes para AM, elevado custo para aquisição destes *softwares* – fator limitante para determinados projetos –, poucas metodologias consolidadas ou normatizadas, permitindo a possibilidade para a geração de novas metodologias, mais adequadas para as necessidades de cada companhia. Além disto, das metodologias disponíveis na literatura, um baixo número delas admite a participação de pessoas com pouco conhecimento técnico em AM para tomada de decisões envolvidas na gestão de PS utilizando a fabricação aditiva. Outra oportunidade está pautada no melhor atendimento às necessidades e expectativas de *stakeholders* a partir de um alinhamento entre os critérios de elegibilidade de PS para AM e os objetivos estratégicos da companhia interessada em adotar a fabricação baseada em camadas como alternativa para gerenciamento das suas peças de reposição.

Diante das oportunidades verificadas, definiu-se elaborar, com base em periódicos, teses, dissertações, normas técnicas e boas práticas aplicadas nos processos de desenvolvimento de produtos, uma metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva e destinadas a aplicações industriais. Deste

modo, a pergunta norteadora a ser respondida por esta dissertação é: “como sistematizar a classificação e a seleção de peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva e destinadas a aplicação industriais?”

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é elaborar uma metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva e destinadas a aplicações industriais.

1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo do trabalho, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar, com base em periódicos, teses, dissertações e normas técnicas, os critérios que devem ser considerados durante a identificação das peças de reposição elegíveis para AM.
- Estabelecer uma sistematização para identificar e adequar os critérios de elegibilidade de acordo com as necessidades de cada empresa interessada em utilizar a AM como alternativa para gestão de peças sobressalentes.
- Analisar a metodologia elaborada a partir de estudos de casos, observando os benefícios e as limitações ao adotá-la como ferramenta analítica para avaliação da AM como alternativa para gerenciamento de peças sobressalentes.

1.3 Organização do Documento

A seção 2 apresenta a revisão sistemática da literatura que embasa esta pesquisa, evidenciando a relevância da manufatura aditiva para o cenário industrial e gerenciamento de peças de reposição, além de descrever o método multicritério para tomada de decisão utilizado e as companhias selecionadas para a realização dos estudos de caso. A seção 3 detalha a metodologia da pesquisa e o método científico seguidos para a elaboração desta dissertação. Em seguida, na seção 4, são descritos os resultados e limitações obtidos da aplicação da metodologia desenvolvida aos estudos de caso. Por fim, a seção 5 conclui a dissertação e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão da Literatura

2.1 Manufatura Aditiva

Consoante à norma técnica ISO/ASTM 52900:2021, AM é um termo comumente utilizado para as tecnologias de fabricação capazes de produzir objetos sólidos a partir de modelos 3D digitais através da sobreposição de camadas, permitindo, por exemplo, a obtenção de peças com geometrias complexas. A AM contrasta com as metodologias de fabricação tradicionais, pois estas utilizam métodos de subtração e formação de materiais para manufatura de peças. Em determinadas circunstâncias, a AM pode ser usada para melhorar as tecnologias de fabricação convencionais. Em outras ocasiões, é o único método para fabricar produtos complexos.

No que se refere a terminologia aplicadas à AM, GROOVER (2017) apresenta as seguintes expressões técnicas como similares: prototipagem rápida, fabricação digital direta, fabricação rápida, fabricação baseada em camadas e fabricação de sólido de forma livre.

As vantagens obtidas através da AM são comumente evidenciadas sob três perspectivas: oportunidades mercadológicas que podem ser alcançadas, eficiências produtivas que podem ser satisfeitas e benefícios da cadeia de suprimentos que podem ser notados (PONFOORT e TATHGAR, 2019). Considerando a evolução do processo produtivo e do modelo de negócios, a AM, quando implementada nas indústrias, busca aumentar o valor percebido de lucro, risco, tempo, inovação, crescimento de mercado e performance (DELOITTE, 2014). Segundo um artigo publicado pela empresa de consultoria empresarial estadunidense *McKinsey & Company*, o setor de AM cresceu, em 2020, para uma indústria de € 13,4 bilhões além de possuir uma taxa de crescimento anual equivalente a 22%. Ademais, “o setor continua extremamente dinâmico, com mais de 200 *players* competindo para desenvolver novos *hardwares*, *softwares* e materiais” (BROMBERGER, ILG e MIRANDA, 2022).

Ressalta-se que o crescimento da utilização de AM tem impactado todos os setores econômicos, a saber: o primário, através do fornecimento de matérias-primas e intermediárias para fabricação de peças; o secundário, mediante produção e aplicação em campo de produtos obtidos por intermédio da fabricação baseada em camadas; além do terciário e do quaternário, empregando serviços para AM ou serviços que a utilizam, como vendas de máquinas, locação, manutenção, treinamentos, entre outros (DESPEISSE e MINSHALL, 2017).

Segundo GROOVER (2017), pode-se classificar as aplicações da AM quatro categorias: projeto, análise e planejamento de engenharia, ferramentais e fabricação de peças finais. No que se refere ao primeiro grupo, é possível validar projetos mais facilmente, utilizando protótipos – isto é, modelos físicos reais –, através da análise das características e funções da peça a ser fabricada. Quanto à análise e ao planejamento de engenharia, pretende-se: aferir, a título de exemplo, os comportamentos aerodinâmicos, elétricos, mecânicos, magnéticos da peça; planejar os processos fabris e avaliar os aspectos estéticos do componente. Levando em

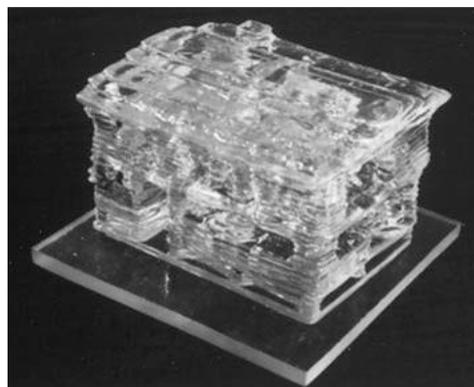
consideração a terceira categoria, busca-se fabricar as próprias ferramentas de produção (método direto) ou gerar um padrão, usando a prototipagem rápida, para a posteriori, produzir as ferramentas (método indireto). Por fim, a fabricação de peças finais, como o próprio termo propõe-se a designar, aplica-se àqueles produtos capazes de serem aplicados diretamente em serviço, ou seja, empregados para cumprir as suas funções de projeto *in loco*.

Inicialmente, as tecnologias de AM eram reconhecidas como de prototipagem rápida, uma vez que eram utilizadas com a finalidade de visualizar preliminarmente protótipos e validar projetos. Todavia, a acelerada evolução dessas tecnologias, impulsionada pela necessidade de aumentar a flexibilidade e velocidade do processo de projeto e fabricação de novos produtos, ocasionou a fabricação rápida de peças de uso final e o desenvolvimento rápido de ferramentais (MEDELLIN-CASTILLO e ZARAGOZA-SIQUEIROS, 2019).

2.1.1 História

A história da AM inicia-se na década de 1980, época cuja primeira patente de prototipagem rápida foi registrada pelo pesquisador do Instituto Municipal de Pesquisa Industrial de Nagoya (Japão), Hideo Kodama. Segundo ele, o novo método automático de fabricação baseava-se na geração de um modelo sólido, ilustrado na Figura 1, a partir da sobreposição de camadas de um polímero líquido fotocurável solidificado a partir da sua exposição a raios ultravioleta (UV) com comprimento de onda entre 300 e 400 nanômetros. Esse novo método de manufatura era capaz de fabricar um modelo sólido em “um curto espaço de tempo, baixo custo e sem trabalho manual excessivo” (KODAMA, 1981). Entretanto, o método apresentava limitações técnicas, como a dificuldade para manter o controle da acurácia dimensional devido, principalmente, ao processo de solidificação da matéria-prima, além da incapacidade de “fabricar uma forma suspensa e não suportada por baixo” (KODAMA, 1981). Além disto, Kodama não obteve o prestígio esperado ao apresentar os resultados do seu trabalho, em 1981, para as comunidades científicas nacionais e internacionais, levando-o a abandonar o projeto (LENGUA, 2017).

Figura 1. Primeiro objeto impresso por Kodama em 1981.



Fonte: LENGUA, 2017.

Todavia, apesar da patente de prototipagem rápida obtida em 1981 por Kodama pelo seu novo método automático de fabricação, o crédito pela criação da primeira impressora 3D é designado ao físico estadunidense Charles W. Hull, fundador da empresa, atualmente multinacional, *3D Systems Corporation*. Ele inventou, em 1984, um sistema capaz de gerar um modelo tridimensional a partir da união de camadas aplicadas de maneira sucessiva, as quais eram integradas automaticamente para fabricar o modelo 3D desejado. Em termos técnicos, o processo de fabricação desenvolvido baseou-se, inicialmente, na solidificação de materiais poliméricos fotocuráveis, mediante uso da radiação UV fornecida com por um laser, recriando, por conseguinte, o objeto 3D pretendido (GOKHARE, RAUT e SHINDE, 2017). A primeira máquina construída por Charles Hull, em 1983, e o primeiro objeto impresso por ela, um copo que levou meses para terminar, podem ser vistos na Figura 2.

Figura 2. Primeira máquina SLA construída por Charles Hull, em 1983, e o seu primeiro objeto impresso.

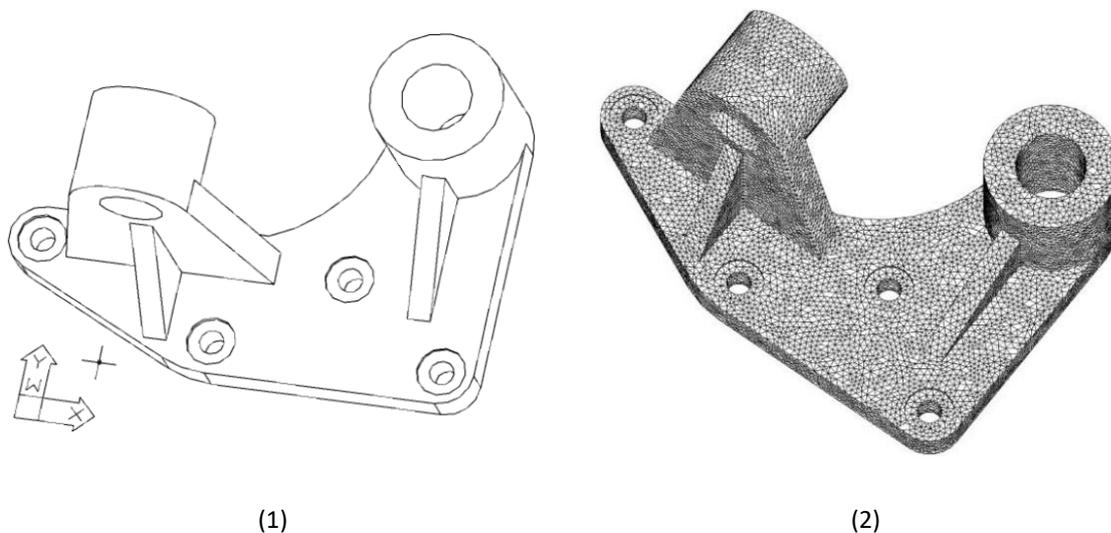


Fonte: LENGUA, 2017.

Hull obteve seu registro de patente em 1987 pela invenção deste novo método de manufatura e o denominou de estereolitografia, do inglês *stereolithography apparatus* (SLA) (LENGUA, 2017), também abreviado pelo termo “SL” (GROOVER, 2017). Esta nomenclatura dá origem à terminologia do formato de arquivo STL (do inglês, *STereoLithography*), o qual ainda permanece sendo empregado na AM (GOKHARE, RAUT e SHINDE, 2017). Ademais, o termo STL também é um acrônimo para os termos em inglês *Standard Triangle Language* ou *Standard Tessellation Language* (CRAFTS et al., 2016). Tecnicamente, o arquivo STL consiste na representação facetada triangular das superfícies limítrofes de um sólido 3D cujos vértices de cada triângulo são dispostos com a finalidade de conter, adequadamente, os dados necessários para a definição geométrica de sólidos reais, como pode ser visualizado na Figura 3. Devido à esta adequabilidade, o STL tornou-se um formato muito utilizado para entrada de dados 3D e fabricação rápida de peças (SZILVÁSI-NAGY e MÁTYÁSI, 2003). Entretanto, existem outros formatos digitais, como AMF, VRML, OBJ e 3MF, cujos sólidos 3D podem ser salvos (VOLPATO, 2017). Em outros termos, o formato STL é um padrão comumente aceito pelas

empresas que realizam AM, porém o seu uso não é obrigatório, pois ele não foi normatizado por uma entidade regulamentadora. Curiosamente, o princípio matemático que descreve a representação supracitada advém da seguinte constatação arquimediana: através da aproximação poligonal, quaisquer superfícies suaves podem ser convincentemente representadas por triângulos. Logo, pode-se inferir que aumentando a quantidade de triângulos e reduzindo as suas dimensões, melhor representadas essas superfícies estarão (STROGATZ, 2019).

Figura 3. Modelo CAD de uma alavanca (1) e sua representação em malha triangular refinada contendo 30.208 triângulos com arestas de até 5 mm, 15.094 vértices e armazenada em formato STL (2).



Fonte: Adaptado de BÉCHET, CUILIERE e TROCHU, 2002.

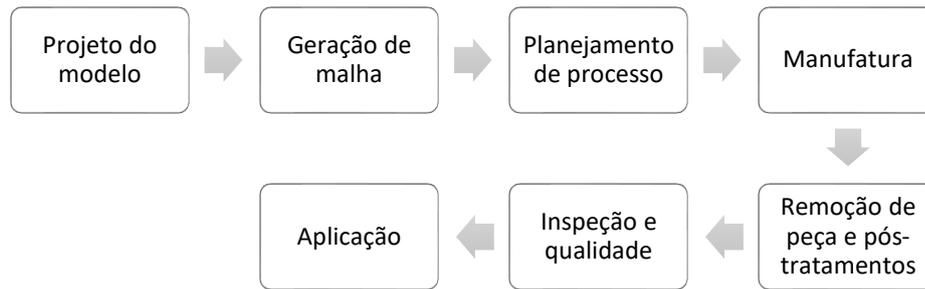
Portanto, a patente requerida por Charles Hull é considerada a mais significativa para a AM porque resultou na fundação da empresa *3D Systems* e na comercialização da AM (GROOVER, 2017), a qual emergiu em 1987 a partir do processo produtivo SLA (WOHLERS e GORNET, 2016).

2.1.2 Processo Produtivo

As tecnologias de AM são empregadas para fabricar protótipos, modelos, peças de uso final, ou seja, prontas para utilização, além de ferramentas para produção em massa de componentes a longo prazo (ALFAIFY et al., 2022). Segundo VANEKER et al. (2020), o processo de produção de um produto fabricado por AM pode ser dividido em sete etapas, como pode ser visto na Figura 4.

Primeiramente, é realizado o projeto do modelo do produto a ser fabricado. Esta etapa pode ser realizada utilizando um *software CAD* (do inglês, *computer aided design*) tridimensional para criar um sólido ou uma superfície do modelo, ou usar dados de digitalização obtidos através da tecnologia de varredura a laser tridimensional (PARRY, BEST e BANKS, 2020), por exemplo, para gerar uma geometria 3D do modelo.

Figura 4. Etapas para fabricação de produto por manufatura aditiva



Fonte: Adaptado de VANEKER et al., 2020

Na segunda etapa, ocorre a geração da malha da geometria 3D, isto é, há a conversão do modelo 3D no formato de arquivo que será fabricado pelas máquinas de MA. O formato STL é muito utilizado na indústria da AM e aproxima, assim como os demais formatos, o modelo tridimensional a uma superfície por meio de triângulos (VANEKER et al., 2020).

A terceira etapa consiste no planejamento de processo cujo formato de arquivo é enviado para um *software* onde são definidas as localizações e orientações da peça a ser fabricada na máquina de AM. Ressalta-se que este *software* realiza uma divisão do modelo 3D em camadas individuais e que, para cada uma destas, os seus dados geométricos, em combinação com os parâmetros da máquina, como potência do laser, espessura da camada e padrões de varredura, são convertidos em instruções de fabricação para a máquina de AM (VANEKER et al., 2020).

O quarto passo corresponde ao processo da AM da peça cuja execução ocorre autonomamente e requer apenas supervisão ocasional (VANEKER et al., 2020). Durante o processo de fabricação de peças, pode-se realizar um monitoramento *in situ* da manufatura, através do método *machine learning*, para detectar e corrigir defeitos ao longo da fabricação das peças impressas em 3D, melhorando, deste modo, a confiabilidade e a repetitividade do processo de manufatura (GOH, SING e YEONG, 2021).

No quinto estágio, a peça fabricada é retirada da máquina de AM e o excesso de material, como pó e estruturas de suporte, é removido (VANEKER et al., 2020). Quando necessário, etapas adicionais de pós-processamentos, como tratamentos térmicos, jateamento e polimento a laser, além de usinagem e acabamento abrasivo (PENG et al., 2021), são executadas com o objetivo de melhorar as características funcionais da peça fabricada.

A sexta etapa é compreendida pelos testes e inspeções para a análise da qualidade do produto manufaturado (VANEKER et al., 2020). Levando em consideração que os materiais e tecnologias aplicadas à AM dependem de parâmetros operacionais que impactam nas características e qualidade da peça fabricada, pode-se afirmar que as normas convencionais usadas para avaliação da qualidade de produtos fabricados pelos processos tradicionais podem não ser aplicáveis no caso de tecnologia de AM (KAWALKAR, DUBEY e LOKHANDE,

2022). Portanto, normas técnicas específicas têm sido desenvolvidas para avaliação da qualidade das peças manufaturadas aditivamente, como a DNV-ST-B203 e API STD 20S.

Por fim, a sétima etapa consiste na aplicação das peças fabricadas por AM em campo (VANEKER et al., 2020). Contudo, para que haja esta aplicação, faz-se necessário avaliar o nível de maturidade tecnológica, descrita pelo termo TRL (do inglês, *Technology Readiness Level*), da peça obtida por AM. A escala TRL foi criada pela NASA (do inglês, *US National Aeronautics and Space Administration*) na década de 1970 e é largamente aplicada para avaliação da “maturidade tecnológica por meio da comprovação de capacidades técnicas” (LEZAMA-NICOLÁS et al., 2018).

2.1.3 Oportunidades para as Indústrias

Os benefícios potenciais da AM estão sendo explorados nos meios acadêmicos e industriais, além de serem difundidos pela mídia e por círculos políticos. Além disso, os principais mercados da AM incluem os setores automotivo, aeroespacial, médico, bens de consumo e indústrias em geral, como o de petróleo e gás, visto que há o interesse na utilização da AM nestes setores econômicos está aumentando substancialmente devido à capacidade da AM de explorar novos projetos de peças, otimizar os prazos de entrega, diminuir o desperdício de fabricação além de permitir novas configurações de cadeias de suprimentos. Essa realidade se deve, primordialmente, aos resultados únicos que podem ser obtidos pela MA em comparação aos métodos tradicionais de manufatura, como a fabricação de peças sem ferramental, componentes com massa reduzida, geometrias complexas e customizadas, além da consolidação de requisitos de projeto e propriedades de materiais – proporcionando um aumento na performance e robustez nos produtos –, e viabilização do desenvolvimento eficiente de projetos (BLÖSCH-PAIDOSH e SHEA, 2017; DNV, 2022; SGARBOSSA et al., 2020; VANEKER et al., 2020; WIBERG, PERSSON e ÖLVANDER, 2021).

Tabela 1. Categorias de processos de manufatura aditiva.

Processo	Terminologia em inglês	Descrição
Jateamento de aglutinante	<i>Binder Jetting</i>	Agente de ligação líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó
Deposição com energia direcionada	<i>Direct Energy Deposition</i>	Energia térmica concentrada é usada para fundir materiais à medida que são depositados
Extrusão de material	<i>Material Extrusion</i>	Material é dispensado seletivamente através de um bocal ou orifício
Jateamento de material	<i>Material Jetting</i>	Gotas do material de fabricação são depositadas seletivamente
Fusão em leito de pó	<i>Powder Bed Fusion</i>	Energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó
Adição de lâminas	<i>Sheet Lamination</i>	Chapas de material são unidas para formar uma peça
Fotopolimerização em cuba	<i>Vat Photopolymerization</i>	Fotopolímero líquido em uma cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz

Fonte: Adaptado de ISO/ASTM 52900, 2021; LEZAMA-NICOLÁS et al., 2018 e VOLPATO, 2017

Embora tenha surgido como uma tecnologia de prototipagem rápida, a AM tornou-se uma tecnologia capaz de produzir uma grande quantidade de peças de uso final. Em 2018, por exemplo, a companhia automotiva alemã BMW, reportou o seu milionésimo componente fabricado em série a partir da MA. Outro exemplo é a otimização de um cabeçote de injeção do motor de um foguete transportador competitivo, a qual reduziu as 248 peças do cabeçote para apenas uma, causando diminuição de 25% em massa, 50% em custos e de 3 meses de produção para 65 horas (GLAS, MEYER e EßIG, 2020; VANEKER et al., 2020).

Com o propósito de validar as metodologias de fabricação e qualificação de componentes críticos estáticos e dinâmicos fabricados por AM e aplicados na indústria de óleo e gás, um projeto de pesquisa foi realizado pelas instituições brasileiras PETROBRAS, SENAI Joinville e Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), juntamente com a empresa alemã *ZEISS Group*, utilizando como um dos objetos de estudo um trocador de calor compacto feito em aço AISI 316L e fabricado aditivamente (METAL AM, 2021). À vista disso, o progresso acadêmico, comercial e tecnológico da AM se fez factível devido ao desenvolvimento focado em materiais e tecnologias para a manufatura aditiva, além de ter sido impulsionado por

fatores mercadológicos, como menores ciclos de desenvolvimento de produtos, expansão da demanda por produtos personalizados e sob medida, regulamentações visando mitigar impactos ambientais, redução de custos de produção relacionados aos prazos de entrega, além do aparecimento de novos modelos de negócios (ALFAIFY et al., 2020).

Tomando como exemplo a indústria aeronáutica, componentes projetados e otimizados especificamente para AM podem reduzir de maneira significativa o custo de operação de uma aeronave Airbus A380. Estima-se que uma fivela de cinto de segurança de titânio, reprojeta para ser produzida por AM, seja 45% mais leve do que suas peças homólogas feitas convencionalmente em alumínio, não comprometendo a sua resistência mecânica e economizando mais de 3.000.000 litros de combustível que deveriam ser consumidos ao longo da vida útil da aeronave. Ainda sobre a otimização de projeto orientado para AM, ressalta-se a possibilidade de produção de peças com menos componentes, podendo ocasionar, por conseguinte, na redução do número de fornecedores externos e, conseqüentemente, dos custos com gerenciamento de estoque, além de diminuir “inspeções de controle de qualidade, documentação e aprovação regulatória em toda a cadeia de suprimentos” (SIREESHA et al., 2018).

A implementação da manufatura *in situ*, por exemplo, torna-se uma aplicação relevante para o atendimento das necessidades do setor manutenção (DNV, 2021), assim como a produção mais rápida de peças de reposição sem a necessidade de custos de estocagem (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022). No que tange o processo de operação e manutenção (O&M) das indústrias *offshore*, a cadeia de suprimentos das PS possui relevante importância, visto que qualquer atraso no fornecimento desses componentes pode gerar um acréscimo substancial nos custos devido ao incremento dos tempos de parada, além dos gastos com as perdas de produção e mão de obra. Logo, uma solução intuitiva para os problemas de suprimento de PS é mantê-las em estoque. Contudo, frequentemente elas tornam-se obsoletas, e, quando são avaliados os custos inerentes à construção de estoque e armazenagem de todas as peças de reposição adquiridas, percebe-se que a solução apresentada é antieconômica, evidenciando, deste modo, a necessidade de tecnologias alternativas para o processo de cadeia de suprimentos. Adicionalmente, na maior parte dos casos, os fornecedores de PS estão muito distantes, cerca de milhares de quilômetros, das instalações de destinos e, quaisquer pedidos de compra, geralmente, demandam tempo, uso de transporte pesado e regulamentação entre países antes do produto chegar ao consumidor, o que se torna ainda mais crítico para componentes de movimento lento. Assim sendo, uma estratégia contemporânea para os *players* da indústria *offshore*, como petróleo e gás, é a transição para tecnologias de AM com o intuito de produzir peças de reposição para uso final de maneira rápida, com curto prazo de entrega, sob demanda, sem a necessidade de configuração e ferramentas, reduzindo os custos com mão de obra, transporte e estocagem relacionados às matérias-primas, tanto quanto às peças de reposição, dentre outros desperdícios relacionados à produção (ABBASZADEH et al., 2022; PONFOORT e TATHGAR, 2019; SGARBOSSA et al., 2020; SIREESHA et al., 2018).

Portanto, estima-se que o impacto mais disruptivo da AM na indústria *offshore*, por exemplo, deverá ser no gerenciamento da cadeia de suprimentos no que se refere ao desempenho de peças por AM e às vantagens relacionadas aos seus custos de produção e estocagem. Como justificativa, uma vez que os ativos destinados para a indústria de óleo e gás são aplicados por longos períodos em regiões remotas, as quais sofrem com diferentes tipos de mecanismos de deterioração, como mecânicos, químicos e eletroquímicos, pode-se inferir que há um aumento na probabilidade de falha das peças de máquinas e equipamentos que estão estocadas ou em funcionamento. Outro fator a ser considerado é a obsolescência desses componentes motivada por mudanças ora tecnológicas, ora normativas, ou até mesmo devido à saída de produção do ativo antes mesmo de ser desativado em campo. Em referência às peças obsoletas, estas podem ser fabricadas por AM sob demanda ao serem submetidas à engenharia reversa digital, aumentando, assim, vida útil do ativo nos casos em que a peça defeituosa de um componente crítico pode simplesmente ser fabricada por AM e substituída por outra similar, atendendo aos requisitos funcionais da peça original que apresenta defeito. Ademais, ressalta-se que uma das principais estratégias nos sistemas de gestão de manutenção e reparo consiste em substituir componentes avariados por peças novas. Por fim, tendo em vista a democratização e descentralização da manufatura *just-in-time* proporcionada pelo AM, há uma economia significativa com os gastos relacionados ao tempo de espera de produção, gerenciamento de estoque e transporte de PS, além da diminuição do tempo de inatividade dos ativos (ABBASZADEH et al., 2022; SIREESHA et al., 2018).

Em conclusão, é notório que a AM oferece numerosas oportunidades para as indústrias, como o aprimoramento das propriedades superficiais, mecânicas e estéticas dos produtos manufaturados, além do aprimoramento da gestão de peças sobressalente. Todavia, para que se torne uma tecnologia comercial capaz de competir com os métodos de fabricação convencionais, obstáculos tecnológicos, regulatórios e financeiros necessitam ser superados (SGARBOSSA et al., 2020; SIREESHA et al., 2018).

2.1.4 Desafios para as Indústrias

De acordo com DELOITTE (2019), 63% das companhias que utilizam AM implementam-na para prototipagem rápida, enquanto 21% aplicam esta tecnologia para produtos que não podem ser obtidos pelos métodos de fabricação convencionais. Portanto, para que a AM seja escolhida e comercializada em larga escala pelas indústrias, faz-se necessário superar, especialmente, os seguintes desafios: tecnológicos, no que se refere a materiais, implementação da manufatura, pós-processamento e garantia de qualidade; de tecnologia da informação, devido à falta de regulamentações e às ameaças digitais em cada etapa de projeto e fabricação; de formação técnica, uma vez que faltam profissionais bem treinados e experientes em MA; de projetos, em razão da existência de projetistas e engenheiros ainda aderentes às diretrizes convencionais de projeto orientadas para manufatura de produtos; e financeiros, devido à limitada consideração dos cálculos dos fatores monetários, e seus impactos, da AM nos modelos de negócios de uma companhia, os quais, por conseguinte, ainda

permanecem imaturos para implementação em larga escala das tecnologias de AM (DELOITTE, 2019; ABBASZADEH et al., 2022).

ATZENI e SALMI (2012) realizaram uma investigação para avaliar se a técnica de AM, denominada de sinterização seletiva a laser – processo oriundo da fusão de leito de pó –, é uma alternativa economicamente viável para a fabricação de peças metálicas que compõem um trem de pouso principal da aeronave italiana P180 Avanti II, as quais são, tradicionalmente, fabricadas pelo método de fundição injetada sob alta pressão. O estudo elucidou que a AM é penalizada pelos altos custos com materiais e máquinas, nos quais deve ser acrescentado ao custo da peça fabricada com o intuito de representar, contabilmente, a amortização do custo do maquinário. Os processos de pós-processamentos – aplicados quando requisitos de projeto da peça não são alcançados imediatamente após a sua fabricação – e energia consumida necessários para produção de componentes também são citados como principais despesas de componentes metálicos fabricados por AM (SIREESHA et al., 2018).

Uma categoria de despesa ainda pouco explorada pela literatura tradicional em modelagem de custos de fabricação, mas que deve ser considerada, é o gasto envolvido com a qualificação das peças feitas por AM, especialmente aquelas fabricadas em materiais metálicos. Este custo é relevante, pois ao não o incorporar nas análises de viabilidade de projeto, torna-se difícil determinar em que medida a AM é economicamente viável em comparação com a manufatura tradicional (BRU, 2022). Portanto, espera-se que, com a difusão das tecnologias de AM e dos seus respectivos benefícios citados anteriormente, ocorra uma redução do custo dos sistemas de AM, e que o ponto de equilíbrio, relacionado ao custo de fabricação e volume de peças produzidas, demonstre a capacidade para a produção de volumes maiores (ATZENI e SALMI, 2012), haja vista que a AM, na maioria das vezes, torna-se uma alternativa adequada apenas para produção de baixo volume, ou mais precisamente, de lotes constituídos por menos de 40 peças. Entretanto, ressalta-se que o volume de produção depende “da capacidade da máquina, das propriedades do material e dos níveis de qualidade exigidos” (NIAKI et al., 2019).

Para que as peças obtenham as características únicas e excepcionais proporcionadas pela AM, profissionais deste ramo fabril são desafiados a projetar, reprojetar ou adequar a fabricação de peças com elevada qualidade, atendendo aos requisitos de projeto, como funcionalidade, propriedades mecânicas, custo e tempo, objetivando garantir a capacidade de fabricação dessas peças pelos sistemas de manufatura digital direta. Considerando os seus critérios tecnológicos, destacam-se como principais problemas da AM: precisão das peças fabricadas, disponibilidade limitada de materiais e desempenho mecânico dos componentes manufaturados. Dentre os motivos que levam à limitação de precisão da peça nos sistemas de AM estão os erros matemáticos, evidenciados pelas aproximações geométricas correspondentes às superfícies das peças a serem fabricadas, preparação dos dados obtidos em formatos digitais (STL, AMF, VRML, OBJ e 3MF, por exemplo), além das diferenças entre as espessuras das camadas do modelo geométrico 3D geradas pelo *software* do sistema de

AM e as espessuras das camadas fabricadas. Ressalta-se que essas diferenças provocam erros de fabricação, pois, à medida que a espessura das camadas aumenta, as superfícies inclinadas das peças tendem a apresentar aparência de degraus, acarretando, neste caso, em dificuldades com as tolerâncias geométricas e dimensionais (GD&T, do inglês *Geometric Dimensioning and Tolerancing*) do componente. A seleção inadequada do tipo de tecnologia de MA para fabricação de peças também pode ser considerada como fonte de erros de processos, visto que é capaz de degradar: o formato da peça, a geometria das camadas de material, além do posicionamento entre as camadas adjacentes de materiais. Quanto aos erros referentes aos materiais e ao desempenho mecânico das peças fabricadas aditivamente, incluem-se: propriedades mecânicas anisotrópicas, contração e distorção térmicas – responsáveis por provocar tensões residuais nessas peças devido aos fenômenos de transferência de calor e massa que ocorre durante a fusão e solidificação das camadas que formam essas peças –, fusão incompleta, trincas, vazios, porosidade, bolhas, inclusões sólidas, microestruturas não tradicionais e elevada dureza superficial, sendo estes dois últimos mais prejudiciais à vida útil das peças sujeitas a solicitações mecânicas cíclicas, isto é, sob fadiga. Outrossim, existem incertezas com relação à saúde e segurança do processo, especialmente considerando os tamanhos nanométricos das partículas de metal usadas para fabricação de peças metálicas. Problemas também se originam de incertezas quanto à propriedade intelectual entre projetistas, clientes e provedores de serviços AM no que se refere aos projetos digitalizados de peças existentes, bem como a engenharia reversa de peças em serviço realizada por empresas e profissionais sem licenciamento de propriedade intelectual do fabricante (ALFAIFY et al., 2020; GROOVER, 2017; SIREESHA et al., 2018; ZERBST et al., 2021).

Os processos de AM apresentam restrições de manufatura, como fabricação de hastes com pequenas espessuras, *features* suspensos, pequenos orifícios, paredes finas, ranhuras, estruturas oblíquas e rasgos, as quais impedem a remoção do material não fundido ou estruturas de suporte. Entretanto, ressalta que essas restrições estão intimamente relacionadas com a orientação de fabricação da peça, uma vez que há influência da orientação da componente em relação ao seu acabamento superficial, variação dimensional, alteração da resistência mecânica e no tempo de fabricação. Além disso, os pós-processamentos – aplicados somente para atender às exigências de projeto –, elevam os custos e tempo de fabricação devido às intervenções necessárias, sejam elas manuais ou automatizadas, isto é, com uso de máquinas e ferramentas. Neste contexto, tem-se como exemplo de melhoria, a eliminação, quando possível, das estruturas de suporte e de materiais, ou seja, remoção de subprodutos que, em excesso, aderem às superfícies das peças fabricadas e dificultam a sua extração. Ademais, deve-se evidenciar que as restrições de fabricação e pós-processamentos estão intimamente relacionadas aos tipos de processo de AM. Portanto, ter ciência das capacidades e limites tecnológicos dos diferentes métodos aditivos para obtenção de peças ajuda os profissionais de MA a projetar peças adequadas para a fabricação rápida de componentes (ALFAIFY et al., 2020; GROOVER, 2017; VOLPATO, 2017; VANEKER et al., 2020).

A falta de habilidades técnicas e de engenharia apropriadas para a AM, ou seja, a escassez de familiaridade, compreensão e experiência com as tecnologias da fabricação rápida, também é considerada uma das maiores barreiras para a sua adoção industrial. Isto se justifica, à título de exemplo, pela pequena oferta de programas educacionais específicos para AM em comparação com a alta demanda por conhecimento especializado. Outra preocupação é se os treinamentos oferecidos fornecem os conhecimentos e habilidades necessárias para entender todo o potencial da MA. Portanto, para que haja maior adesão comercial da MA, infere-se que é necessária uma mudança no paradigma de formação técnica (DESPEISSE e MINSHALL, 2017; THOMAS-SEALE et al., 2018).

Devido à flexibilidade inerente à AM e as demais vantagens citadas anteriormente, profissionais e acadêmicos estão desenvolvendo novos métodos de fornecimento e gerenciamento de peças fabricadas aditivamente, principalmente para a provisão de peças sobressalentes no cenário industrial (AKMAL et al., 2022), uma vez que a AM tem sido reconhecida como um método alternativo para produção de peças de reposição (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022). Entretanto, atualmente há uma grande falta de literatura específica para dar suporte ao processo de seleção de peças sobressalentes que podem ser adequadamente fabricadas por AM, até porque existem poucas diretrizes consolidadas para esta finalidade, faltam dados sobre histórico de falhas ou demandas, projeto ou propriedades físicas da peça e informações da cadeia de suprimentos, além do desconhecimento das capacidades de AM entre os profissionais da cadeia de suprimentos, logísticos e engenheiros de projeto. Portanto, para que as organizações explorem a possibilidade de aplicar a AM para fabricação de peças de reposição, elas devem, primeiramente, identificar as àquelas mais adequadas para AM. Para que esta identificação seja conveniente, pesquisas sistemáticas sobre a classificação de peças de reposição são necessárias, com o intuito de compreender as características que tornam as peças sobressalentes elegíveis para fabricação aditiva (CARDEAL, LEITE e RIBEIRO, 2023; CHAUDHURI et al., 2020; FRANDBSEN et al., 2019).

Por fim, considerando que as tecnologias de AM ainda estão em processo de desenvolvimento, nota-se a ausência padrões, diretrizes e recomendações consolidadas e relevantes para os *stakeholders*. Assim sendo, a natureza prematura das tecnologias AM induz incertezas e aumenta a exposição ao risco para as partes interessadas envolvidas (DENV, 2021). Ademais, por se tratar de um processo de fabricação descentralizado e imaturo, de acordo com 50% das organizações europeias de segurança e defesa, o rastreamento da produção do material para fins de qualificação da AM é árduo, além de sofrer com problemas de reprodutibilidade, confiabilidade, produtividade e incerteza de controle de qualidade (ABBASZADEH et al., 2022; CALDERARO, LACERDA e VEIT, 2019). Outrossim, como saúde, segurança e meio ambiente são elementos fundamentais para o setor de petróleo e gás, por exemplo, o risco deve sempre ser mitigado (HIEBLER, 2020). Aliás, sem normas ou diretrizes consolidadas para a AM, presume-se que o risco de produtos não atenderem aos requisitos mínimos de projeto aumentará, além de elevar os seus custos de qualificação (DE BERNARDI et al., 2020), visto que eles precisam ser validados antes de serem colocados em serviço e o

investimento em qualificação está intrinsecamente relacionado aos riscos potenciais da peça, isto é, ligada à criticidade do componente. Portanto, é essencial que os produtos obtidos através dos processos da AM sejam confiáveis, seguros e legalmente aprovados para que sejam aplicados pelos *players* industriais. Buscando atender estes critérios, por exemplo, foram publicadas normas técnicas específicas para produtos empregados neste setor, como a API STD 20S:2021 e a DNV-BT-203:2022. A Tabela 2 apresenta sumariamente os fatores motrizes e obstáculos para a adoção das tecnologias de AM.

Tabela 2. Fatores motrizes e barreiras para a adoção da manufatura aditiva (continua).

Motrizes	Barreiras
<p data-bbox="400 669 628 701"><u>Fatores Estratégicos:</u></p> <p data-bbox="269 734 517 766">Expiração de patentes.</p> <p data-bbox="269 799 544 831">Advento da Indústria 4.0.</p> <p data-bbox="419 882 608 913"><u>Nível do produto:</u></p> <p data-bbox="269 960 759 1025">Liberdade de design: possibilidade de produzir itens com formatos complexos.</p> <p data-bbox="269 1059 759 1153">Otimização de produtos e funcionalidades aprimoradas: criação de espaços vazios ou estruturas de grade dentro de um objeto.</p> <p data-bbox="416 1189 611 1220"><u>Nível de processo:</u></p> <p data-bbox="269 1256 743 1350">Desempenho de fabricação econômico: redução nos custos de fabricação e no <i>lead time</i>.</p> <p data-bbox="269 1368 759 1462">Simplificação de processos: menos procedimentos de pós-produção e montagem.</p> <p data-bbox="269 1500 759 1594">Redução do consumo de recursos e desperdícios, com impacto no desempenho ambiental.</p> <p data-bbox="269 1662 676 1727">Encurtamento do processo de desenvolvimento de novos produtos.</p> <p data-bbox="269 1794 644 1825"><u>Nível da cadeia de abastecimento:</u></p> <p data-bbox="269 1861 700 1926">Digitalização de processos e ligações da cadeia de abastecimento.</p>	<p data-bbox="970 669 1211 701"><u>Barreiras tecnológica:</u></p> <p data-bbox="785 734 1115 766">Baixa velocidade de produção.</p> <p data-bbox="785 799 1339 831">Altos custos de fabricação para produção em série.</p> <p data-bbox="785 864 1353 929">Restrições técnicas: tamanho e volume limitados do produto.</p> <p data-bbox="785 963 1303 1028">Problemas de qualidade e necessidades de pós-processamento.</p> <p data-bbox="963 1090 1217 1122"><u>Barreiras operacionais:</u></p> <p data-bbox="785 1189 1291 1220">Qualidade, precisão e confiabilidade limitadas.</p> <p data-bbox="785 1288 1128 1319">Materiais disponíveis limitados.</p> <p data-bbox="785 1402 1248 1433">Falta de padrões e especificações técnicas.</p> <p data-bbox="829 1532 1353 1563"><u>Barreiras relacionadas à cadeia de suprimentos:</u></p> <p data-bbox="785 1630 1383 1756">Incerteza da estrutura da cadeia após a adoção da AM: mudanças na concepção da cadeia de abastecimento, novos intervenientes na cadeia (por exemplo, novos fornecedores).</p> <p data-bbox="984 1794 1195 1825"><u>Barreiras externas:</u></p> <p data-bbox="785 1899 1197 1930">Falta de certificações e regulamentos.</p>

Tabela 2. Fatores motrizes e barreiras para a adoção da manufatura aditiva (conclusão).

Motrizes	Barreiras
<p>Redução da complexidade da cadeia de abastecimento: eliminação de um ou mais níveis da estrutura da cadeia de abastecimento.</p> <p>Melhoria do desempenho da cadeia de suprimentos: redução de custos de estoque e transporte, melhor impacto ambiental.</p> <p>Habilitar modelos de negócios centrados no cliente: cadeia de demanda e cocriação de valor com os clientes.</p>	<p>Propriedade intelectual: proteção correta de arquivos CAD.</p> <p><i><u>Desafios organizacionais:</u></i></p> <p>Falta de habilidades e conhecimento de AM.</p> <p>Falta de mão de obra treinada e qualificada.</p> <p><i><u>Desafios estratégicos:</u></i></p> <p>Falta de uma estratégia para introdução de AM.</p> <p>Altos investimentos iniciais, despesas de capital e longo tempo de retorno.</p> <p>Elevadas despesas operacionais.</p>

Fonte: Adaptado de RONCHINI, MORETTO e CANIATO, 2023

2.1.5 Normas Técnicas para Qualificação e Certificação

A AM surgiu na década de 1980 como uma tecnologia de prototipagem rápida. Contudo, atualmente, estima-se que as indústrias que aplicam a AM no seu processo produtivo investem cerca de 10 vezes mais na fabricação de peças finais, isto é, destinadas para aplicação direta em serviço, do que em prototipagem, representando, desta maneira, o desenvolvimento industrial que o método de fabricação aditiva vem adquirindo ao longo dos anos. Entretanto, para que a fabricação rápida seja empregada diretamente para a obtenção de peças funcionais reais, o controle de qualidade certificado é fundamental para o atendimento aos requisitos específicos dessas peças, especialmente qualidade e confiabilidade. Neste âmbito, uma vez que uma variedade de materiais está sendo utilizada nas tecnologias de AM, como cerâmica, aço, liga, compósitos e tecidos vivos, em comparação com a fabricação tradicional, faz-se necessário o constante aprimoramento da qualidade e desempenho da peça a ser obtida por meio das técnicas de fabricação rápida (KIM, LIN e TSENG, 2018).

Conforme mencionado anteriormente, um dos desafios que a AM deve superar para possua uma aplicação industrial em larga escala é a consolidação de padrões, normas técnicas, diretrizes e regulamentações específicos para os produtos produzidos através das

tecnologias de AM. Devido a este desafio, os primeiros usuários e fornecedores de AM desenvolveram seus próprios padrões internos (AMPOWER, 2021). Todavia, o desenvolvimento de especificações e padrões universalmente aceitos pela indústria é essencial neste cenário em rápida evolução da AM, pois visa, dentre outros fatores a garantia da qualidade e confiabilidade dos produtos manufaturados. Além disso, pode facilitar uma qualificação mais rápida e robusta, o que, por sua vez, pode agilizar a certificação de dispositivos e produtos por agências reguladoras (SEIFI et al., 2017). Complementarmente, os processos de qualificação e certificação são considerados como críticos para a realização da produção, popularização e aplicação de produtos em serviço. Esta criticidade se justifica em virtude de a qualificação ser considerada como um processo avaliativo de um projeto de protótipo, um material ou até mesmo de um produto, seja durante seu desenvolvimento ou testagem. Pode-se qualificar, a título de exemplo, técnicas, máquinas, materiais, peças e fornecedores. Outra justificativa plausível deve-se ao fato de a certificação ser predominantemente estabelecida para satisfazer uma autoridade ou entidade certificadora, a qual pode certificar peças, componentes, sistemas ou os processos de avaliação de um material, produto ou componente, seja durante ou ao findar o desenvolvimento ou produção destes itens (ZE CHEN et al., 2022). Por fim, ressalta-se que esse tipo de desafio a ser superado pela MA vem sendo abordado por grupos de pesquisadores, cientistas e organizações nas últimas três décadas com o objetivo de desenvolver os padrões qualificados desejados na AM (KAWALKAR, DUBEY e LOKHANDE, 2022). As normas técnicas de AM vigentes e aplicadas à qualificação e certificação estão descritas na Tabela 3.

Exemplificativamente, as normas técnicas desenvolvidas para o a fabricação de peças a partir da AM e aplicadas na indústria de petróleo e gás fundamentam-se nas tecnologias particulares para fabricação aditiva de peças metálicas, como a deposição de energia direcionada, fusão em leito de pó, jateamento de ligante e adição de lâminas, descritas sumariamente na Tabela 1. A utilização de materiais metálicos para fabricação de PS em indústrias *offshore* se justifica por elas desempenharem um papel cada vez mais crítico no mercado industrial da AM em razão do seu desempenho mecânico superior em comparação com as suas contrapartes fabricadas em materiais poliméricos e cerâmicos, tendo em vista propriedades como tenacidade, resistência mecânica, dureza, resistência ao calor e ao desgaste (ZE CHEN et al., 2022).

Com o intuito de preparar, desenvolver e publicar internacionalmente as padronizações relativas à AM, as instituições internacionais ISO (*International Standardization Organization*) e ASTM (*American Society for Testing and Materials*) estruturaram um plano conjunto para desenvolvimento de normas técnicas. Por conseguinte, objetivando desenvolver um roteiro comum e uma estrutura organizacional para os padrões da AM, os comitês técnicos denominados ISO/TC 261 e ASTM F42, em 2016, concordaram com uma estrutura comum que define uma hierarquia de padrões da fabricação aditiva com três níveis, são eles: padrões gerais de alto nível, padrões para amplas categorias de materiais ou processos, normas especializadas para um material, processo ou aplicação específica

(AMPOWER, 2021; ISO, 2023). Portanto, a estrutura ISO/ASTM, a qual pode ser visualizada na Figura 5, proporcionou embasamento técnico e metodológico para que outras entidades internacionalmente reconhecidas, como a *Det Norske Veritas Group* (DNV GL) e *American Petroleum Institute* (API), desenvolvessem os seus padrões próprios de qualificação de peças manufaturadas aditivamente.

Tabela 3. Normas técnicas de manufatura aditiva vigentes e aplicadas à qualificação e certificação.

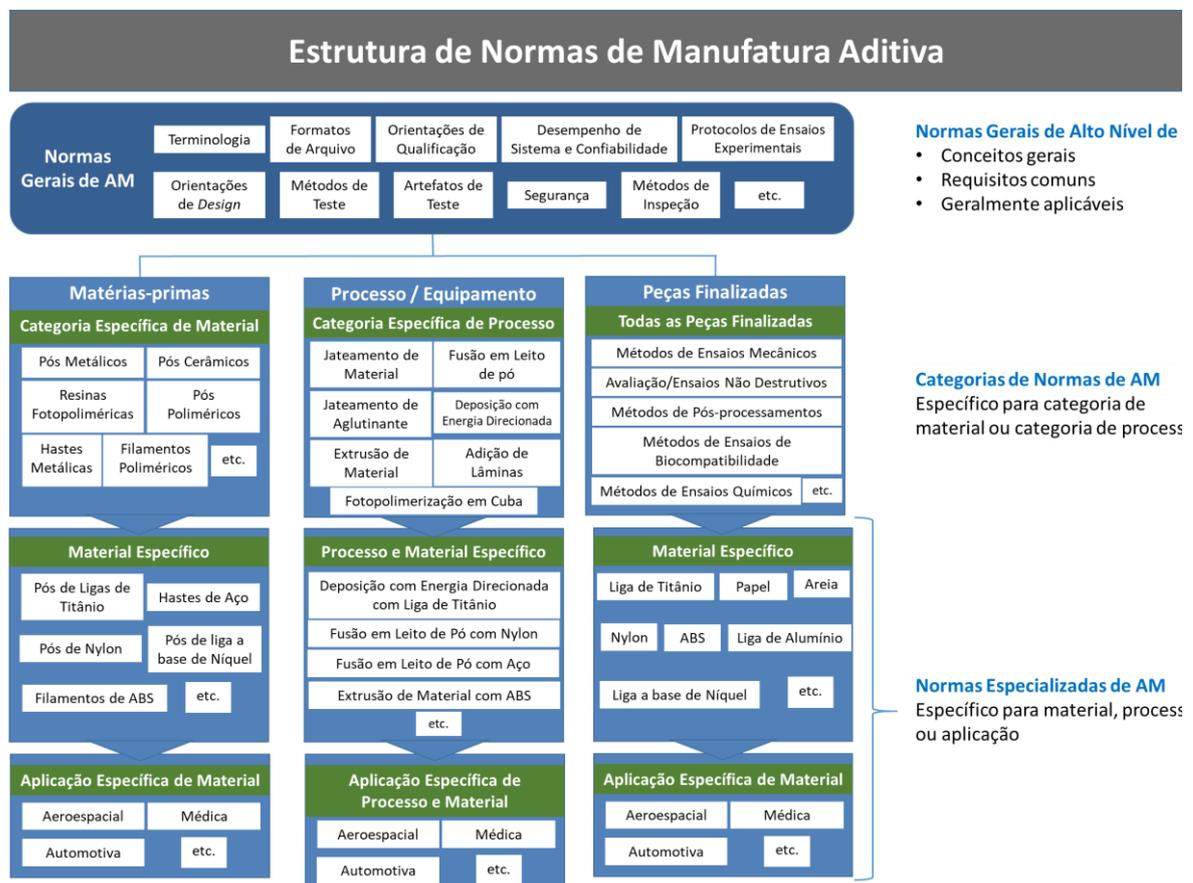
Designação	Publicação	Título
API STD 20S	2021	<i>Additively Manufactured Metallic Components for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries.</i>
DNV-ST-B203	2022	<i>Additive manufacturing of metallic parts.</i>
DNV-SE-0568	2021	<i>Qualification of additive manufacturing service providers, manufacturers and parts.</i>
DNV-CG-0197	2021	<i>Additive manufacturing - qualification and certification process for materials and components.</i>
DNV-CP-0267	2022	<i>Additive Manufacturing.</i>
ISO/ASTM 52920	2023	<i>Additive manufacturing — Qualification principles — Requirements for industrial additive manufacturing processes and production sites.</i>
ISO/ASTM 52925	2022	<i>Additive manufacturing of polymers — Feedstock materials — Qualification of materials for laser-based powder bed fusion of parts.</i>
ISO/ASTM TS 52930	2021	<i>Additive manufacturing — Qualification principles — Installation, operation and performance (IQ/OQ/PQ) of PBF-LB equipment.</i>
ISO/ASTM 52936-1	2023	<i>Additive manufacturing of polymers — Qualification principles — Part 1: General principles and preparation of test specimens for PBF-LB.</i>
ISO/ASTM 52942	2020	<i>Additive manufacturing — Qualification principles — Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications.</i>
VDI 3405 Blatt 1	2019	<i>Additive manufacturing processes - Laser sintering of polymer parts - Quality control.</i>
VDI 3405 Blatt 1.1	2018	<i>Additive manufacturing processes - Laser sintering of polymer parts - Qualification of materials.</i>
VDI 3405 Blatt 2	2013	<i>Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - Beam melting of metallic parts - Qualification, quality assurance and post processing.</i>
VDI 3405 Blatt 7	2019	<i>Additive manufacturing processes - Quality grades for additive manufacturing of polymer parts.</i>

Fonte: Adaptado de API, 2021; SLATER, 2022; ISO, 2023 e VDI, 2023

O grupo DNV GL, sociedade de classificação e certificação líder mundial e consultor reconhecido para a cadeia de valor de energia, incluindo energias renováveis, petróleo e gás e gestão energética, liderou um projeto conjunto da indústria, do inglês *joint industry project*, em duas fases, o primeiro em 2018 e o segundo em 2020, com 30 empresas participantes representando toda a cadeia de valor, desde o fornecedor de matéria-prima até o usuário final. O objetivo do JIP foi estabelecer uma estrutura para a qualificação de peças metálicas fabricadas aditivamente cujos resultados proporcionaram a criação do padrão DNV-ST-B203: Manufatura aditiva de peças metálicas, o qual encontra-se na sua terceira edição, atualizada em outubro de 2022. A finalidade desta norma é fornecer uma estrutura internacionalmente admissível para a MA com o intuito de obter uma qualidade consistente de peças metálicas pelas tecnologias de AM e fornecer previsibilidade na cadeia de suprimentos para reduzir o tempo de entrega e custos (METAL, 2021; DNV, 2022).

O escopo da DNV-ST-B203 especifica requisitos e orientações para a qualificação de peças fabricadas pela MA para as indústrias energética, marítima e correlatas – dentre elas a indústria de petróleo e gás –, aquisição de peças obtidas por AM, gerenciamento da qualidade dos fabricantes de peças feitas por AM e a real fabricação de peças por AM. Além disso, estabelece práticas para qualificação e produção de peças metálicas obtidas através das seguintes tecnologias de AM: DED usando um arco elétrico como fonte de calor (DED-arc), DED usando um feixe de laser como fonte de calor (DED-LB), PBF através do feixe de laser (PBF-LB), PBF por feixe de elétrons (PBF-EB) e tecnologia de jateamento de aglutinantes (BJT). Quanto às suas aplicações, a norma destina-se a ser utilizada: como documento de referência contratual; para gerar especificações ao comprar peças de metal por AM; para documentar e comprovar a gestão da qualidade dos fabricantes e integridade das peças fabricadas; para fornecer orientação para compradores e fabricantes de peças fabricadas por AM (DNV, 2022).

Figura 5. Estrutura ISO/ASTM para normas de manufatura aditiva.



Fonte: Adaptado de ISO/ASTM 52900, 2021

Considerando a ênfase da indústria de petróleo e gás natural em implementar novas tecnologias e inovações para satisfazer a crescente necessidade global por energia, protegendo o meio ambiente, e visando aproximar as funções críticas de fabricação dos locais onde os componentes serão usados, maximizando, assim, a capacidade de produção e reduzindo as tensões e emissões da cadeia de suprimentos, a associação comercial

estadunidense *American Petroleum Institute* (API) publicou, no dia 19/10/2021, a primeira edição do padrão API Standard 20S (API STD 20S): Componentes metálicos manufaturados aditivamente para uso nas indústrias de petróleo e gás natural (API, 2021; METAL AM, 2021). A API 20S, como também é reconhecida a norma produzida pela API, foi reportada como a primeira publicação proposta para as aplicações da AM na indústria de óleo e gás e específica:

“[...] os requisitos para qualificação do processo de fabricação, produção, marcação e documentação de componentes metálicos fabricados aditivamente usados nas indústrias de petróleo e gás natural quando referenciados por um padrão de equipamento API aplicável ou de outra forma especificado como um requisito para conformidade” (API, 2021).

Complementarmente, a API 20S é aplicada aos componentes metálicos fabricados pelos processos de PBF, DED e BJT. Ela estabelece requisitos para três níveis de especificação de AM cuja denominação em inglês é *additive manufacturing specification levels* (AMSL). Há três designações AMSL, as quais variam de acordo com a criticidade da aplicação, descritas como AMSL 1 (aplicação menos crítica), AMSL 2 (aplicação moderadamente crítica) e AMSL 3 (aplicação mais crítica), definindo, portanto, níveis crescentes de requisitos técnicos, de qualidade e qualificação de AM. Esta abordagem em camadas permite a AMSL abranger a qualificação do processo de AM, qualificação do produto fabricado e seus requisitos suplementares do produto. Ademais, os requisitos exigidos pelo padrão API 20S não pretendem regulamentar as especificações de projeto do componente a ser produzido, ocasionando, por exemplo, em restrições aos projetistas. Pelo contrário, esses requisitos oferecerão visibilidade e compreensão das variáveis essenciais da AM – igualmente descritas como parâmetros-chave de fabricação ou documentos de controle de processo –, além de estruturar a identificação e controle dessas variáveis, para os compradores e fabricantes, sem comprometer a propriedade intelectual específica da fabricação aditiva, isto é, sem prejudicar a vantagem competitiva adquirida pelo produto através da aplicação das tecnologias de AM (API, 2021; DE BERNARDI et al., 2020). A Figura 6 apresenta o fluxograma do processo de qualificação da API STD 20S.

Na primeira etapa, o processo de qualificação da API STD 20S requer que o cliente ou o comprador da peça metálica a ser fabricada aditivamente e aplicada nos campos de petróleo e gás defina o nível de criticidade da aplicação do produto desejado, ou seja, que escolha o AMSL adequado para o componente (API, 2020). Entretanto, a API 20S não fornece a orientação necessária sobre como o comprador deve atribuir os níveis de criticidade e risco às aplicações de interesse. Desta maneira, a compreensão da criticidade e dos riscos inerentes às peças fabricadas por AM é altamente sujeita à situação sob a qual os componentes estarão submetidos. Assim sendo, sugere-se, ao cliente ou comprador, seguir as diretrizes, práticas, metodologias ou padrões recomendados especificamente para a peça a ser manufatura e o cenário no qual este componente encontrar-se-á (DE BERNARDI et al., 2020), como a API 780,

BS EN 60300-3-11, IEC 31010, ISO 14224, JIPM, NORSOK Z-008 e MIL-STD-169A para citar alguns exemplos.

Em contrapartida, no segundo estágio, define-se as “condições que, quando atendidas, permitem que o processo de manufatura aditiva receba o nível de classificação AMSL apropriado” (API, 2020). Para que a etapa dois seja completada, analisa-se as exigências que devem ser cumpridas no que se refere ao fabricante, matéria-prima, substrato, equipamentos para MA e componente(s) manufaturado(s) aditivamente, bem como seus pós-processamentos e requisitos para controle de qualidade consoantes ao método de fabricação aditiva adotado (API, 2020).

Posteriormente, na terceira fase é avaliada a necessidade de requalificação do(s) componente(s) quando houver mudanças nas variáveis ou parâmetros essenciais do processo produtivo da manufatura aditiva. Ressalta-se que essas mudanças devem ser controladas durante o processo de qualificação e reportadas ou notificadas ao comprador. Ademais, a etapa três define o fim do processo de qualificação da AM (API, 2020).

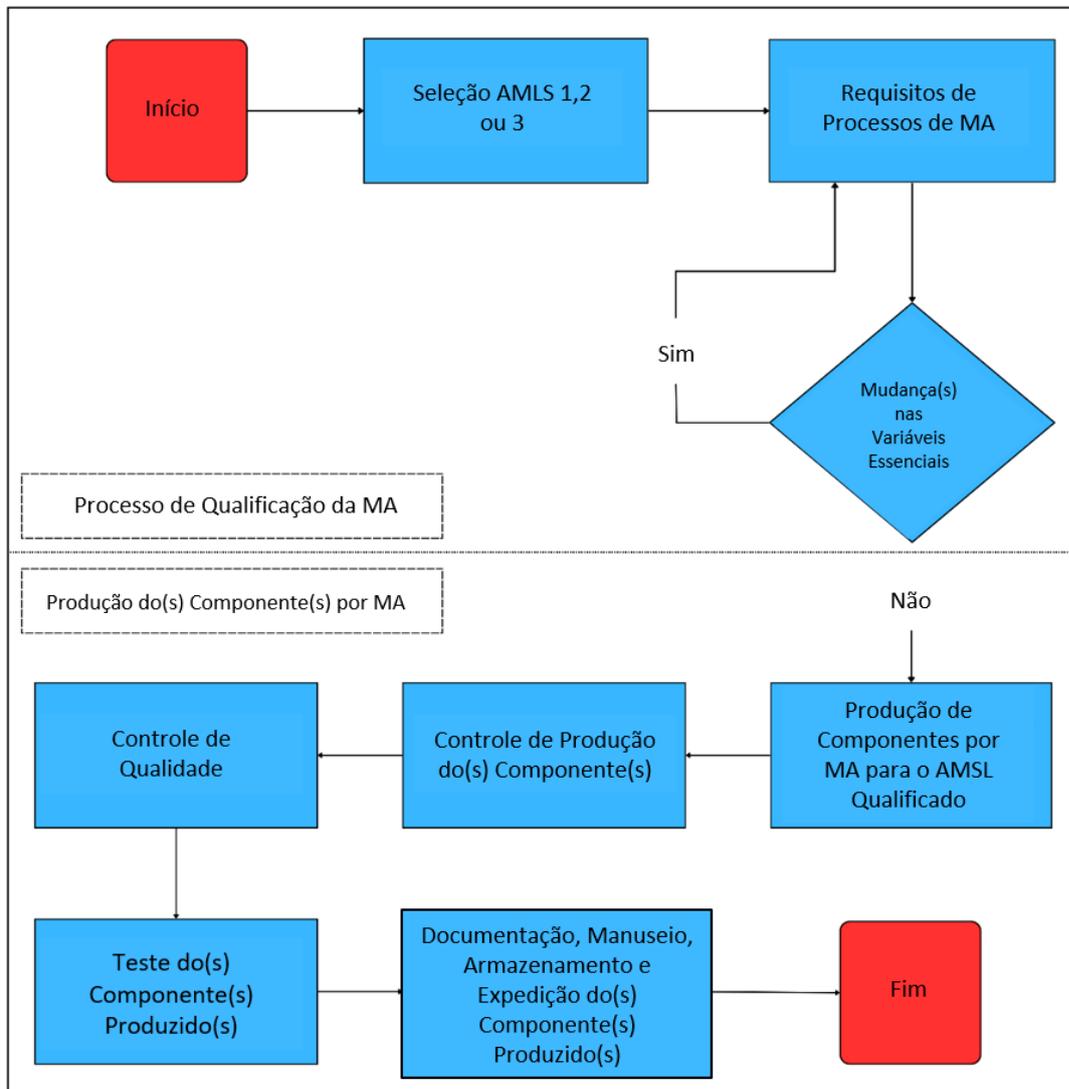
De posse do componente metálico produzido por AM para o AMSL previamente qualificado, pode-se inferir que o processo de fabricação aditiva também está qualificado, permitindo, portanto, a progressão para o quinto estágio, onde haverá o controle da produção da(s) peça(s). Nesta fase, serão aferidas as especificações do processo de manufatura, procedimentos de pré-fabricação, controle de lote e reciclagem de matéria-prima, interrupções no processo produtivo, processos de pós-processamentos e serialização e identificação dos componentes fabricados. A saber quanto às duas últimas categorias: as peças fabricadas, sob os critérios de qualificação da criticidade AMSL 1, devem ser identificadas como “API 20S-1” e não necessitam de serialização. Já para cada um dos componentes produzidos e qualificados seguindo os procedimentos exigidos para a criticidade AMSL 2 e AMSL 3, devem ser designados como “API 20S-2” e “API 20S-3”, respectivamente, além de “atribuídos e identificados com um código único para manter a rastreabilidade e os registros associados” (API, 2020).

A sexta etapa detalha os requisitos mínimos de controle de qualidade para componentes metálicos manufaturados, levando em consideração equipamentos de monitoramento e medição, procedimentos de controle de qualidade, amostragem e requisitos de pessoal de controle de qualidade. Além disso, a norma API STD 20S estabelece que o fabricante deve possuir um sistema de gestão da qualidade (SGQ) (API, 2020).

Durante o estágio sete são verificados, consoante ao AMSL aplicado e à tecnologia de fabricação aditiva definida, os critérios de inspeção e teste para produção de componentes metálicos fabricados por AM, como os testes de tração, impacto, dureza, densidade, análises químicas e microestrutural, inspeções visuais e dimensionais, além dos exames não destrutivos de superfície e volume. A norma API 20S determina, na sétima etapa, que o fabricante deve estabelecer e guardar procedimentos documentados para assegurar que, aqueles componentes fabricados aditivamente que não estejam em conformidade com os

requisitos especificados, sejam impedidos de uso ou instalação não intencional. Ademais, esses procedimentos devem fornecer, seguindo as recomendações dos padrões API *Specification* Q1 ou ISO 9001, identificação, documentação, avaliação, segregação (quando aplicável) e disposição dos componentes não conformes (API, 2020).

Figura 6. Fluxograma do processo de qualificação da API STD 20S.



Fonte: Adaptado de API, 2021

Por fim, na oitava fase são descritos os procedimentos que devem ser gerados e mantidos pelos fabricantes no que se refere à documentação, manuseio, armazenamento e transporte com o intuito de garantir o controle de todos os documentos e dados exigidos pela norma API 20S (API, 2020).

2.2 Peças Sobressalentes

2.2.1 Definição

A norma técnica IEC 62550:2017 define peça sobressalente (PS), também denominada de peça de reposição, como um item ou componente, seja este reparável ou não – isto é, estar apto ou não, após a ocorrência de uma falha, a retornar à uma condição cujo desempenho das suas funcionalidades de projeto não seja comprometido –, associado à uma lista de materiais e utilizado para manter ou reparar uma máquina ou equipamento (IEC, 2017). Peça de reposição, consoante à norma BS EN 13306:2017, também é definida como um item designado para substituir outro item, ou seja, o seu correspondente, com o propósito de reter ou manter a função original exigida do componente a ser substituído. Portanto, pode-se inferir que os adjetivos “sobressalente” ou “de reposição” qualificam uma peça objetivando descrevê-la como um componente mantido em estoque por uma companhia e utilizado apenas quando necessário, substituindo um item por outro que seja o seu corresponde, por meio de manutenções corretivas ou preventivas, garantindo, portanto, o cumprimento das funcionalidades e desempenho exigidos por máquinas e equipamentos (FÉLIX, 2017).

As PS possuem três categorias, de acordo com a norma NORSOK Z-008:2011, descritas como peças sobressalentes capitais, peças de reposição operacionais e consumíveis. Essa categorização está baseada numa avaliação dos riscos (e incertezas) que as PS podem ofertar para uma planta ou processos produtivos. Essa avaliação é realizada levando em consideração critérios como criticidade e segurança operacional. As peças sobressalentes categorizadas como capitais são fundamentais para o funcionamento de uma planta ou processos produtivos, apesar de possuírem baixa probabilidade de falhas ao longo da vida útil de um equipamento. Geralmente caras e com longos prazos de entrega, podem ter o seu custo reduzido substancialmente se compradas em quantidade. Já as PS operacionais são requeridas com a intenção de preservar as funcionalidades e a segurança de um equipamento durante sua vida operacional. Por fim, os consumíveis são descritos como componentes destinados exclusivamente para utilização única, sendo, portanto, irreparáveis (NORSOK, 2011). É importante evidenciar que outras fontes categorizam e classificam as peças de reposição utilizando critérios diferentes – ou possuem entendimentos distintos sobre esses critérios –, como citado na seção 2.2.2.1.

Além das definições e categorias existentes para as peças de reposição, salienta-se que estas possuem determinadas especificidades, a saber: elevada propensão à obsolescência; o preço da PS, normalmente, é inferior ao custo da sua falta no estoque da companhia; podem ser críticas para os processos operacionais, conforme supracitado; e para algumas peças sobressalentes, há baixa oferta de fornecedores específicos no mercado (TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO, 2018 apud GOPALAKRISHNAN e BANERJI, 2015).

2.2.2 Gerenciamento

Primeiramente, o gerenciamento de PS é uma das atribuições da gestão da manutenção e tem como propósito apoiar as atividades de manutenção de uma empresa. Isto

posto, a gestão das peças de reposição fundamenta-se no compartilhamento de informações – feito, preferencialmente, em tempo real, sobre a quantidade das PS disponíveis no estoque de uma companhia – e em políticas de inventário que busquem garantir a disponibilidade dessas peças quando necessárias, minimizando, deste modo, custos relativos à operação, manutenção, logística e segurança, por exemplo. Em outras palavras, apesar do SPM ser uma das atribuições do setor de manutenção, ela também envolve o gerenciamento da logística de uma organização (TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO, 2018).

TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO (2018) apud KENNEDY et al. (2002) destacam que a gestão de estoque de PS apresenta características intrínsecas, como: complexidade ao decidir entre manter ou trocar componentes devido ao impacto nos níveis de estoque de manutenção e, por conseguinte, nos custos relacionados; dificuldade para prever o período das falhas dos itens uma vez que, normalmente, a quantidade necessária de dados para avaliação precisa da confiabilidade dos componentes não se encontra disponível; obsolescência, ou seja, inexistência de determinadas PS, pois já não são mais cabíveis para uso em máquinas e equipamentos mais atuais; quantificação dificultosa dos custos relativos à quebra de uma PS, pois se deve incluir os custos associados às perdas de produção.

Portanto, levando em consideração as características intrínsecas à gestão de PS, FRANDSEN et al. (2019) consideram esse gerenciamento desafiador, pois compreende uma elevada variedade e um baixo volume de componentes a serem estocados – e, portanto, gerenciados –, além dessa gestão ser, normalmente, caracterizada por altos requisitos de serviço e pela grande imprevisibilidade e esporadicidade dos padrões de demanda. Outro aspecto que caracteriza o SPM é o impacto financeiro relativo à falta de componentes em estoque, além do elevado preço de aquisição individual de peças de reposição comparado com o valor de compra de PS em quantidade. Portanto, as companhias adotam como prática ordinária proteger-se contra as faltas de sobressalentes no inventário, acarretando grandes investimentos em estoque de peças críticas. Além dessa consequência, acondicionar níveis de inventário tão altos de PS caras “resulta em elevados custos de depreciação e obsolescência, o que pode impedir a rentabilidade das empresas” (FRANDSEN et al., 2019). Em outros termos, o SPM lida com o *trade off* entre quantidade de PS estocadas e seus custos inerentes, pois manter um elevado número de itens sobressalentes acarreta numa grande quantidade de capital imobilizado – não permitindo a geração de novas receitas por meio dessa estocagem – e, por outro lado, a inexistência das peças sobressalentes em estoque provoca custos devido às interrupções da produção, além de poder impactar na segurança operacional. Portanto, o SPM tornou-se cada vez mais vital para a gestão de operações modernas (TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO, 2018).

A falta de PS para atender a um pedido de um cliente, seja ele interno ou externo à empresa, também é considerada uma adversidade para o SPM. Isto se justifica no impacto causado ao cliente devido à interrupção do seu processo produtivo, além da possibilidade de expô-lo à uma situação crítica e até mesmo afastá-lo do fornecedor que permitiu a ocorrência da falta de componentes de reposição (FÉLIX, 2017). À vista dessas adversidades e do *trade*

off evidenciado anteriormente, faz-se necessário realizar, quando adequado, o reabastecimento do inventário de PS através de novos pedidos feitos diretamente com os fornecedores. Quanto a esses pedidos, a norma NORSOK Z-008:2011 destaca o seguinte:

“O nível de novo pedido e a quantidade do pedido são parâmetros importantes para controlar se as peças sobressalentes estão disponíveis sem estoque insuficiente ou excessivo. Métodos e fórmulas de inventário tradicionais podem ser usados para estimar esses parâmetros para peças de reposição operacionais e consumíveis. As peças sobressalentes capitais são avaliadas caso a caso com base em uma avaliação de risco. O resultado é um nível de peças sobressalentes que incorre na combinação mínima de custos e riscos.

O nível de novo pedido é baseado na taxa de demanda e no prazo de entrega, ajustado por um fator de segurança devido à incerteza. A quantidade do pedido é estimada com base na taxa de demanda, custo por pedido e custo de manutenção” (NORSOK, 2011).

Em conclusão, devido às particularidades oriundas dos fundamentos, características intrínsecas e adversidades do SPM, pode-se inferir que é necessário identificar métodos eficazes e eficientes para realizar esse gerenciamento. Assim sendo, de acordo com TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO (2018), classificar PS é uma etapa relevante para orientar todo esse processo de gestão de sobressalentes, pois, com essa classificação, torna-se possível efetuar um gerenciamento adequado de peças de reposição, obtendo, desse modo, muitas vantagens.

2.2.2.1 Métodos para Classificação de Peças Sobressalentes

A classificação de PS é fundamental para o gerenciá-las adequadamente, pois se trata de um método para controlar tanto a diversidade de peças de reposição em estoque, quanto a sua variedade. Para realizar essa classificação, podem ser aplicados três tipos de métodos, a saber: os quantitativos, baseados em dados e indicadores; os qualitativos, vinculados às análises subjetivas, ou seja, baseiam-se em julgamentos aproximados ou em métodos de pontuação (TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO, 2018); e os qualiquantitativos, os quais unem características dos dois métodos citados anteriormente. Antes de selecionar e empregar quaisquer métodos, uma empresa deve decidir quais critérios devem ser analisados para realizar a classificação e categorização das suas PS. A Tabela 4 e a Tabela 5 foram elaboradas, a partir de uma revisão sistemática, com o intuito de apresentar os critérios mais citados pela literatura para classificar e categorizar PS. Ressalta-se que as unidades de medida dos critérios apresentados nas tabelas supracitadas podem ser ou não as mesmas empregadas pelas referências que citam estes critérios. Além disso, foi desconsiderado o termo “criticidade” por ser entendido e aplicado de diferentes maneiras na literatura. Portanto, preferiu-se utilizar termos mais precisos e que estejam correlacionados ao critério “criticidade”.

Tabela 4. Critérios estratégicos para classificação de peças sobressalentes elegíveis para AM e alinhamento com objetivos estratégicos da companhia (continua).

Critério (<i>Criteria</i>)	Descrição	Referências	Alinhamento com objetivos estratégicos da companhia			
			Inovar	Garantir suprimentos	Reduzir custos	Manutenir peças
Capacidade de estoque / Armazenamento / Espaço do armazém (<i>Stockability / Storage / Warehouse Space</i>)	Fornecer as informações sobre a forma e as condições necessárias para o processo de armazenamento das peças sobressalentes, o que facilitará consideravelmente a sua adequada organização (ANTOSZ e RATNAYAKE, 2016).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); CHAUDHURI et al. (2020); FRANDSEN et al. (2019); ANTOSZ e RATNAYAKE (2016); BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI (2004)		✓		
Categoria da máquina (<i>Machine category</i>)	Descreve a importância de uma máquina para o desempenho do processo de produção (ANTOSZ e RATNAYAKE, 2016).	ANTOSZ e RATNAYAKE (2016)	✓			✓
Competitividade / Competição (<i>Competitiveness / Competition</i>)	Peças sobressalentes diferenciadas conforme sua disponibilidade no mercado independente ou de concorrentes (peças competitivas) (PERSSON e SACCANI, 2009).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); PERSSON e SACCANI (2009)	✓			
Complexidade do processo de substituição da peça sobressalente (<i>Complexity of the exchange process</i>)	Define o quão complexo, difícil é o processo de troca de peças sobressalentes (ANTOSZ e RATNAYAKE, 2016).	ANTOSZ e RATNAYAKE (2016)	✓			✓
Comunalidade / Número de componentes idênticos na planta (<i>Commonality / Number of identical components in the plant</i>)	Expressa se existe outro item de estoque que pode substituir qualquer item de estoque (CAKMAK e GUNEY, 2022).	FRANDSEN et al. (2019); CAKMAK e GUNEY (2022); SARMAH e MOHARANA (2015); BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI (2004)		✓	✓	✓
Confiabilidade de fornecimento (<i>Supply reliability</i>)	Cumprimento dos pedidos dos fornecedores (YANG et al., 2021).	YANG et al. (2021)		✓		✓
Criticidade do equipamento (<i>Equipment criticality</i>)	Criticidade do equipamento refere-se à classe de criticidade do equipamento. Normalmente, a organização distingue entre seis classes possíveis, nomeadamente A, B, C, D, E F (MOLENAERS et al., 2012).	MOLENAERS et al. (2012)	✓	✓		✓

Tabela 4. Critérios estratégicos para classificação de peças sobressalentes elegíveis para AM e alinhamento com objetivos estratégicos da companhia (continuação).

Critério (Criteria)	Descrição	Referências	Alinhamento com objetivos estratégicos da companhia			
			Inovar	Garantir suprimentos	Reduzir custos	Manutenir peças
Crítico para o equipamento [<i>Critical to equipment</i>]	Define a criticidade da peça que afeta a função primária da máquina (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)	✓	✓	✓	✓
Custo de consumo anual / Custo anual total (<i>Annual consumption cost / Annual cost usage / Total annual cost</i>)	Calculado pelo custo unitário médio multiplicado pelo consumo anual (YANG et al., 2021).	YANG et al. (2021); BAYKASOGLU, SUBULAN e KARASLAN (2016); HU et al. (2017)		✓		
Custo de falta de estoque (<i>Stockout cost / Out-of-stock cost</i>)	O custo da penalidade devido à perda de produção ocasionada pela falta de estoque ou disponibilidade das peças de reposição (YANG et al., 2021; CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); YANG et al. (2021); RODA et al. (2014)	✓		✓	
Custo de manutenção de estoque (<i>Inventory holding cost</i>)	Custo de manutenção de estoque (YANG et al., 2021).	YANG et al. (2021)		✓	✓	
Custo do ciclo de vida (<i>Lifecycle cost</i>)	É o custo incorrido em uma fase diferente do ciclo de vida (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)			✓	✓
Custo do inventário / Custo em estoque (<i>Inventory cost / In-stock cost</i>)	Calculado pelo custo de consumo anual mais o custo de manutenção de estoque (YANG et al., 2021).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); FRANSEN et al. (2019); YANG et al. (2021); DUCHESSI, TAYI e LEVY (2007)		✓	✓	
Custo unitário / Custo unitário médio / Preço unitário / Preço (<i>Unit cost / Average unit cost / Unit price / Price</i>)	Preço ou custo total da peça sobressalente (YANG et al., 2021; CHAUDHURI et al., 2020)	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); CHAUDHURI et al. (2020); FRANSEN et al. (2019); YANG et al. (2021); CAKMAK e GUNEY (2022); LIU e MA (2019); TEIXEIRA, LOPES E FIGUEIREDO (2017); SARMAH e MOHARANA (2015); RODA et al. (2014); ERNST e COHEN (1990); TEUNTER, BABAI e SYNTETOS (2009); ANTOSZ e RATNAYAKE (2016); HU et al. (2017); BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI (2004)	✓	✓	✓	

Tabela 4. Critérios estratégicos para classificação de peças sobressalentes elegíveis para AM e alinhamento com objetivos estratégicos da companhia (continuação).

Critério (<i>Criteria</i>)	Descrição	Referências	Alinhamento com objetivos estratégicos da companhia			
			Inovar	Garantir suprimentos	Reduzir custos	Manutenir peças
Custos de certificação / qualificação (<i>Certification / qualification costs</i>)	Custos relacionados à certificação e qualificação de produtos.	ZE CHEN et al. (2022); BRU (2022); THOMAS, Douglas S. and GILBERT, Stanley W. (2014)	✓		✓	
Custos de inatividade (criticidade) [<i>Downtime costs (criticality)</i>]	Custo relacionado ao tempo durante o qual uma máquina ou equipamento não pode ser utilizado. As paradas da máquina ou equipamento podem ocorrer devido a avarias, manutenção, substituição de peças sobressalentes, entre outros motivos (IWLA, 2018).	CHAUDHURI et al. (2020); DUCHESSI, TAYI e LEVY (2007)		✓	✓	✓
Custos indiretos (<i>Overhead cost</i>)	Custos relacionados ao estoque, transporte entre outros custos relevantes (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)	✓	✓	✓	✓
Disponibilidade (criticidade) [<i>Availability (criticality)</i>]	Representa a influência do esgotamento das peças sobressalentes na disponibilidade do equipamento (HU et al., 2017).	BAYKASOGLU, SUBULAN e KARASLAN (2016); HU et al. (2017)		✓		✓
Disponibilidade da instalação da produção / Disponibilidade da produção (<i>Availability of production facility / Production availability</i>)	É o status da disponibilidade das instalações produtivas (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)				✓
Disponibilidade de especificações técnicas (<i>Availability of technical specifications</i>)	A disponibilidade das especificações técnicas (BOM, desenho CAD-CAM e texto do pedido) da peça sobressalente (MOLENAERS et al., 2012).	MOLENAERS et al. (2012)			✓	
"Efeito dominó" (criticidade) [<i>"Domino effect" (criticality)</i>]	Quanto que a peça sobressalente pode impactar em outros processos produtivos (BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI, 2004).	BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI (2004)		✓	✓	✓

Tabela 4. Critérios estratégicos para classificação de peças sobressalentes elegíveis para AM e alinhamento com objetivos estratégicos da companhia (continuação).

Critério (<i>Criteria</i>)	Descrição	Referências	Alinhamento com objetivos estratégicos da companhia			
			Inovar	Garantir suprimentos	Reduzir custos	Manutenir peças
Especificidade (<i>Specificity</i>)	Avaliar o quão divergente uma peça sobressalente é de outras peças sobressalentes padronizadas disponíveis no mercado (RODA et al., 2014).	CHAUDHURI et al. (2020); RODA et al. (2014)	✓	✓	✓	✓
Estratégia de serviço pós-venda para fornecer peças de reposição (<i>After-sales service strategy to supply spare parts</i>)	Atividade que mantém os produtos após a entrega, dedicando-se ao suporte ao cliente para realizar as atividades do dia a dia (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)	✓	✓		
Experiência limitada com produção sob demanda (<i>Limited experience with ondemand production</i>)	Conhecimento inadequado de peças de fabricação sob demanda e seguindo estratégias de longa data (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)				✓
Fase do ciclo de vida / Última data de uso (<i>Lifecycle stage / Last date of use</i>)	É o período de tempo desde que as peças sobressalentes não foram utilizadas (CHAUDHURI et al., 2020).	CHAUDHURI et al. (2020); FRANDSEN et al. (2019); PERSSON e SACCANI (2009); ERNST e COHEN (1990)				✓
Inventário / Estoque de segurança (<i>Safety inventory / Safety stock</i>)	Um estoque regulador preparado para prevenir os fatores incertos da demanda futura (YANG et al., 2021).	YANG et al. (2021); DUCHESSI, TAYI e LEVY (2007)		✓	✓	✓
Localização Geográfica / Proximidade (<i>Geographic Location / Proximity</i>)	Localização do fornecedor/armazém de um cliente (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)	✓	✓	✓	✓
Experiência limitada com produção sob demanda (<i>Limited experience with ondemand production</i>)	Conhecimento inadequado de peças de fabricação sob demanda e seguindo estratégias de longa data (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)				✓

Tabela 4. Critérios estratégicos para classificação de peças sobressalentes elegíveis para AM e alinhamento com objetivos estratégicos da companhia (continuação).

Critério (<i>Criteria</i>)	Descrição	Referências	Alinhamento com objetivos estratégicos da companhia			
			Inovar	Garantir suprimentos	Reduzir custos	Manutenir peças
Nível de monitoramento do sistema (<i>System monitoring level</i>)	Nível de quantidade de informações coletadas sobre o funcionamento das máquinas ou equipamentos (YANG et al., 2021).	YANG et al. (2021)			✓	✓
Número de Fornecedores (<i>Number of suppliers / Suppliers availability</i>)	O número de fornecedores que podem fornecer algum tipo de peças de reposição (YANG et al., 2021).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); CHAUDHURI et al. (2020); FRANSEN et al. (2019); YANG et al. (2021); TEIXEIRA, LOPES E FIGUEIREDO (2017); RODA et al. (2014); MOLENAERS et al. (2012); ANTOSZ e RATNAYAKE (2016); BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI (2004)	✓	✓	✓	✓
Obsolescência / Taxa de obsolescência (<i>Obsolescence / Obsolescence rate</i>)	Ato de ficar desatualizado devido aos avanços dos produtos e não mais oferecidos pela empresa (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); CHAUDHURI et al. (2020); FRANSEN et al. (2019); RODA et al. (2014); BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI (2004)	✓			✓
Orçamento anual alocado para peças de reposição críticas (<i>Annual budget allocated for critical spare parts</i>)	O orçamento geral alocado para peças de reposição críticas ao longo de um ano (CHAUDHURI et al., 2020)	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)		✓	✓	
Perda de produção (criticalidade) [<i>Production loss (criticality)</i>]	Quanto que a peça sobressalente pode resultar em perdas de produtividade no processo produtivo (BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI, 2004).	BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI (2004)			✓	✓
Perecibilidade (<i>Perishability</i>)	Termo utilizado para designar aqueles produtos que se deterioram rapidamente (CAMBRIGDE, 2023).	FRANSEN et al. (2019)	✓	✓		✓

Tabela 4. Critérios estratégicos para classificação de peças sobressalentes elegíveis para AM e alinhamento com objetivos estratégicos da companhia (continuação).

Critério (<i>Criteria</i>)	Descrição	Referências	Alinhamento com objetivos estratégicos da companhia			
			Inovar	Garantir suprimentos	Reduzir custos	Manutenir peças
Peso da peça (<i>Part weight</i>)	O peso da peça expressa o peso da peça em quilogramas ou gramas (CAKMAK e GUNEY, 2022).	CAKMAK e GUNEY (2022)		✓		
Política de Inventário (nível de serviço de inventário) [<i>Inventory policy (inventory service level)</i>]	Refere-se ao nível de manutenção da peça relevante em estoque (CAKMAK e GUNEY, 2022).	CAKMAK e GUNEY (2022)		✓	✓	
Previsão / Previsibilidade de demanda (<i>Demand forecasting / Demand predictability</i>)	A previsibilidade da demanda de peças de reposição. Esta previsibilidade está relacionada à fase de falha de um componente e às abordagens matemáticas usadas para medir tendências e taxas de falha (YANG et al., 2021; CAKMAK e GUNEY, 2022).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); FRANDSEN et al. (2019); YANG et al. (2021); CAKMAK e GUNEY (2022); RODA et al. (2014)	✓	✓	✓	✓
Previsibilidade / Probabilidade de falha / Durabilidade (criticidade) [<i>Predictability of failure / Probability of failure / Durability (criticality)</i>]	Aumentar a durabilidade das peças é uma situação que reduz as perdas de produto como deterioração, quebra e envelhecimento das peças (CAKMAK e GUNEY, 2022).	CHAUDHURI et al. (2020); CAKMAK e GUNEY (2022); TEIXEIRA, LOPES E FIGUEIREDO (2017); RODA et al. (2014); MOLENAERS et al. (2012); BAYKASOGLU, SUBULAN e KARASLAN (2016)	✓	✓	✓	✓
Previsibilidade do tempo de entrega (<i>Delivery time predictability</i>)	Define o quão previsível é o tempo de entrega de uma peça sobressalente até o seu destino final.	CHAUDHURI et al. (2020)		✓		✓
Problema de qualidade (criticidade) [<i>Quality problem (criticality)</i>]	Quanto que a peça sobressalente pode imprimir em perdas de qualidade no processo produtivo (BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI, 2004).	BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI (2004)		✓	✓	✓

Tabela 4. Critérios estratégicos para classificação de peças sobressalentes elegíveis para AM e alinhamento com objetivos estratégicos da companhia (continuação).

Critério (<i>Criteria</i>)	Descrição	Referências	Alinhamento com objetivos estratégicos da companhia			
			Inovar	Garantir suprimentos	Reduzir custos	Manutenir peças
Qualificações do funcionário necessárias para substituir uma peça (<i>Employee's qualifications needed for exchanging a part</i>)	Necessárias permissões especiais ou o envolvimento de uma empresa externa para substituir uma peça sobressalente (ANTOSZ e RATNAYAKE, 2016).	ANTOSZ e RATNAYAKE (2016)			✓	✓
Quantidade de pedido econômico (<i>Economic order quantity</i>)	Lida com o problema de identificar o tamanho do lote econômico exigido nos sistemas de manufatura por uma suposição da taxa de custo da demanda por meio da estabilização dos custos de estoque intangíveis em comparação com os custos reais de pedido (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)		✓	✓	
Quantidade média de pedidos (<i>Average order quantity</i>)	Refere-se à quantidade média de pedidos de peças sobressalentes realizada em um intervalo de tempo definido.	TEUNTER, BABAI e SYNTETOS (2009)	✓		✓	
Reabastecimento de pedidos (<i>Order replenishment</i>)	Indica com que frequência a solicitação de com ra foi realizada. Este critério tem consequências significativas tanto para o gerenciamento de estoque quanto para a estimativa (CAKMAK e GUNEY, 2022).	CAKMAK e GUNEY (2022)		✓	✓	
Reparabilidade / Eficiência de reparabilidade (<i>Repairability / Repairability efficiency</i>)	Quando a peça falha, ela deve ser reciclada ou reutilizada. Quanto maior a eficiência de reparabilidade da peça sobressalente, maior a preferência (CAKMAK e GUNEY, 2022).	FRANDSEN et al. (2019); CAKMAK e GUNEY (2022)				✓
Risco de falta de estoque (<i>Out-of-stock risk</i>)	A possibilidade de peças de reposição indisponíveis (YANG et al., 2021).	YANG et al. (2021); GAJAPL, GANESH e RAJENDRAN (1994)		✓		✓
Segurança externa e meio ambiente (criticidade) [<i>External safety and environmental (criticality)</i>]	Quantidade de contaminação ao ambiente devido à problemas nas máquinas que alocam as peças sobressalentes (BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI, 2004).	BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI (2004)	✓		✓	

Tabela 4. Critérios estratégicos para classificação de peças sobressalentes elegíveis para AM e alinhamento com objetivos estratégicos da companhia (continuação).

Critério (<i>Criteria</i>)	Descrição	Referências	Alinhamento com objetivos estratégicos da companhia			
			Inovar	Garantir suprimentos	Reduzir custos	Manutenir peças
Segurança interna e meio ambiente (criticidade) [<i>Internal safety and environmental (criticality)</i>]	Quantidade de incidentes, acidentes e óbitos devido à problemas nas máquinas que alocam as peças sobressalentes (BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI, 2004).	BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI (2004)	✓		✓	
Status atual do item (<i>Current item status</i>)	É o critério que indica quanto do material relevante está no depósito (CAKMAK e GUNEY, 2022).	CAKMAK e GUNEY (2022)		✓		
Substituibilidade (<i>Substitutability</i>)	Capacidade de substituir ou usar uma peça sobressalente em vez de outra (CAMBRIGDE, 2023).	FRANSEN et al. (2019)	✓	✓	✓	✓
Sustentabilidade / Economia circular (<i>Sustainability / Circular economy</i>)	É definido como o uso eficiente de peças sobressalentes em fim de vida, convertendo-as em matéria-prima para produzir novas peças sobressalentes ou reformar e reutilizar para minimizar o desperdício (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)	✓		✓	
Tamanho (<i>Size</i>)	Refere-se às dimensões físicas da peça sobressalente sem embalagem.	CHAUDHURI et al. (2020)		✓		
Taxa de falhas / Confiabilidade / Frequência de falhas (criticidade) [<i>Failure rate / Reliability / Frequency of failure (criticality)</i>]	Número de falhas que um componente apresenta durante um intervalo de tempo (DUCHESSI, TAYI e LEVY, 2007).	SGARBOSSA et al. (2020); DUCHESSI, TAYI e LEVY (2007); ANTOSZ e RATNAYAKE (2016); BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI (2004)	✓			✓
Tempo de esgotamento de estoque (<i>Time to stock-out</i>)	É definida como a disponibilidade de estoque para atender a demanda (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)		✓		

Tabela 4. Critérios estratégicos para classificação de peças sobressalentes elegíveis para AM e alinhamento com objetivos estratégicos da companhia (continuação).

Critério (<i>Criteria</i>)	Descrição	Referências	Alinhamento com objetivos estratégicos da companhia			
			Inovar	Garantir suprimentos	Reduzir custos	Manutenir peças
Tempo de espera / Tempo de espera médio / Prazo de reposição (<i>Lead time / Average Lead time / Replenishment lead time</i>)	É o tempo entre a colocação do pedido até a entrega da nova peça de reposição (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); CHAUDHURI et al. (2020); FRANDBSEN et al. (2019); YANG et al. (2021); LIU e MA (2019); TEIXEIRA, LOPES E FIGUEIREDO (2017); SARMAH e MOHARANA (2015); RODA et al. (2014); MOLENAERS et al. (2012); GAJAPL, GANESH e RAJENDRAN (1994); ERNST e COHEN (1990); TEUNTER, BABAI e SYNTETOS (2009); DUCHESSI, TAYI e LEVY (2007); BAYKASOGLU, SUBULAN e KARASLAN (2016); ANTOSZ e RATNAYAKE (2016); HU et al. (2017); BRAGLIA, GRASSI e MONTANARI (2004)		✓	✓	✓
Tempo de troca de peças sobressalentes (<i>Spare part exchange time</i>)	Determina o tempo estimado necessário para trocar a peça de reposição em caso de defeito (ANTOSZ e RATNAYAKE, 2016).	ANTOSZ e RATNAYAKE (2016)	✓		✓	✓
Tempo para responder à falha (criticidade) [<i>Time to respond to failure (criticality)</i>]	Intervalo de tempo necessário para que um item que está em um estado inativo devido a uma falha retorne a funcionar normalmente (BSI, 2010).	CHAUDHURI et al. (2020)	✓		✓	✓
Tipo de manutenção (criticidade) [<i>Maintenance type (criticality)</i>]	O tipo de manutenção (corretiva, preventiva, preditiva) realizada no equipamento (MOLENAERS et al., 2012).	CHAUDHURI et al. (2020); MOLENAERS et al. (2012); ANTOSZ e RATNAYAKE (2016)			✓	✓
Tipo de peça sobressalente (<i>Type of spare part</i>)	Avalia se a peça sobressalente é padronizada ou não (GAJAPL, GANESH e RAJENDRAN, 1994).	GAJAPL, GANESH e RAJENDRAN (1994)		✓		

Tabela 4. Critérios estratégicos para classificação de peças sobressalentes elegíveis para AM e alinhamento com objetivos estratégicos da companhia (conclusão).

Critério (<i>Criteria</i>)	Descrição	Referências	Alinhamento com objetivos estratégicos da companhia			
			Inovar	Garantir suprimentos	Reduzir custos	Manutenir peças
Uso anual do dólar (<i>Annual dollar usage</i>)	Custo anual, em dólar, referente ao consumo ou demanda, ao longo de um ano, com peças sobressalentes por uma companhia. Critério utilizado para classificação ABC de inventário (LIU e MA, 2019).	CHAUDHURI et al. (2020); FRANDSEN et al. (2019); LIU e MA (2019)	✓	✓	✓	
Valor de consumo anual / consumo anual (<i>Annual consumption value / Annual consumption</i>)	Quantidade de peça sobressalente calculada a partir dos dados históricos do uso anterior de peças de reposição (YANG et al., 2021). Os valores de consumo de sobressalentes são determinados pela multiplicação do consumo anual ou quantidade de uso e preço unitário médio ponderado anual (SARMAH e MOHARANA, 2015).	CHAUDHURI et al. (2020); YANG et al. (2021); SARMAH e MOHARANA (2015); HU et al. (2017)		✓	✓	
Volume de demanda / Padrão de demanda / Variabilidade / Taxa de demanda (<i>Demand Volume / Demand Pattern / Variability / Demand rate</i>)	É a quantidade de demanda feita para o item de estoque dentro de um período determinado. Se a demanda pelo produto no qual a peça é utilizada for alta, a peça se torna mais importante (CAKMAK e GUNEY, 2022).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); CHAUDHURI et al. (2020); FRANDSEN et al. (2019); CAKMAK e GUNEY (2022); RODA et al. (2014); PERSSON e SACCANI (2009); TEUNTER, BABAI e SYNTETOS (2009); HU et al. (2017)	✓	✓		✓

Fonte: A autoria própria, 2024

Tabela 5. Critérios técnicos de engenharia para seleção de peças sobressalentes elegíveis para AM (continua).

Critério (<i>Criteria</i>)	Descrições	Referências
Acabamento da superfície / Rugosidade da superfície (<i>Surface finish / Surface roughness</i>)	É definido como as irregularidades do material desenvolvido a partir do processo de fabricação (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)
Alongamento na ruptura (<i>Elongation at break</i>)	É a razão da mudança no comprimento em relação ao comprimento original antes da fratura de um espécime impresso em 3D (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)
Complexidade (<i>Complexity</i>)	Define o quão difícil é fabricar peças por manufaturas convencionais devido ao número de passos de ferramenta necessários para fabricar o produto (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)
Confiabilidade (<i>Reliability</i>)	É definida como a capacidade de uma peça sobressalente funcionar em circunstâncias determinadas por um período específico (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)
Encolhimento de pós-produção (<i>Post-production shrinkage</i>)	Redução no volume das peças após o cumprimento do processo de fabricação por manufatura aditiva.	CHAUDHURI et al. (2020)
Materiais de apoio e pós-processamento (<i>Support materials and post processing</i>)	Recursos adicionais necessários a serem utilizados após a fabricação das peças sobressalentes pelo processo de manufatura aditiva.	CHAUDHURI et al. (2020)
Precisão dimensional necessária (<i>Required dimensional accuracy</i>)	Refere-se às limitações das tolerâncias dimensionais e geométricas (GD&T) das peças sobressalentes a serem obtidas por manufatura aditiva.	CHAUDHURI et al. (2020); GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); FRANDSEN et al. (2019)
Propriedade térmica (<i>Thermal property</i>)	São as propriedades de um material que incluem resistência ao calor (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); CHAUDHURI et al. (2020)
Relação resistência/peso e relação rigidez/peso (<i>Strength to weight ratio and stiffness to weight ratio</i>)	Comparação entre a massa de uma peça sobressalente e a sua capacidade de resistir a solicitações mecânicas	CHAUDHURI et al. (2020)
Resistência à água (<i>Water resistance</i>)	Capacidade necessária da peça sobressalente para resistir à água.	CHAUDHURI et al. (2020)
Resistência à fadiga (<i>Fatigue strength</i>)	É a tensão máxima que a peça impressa em 3D pode suportar por um determinado número de ciclos sem falha (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); FRANDSEN et al. (2019)

Tabela 5. Critérios técnicos de engenharia para seleção de peças sobressalentes elegíveis para AM (conclusão).

Critério (<i>Criteria</i>)	Descrições	Referências
Resistência à tração (<i>Tensile strength</i>)	É a propriedade de uma peça impressa em 3D que resiste ao alongamento sob carga (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); FRANDSEN et al. (2019)
Tensão de escoamento (<i>Yield strength</i>)	É a tensão em uma peça impressa suportada antes da deformação plástica (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); FRANDSEN et al. (2019)
Tamanho das peças / Volume para impressão (<i>Size of parts / Build volume</i>)	É a dimensão máxima de uma peça que pode ser fabricada (CHAUDHURI et al., 2020).	CHAUDHURI et al. (2020)
Massa (<i>Mass</i>)	Refere-se à massa da peça sobressalente sem embalagem.	LINDEMANN et al. (2015); KNOFIUS, van der HEIJDEN e ZIJM (2016); FRANDSEN et al. (2019); DIAS (2020); CHAUDHURI et al. (2020); LASTRA et al. (2022)
Resolução / tamanho mínimo do recurso (<i>Resolution / Minimum feature size</i>)	A menor característica tem uma forma e orientação particular que o processo AM pode produzir, e dura após o pós-processamento (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)
Tipo de material (<i>Material type</i>)	É o material utilizado para fabricar a peça pela máquina de manufatura aditiva (CHAUDHURI et al., 2020).	GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022); CHAUDHURI et al. (2020); FRANDSEN et al. (2019)
Velocidade de construção (<i>Build speed</i>)	Diz respeito à velocidade de impressão da máquina de manufatura aditiva.	CHAUDHURI et al. (2020); FRANDSEN et al. (2019)
Espessura da camada (<i>Layer thickness</i>)	Dimensão admissível das camadas que constituem as peças fabricadas por manufatura aditiva.	CHAUDHURI et al. (2020); FRANDSEN et al. (2019)
Propriedade intelectual (<i>Intellectual property</i>)	Avalia se a empresa possui a propriedade intelectual sobre as peças sobressalentes a ser obtidas por manufatura aditiva.	Não citado
Quantidade de peças para impressão (<i>Number of pieces for printing</i>)	Quantidade dos exemplares a serem impressos as peças sobressalentes a ser obtidas por manufatura aditiva.	Não citado
Remoção de material (<i>Material usage / removal</i>)	Volume de material a ser removido da matéria-prima necessário para produzir a peça sobressalente através dos métodos convencionais de fabricação.	MUVUNZI, MPOFU e DANIAN (2021); BOOTH et al. (2017)

Fonte: Autoria própria, 2024

Dentre os métodos quantitativos, destacam-se as análises ABC, XYZ e FSN, os quais classificam as PS em três categorias distintas, descritas pelas letras que nomeiam esses métodos. A classificação ABC, considerada uma das abordagens mais tradicionais para o gerenciamento de peças de reposição, classifica essas peças em “A” (mais importantes), “B” (importância média) e “C” (menos importantes) considerando critérios quantificáveis, como tempo de espera, custo unitário, demanda anual, dentre outros. O método XYZ baseia-se nas variações dos critérios que quantificam a demanda dos sobressalentes e classifica-os como “X” (demanda constante), “Y” (demanda média) e “Z” (demanda aleatória). Já a abordagem FSN fundamenta-se nas taxas de movimentação de peças de reposição no estoque, tornando-se útil para evidenciar a obsolescência de peças sobressalentes em uma empresa, classificando-as em “F” (do inglês, *fast-moving*) quando apresentam rápida movimentação no inventário, “S” (da língua inglesa, *slow-moving*) nas situações cuja movimentação é lenta e “N” (de etimologia britânica, *non-moving*) para indicar aqueles componentes não móveis (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022; TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO, 2018).

Acerca dos métodos qualitativos, GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022) e TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO (2018) citam a análise VED que classifica as PS em vitais, essenciais e desejáveis (do inglês, *vital*, *essencial*, e *desirable*, respectivamente) levando em consideração a criticidade dessas peças para a companhia, criticidade esta analisada por especialistas em manutenção, os quais utilizam critérios como tempo de entrega, demanda anual, custo de estoque, dentre outros. Os MCDMs também têm sido reportados pela literatura, além de serem predominantemente aplicados, como métodos para classificação de peças sobressalentes. Dentre esses métodos, destaca-se o AHP, o qual pode ser utilizado unicamente ou em conjunto com outros, devido à possibilidade de combinar critérios qualitativos e quantitativos, relativa facilidade para inserção de dados, ajuda fornecida para reduzir decisões complexas e definir critérios cruciais através de uma estrutura hierárquica, representada por meio de um ranqueamento (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022; TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO, 2018).

Por fim, é importante evidenciar que os métodos ABC, VED, XYZ e FSN fundamentam “todas as metodologias usadas para classificação de peças de reposição em diferentes indústrias” (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022). A Figura 7 apresenta sumariamente os métodos mais utilizados para classificação de PS.

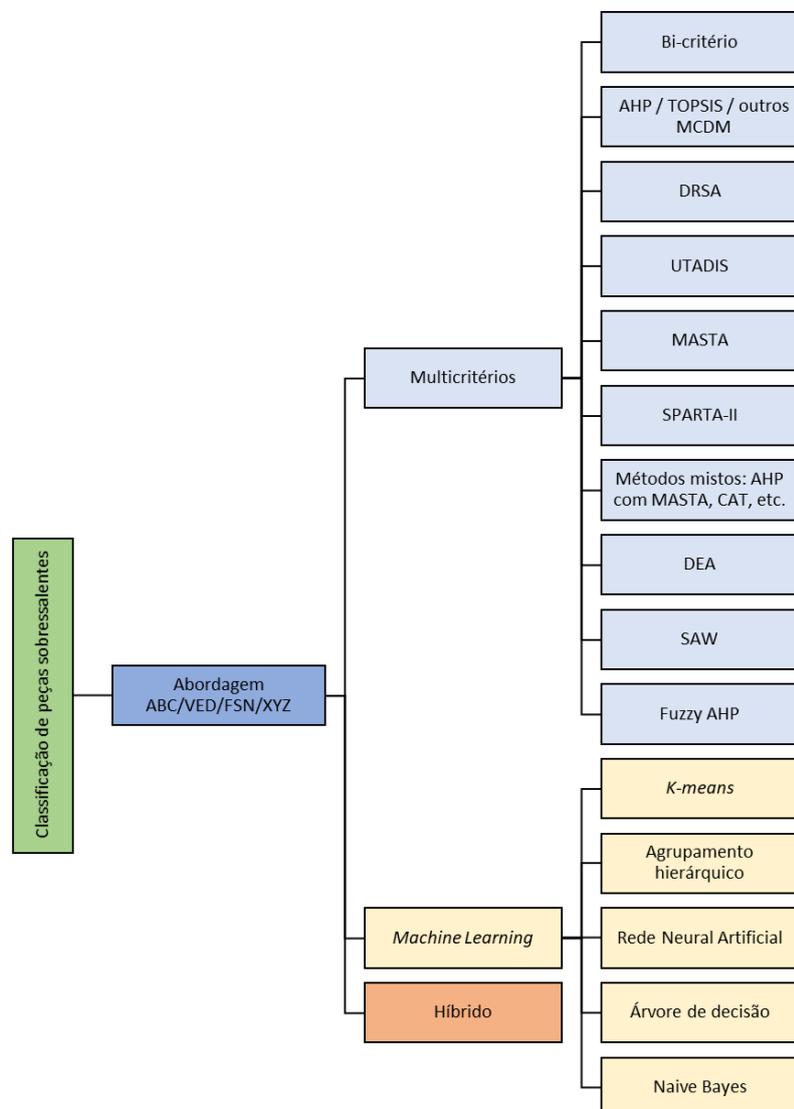
2.2.2.2 Oportunidades para Manufatura Aditiva

Devido às vantagens possibilitadas pela AM, como redução de desperdícios e custos de produção, aumento de complexidade dos produtos, customização de materiais, *design* generativo e manufatura distribuída (LEARY, 2020), ela também proporciona diversas oportunidades de melhorias para o SPM (KNOFIUS, van der HEIJDEN e ZIJM, 2016).

Segundo KNOFIUS, van der HEIJDEN e ZIJM (2016), a redução dos custos de manufatura, possibilitada pela AM, apresenta-se como o potencial mais evidente para o gerenciamento de PS. Isto se deve, por exemplo, para produção de baixo volume de peças

porque há a possibilidade de redução dos *setups* de fabricação e custos com ferramental. Também é possível minimizar os custos diretos de uso de peça, aplicando as tecnologias de MA, através do reparo, mesmo que temporário, de componentes que apresentem desgastes ou falhas - como evidenciado por DIAS (2020). Deste modo, pode-se elevar o tempo de vida útil dessas peças, através do aumento do intervalo da sua substituição, ofertando, assim, substancial diminuição nos custos totais do seu ciclo de vida e acréscimo de confiabilidade ao componente, mesmo que este venha a apresentar taxas de desempenho reduzidas. A aplicação da AM para reparo temporário de peças desgastadas ou que apresentem falhas representa uma oportunidade para manter inventários de segurança de alto valor agregado ou reduzir o risco de longos períodos de inatividade por falta de estoque de sobressalente.

Figura 7. Métodos mais utilizados para classificação de peças sobressalentes.



Fonte: Adaptado de GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022

A AM também oportuniza o aumento na capacidade de resposta de uma cadeia de suprimentos, pois é capaz de fabricar e entregar peças de reposição, geralmente, de maneira mais rápida quando comparada com os métodos tradicionais de fabricação, sem manter os níveis de estoque – e seus custos característicos – elevados. Além disso, como a AM é capaz de permitir uma manufatura descentralizada, pode-se realizar a fabricação dos sobressalentes *in situ*, tornando-se potencialmente útil para as indústrias, como a de mineração, petróleo e gás, energia eólica, entre outras, que podem ser penalizadas por atrasos nas entregas uma vez que as suas localizações normalmente são remotas e, devido a este motivo, os tempos de inatividade da produção podem ser dispendiosos – especialmente quando faturam por tempo de serviço. Ademais, aplicar as técnicas de AM nas cadeias de abastecimento de serviços pós-venda é outra oportunidade, pois elas são capazes de fornecer auxílio ao processo de manutenção de bens de capital de alto valor agregado ao longo dos seus ciclos de vida, que, frequentemente, estendem-se por várias décadas. Em contrapartida, vale salientar que aspectos legais envolvendo proteção de patentes e propriedades intelectuais são ameaças permitidas pela AM e que vem sendo estudados e divulgados na literatura (KNOFIUS, van der HEIJDEN e ZIJM, 2016, apud WALTER et al., 2004; FRANDSEN et al., 2019).

2.3 Método Multicritério para Tomada de Decisão: AHP

O método AHP foi desenvolvido entre 1971 e 1975 pelo matemático estadunidense Thomas L. Saaty para “resolver problemas não estruturados em economia, ciências sociais e gestão” (VAFAEI, RIBEIRO e CAMARINHA-MATOS, 2016). Trata-se de uma teoria geral de medição utilizada para avaliar critérios ou alternativas, sejam eles quantitativos ou qualitativos, a partir de comparações entre pares desses critérios ou alternativas e usando uma escala de importância que varia entre 1 (igual importância) a 9 (extrema importância). Esse método está fundamentado no seguinte princípio: a experiência e o conhecimento dos decisores, isto é, das pessoas, são considerados tão relevantes quanto a base de dados ou informações disponíveis para o processo de tomada de decisões (SAATY, 1987; VARGAS, 1999; DIAS, 2020). Devido ao seu propósito resolutivo, o AHP tem sido aplicado em diferentes áreas do conhecimento, como medicina, economia, política, administração pública, engenharia, dentre outras, para auxiliar tanto nas tomadas de decisões consideradas simples, ao selecionar uma escola, por exemplo, quanto naquelas classificadas como complexas, a exemplo de problemas gerenciais, econômicos, políticos, sociais e tecnológicos de impacto mundial (VARGAS, 1999; VAFAEI, RIBEIRO e CAMARINHA-MATOS, 2016).

SAATY (2008) explica que para tomar uma decisão organizadamente com a intenção de gerar prioridades, faz-se necessário dividir a decisão em algumas etapas. Em termos mais específicos, para implementar o método AHP, é necessário aplicar as quatro etapas seguintes:

1. Definir o problema e o tipo de conhecimento pretendido.
2. Estruturar a hierarquia de decisão: objetivo da decisão, no topo; critérios e subcritérios escolhidos para as comparações pareadas, nos níveis

intermediários; conjunto de alternativas selecionadas para solucionar o problema, no fim.

3. Construir um conjunto de matrizes de comparações pareadas cujos elementos dos níveis hierárquicos superiores são comparados com aqueles dos estágios imediatamente inferiores na hierarquia de decisão.
4. Utilizar, para cada elemento da hierarquia de decisão, as prioridades obtidas nas comparações pareadas para pesar as prioridades nos níveis imediatamente inferiores. Depois, para cada elemento presente no nível hierárquico inferior, adicionar seus valores ponderados, obtendo sua prioridade geral ou global. Prosseguir este processo de pesagem e adição até obter as prioridades finais das alternativas presentes no último nível.

Portanto, o método AHP, detalhado no Anexo 13, utiliza uma estrutura hierárquica multinível composta por objetivos, critérios, subcritérios e alternativas. Para obter as alternativas mais recomendadas para uma decisão, os decisores realizam comparações pareadas a fim de definir o peso de cada critério e as medidas de desempenho relativo das alternativas para cada critério. Além disso, esse método avalia a consistência das comparações e fornece um mecanismo para aperfeiçoá-la nos casos cujas comparações não são consistentes (TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO, 2018).

A AM refere-se a uma família de tecnologias de fabricação capazes de produzir produtos a partir de modelos digitais adicionando material progressivamente, camada a camada (DNV, 2021; LEARY, 2020). Desde a primeira patente registradas, em 1981 (KODAMA, 1981), a AM está em contínuo processo de aprimoramento tecnológico e comercial, demonstrando sua relevância para a fronteira tecnológica (FRANSEN, 2019). Este fato é evidenciado, exemplificativamente, pelas normas técnicas de qualificação e certificação de peças fabricadas por AM e pelo crescente número de publicações científicas que visam investigar e descrever os fatores motrizes e barreiras da MA para o cenário industrial (API, 2021; SLATER, 2022; ISO, 2023; VDI, 2023; RONCHINI, MORETTO e CANIATO, 2023). Uma oportunidade latente é a otimização do gerenciamento de peças sobressalentes através da fabricação aditiva (KNOFIUS, van der HEIJDEN e ZIJM, 2016). Neste contexto, destaca-se a relevância da classificação de PS para direcionar o processo de SPM (TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO, 2018). O método AHP destaca-se dentre os diferentes métodos existentes para classificação de PS devido à sua capacidade de auxiliar tomadas de decisões complexas a partir de comparações pareadas entre alternativas, integrar tanto critérios de decisão qualitativos quanto quantitativos, inserir dados para avaliação com relativa facilidade, estabelecer critérios essenciais para as decisões por meio de uma estrutura hierárquica e garantir a consistência das preferências dos decisores (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022; TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO, 2018; SAATY, 1987).

3 Métodos e Materiais

3.1 Classificação da Pesquisa

Pesquisar significa buscar respostas para questionamentos propostos. Conseqüentemente, realiza-se uma pesquisa quando se faz necessário solucionar um problema para o qual inexitem informações para resolvê-lo. E, para que este objetivo seja atingido, utilizam-se procedimentos racionais e sistemáticos (SILVA, 2005).

Consoante a SILVA (2005), esta pesquisa pode ser classificada de acordo com as seguintes categorias:

- Natureza: aplicada, uma vez que possui como propósito criar conhecimentos para aplicação prática e direcionados à solução de problemas específicos.
- Abordagem do problema: qualitativa, pois se baseia na interpretação e análise dos dados coletados e na compreensão dos fenômenos intrínsecos à pesquisa.
- Objetivo: exploratória, visto que objetiva proporcionar maior vínculo com o problema cuja finalidade é torná-lo explícito e construir hipóteses a partir da sua análise.
- Procedimento técnico: pesquisa bibliográfica porque foi elaborada a partir de material publicado previamente.

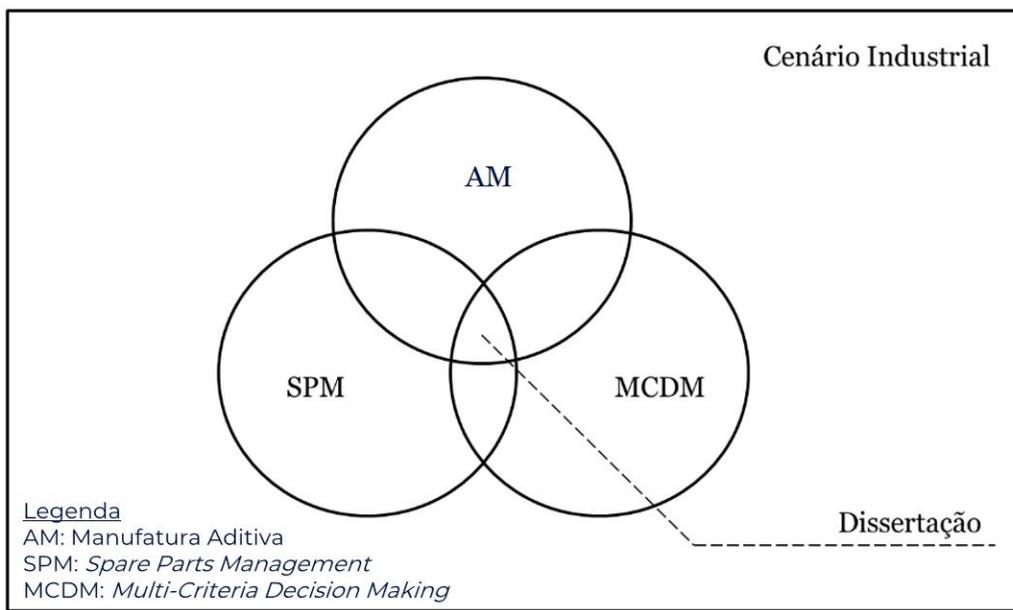
O método científico é o conjunto de processos ou operações mentais que devem ser empregados na investigação do problema (SILVA, 2005). Deste modo, segundo SILVA (2005), a linha de raciocínio adotada no desenvolvimento desta pesquisa é fenomenológica, uma vez que considera as realidades individuais, particulares das companhias interessadas em implementar a manufatura aditiva como uma solução viável para otimizar o gerenciamento das suas peças sobressalentes. Em outras palavras, esta pesquisa compreende que cada organização é única, isto é, possui os seus próprios valores, objetivos estratégicos, diretrizes, códigos de conduta e motivações para agir. Portanto, estes fatores foram reconhecidos como relevantes para o processo de construção do conhecimento descrito nesta dissertação.

3.2 Delimitação da Pesquisa

Esta dissertação limita-se a elaborar uma metodologia capaz de classificar e selecionar PS elegíveis para AM e destinadas a aplicações industriais, objetivando otimizar o seu gerenciamento. Para classificar e selecionar as PS, foi utilizado o método multicritério para tomada de decisão AHP para auxiliar na avaliação dos critérios de elegibilidade das PS para MA. Estes critérios foram selecionados levando em consideração os objetivos estratégicos constantemente encontrados na literatura para companhias interessadas em aplicar a AM como método de otimização do estoque de suas PS e as características técnicas necessárias para definição da fabricação aditiva como método de manufatura de PS elegíveis.

Portanto, as principais temáticas que englobam esta pesquisa são: manufatura aditiva (AM); gerenciamento de peças sobressalentes (SPM) e tomada de decisão multicritério, da língua inglesa *multi-criteria decision making* (MCDM). O cenário industrial foi definido como objeto de estudo desta pesquisa para aplicação e validação da metodologia desenvolvida. Por fim, a delimitação descrita pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8. Delimitação da pesquisa.



Fonte: Autoria própria, 2024

3.3 Metodologia da Pesquisa

Primeiramente, foram identificados os problemas envolvidos com as principais temáticas da pesquisa, os quais foram obtidos a partir de análises feitas de materiais publicados previamente, isto é, da revisão da literatura. Esta revisão utilizou diferentes bases de dados científicos com o intuito de buscar por periódicos, teses, dissertações e normas técnicas pertinentes à delimitação da pesquisa. Com o objetivo de solucionar os problemas identificados, foi desenvolvida uma metodologia capaz de classificar e selecionar PS elegíveis para a AM e destinadas a aplicações industriais utilizando as informações relevantes oriundas da revisão da literatura realizada.

Em seguida, foram definidos os critérios de classificação das PS mais relevantes para a aplicação da metodologia desenvolvida. Com o intuito de defini-los, realizou-se um agrupamento daqueles critérios com descrições semelhantes e com aplicações equivalentes. Esses critérios foram, posteriormente, traduzidos para a língua inglesa, referenciados e alinhados segundo os seguintes objetivos estratégicos: inovação, garantia de suprimentos, redução de custos e manutenção de peças sobressalentes.

Posteriormente, estruturou-se, a partir da literatura previamente selecionada, o método adequado para classificação e categorização das PS. Depois, definiu-se os critérios para aplicação dos estudos de caso, como a seleção das companhias interessadas em aplicar a AM para aprimorar o gerenciamento das suas PS, bem como os seus decisores. Além disso, foram definidos os critérios para seleção dos objetivos estratégicos dessas companhias, e avaliação das vantagens e desvantagens da AM para as companhias no que se refere à gestão de PS.

Por fim, elaborou-se uma metodologia capaz de classificar e selecionar PS elegíveis para AM e destinadas a aplicações industriais. Posteriormente, foram realizados estudos de caso com o intuito de validá-la, analisar os seus resultados e aferir se ela é uma ferramenta analítica adequada para classificação e seleção de PS elegíveis para AM como uma alternativa para a otimização do SPM.

3.3.1 Identificação de problemas

Com a intenção de identificar os problemas da pesquisa foram elaboradas as questões norteadoras, do inglês *research question* (RQ), pois trata-se de uma etapa fundamental antes de iniciar quaisquer pesquisas. As RQs têm por finalidade explorar incertezas existentes em uma área de preocupação e direcionar às necessidades de investigação identificadas. Logo, conclui-se que é pertinente formular as RQs adequadas à pesquisa antes mesmo começá-la (RATAN, ANAND e RATAN, 2018). Deste modo, as perguntas norteadoras são as seguintes:

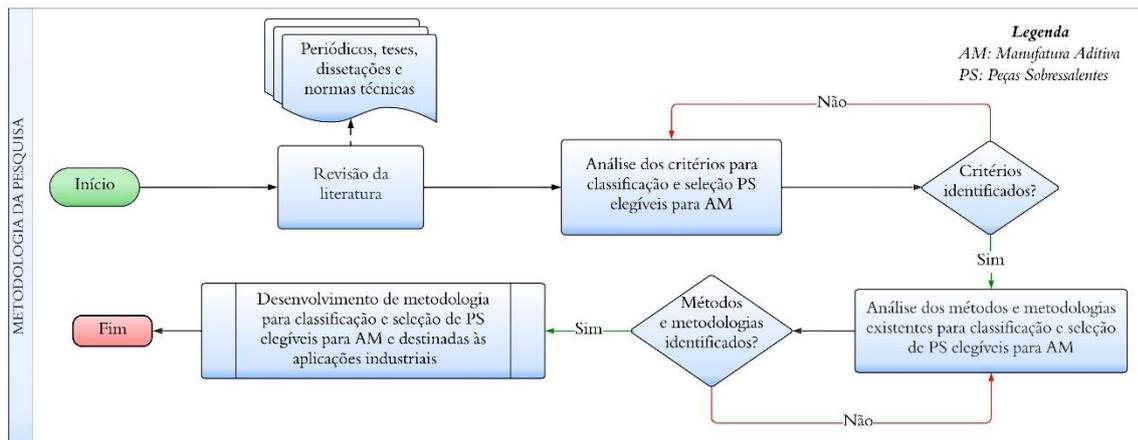
1. RQ1. Quais são os critérios que devem ser considerados durante a identificação das PS elegíveis para AM?
2. RQ2. Como definir os critérios de elegibilidade mais adequados para os interesses das companhias ao decidirem adotar a AM como alternativa para o SPM?
3. RQ3. Como classificar e selecionar PS elegíveis para fabricação por meio das tecnologias da AM?
4. RQ4. Quais vantagens as companhias podem obter ao adotar a AM como uma alternativa para otimizar o SPM?

Portanto, com o objetivo de responder às perguntas norteadoras supracitadas, foi realizada uma revisão da literatura utilizando palavras-chave correspondentes às principais temáticas desta pesquisa, ou seja, AM, SPM e MCDM. Em outras palavras, as palavras-chave escolhidas foram aquelas que frequentemente são utilizadas na literatura para buscar por critérios, métodos, metodologias e modelos para seleção e classificação de peças sobressalentes para AM, além de coletar normas técnicas correspondentes à fabricação aditiva e gerenciamento de PS.

Realizada a busca necessária para a revisão da literatura – descrita no tópico seguinte –, foram selecionados aqueles materiais de referência mais alinhados aos objetivos desta dissertação. Feito isto, foram identificados e analisados os critérios mais empregados na

literatura para classificação e seleção de PS elegíveis para a AM. Posteriormente, com o intuito de identificar problemas e soluções sugeridas e aplicadas, foram examinados os métodos e metodologias existentes na literatura para classificação e seleção de PS adequadas para AM. Por conseguinte, objetivando solucionar os problemas identificados, resolveu-se desenvolver uma metodologia capaz de classificar e selecionar PS elegíveis para AM e destinadas para as aplicações industriais. A Figura 9 detalha a metodologia desta dissertação.

Figura 9. Metodologia da pesquisa.



Fonte: Autoria Própria, 2024

3.3.1.1 Materiais de Referência para Revisão da Literatura

As bases de dados científicos usadas na coleta dos materiais de referência disponíveis em inglês foram o CAPES Periódicos e a *Emerald Insight*. Já para a busca da literatura escrita em português foram definidos como banco de dados o Google Acadêmico e o Catálogo de teses e dissertações CAPES. Os operadores de pesquisa apropriados para as publicações feitas em inglês e português foram identificados combinando palavras-chave, incluindo seus sinônimos, com modificadores booleanos, consoante à Tabela 6. Operadores de pesquisa empregados nas bases de dados científicas definidas para busca da literatura. A busca na literatura publicada em inglês restringiu-se a periódicos de pesquisa e revisão, revisados por pares e publicados em qualquer ano. Para a busca realizada no Google Acadêmico e no Catálogo de teses e dissertações CAPES, aplicou-se como filtro periódicos, teses e dissertações disponíveis em português e publicados em qualquer período. Esta estratégia fundamenta-se na tentativa de encontrar materiais de referência publicados no Brasil e na língua portuguesa, expandindo, desta maneira, a base de dados para esta dissertação. Portanto, pode-se elencar como um diferencial desta pesquisa a busca por palavras-chave pertinentes à AM, SPM e MCDM em diferentes bases de dados científicas amplamente reconhecidas e utilizadas para revisão da literatura, além desta pesquisa ter sido orientada para a busca por materiais previamente publicados em mais de um idioma, isto é, inglês e português.

O processo decisório acerca dos materiais de referência utilizados na revisão da literatura é composto por cinco fases, conforme descrito na Tabela 7. Na primeira etapa, foram executadas as buscas empregando os operadores de pesquisa nos bancos de dados científicos previamente definidos. Após executadas as buscas, foram excluídos aqueles materiais encontrados em duplicidade. Durante o terceiro estágio, executou-se uma avaliação dos títulos e palavras-chave dos materiais previamente selecionados cuja finalidade pautou-se na exclusão daqueles documentos científicos sem relevância para o cumprimento dos objetivos deste projeto de pesquisa. No decorrer da quarta fase, foram lidos os resumos dos materiais selecionados anteriormente e excluídos aqueles inadequados ao propósito da dissertação. Por fim, na quinta etapa, foi executada a leitura completa dos textos dos materiais escolhidos preliminarmente para avaliar quais deveriam ser utilizados como embasamento científico para a revisão da literatura desta pesquisa.

Tabela 6. Operadores de pesquisa empregados nas bases de dados científicos definidas para busca da literatura.

Publicações	Operadores de pesquisa	Base de dados
Em inglês	<i>(("selection" OR "classification") AND ("additive manufacturing" OR "3d printing") AND ("spare part" OR "spare parts"))</i>	CAPES Periódicos e Emerald Insight
Em português	<i>(("seleção" OR "classificação") AND ("manufatura aditiva" OR "impressão 3D") AND ("peça de reposição" OR "peças sobressalentes"))</i>	Google Acadêmico Catálogo de Teses e Dissertações CAPES

Fonte: Autoria própria, 2024

Finalizado o processo decisório, realizou-se uma verificação do nível de afinidade dos periódicos e dissertações selecionados – e de publicações específicas citadas por estes periódicos e dissertações – que apresentam objetivos semelhantes ao objetivo geral desta dissertação, isto é, elaboração de metodologia para classificação e seleção de PS para AM e destinadas às aplicações industriais. Para avaliar o grau de afinidade supracitado, foi verificado se as publicações abordavam como critérios de elegibilidade para AM das PS os seguintes temas: estoque e cadeia de suprimentos (do inglês, *supply chain*); manufatura; manutenção; reprojeto; e MCDM. O Anexo 1 mostra a comparação entre o nível de afinidade dos periódicos selecionados com os objetivos da dissertação.

Tabela 7. Critérios de inclusão e exclusão dos materiais de referência para a revisão da literatura.

Fase	Critérios de inclusão e/ou exclusão
1	Executar pesquisa nos bancos de dados científicos definidos com os operadores de pesquisa determinados.
2	Excluir materiais de referência encontrados em duplicidade nos bancos de dados científicos.
3	Executar avaliação dos títulos e palavras-chave a fim de excluir materiais sem relevância para os objetivos da dissertação.
4	Executar avaliação dos resumos e excluir materiais sem relevância.
5	Executar avaliação dos textos completos e excluir materiais sem relevância.

Fonte: Autoria própria, 2024

Segundo ABNT (2023), uma norma técnica é o documento constituído consensualmente e aprovado por uma entidade acreditada. Apesar de seu uso ser, a princípio, voluntário, faz parte da boa prática profissional utilizar as normas técnicas, pois representa “o consenso sobre o estado da arte de determinado assunto, obtido entre especialistas das partes interessadas” (ABNT, 2023). Portanto, foram buscadas normas técnicas elaboradas por organizações certificadoras ou qualificadoras de reconhecimento internacional para consolidar o embasamento técnico-científico desta dissertação. Assim sendo, no que se refere às normas técnicas relativas à AM, foram utilizados os padrões API STD 20S:2021: Componentes metálicos manufaturados aditivamente para uso nas indústrias de petróleo e gás natural, e DNV-ST-B203:2022: Manufatura aditiva de peças metálicas. As normas técnicas referentes a SPM selecionadas foram as seguintes: BS EN 13306:2017: Manutenção – Terminologia de manutenção; IEC 62550:2017: Provisionamento de peças sobressalentes; e NORSOK Z-008:2011: Manutenção baseada em risco e classificação de consequências. Quanto ao padrão usado como embasamento técnico para a seleção do método multicritério para tomada de decisão foi o IEC 31010:2019: Gestão de riscos — Técnicas de avaliação de riscos. Finalmente, para a realização desta pesquisa foram utilizados diretamente, a partir da revisão da literatura: 20 periódicos, 6 normas técnicas e 3 dissertações, conforme detalhado na Tabela 8.

Tabela 8. Quantidade de materiais de referência obtidos nas bases de dados científicos definidas para busca da literatura.

Base de dados	Fases				
	1	2	3	4	5
Normas técnicas	6	6	6	6	6
Catálogo de Teses e Dissertações CAPES	6	5	3	1	1
Google Acadêmico	14	14	4	3	2
CAPES Periódicos	29	29	17	14	10
<i>Emerald Insight</i>	197	192	39	22	10
Total	252	246	69	46	29

Fonte: Autoria própria, 2024

3.4 Critérios de Classificação das Peças Sobressalentes

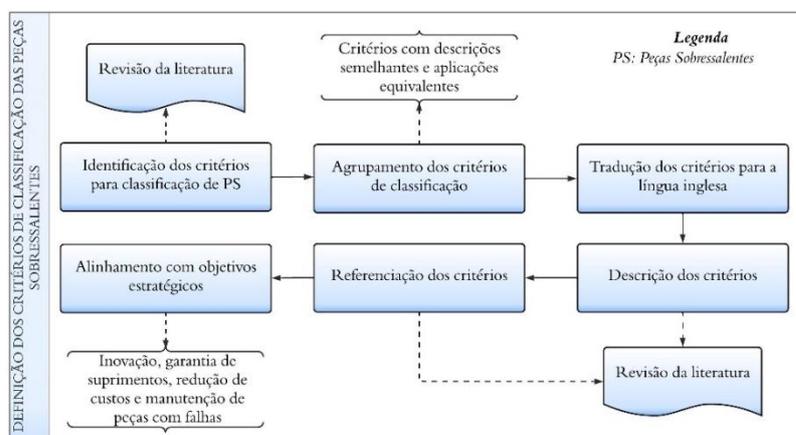
Realizada a análise dos materiais de referência devidamente selecionados para esta dissertação, buscou-se responder à RQ1 através da identificação dos critérios que devem ser considerados durante a classificação e seleção de PS elegíveis para AM. Para cumprir este fim, primeiramente, foram identificados na literatura os critérios mais empregados para classificação das PS nas indústrias. Feito isto, percebeu-se a existência de critérios com descrições semelhantes e aplicações equivalentes, como capacidade de estoque, armazenamento e espaço de armazém, ou volume de demanda, padrão de demanda, variabilidade e taxa de demanda. Deste modo, aqueles critérios com aplicações equivalentes e com definições semelhantes foram agrupados. Feito isto, foram obtidos ao todo 83 critérios. Posteriormente, estes foram divididos em duas categorias, denominadas de Critérios

Estratégicos (CEs) – no qual foram alocados 61 critérios –, e Critérios Técnicos de Engenharia (CTs) – onde os outros 22 foram inseridos –, de acordo com as finalidades de cada critério no que se refere à classificação de PS. Em outros termos, os CEs possuem impacto direto no SPM e, por consequência, no quanto que a PS pode contribuir na competitividade de uma companhia. Já os CTs estão relacionados às características e especificações técnicas de engenharia que influenciam diretamente no desempenho, propriedades mecânicas e método de fabricação da PS. Esta estratégia mostrou-se vantajosa, pois criar as categorias CEs e CTs facilita a seleção e interpretação dos critérios de elegibilidade em etapas subsequentes, a partir de uma compreensão mais aprofundada da finalidade deles.

A fim de responder à RQ2, os 83 critérios previamente selecionados foram tabelados, conforme pode ser visto na Tabela 4 e Tabela 5, com o intuito de traduzir as suas respectivas terminologias para a língua inglesa, descrever a definição dos critérios segundo as literaturas selecionadas, apresentar os autores que citam cada um dos critérios selecionados, além de alinhá-los, isto é, classificá-los, segundo os objetivos estratégicos mais frequentes das companhias, e descritos na literatura, no que se refere à otimização da gestão de PS, a saber: inovação, garantia de suprimentos, redução de custos e manutenção de peças.

Para a realização do alinhamento entre os quatro objetivos estratégicos definidos para este projeto de pesquisa e os CEs e CTs, foi realizada uma análise criteriosa entre as descrições de cada um dos critérios e o propósito dos objetivos estratégicos selecionados. A intenção central deste alinhamento é fornecer embasamento científico para a seleção dos critérios de elegibilidade de PS para AM mais adequados para as estratégias de cada companhia interessada em otimizar o seu gerenciamento das peças de reposição utilizando as tecnologias de AM. Ademais, ressalta-se que o alinhamento entre os objetivos estratégicos mais constantes das empresas e os critérios de classificação de PS frequentemente empregados nas organizações e literatura representa um diferencial desta pesquisa, visto que não foram observados resultados semelhantes na revisão da literatura realizada. A Figura 10 apresenta o processo de definição dos critérios de classificação das PS.

Figura 10. Definição dos critérios de classificação das peças sobressalentes.



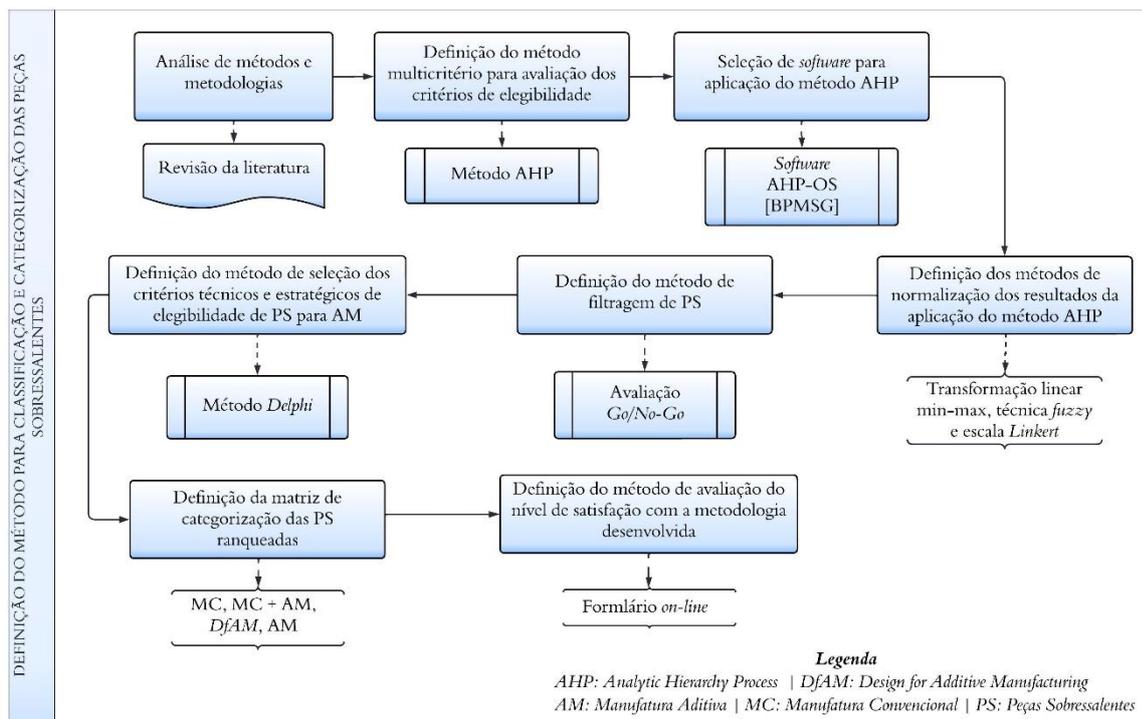
Fonte: Autoria Própria, 2024

3.5 Classificação e Categorização das Peças Sobressalentes

Para atender ao requisito da RQ3, foram analisados, na literatura definida, os métodos e metodologias empregadas para classificação e seleção de PS elegíveis para a AM. Concluídas as análises dos periódicos mais alinhados ao projeto de pesquisa, percebeu-se a baixa quantidade de metodologias, nacional e internacionalmente, consolidadas ou normatizadas com o fim de classificar e selecionar PS adequadas para AM. A Figura 11 aborda as etapas para definição do método para classificação e categorização das peças sobressalentes.

Quanto às metodologias disponíveis na literatura, poucas são abrangedoras, ou seja, permitem a participação de pessoas com conhecimento técnico insuficiente acerca das tecnologias de MA para as tomadas de decisões envolvidas no SPM através da MA. Dentre os métodos predominantemente utilizados para classificação ou seleção de PS na literatura, destaca-se o método multicritério para tomada de decisões complexas denominado Processo de Análise Hierárquica, do inglês *Analytic Hierarchy Process* (AHP), por ser considerado um dos métodos MCDM mais empregados para determinar a relevância dos critérios analisados, bem como por sua versatilidade, sendo capaz de adequar-se às aplicações de diferentes áreas do conhecimento, como engenharia, política, economia e medicina (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022; DIAS, 2020).

Figura 11. Definição do método para classificação e categorização de peças sobressalentes.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Com o intuito de automatizar as operações matemáticas intrínsecas ao método AHP, minimizando, deste modo, o tempo necessário para a decisão dos decisores da companhia

quanto aos pesos dos critérios estratégicos (CEs) e critérios de técnicos de engenharia (CTs) a serem empregados para a classificação e categorização das peças sobressalentes, decidiu-se selecionar o *software* “Calculadora de Prioridade AHP”, desenvolvido pela *Business Performance Management Singapore* (BPMSG). Os parâmetros utilizados para esta seleção foram: boa interface com o usuário – isto é, facilidade para compreensão do funcionamento do *software* e para inserir dados, bem como coletar resultados –, gratuidade, disponibilidade universal por meio na *internet*, configurável para diferentes idiomas (alemão, espanhol, inglês e português), rapidez para entrega dos resultados e do índice de consistência do método AHP, além de, caso o índice de consistência do resultado encontrado esteja acima do seu limite (10%), apresentar *feedbacks* sugestivos, por meio de uma análise de sensibilidade, para melhoramento dos ajustes dos pesos dos CEs e CTs. Deste modo, os decisores da companhia são auxiliados a melhorar as suas tomadas de decisões, especialmente aquelas pessoas que desconhecem ou possuem pouca familiaridade com o método AHP. Em contrapartida, trata-se de um *software* destinado para fins educacionais. Logo, a sua utilização comercial está condicionada à adequação quanto às condições de licenciamento e aos termos de uso disponíveis no *site* da BPMSG.

Sugere-se aos decisores que sejam escolhidos entre 3 a 8 CEs e 3 a 5 CTs. O valor mínimo de 3 critérios se justifica devido o cálculo da razão de consistência (CR), levando em consideração o valor do índice randômico (RI) (ver Tabela 21), o qual possui valor “0” quando o número de critérios é menor que 3. Em termos práticos, se o valor de RI for igual a 0, o cálculo do CR torna-se matematicamente indefinido e o método de AHP será inconsistente, resultando em um processo decisório por comparação pareada ineficaz. Já quantidade máxima sugerida de 8 CEs e 5 CTs foi sugerida com o intuito de otimizar o processo decisório, pois, quanto maior o número de critérios selecionados, maior o tempo destinado para estabelecer as prioridades entre esses critérios e, por conseguinte, maior o período de aplicação da metodologia desenvolvida.

Após a seleção dos CEs e CTs feita pelos decisores da companhia e aplicação do *software* “Calculadora de Prioridade AHP” para a definição dos pesos desses critérios estratégicos e técnicos de engenharia previamente selecionados, faz-se necessário normalizá-los, ou seja, ajustar os dados para uma escala comum com o intuito de realizar uma análise de dados mais fidedigna, sem distorções ou perdas de informações relevantes. Ressalta-se que os critérios, sejam eles estratégicos ou técnicos de engenharia, podem ser do tipo objetivo ou subjetivo, isto é, classificados quanto à maneira como são mensurados. Em outros termos, os critérios objetivos são aqueles medidos quantitativamente, como custo unitário, número de fornecedores, peso da peça, taxa de falha. Por sua vez, os critérios subjetivos – a exemplo de competitividade, criticidade do equipamento, risco de falta de estoque, perecibilidade –, são mensurados de maneira qualitativa.

Para a metodologia desenvolvida, adotou-se, para os critérios objetivos, duas abordagens de normalização, a saber: transformação linear min-máx, para os CEs objetivos, e a técnica *fuzzy*, para os CTs objetivos. Quanto aos CEs e CTs subjetivos, aplicou-se como

abordagem de normalização uma avaliação qualitativa, feita pelos decisores da companhia, a partir de uma escala *Linkert* de cinco pontos, a saber: muito alto, alto, médio, baixo e muito baixo. Esta escala é quantificada usando o método de comparação pareada do AHP, conforme mostrada na Tabela 9. Ademais, a abordagem de normalização para avaliação qualitativa também pode ser aplicada para os casos cuja companhia não possua dados suficientes, como indicadores e especificações técnicas referentes às PS, para aplicar as técnicas de normalização indicadas para os critérios objetivos.

Para a normalização dos CEs objetivos, foi escolhida a técnica de transformação de escala linear min-máx, detalhada na Equação 1. Esta escolha fundamenta-se na evidência de que esta técnica de normalização é a mais adequada para o método AHP (VAFÁEI, RIBEIRO e CAMARINHA-MATOS, 2020), além de apresentar os seguintes benefícios: simplicidade no cálculo e robustez dos resultados, oferecer estabilidade e precisão dentro de um ambiente dinâmico que compreende critérios de natureza e unidades diversificadas, tempo de cálculo comparativamente mínimo em relação às outras técnicas, além de eliminar as unidades dos critérios e torná-los adimensionais (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022).

Tabela 9. Matriz de normalização para critérios subjetivos

Terminologia	Muito alto (VH)	Alto (H)	Médio (M)	Baixo (L)	Muito baixo (VL)	Prioridade	Rank
Muito alto (VH)	1	3	5	7	9	51 %	1
Alto (H)	1/3	1	3	5	7	26 %	2
Médio (M)	1/5	1/3	1	3	5	13 %	3
Baixo (L)	1/7	1/5	1/3	1	3	6 %	4
Muito baixo (VL)	1/9	1/7	1/5	1/3	1	4 %	5
Razão de consistência						5 %	

Fonte: Adaptado de GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022

Quanto à normalização dos CTs objetivos, definiu-se a abordagem *fuzzy* uma vez que esta visa avaliar o “nível de compatibilidade entre os requisitos técnicos das peças sobressalentes e a faixa de capacidade do processo de MA” (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022). Em outras palavras, busca-se, com a técnica *fuzzy*, avaliar o desempenho dos requisitos técnicos, descritos por meio de indicadores quantitativos, das peças sobressalentes selecionadas tomando como referência a faixa dos valores correspondentes à capacidade dos processos de MA. Esta faixa encontra-se numa escala normalizada e varia entre 0 e 1, como pode ser visto na Equação 2. O valor mais elevado, equivalente ao número 1, transcreve a maior compatibilidade entre uma PS específica com o processo de MA, levando em consideração os CTs selecionados pelos decisores da empresa (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022).

$$Norm_{CE_{kn}} = \frac{CE_{kn} - CE_{kmin}}{CE_{kmax} - CE_{kmin}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde, Norma CE_{kn} é o valor normalizado de um determinado critério estratégico selecionado (CE_k) para avaliação de uma PS específica (n); CE_{kn} corresponde ao valor ideal de um critério estratégico específico (CE_k) para a PS (n) em análise; CE_{kmin} e CE_{kmax} equivalem aos valores mínimo e máximo, respectivamente, de um critério estratégico (CE_k) para a PS (n) em estudo.

Definiu-se consumibilidade e intercambiabilidade como critérios de filtragem prévia das PS possivelmente adequadas para AM. Ou seja, sugere-se que as PS classificadas como consumíveis ou intercambiáveis sejam excluídas do processo de classificação e seleção de PS elegíveis para AM, a menos que os decisores julguem-nas como apropriadas para seguirem no processo de avaliação de elegibilidade para AM. A definição desses critérios de filtragem prévia justifica-se pelo aspecto econômico-financeiro, ou, em termos técnicos, devido ao custo para aquisição de consumíveis e peças intercambiáveis – geralmente mais disponíveis no mercado – comparado ao custo para compra de novas PS classificadas como não consumíveis e não intercambiáveis.

$$\begin{aligned}
 & \text{(i) } Norm_CT_{kn} = 1, \text{ se } CT_{kmin_desejado} < CT_{kn} < CT_{kmax_desejado} \cdot \\
 & \text{(ii) } Norm_CT_{kn} = \frac{CT_{kn} - CT_{kmin}}{CT_{kmin_desejado} - CT_{kmin}}, \text{ se } CT_{kmin} < CT_{kn} < CT_{kmin_desejado} \cdot \\
 & \text{(iii) } Norm_CT_{kn} = \frac{CT_{kmax} - CT_{kn}}{CT_{kmax} - CT_{kmax_desejado}}, \text{ se } CT_{kmax_desejado} < CT_{kn} < CT_{kmax} \cdot \\
 & \text{(iv) } Norm_CT_{kn} = 0, \text{ se nenhuma das condições anteriores forem satisfeitas.}
 \end{aligned}
 \tag{Equação 2}$$

Onde, Norma CT_{kn} é o valor normalizado de um determinado critério técnico de engenharia selecionado (CT_k) para avaliação de uma PS específica (n); CT_{kn} corresponde ao valor ideal de um critério técnico de engenharia específico (CT_k) para a PS (n) em análise; CT_{kmin} e CT_{kmax} equivalem aos valores mínimo e máximo permitidos, respectivamente, de um critério técnico de engenharia (CT_k) para uma faixa especificada de processos de AM; $CT_{kmin_desejado}$ e $CT_{kmax_desejado}$ representam aos valores mínimo e máximo desejados, respectivamente, de um critério técnico de Engenharia (CT_k) para uma faixa especificada de processos de AM. Determinou-se que os valores de $CT_{kmin_desejado}$ e $CT_{kmax_desejado}$ correspondem a 10% dos valores de CT_{kmin} e CT_{kmax} .

Para o processo de filtragem de PS a serem classificadas e selecionadas para fabricação através das tecnologias de AM, foi definido um processo de avaliação denominado Passa ou Não-passa, do inglês *Go/No-Go*. Esta escolha fundamenta-se nos seguintes fatores: simplicidade, acurácia e agilidade. Em outros termos, esse processo de avaliação é considerado como descomplicado para implementação, apresenta resultados confiáveis e baixo tempo de resposta dos avaliadores (GOMEZ, RATCLIFF e PEREA, 2007).

Um dos critérios que merecem destaque na Avaliação *Go/No-Go* é o volume da peça sobressalente, sem embalagem, por se tratar de um critério decisivo para aprovação de uma PS para produção por MA (KRETZSCHMAR et al., 2018; MARANHA et al., 2023). Segundo MARANHA et al. (2023), as peças de reposição com volume menor ou igual a 0,06 m³ (60 litros)

foram consideradas como mais adequadas para AM, visto que existe uma maior quantidade de máquinas de AM disponíveis comercialmente com volumes de trabalho inferiores a 0,06 m³. A título de exemplo, uma das maiores máquinas de AM para metais existentes no mercado possui 8,6 m³ (8600 litros) de volume de trabalho, do inglês *build envelope volume* ou *build envelope size* (SCIAKY INC, 2024). O Anexo 2 detalha o processo definido Avaliação *Go/No-Go*, apresentando os critérios utilizados, suas respectivas descrições e terminologias na língua inglesa, bem como as justificativas para determiná-los e os autores que citam esses critérios como parâmetros para classificação de PS. Ademais, a Figura 12 mostra o processo Avaliação *Go/No-Go*.

Após a filtragem das PS, obtém-se aqueles componentes que serão categorizadas segundo dois conjuntos de critérios, a saber: Critérios Estratégicos (CE), definidos com base nos objetivos estratégicos e dados disponíveis da empresa; e Critérios Técnicos de Engenharia (CT), determinados tendo em vista os aspectos relacionados aos conhecimentos técnicos sobre manufatura e propriedades mecânicas dos materiais. Os resultados da Avaliação *Go/No-Go* dos estudos de caso realizados estão descritos no Anexo 3.

Para a escolha dos CEs e CTs que forneceram embasamento para a categorização das PS filtradas, definiu-se o método *Delphi*, pois, segundo IEC (2019), é uma técnica aplicada para resolução de problemas complexos sobre os quais existe incerteza e para os quais é necessária a opinião de especialistas para tratá-la. Ou seja, é um método que pode ser usado para obter consenso ou conciliar diferenças entre especialistas, geralmente aplicado em um nível estratégico ou tático. Uma explicação válida para a singularidade dessa técnica fundamenta-se na superação de certas limitações, como capturar julgamentos de especialistas devido a existência de pessoas influentes dentro do grupo, além de conflitos de pensamentos e pressões dos participantes, fornecendo, desta maneira, uma oportunidade equivalente aos atores e decisores da companhia para seleção dos CEs e CTs, resultando, por fim, em melhores julgamentos. Além disto, trata-se de uma técnica amplamente aplicada para identificar e validar atributos (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022).

Durante a aplicação do Método *Delphi*, apresentada na Figura 13, os decisores, individualmente, recebem a Tabela 4 e a Tabela 5 e escolhem os CEs, com base nos objetivos estratégicos da companhia (inovação, garantia de suprimentos, redução de custos e manutenção de peças) para utilização da AM para SPM, e os CTs, considerando os aspectos relacionados à fabricação e às características mecânicas dos materiais. Posteriormente, os CEs e CTs selecionados previamente pelos participantes são agrupados com o intuito de validá-los a partir do cálculo do CVR (do inglês, *content validity ratio*), isto é, razão de validade de conteúdo. Aqueles CEs e CTs que apresentaram $CVR \geq 0.29$ (29%) foram admitidos como os critérios de elegibilidade para a realização dos *cases*. Caso ocorra do $CVR < 0,29$, são sugeridas duas opções: os decisores podem repetir o processo de seleção dos CEs e CTs com base nos objetivos estratégicos estabelecidos por eles ou analisar, por meio de um consenso entre os participantes, os CEs e CTs previamente escolhidos por eles com o intuito de definir os CEs e

CTs que serão admitidos como os critérios de elegibilidade para aplicação dos estudos de casos. A equação que baseia o CVR é a seguinte:

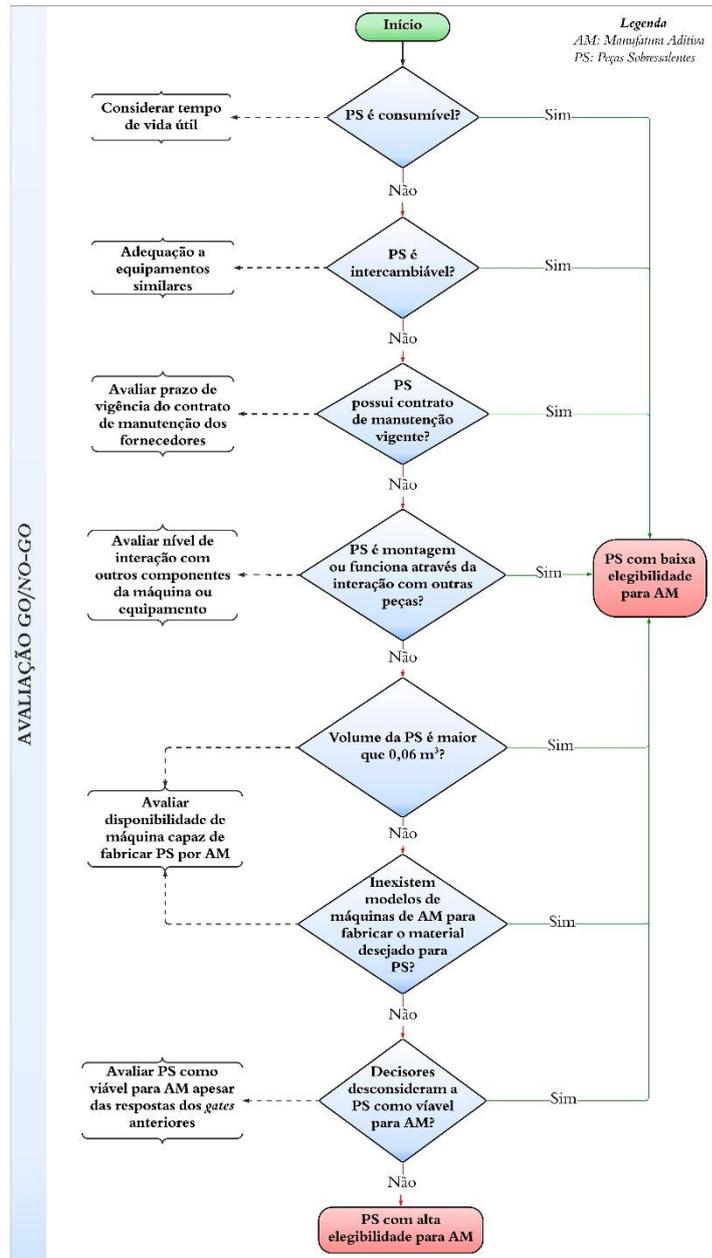
$$CVR = \frac{N_{PE} - \left(\frac{N}{2}\right)}{\frac{N}{2}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde, CVR é razão de validade de conteúdo, N_{PE} equivale ao número de decisores que sugerem um determinado critério como essencial, N o número total de decisores participantes de cada *case*.

De modo geral, um CVR superior ou igual a 0,29 pode ser considerado um limite adequado para a avaliação de um determinado critério ou item (KIM, JANG e LEE, 2013; DOHALE et al., 2022; GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022). Trata-se de uma técnica estatística útil para validação de itens ou critérios individuais, além de ser internacionalmente reconhecida como um método para estabelecer a validade de um conteúdo em análise (GILBERT e PRION, 2016 apud WILSON, PAN e SCHUMSKY, 2012). O CVR é uma transformação linear, proposta por LAWSHE (1975), criada com o intuito de facilitar a verificação do nível de concordância (superior a 50%) entre especialistas em um assunto (AYRE e SCALLY, 2014; LAWSHE 1975). Segundo LAWSHE (1975), a razão de validade de conteúdo foi desenvolvida a partir das seguintes hipóteses: se uma maioria de especialistas considera um item ou critério como “essencial”, isto indica que eles possuem algum grau de validade de conteúdo; e quanto mais especialista o classificam um item ou critério como “essencial”, maior será a validade de seus conteúdos. Salienta-se que o valor do CVR varia de +1, quando todos os especialistas do painel indicam que um item é essencial, a -1, se todos os especialistas do painel indicam que um item é não essencial (LAWSHE, 1975; KIM, JANG e LEE, 2013; EMOVON, NORMAN e MURPHY, 2015).

Posteriormente, definiu-se uma matriz de categorização das peças sobressalentes, apresentada na Figura 17, capaz de agrupar em quatro categorias distintas, a saber: manufatura convencional (MC), *design for additive manufacturing (DfAM)*, manufatura convencional e manufatura aditiva (MC + AM) e manufatura aditiva (AM) (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022). A justificativa para esta escolha baseia-se no interesse em definir pela estratégica de fabricação mais adequada para as PS destinadas a aplicações industriais. Além disso, a integração da AM com métodos convencionais de fabricação para a produção de PS tem como objetivo principal a redução de custos e a melhoria da eficiência na produção desses componentes. Ao combinar a AM com processos tradicionais, é possível alcançar benefícios como a capacidade de criar geometrias complexas, a flexibilidade na escolha de materiais e a obtenção de um acabamento superficial superior. Isso resulta na capacidade de fabricar peças de reposição em pequenos volumes de maneira mais econômica, proporcionando soluções mais eficientes e viáveis para as necessidades de produção (MAHA 3D, 2021; FRANDSEN, 2019).

Figura 12. Avaliação Go/No-Go.



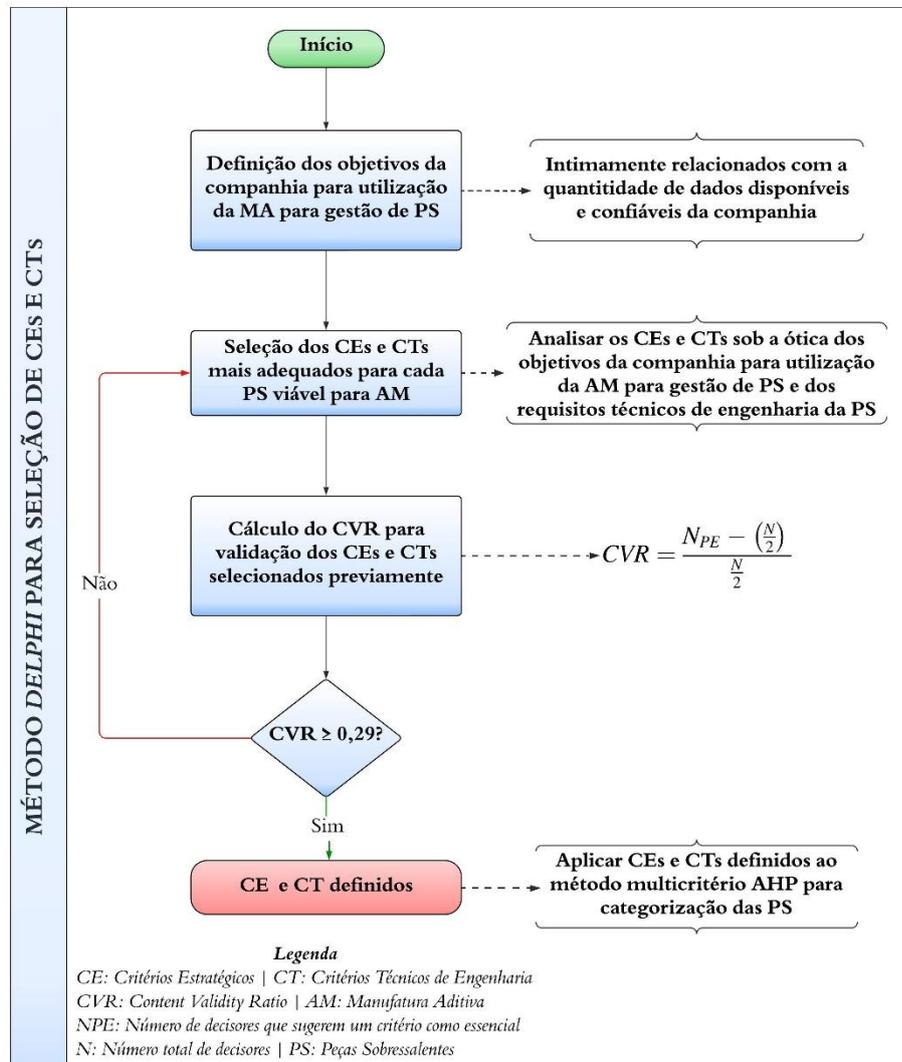
Fonte: Autoria própria, 2024

3.6 Avaliação do Nível de Satisfação da Metodologia Desenvolvida

Após a conclusão dos estudos de caso, um formulário, disponível no Anexo 5, foi enviado para os decisores avaliarem o seu nível de satisfação com a metodologia desenvolvida. Para isto, foram criadas seis perguntas, com pesos distintos, conforme Anexo 6, e um espaço destinado para comentários gerais sobre a metodologia. As possíveis respostas para as seis perguntas e as suas respectivas conversões em números para cálculo do Índice de Satisfação (I.S.) da metodologia são as seguintes: “insatisfeito” ou “nenhuma” (0); “indiferente” ou “baixa” (2); e “satisfeito” ou “alta” (4). Adotou-se esta escala *Linkert* adaptada para que ela mantivesse uma diferença de dois pontos entre as respostas e para que

as respostas “insatisfeito” ou “nenhuma” possuísem valores nulos (0), ou seja, para que não contabilizassem nem positiva nem negativamente para o cálculo do I.S.

Figura 13. Método *Delphi*.



Fonte: Autoria própria, 2024

O cálculo do I.S. é realizado da seguinte maneira: as respostas de cada decisor são convertidas nos seus valores numéricos correspondentes (0, 2 ou 4), os quais são multiplicados pelas porcentagens dos pesos de cada pergunta e, posteriormente, somados. Assim, obtém-se o índice de satisfação de cada decisor. Para verificar o I.S. de cada estudo de caso ou para todos eles, é necessário somar os I.S. de cada decisor levado em consideração e dividir este somatório pelo resultado da multiplicação do número de decisores participantes por 4, valor equivalente à pontuação máxima de conversão. A Tabela 10 detalha a equivalência entre o intervalo percentual do valor de I.S. e a escala do nível de satisfação com a metodologia.

Tabela 10. Escala do Índice de Satisfação (I.S.) da metodologia desenvolvida.

Ruim	Regular	Bom	Muito bom	Excelente
0 a 30%	31 a 60%	61 a 80%	81 a 90%	91 a 100%

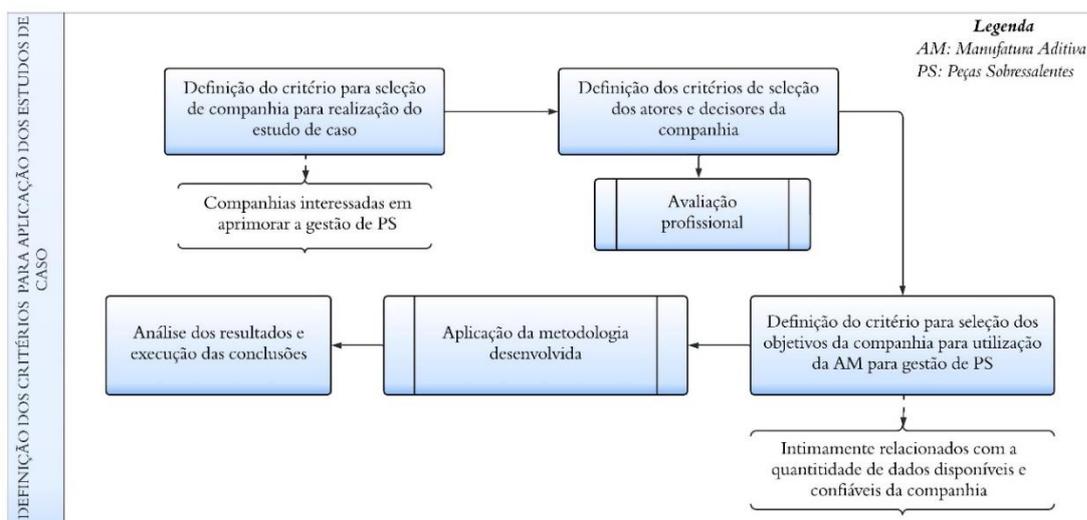
Fonte: Adaptado de FRANCISCHINI e FRANCISCHINI, 2017

3.7 Critérios para Aplicação dos Estudos de Caso

Com o objetivo de responder à RQ4, ou seja, validar os benefícios que as companhias podem obter ao adotar a AM como um método para produzir PS ou otimizar a gestão destas, resolveu-se realizar estudos de caso aplicando a metodologia desenvolvida em duas companhias situadas em Salvador. O critério adotado para a seleção da companhia para aplicação do estudo de caso baseia-se, majoritariamente, no interesse da empresa em aprimorar a sua gestão de PS.

A posteriori, com o intuito de refinar seleção das empresas para aplicação dos estudos de caso, foram definidos os seguintes fatores: interesse em considerar a AM – tecnologia ainda em desenvolvimento científico e tecnológico –, como um mecanismo para otimização do SPM; realização de atividades comerciais na cidade do Salvador e região metropolitana, além de atender demandas a nível nacional e internacional, isto é, empresa capaz de se tornar um vetor capaz de difundir a metodologia descrita nesta dissertação em diferentes localidades; companhia atuante em setores da economia com poucas publicações da AM na literatura, diferentemente de outros ramos econômicos que já adotam a AM como para fabricação de PS, como o aeronáutico e o médico. A Figura 14 ilustra o processo decisório para aplicação dos estudos de caso.

Figura 14. Definição dos critérios para aplicação dos estudos de caso.



Fonte: Autoria Própria, 2024

3.7.1.1 SENAI CIMATEC

O SENAI CIMATEC foi fundado em 2002, em Salvador (BA), como parte do Sistema FIEB (Federação das Indústrias do Estado da Bahia). Desde o início, teve como objetivo principal promover o desenvolvimento tecnológico e a formação de profissionais qualificados para atender às demandas da indústria brasileira, especialmente na região nordeste do país (SENAI CIMATEC, 2024).

Segundo SENAI CIMATEC (2024), com uma infraestrutura moderna e avançada, o SENAI CIMATEC oferece uma ampla gama de cursos técnicos, de graduação e pós-graduação em diversas áreas, como engenharia, tecnologia da informação, automação, energia, entre outras. Além disso, realiza atividades de pesquisa e desenvolvimento, estabelecendo parcerias com empresas e instituições nacionais e internacionais para impulsionar a inovação e a competitividade do setor industrial.

Ao longo dos anos, o SENAI CIMATEC consolidou-se como uma referência em educação e pesquisa no Brasil, contribuindo significativamente para o avanço tecnológico e o crescimento econômico da região e do país como um todo (SENAI CIMATEC, 2024).

3.7.1.2 PAVNORTE CONSTRUTORA

A PAVNORTE CONSTRUTORA LTDA é uma empresa privada fundada em 2014 na cidade do Salvador (BA) especializada em pavimentação asfáltica e infraestrutura urbana. Dentre as suas áreas de atuação, destacam-se controle tecnológico, drenagem e saneamento, monitoria de frota, projetos e topografia, terraplanagem e aluguel de máquinas e equipamentos para construção sem operador (PAVNORTE, 2024)

De acordo com PAVNORTE (2024), os notáveis diferenciais da PAVNORTE são a posse de equipamentos especializados em pavimentação asfáltica e infraestrutura urbana de última geração e a usina de asfalto que funciona com tecnologia de ponta. O intuito da empresa com esses diferenciais é, primordialmente, garantir a produção de asfalto - concreto betuminoso usinado a quente (CBOQ) - de qualidade, fator essencial para uma pavimentação longa. Todo este imobilizado aloca-se numa área de aproximadamente 12 mil m². Além disso, a companhia emprega esforços para minimizar os impactos ambientais provenientes da sua produção, estabelecendo, portanto, um compromisso com a sustentabilidade ambiental.

Em essência, a PAVNORTE empenha a sua expertise técnica na cidade do Salvador (BA), local onde vem realizando serviços de pavimentação asfáltica e infraestrutura urbana para diferentes órgãos públicos municipais desde a sua origem, além de alugar máquinas e equipamentos característicos da área de construção civil para outras empresas locais (PAVNORTE, 2024).

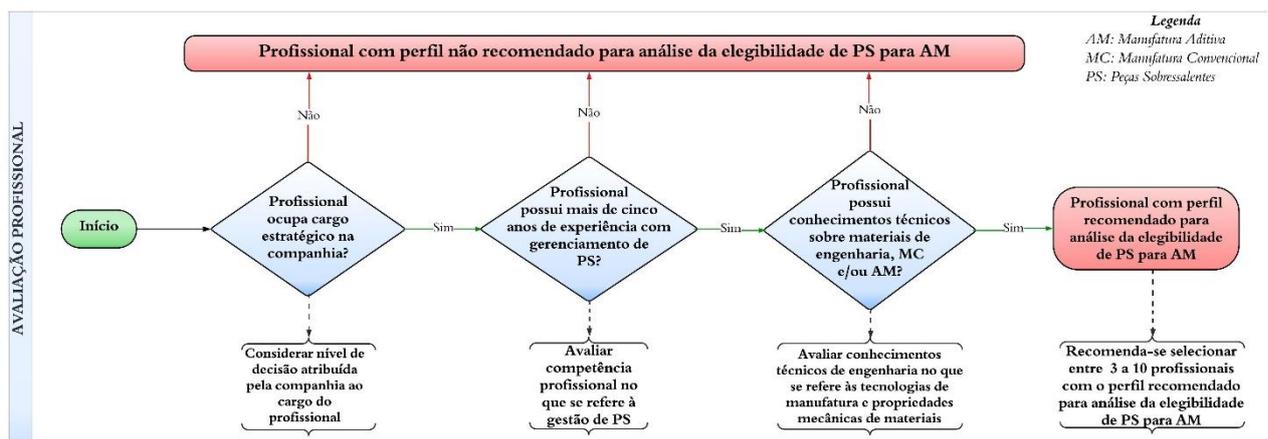
3.7.1.3 Seleção de Decisores da Companhia

A seleção dos atores e decisores da companhia, detalhada na Figura 15, é pautada em três critérios: posição na companhia, ou seja, profissionais com cargos que permitem tomadas de decisões estratégicas para a empresa; experiência profissional, isto é, tempo de vivência

profissional no que se refere a SPM; e conhecimentos técnicos de engenharia relacionados à manufatura de produtos e propriedades mecânicas de materiais (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022). Além disto, sugere-se a definição entre três a dez decisores para participarem do processo de seleção dos critérios. A seleção de apenas dois participantes além de ser estatisticamente injustificada, pode gerar a graves riscos de conclusão por não atender ao CVR (LYNN, 1986). Caso a empresa não possua pessoal que atenda aos três critérios definidos nesta dissertação, sugere-se convidar ou contratar, mesmo que provisoriamente, especialistas em MA para participar do processo decisório.

Portanto, tendo em vista as oportunidades percebidas, decidiu-se desenvolver, com base na revisão da literatura, uma metodologia abrangedora, isto é, capaz de permitir a participação de pessoas com conhecimento técnico insuficiente em AM no processo decisório cujo método AHP possa ser incorporado com o intuito de auxiliar na classificação e seleção de PS adequadas para AM. Além disso, deve ser capaz de atender aos objetivos estratégicos das companhias interessadas na otimização do SPM através das técnicas da AM.

Figura 15. Avaliação profissional.



Fonte: Autoria própria, 2024

As saídas esperadas da metodologia desenvolvida são: estabelecer critérios para determinar quando comprar uma peça sobressalente e categorizar as PS previamente filtradas e classificadas em quatro categorias, a saber: (i) produção por MC, (ii) fabricação por AM, (iii) manufatura usando os métodos MA e MC conjuntamente, e (iv) reprojeto usando diretrizes de projeto orientado para a MA, do inglês *Design for Additive Manufacturing (DfAM)*, definidas pela literatura e experiência de especialistas. Ademais, a partir do preenchimento do formulário apresentado no Anexo 5, calcular o Índice de Satisfação (I.S.) da metodologia com a finalidade de avaliar o nível de satisfação dos decisores com a ferramenta concebida, bem como registrar as suas sugestões de melhorias percebidas.

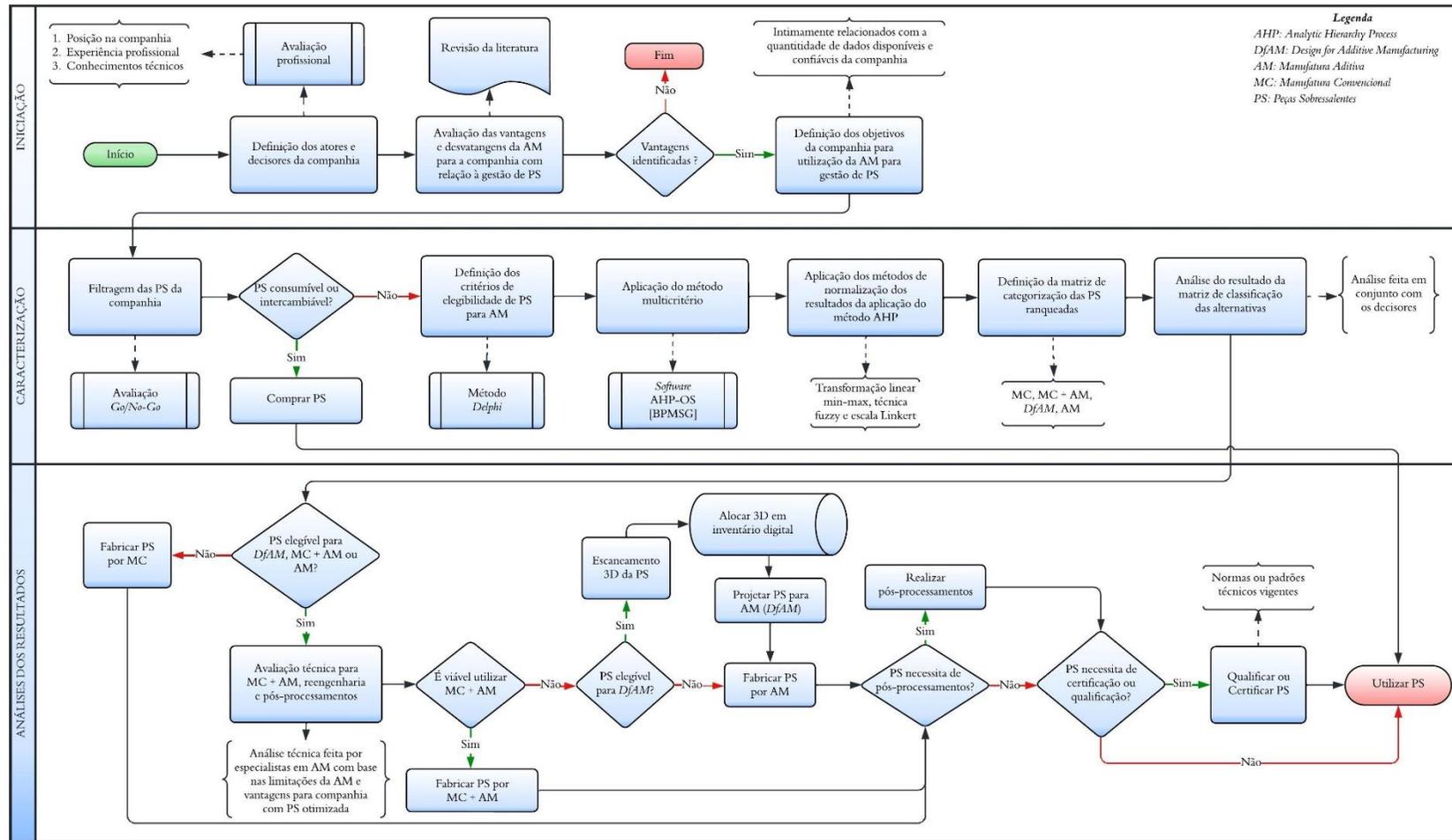
Os resultados dos estudos de caso foram comparados com metodologias e *softwares* disponíveis e destinados para classificação e seleção de PS elegíveis para MA. As metodologias selecionadas para as comparações estão apresentadas no Anexo 1. Ressalta-se que não foi

possível comparar a metodologia elaborada com a versão comercial de *softwares* capacitados para eleger PS para AM e que estejam disponíveis, como os programas desenvolvidos pelas companhias *Spare Parts 3D* (França), *DiManEx* (Países Baixos) e *EOS North America's Additive Minds* (EUA), a qual desenvolveu o seu *software* em parceria com a *3YourMind* (Alemanha). A justificativa para aquela impossibilidade se deve ao acesso restrito aos *softwares* supracitados, pois estes não disponibilizam versões gratuitas ou acadêmicas. Entretanto, o *software* CASTOR (Israel) disponibiliza testes *on-line* e gratuitos, denominados em inglês pelo programa de *Free Trial*, para avaliar peças adequadas para fabricação por AM. Portanto, utilizou-se o programa CASTOR, por meio dos seus testes sem custos e *on-line*, para avaliar se as peças dos estudos de caso aplicados para a companhia PAVNORTE são elegíveis para a AM. Posteriormente, os resultados do *software* CASTOR foram comparados com as saídas da metodologia elaborada a fim de validá-la. Os estudos de caso realizados para o CIMATEC não foram avaliados pelo CASTOR, pois não foram disponibilizados, por questões de confidencialidade de projeto, os desenhos técnicos e arquivos em formato STL das peças dos *cases* 1, 2 e 3.

Os *cases* foram realizados para as empresas SENAI CIMATEC e PAVNORTE CONSTRUTORA, ambas situadas na cidade do Salvador (BA). Ao todo, foram realizados seis *cases*, sendo quatro para o CIMATEC e dois para a PAVNORTE, além de participarem doze decisores – dos quais nove eram do CIMATEC e três contribuíram com a PAVNORTE. Uma vez que apenas o decisor D2 possuía habilidade com o método AHP, o tempo de aplicação da metodologia para cada um dos *cases* foi impactado negativamente, pois, além de ter sido necessário descrever o funcionamento da metodologia desenvolvida, foi preciso explicar aquele método para os demais participantes.

Os resultados estão detalhados na seguinte ordem: CIMATEC e, a posteriori, PAVNORTE. Atendendo aos passos detalhados na metodologia desenvolvida (Figura 16), a apresentação desses resultados está dividida nas três macro etapas, denominadas de “Iniciação”, “Caracterização” e “Análise de Resultados”. Ressalta-se que as duas primeiras macro etapas foram feitas em conjunto com os decisores das companhias. Já a macro etapa “Análise de Resultados” foi desenvolvida exclusivamente pelo autor desta dissertação a partir do julgamento dos *outputs* extraídos dos estudos de caso realizados.

Figura 16. Metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva e destinadas a aplicações industriais.



Fonte: Autoria própria, 2024

4 Resultados

4.1 SENAI CIMATEC: Resultados dos Estudos de Caso

Com o intuito de validar a metodologia desenvolvida, foram realizados presencialmente quatro estudos de casos no SENAI CIMATEC nos dias 6/12/23, 7/12/23, 2/2/24 e 24/7/24, respectivamente. As peças foram selecionadas apenas pelos profissionais desta companhia levando em consideração projetos ainda em fase de desenvolvimento e que estivessem orientados para a utilização da AM. Salienta-se que os decisores que participaram do estudo de caso no CIMATEC são funcionários desta companhia.

Não foram divulgados os nomes dos decisores participantes dos estudos de caso, nome da empresa cliente do CIMATEC detentora das peças avaliadas, detalhes estratégicos, técnicos e financeiros dos projetos selecionados, nem foram descritas detalhadamente as funções das PS, respeitando, deste modo, os termos de confidencialidade firmados entre as partes interessadas. A seguir serão detalhadas as aplicações dos estudos de caso realizados no CIMATEC, seguindo a ordem das etapas (do inglês, *gates*) da metodologia para classificação e seleção de PS elegíveis para AM e destinadas às aplicações industriais.

4.1.1 Macro etapa Iniciação

Ao todo, nove profissionais do SENAI CIMATEC atuaram nos cases, os quais foram identificados como “D1”, para o decisor 1, ao “D6”, correspondente ao sexto decisor da companhia, e “D10” ao “D12”, como pode ser visualizado na Tabela 11. Para cada *case* aplicado no CIMATEC, participaram três decisores. Contudo, o decisor D1 participou dos três estudos de caso e o D2 contribuiu em dois *cases*. A Tabela 11 sinaliza com um “x” os decisores que participaram de cada um dos estudos de caso realizados, além de informar a posição estratégica dos participantes nas companhias onde os cases foram aplicados e possuem experiência profissional com SPM, conhecimentos técnicos em materiais de engenharia, manufatura convencional (MC), manufatura aditiva (AM) e método AHP.

Começando pelas subfases da macro etapa “Iniciação” da metodologia desenvolvida, foi realizado o processo Avaliação Profissional (Figura 15). Por questões de disponibilidade de profissionais do SENAI CIMATEC para atuação nos *cases*, foram admitidos dois decisores (D2 e D4) que não possuíam posição estratégica na empresa e três participantes (D2, D3 e D4) que não possuíam experiência profissional em SPM, divergindo, desta maneira, das diretrizes da metodologia quanto à expertise profissional dos decisores. Todavia, a admissão desses decisores justifica-se em virtude de a companhia permitir a participação direta deles – podendo contribuir nas tomadas de decisão – em projetos desenvolvidos pelo SENAI CIMATEC, inclusive naqueles orientados para o uso da AM. Além disso, todos os decisores possuíam conhecimentos técnicos sobre materiais de engenharia e métodos de fabricação convencional e AM, atendendo unanimemente à terceira pergunta da Avaliação Profissional.

Uma vez que todos os decisores possuíam conhecimentos técnicos sobre materiais de engenharia e as suas propriedades mecânicas, métodos de manufatura convencional e AM, além de participarem de projetos cujos produtos foram orientados para a implementação da MA, os decisores já possuíam ciência sobre as vantagens e desvantagens da AM para as companhias com relação ao SPM. Deste modo, não foi necessário realizar a análise das vantagens e desvantagens da implementação da AM para a companhia (Anexo 1), reduzindo, portanto, o tempo de aplicação do estudo de caso.

Com o intuito de definir os objetivos estratégicos da companhia para utilização da AM para gestão de PS em cada *case*, os decisores se reuniram e chegaram a um consenso após a apresentação das características estratégicas e técnicas das PS analisadas. A descrição das peças dos *cases* 1 e 2 foi realizada pelo decisor D1 e a do componente do *case* 3, foi feita pelo decisor 6. Já o detalhamento da peça correspondente ao *case* 6 foi realizado pelo D10. Além de apresentar essas características, os decisores levaram em consideração os requisitos de projeto da empresa cliente do SENAI CIMATEC para estas peças. Salienta-se que o alinhamento desses requisitos com os objetivos estratégicos contemplados na metodologia elaborada (inovação, garantia de suprimentos, redução de custos e manutenção de peças) é de extrema relevância para a definição apropriada dos CEs e CTs a ser feita pelos decisores.

Os objetivos estratégicos definidos pelos decisores foram “garantir suprimentos” e “manutenir peça”, para a peça 1, denominada de colar batente, e “garantir suprimentos” para os componentes 2, chamada de placa batente, e 3, cuja designação é *handle*. Para a peça 6, descrita como rolete, foram definidos os seguintes objetivos estratégicos: “inovar” e “reduzir custos”. Dentre essas quatro peças, apenas o colar batente não foi considerado como estratégica para o cliente do CIMATEC, pois este buscou, neste caso, simplesmente identificar se o colar batente é elegível para a fabricação pelos métodos de AM. Já a placa batente, o *handle* e o rolete foram consideradas como peças sobressalentes relevantes para o cliente, sendo as duas últimas classificadas pelos decisores como uma PS crítica para o cliente, tanto estratégica quanto tecnicamente.

4.1.2 Macro etapa Caracterização

Segundo os decisores, o colar batente serve para enrijecer a curvatura na linha dos tubos de produção de óleo e gás *offshore* durante as operações de *pull in* e *pull out*, ou seja, mobilização e desmobilização da tubulação de produção. Já a placa batente atua como elemento de vedação para equipamentos *offshore*. O *handle*, por sua vez, funciona como puxador para componentes *offshore*. Já o rolete funciona juntamente com cerca de 10 unidades e possui como função global tracionar e deformar um filme polimérico de uma bobina, o qual é útil para um processo produtivo de óleo e gás.

As PS são fabricadas, originalmente, em materiais metálicos. As três primeiras atuam em plataformas *offshore*, estando submetidas a elevadas pressões – quando submersas –, desgastes corrosivos e fragilização por hidrogênio devido ao ambiente marítimo e substâncias ácidas como o gás sulfídrico (H₂S) (GENTIL, 2022). Apesar dos participantes do *case* 6 não

detalharem o local de aplicação do rolete por questões de sigilo industrial, eles relataram que esta peça é empregada em um equipamento da indústria de óleo e gás. Segundo os decisores do CIMATEC, as três primeiras peças possuem uma baixa quantidade de interações com outros componentes existentes nas plataformas e sofrem solicitações mecânicas de intensidade relativamente baixa, como tração, compressão, impactos (choques mecânicos), desgastes abrasivo, fadiga e fluência, quando comparados com outras peças que atuam nas plataformas *offshore*, como os componentes dos equipamentos *BOP* (do inglês, *BlowOut Preventor*) e catarina de tubos (da língua inglesa, *crown block*). Entretanto, uma vez que o equipamento no qual o rolete é instalado só funciona quando esta peça e o seu respectivo conjunto estão inseridos, isto evidencia que o rolete é uma peça fundamental para o funcionamento desse equipamento. Além disso, os roletes possuem um nível alto de interações com outros componentes que faz parte do equipamento e, devido a sua operação de tracionamento e deformação de um filme polimérico, eles sofrem um carregamento compressivo e de desgaste nas superfícies. Cada rolete necessita suportar uma carga de 20 kg de tracionamento e 15 kg de flexão.

As PS selecionadas pelos profissionais do SENAI CIMATEC passaram pelo processo de filtragem das peças sobressalentes a partir da aplicação da Avaliação *Go/No-Go* (Figura 12). As quatro peças não foram consideradas como consumíveis, nem intercambiáveis pelos decisores. Portanto, pode-se entender que elas possuem um tempo de vida útil considerável e não são disponibilizadas comercialmente de maneira ampla. Sendo assim, é aconselhável que elas não sejam compradas, mas produzidas. Os decisores desconheciam a existência ou vigência do contrato de manutenção dessas peças, então esta pergunta da Avaliação *Go/No-Go* foi ignorada. Conforme apresentado anteriormente, as peças colar batente, placa batente e *handle* possuem poucas interações com outras peças em serviço, fator que reduziria a elegibilidade para AM dos componentes escolhidos. Ainda assim, as equipes de projeto do CIMATEC consideram a utilização da AM como solução técnica para atender às solicitações do cliente. Além disso, os decisores consideraram o volume das quatro PS inferior a 0,06 m³ (60 litros), além de idealizarem o uso de materiais poliméricos para fabricação dessas peças. Logo, pode-se concluir que há máquinas de AM capazes de fabricar as quatro PS selecionadas, demonstrando, assim, que são viáveis para aplicação da AM (KRETZSCHMAR et al., 2018; MARANHA et al., 2023).

Definidos os objetivos estratégicos para cada uma das quatro peças sobressalentes e finalizada a Avaliação *Go/No-Go* delas, deu-se início ao processo do Método *Delphi* (Figura 13). Nele, os decisores, individualmente – ou seja, sem a influência da opinião dos demais –, avaliaram os CEs e CTs, disponíveis na Tabela 4 e na Tabela 5, e selecionaram entre 3 e 8 CEs e 3 e 5 CTs. Somando todos os critérios escolhidos para cada *case*, verificou-se um total de: 9 CEs e 10 CTs, para o *case* 1; 15 CEs e 9 CTs, para o estudo de caso 2; 13 CEs e 10 CTs, para o *case* 3; 11 CEs e 11 CTs, para o estudo de caso 6. Posteriormente, os CEs e CTs mais repetidos pelos decisores foram destacados, juntamente com a quantidade de decisores que participaram do *case* (N) e selecionaram cada um dos critérios (N_{PE}). Logo após, foi realizado

o cálculo do CVR, isto é, razão de validação do conteúdo, para validação dos CEs e CTs selecionados previamente. Aqueles CEs e CTs que apresentaram $CVR \geq 0,29$ (29%) foram admitidos como os critérios de elegibilidade para os *cases*, conforme pode ser visualizado no Anexo 4.

Finalizado o Método *Delphi*, os critérios de elegibilidade validados foram submetidos à aplicação do método multicritério AHP utilizando o *software* Calculadora de Prioridade AHP. Nesta etapa, os decisores de cada um dos *cases* avaliaram, através de comparações pareadas, os critérios estratégicos e técnicos validados cujo $CVR \geq 0,29$. Ao finalizar essas análises, obteve-se o ranqueamento ou o nível de relevância dos critérios estratégicos e técnicos, conforme pode ser visto no Anexo 9. Isto significa que foi definida a importância relativa dos critérios de elegibilidade de PS para AM. A Tabela 12 descreve a quantidade de tentativas de aplicação do método AHP, através do programa AHP-OS, até que os CEs e CTs de cada *case* alcançasse a razão de consistência exigida por esse método correspondente a 10%.

Tabela 11. Detalhamento do perfil profissional dos decisores dos estudos de caso.

Companhia	Decisor	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Posição na companhia	Experiência profissional em SPM	Conhecimentos técnicos em materiais de engenharia, MC e/ou AM	Conhecimento do método AHP
SENAI CIMATEC	D1	x	x	x				Especialista	Sim	Sim	Não
	D2	x	x					Técnico	Não	Sim	Sim
	D3	x						Especialista	Não	Sim	Não
	D4		x					Bolsista	Não	Sim	Não
	D5			x				Especialista	Sim	Sim	Não
	D6			x				Especialista	Sim	Sim	Não
	D10						x	Especialista	Não	Sim	Não
	D11						x	Especialista	Não	Sim	Não
	D12						x	Técnico	Sim	Sim	Não
								Especialista			
								Encarregado de	Sim	Sim	Não
	PAVNORTE	D7				x	x		Manutenção		
D8					x	x		Consultor técnico	Sim	Sim	Não
D9						x		Fornecedor	Sim	Sim	Não

Fonte: Autoria própria, 2024

Logo em seguida, os critérios foram devidamente normalizados. Utilizou-se a técnica de transformação linear min-máx para o CE “Previsibilidade do tempo de entrega” do *case* 1 e o CE “Peso da peça” e a técnica fuzzy para o CT “Massa” do *case* 3, pois eram os únicos critérios objetivos com valores definidos pelo cliente do projeto do CIMATEC. Uma vez que o cliente já havia definido 90 dias como prazo ideal para entrega da peça no seu destino final para utilização, aplicou-se esta meta como valor ideal para o critério “Previsibilidade de tempo de entrega”, no estudo de caso 1. A partir desta meta, foram estimados 60 e 120 dias como os prazos mínimos e máximos, respectivamente. No *case* 3, os critérios “Peso da peça” e “Massa” utilizaram como valor ideal 6,75 kg e foram calculados, pelo decisor 6, o valor mínimo (1,5 kg) e o máximo (12 kg) equivalentes. Além disso, a fim de aplicar adequadamente a técnica *fuzzy*, o valor mínimo desejado foi considerado como 10% acima do valor mínimo

tolerado pelo projeto (1,5 kg), resultando em 1,65 kg, e o valor máximo desejado foi definido como 10% abaixo valor máximo admissível para a peça (12 kg), cujo resultado é de 10,8 kg.

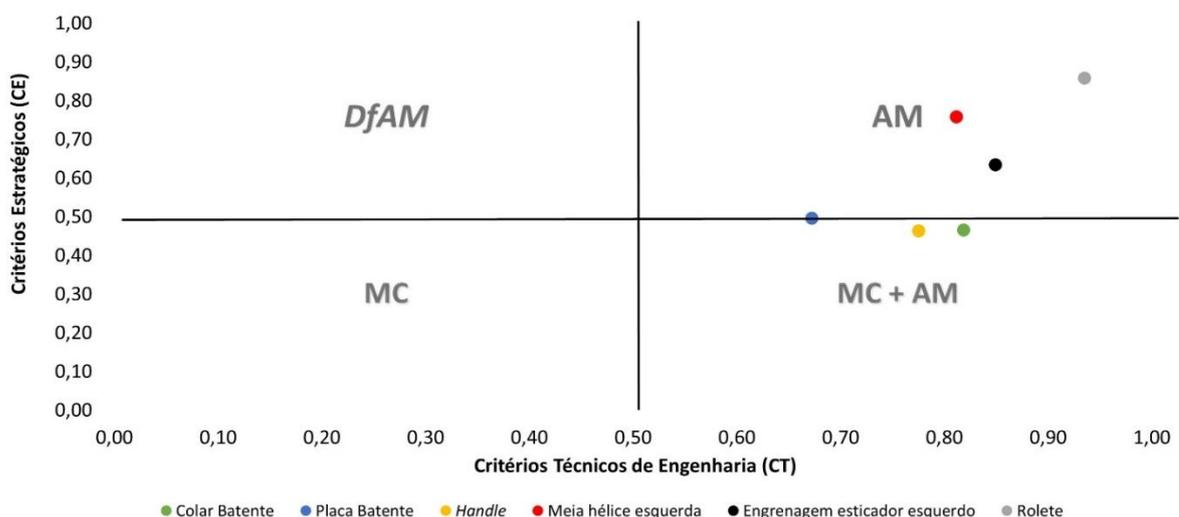
Tabela 12. Número de tentativas do método AHP para CEs e CTs dos *cases* feitos para o CIMATEC.

Companhia	Case	Decisores	Tentativas CE	Tentativas CT	Duração da aplicação da metodologia (min)
SENAI CIMATEC	1	D1, D2, D3	2	2	100
	2	D1, D2, D4	1	1	60
	3	D1, D5, D6	2	1	55
	6	D10, D11, D12	2	1	79

Fonte: Autoria própria, 2024

Os CEs e CTs subjetivos dos quatro *cases* foram normalizados aplicando a escala *Linkert* de cinco pontos uma vez que não havia indicadores ou metas previamente definidas pelo cliente do projeto. O ranqueamento e a normalização dos critérios de elegibilidade validados de cada estudo de caso podem ser vistos no Anexo 9. Após o processo de normalização, plotou-se nos eixos vertical e horizontal, respectivamente, os valores de CEs e CTs normalizados de cada *case* na matriz de categorização, obtendo, assim, a categoria das peças sobressalentes aplicadas para os estudos de caso realizados no CIMATEC, como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17. Matriz de categorização com as peças sobressalentes dos estudos de caso realizados.



Fonte: Autoria própria, 2024

Finalizada a etapa de normalização dos critérios de elegibilidade, o colar batente apresentou valores de 0,47 para o CE e 0,82 para o CT, enquanto que o *handle* obteve 0,46 para o CE e 0,77 para o CT. Portanto, a categoria resultante dos *cases* 1 e 3 foi a “MC + AM”, indicando que as peças sobressalentes analisadas poderiam ser fabricadas pela união dos

métodos de fabricação convencional e AM. Este resultado coincide com a estratégia avaliada pelos decisores do *case 1*, uma vez que eles estavam avaliando a hipótese de fabricar a peça por AM e, posteriormente, aplicar processos de usinagem para adequação às tolerâncias dimensionais e geométricas exigidas pelo projeto da peça. Já os decisores do *case 3* informaram que, por determinação do cliente do projeto, iriam manter a decisão de fabricar a peça apenas por AM.

Além disso, observando apenas os resultados encontrados para os valores de CEs e CTs, pode-se verificar que os estudos de caso 1 e 3 encontram-se no mesmo patamar estratégico para o cliente do CIMATEC – segundo a avaliação prévia feita pelos decisores ao traduzir as necessidades deste cliente –, porém o *handle* apresenta uma viabilidade técnica ligeiramente maior, levando em consideração os estressores aplicados sobre esta peça, bem como as complexidades geométrica e dimensional exigidas por ela. Em outros termos, pode-se concluir, a partir da análise da Figura 17, que o *handle* é considerado como uma PS mais simples de ser fabricada e está exposta a menos estressores quando comparada com o colar batente. Entretanto, vale ressaltar um fator relevante que impacta a análise dos resultados: os decisores do *case 3* (*handle*) possuem posições mais estratégicas no CIMATEC e maior experiência profissional em desenvolvimento de projetos de Engenharia quando comparados com dois decisores (D2 e D3) do *case 1*. Esse fator pode evidenciar que o *case 3* em relação ao *case 1* deve apresentar análises dos critérios de elegibilidade mais bem qualificadas e fundamentadas tecnicamente, além de comparações pareadas, através do método AHP, mais alinhadas às necessidades do cliente do projeto. Em outras palavras, é mais provável que: (i) hajam inconsistências nas análises feitas para do colar batente, podendo levar a resultados de CE, CT e categoria de PS (MC + AM) ligeiramente equivocados; e (ii) que o resultado encontrado para o *handle* seja mais coerente com as exigências do cliente do projeto.

O *case 2* (placa batente) apresentou um resultado peculiar. Possuindo valores de 0,50 para CE e 0,67 para CT, a peça encontra-se no limiar entre as categorias “AM” e “MC + AM”, indicando que ela pode ser fabricada tanto pela AM quanto pela combinação da manufatura convencional com a AM. Este resultado se aproxima da estratégia de manufatura do cliente do CIMATEC, pois, para ele, a placa batente não é considerada como altamente crítica e estratégica, podendo ser fabricada tanto pelas tecnologias de fabricação tradicionais ou por AM. Além disso, ela foi simplesmente definida pelo cliente como uma peça a ser avaliada pelo CIMATEC como elegível ou não para AM. Ademais, assim como o estudo de caso 1, dois decisores do *case 2* (D2 e D4) possuem posições estratégicas inferiores e experiência profissional menores quando comparados com os decisores do *case 3*. Esta circunstância pode levar a uma inconsistência nos resultados dos CEs e CTs e da categoria da placa batente, evidenciada na Figura 17.

Objetivando eliminar possíveis inconsistências nas análises dos decisores quanto à definição dos CEs e CTs e às exigências do cliente do projeto, realizou-se o *case 6*. Este obteve como resultado 0,86, para CE, e 0,93, para CT, sendo o rolete, portanto, categorizado para a “MA”. Esses valores evidenciam que o resultado da metodologia coincide com a estratégia

adotada pela equipe de projeto e exigida pelo cliente: fabricar o rolete por AM. Além disso, os elevados valores de CE e CT para o rolete mostram que é uma peça estrategicamente relevante para o cliente, porém tecnicamente mais complexa de ser fabricada. Logo, segundo a metodologia elaborada, a AM é um processo de manufatura adequado para produzir o rolete tendo em vista a sua complexidade geométrica. Ressalta-se que os roletes foram fabricados por AM cujo o material usado foi a poliamida 12 e as suas dimensões equivalentes tem 20 mm de altura e 12 mm de diâmetro. Segundo os decisores do *case* 6, devido às condições de tracionamento na superfície do rolete, foi necessário realizar uma modificação de textura e acabamento superficial na superfície de tração dos roletes. Este acabamento superficial foi dimensionado de modo a não causar qualquer tipo de dano à superfície do filme polimérico e para isso uma geometria específica foi dimensionada para ser produzida em AM.

Com o intuito de avaliar o nível de satisfação da metodologia desenvolvida e registrar as melhorias possíveis de serem aplicadas nessa metodologia, foi enviado aos decisores um formulário para ser respondido por eles. O Anexo 7 apresenta o Índice de Satisfação (I.S.) estratificado do SENAI CIMATEC cujo resultado foi igual a 98%, indicando o nível de qualidade “Excelente”, segundo a escala de I.S. descrita na Tabela 10. Além do I.S., pode-se extrair do formulário as sugestões de melhorias realizados pelos decisores sobre a metodologia aplicada. O Anexo 8 apresenta estas melhorias e os comentários que podem ser feitos a partir das opiniões dos decisores.

4.1.3 Macro etapa Análise de Resultados

Considerando os resultados dos *cases*, as peças colar batente e *handle* foram classificadas como elegíveis para “MC + AM”, a placa batente foi categorizada no limite entre “MC + AM” e “AM”, enquanto que o rolete foi classificado elegível para “AM”. Avaliando-se tecnicamente os resultados da metodologia e levando em consideração as limitações da AM e as vantagens para a companhia com as PS otimizadas, pode-se concluir que é viável fabricar as peças de acordo com as categorias evidenciadas pela metodologia, visto que: (i) as peças dos *cases* 1, 3 e 6 são consideradas estratégicas pelo cliente do SENAI CIMATEC; (ii) os componentes dos *cases* 2 e 6 foram eleitos pelo cliente para avaliação de elegibilidade para AM e, com base na matriz de categorização, também mostrou-se elegível para AM; (iii) as quatro peças não foram consideradas como componentes consumíveis e intercambiáveis; (iv) essas peças apresentam volume abaixo de 0,06 m³; (v) segundo os decisores, os componentes podem ser fabricadas em material polimérico, como a poliamida. Em especial, estes dois últimos fatores evidenciam o potencial das peças para a AM, visto que existe uma grande quantidade de máquinas de AM disponíveis comercialmente que atendem os parâmetros de volume e material especificados (KRETZSCHMAR et al., 2018; MARANHA et al., 2023).

Em virtude de as quatro peças não terem sido classificadas para *DfAM*, não foi necessário considerar a opção de reprojeto as três peças utilizando os conceitos de projeto orientado para AM, ignorando, assim, esta etapa da metodologia. Entretanto, levando em conta os estressores sob as quais essas peças estão submetidas, caso elas sejam manufaturadas em materiais poliméricos, pode-se aplicar de pós-processamentos, como

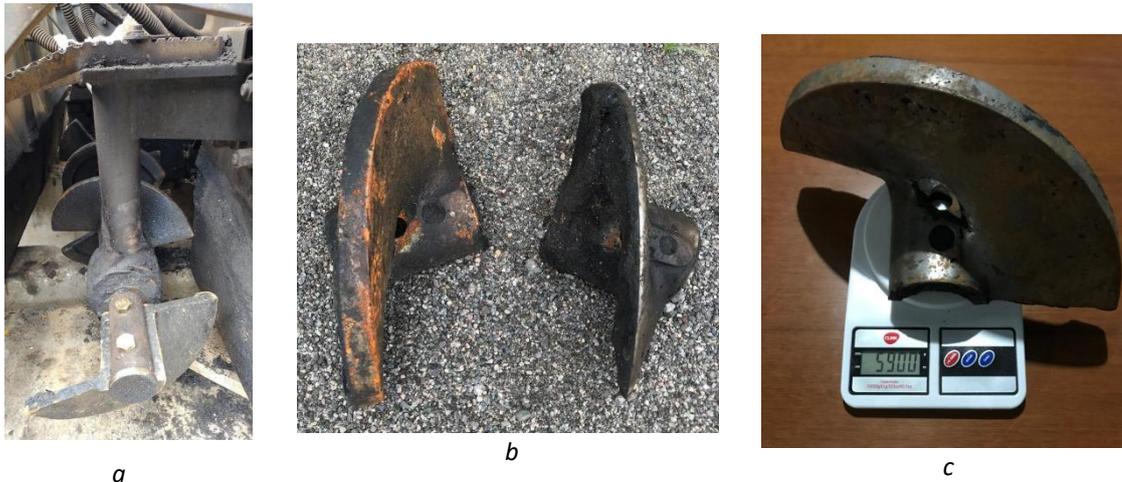
aumento do peso molecular e grau de cristalinidade, pré-deformação por estiramento e tratamento térmico (recozimento), para aprimorar a resistência mecânica das peças (CALLISTER, 2024). Além disso, as normas técnicas ISO/ASTM 52925:2022, VDI 3405 Blatt 1.1:2018 e VDI 3405 Blatt 7:2019, apresentadas na Tabela 3, são mais adequadas para a qualificação e certificação de peças fabricadas em material polimérico. Uma vez que as peças avaliadas no SENAI CIMATEC são aplicadas na indústria de petróleo e gás, caso haja o interesse de fabricá-las por AM em materiais metálicos, elas necessitam estar devidamente certificadas para atender aos critérios pré-estabelecidos, por exemplo, pelas normas técnicas API 20S ou DNV-BT-203, descritos brevemente no capítulo Normas Técnicas para Qualificação e Certificação desta dissertação.

4.2 PAVNORTE: Resultados dos Estudos de Caso

Foram realizados dois estudos de caso, *cases* 4 e 5, para a empresa PAVNORTE CONSTRUTORA. O primeiro deles, denominado de *case* 4, foi feito na data 07/03/2024 no SENAI ITED – polo do SENAI localizado na cidade de Lauro de Freitas (BA) – e avaliou a PS chamada de meia hélice. Além disso, contou apenas com dois decisores (D7 e D8), indo de encontro ao número mínimo de participantes sugeridos pela Avaliação Profissional (Figura 15), isto é, 3 decisores. O objetivo desta escolha fundamenta-se na tentativa de verificar a existência de melhorias na ferramenta elaborada ou durante o processo decisório. Já o segundo estudo de caso realizado para a PAVNORTE, *case* 5, contou com a participação dos decisores D7, D8 e D9. Ele foi realizado remotamente no dia 21/3/2024 através do *software Microsoft Teams*, e analisou-se a PS chamada de engrenagem do esticador. Ambas as peças, que podem ser visualizadas na Figura 18 e na Figura 19, respectivamente, são componentes instalados no lado esquerdo da vibrocabadora VDA 400 *dual concept*, da fabricante BOMAG, a qual possui dimensões máximas aproximadas de 3900 x 4550 x 5940 mm, conforme Figura 20. Também denominada de pavimentadora de asfalto, a vibrocabadora é um equipamento cujas funções principais são nivelamento e compactação do concreto betuminoso usinado a quente (CBOQ), conhecido como concreto asfáltico, em obras de pavimentação (TRACSUL, 2022).

Assim como nos estudos de casos realizados no CIMATEC, não foram divulgados os nomes dos decisores participantes dos *cases* da PAVNORTE por questões de confidencialidade. Posteriormente, serão discriminadas as aplicações dos estudos de caso realizados para a PAVNORTE, seguindo a ordem dos *gates* da metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva e destinadas a aplicações industriais.

Figura 18. Meia hélice esquerda.



Nota:

- a. Meia hélice esquerda do case 4 instalada na rosca transportadora de massa, isto é, asfalto.
- b. Comparação entre a integridade da meia hélice do case 4 (à esquerda), em condição de uso, e uma meia hélice desgastada, sem condição de uso (à direita).
- c. Pesagem da meia hélice esquerda utilizada no case 4.

Fonte: Autoria própria, 2024

4.2.1 Macro etapa Iniciação

Os decisores D7 e D8 atuaram nos *cases* 4 e 5. Já o decisor D9 participou apenas do *case* 5, como pode ser visto na Tabela 11. O decisor D7 é colaborador da PAVNORTE Construtora há seis anos, o D8 atuou como consultor técnico da empresa para auxiliar na aplicação da metodologia desenvolvida e o D9 é fornecedor dessa companhia. Em outras palavras, apenas o D7 possui posição estratégica dentro da companhia PAVNORTE. Ademais, todos os decisores possuíam mais de cinco anos de experiência com SPM, além de disporem de conhecimentos técnicos sobre as tecnologias de manufatura convencional e propriedades mecânicas de materiais de engenharia. Contudo, desconheciam as tecnologias de AM. Por este motivo, foram avaliados os fatores motrizes e barreiras para a adoção da AM pela companhia, os quais estão descritos no Anexo 1. Uma vez que os decisores identificaram as vantagens da aplicação da MA para a gestão de PS da companhia, a partir da apresentação do Anexo 1, definiu-se, para a meia hélice esquerda e engrenagem do esticador esquerdo, os respectivos objetivos estratégicos: garantir suprimentos e reduzir custos (*case* 4) e garantir suprimentos (*case* 5).

Figura 19. Engrenagem do esticador esquerdo.



a



b

Nota:

a. Engrenagem do esticador esquerdo do case 5 indicada pela seta amarela e instalada na esteira transportadora esquerda da vibroacabadora.

b. Pesagem da engrenagem do esticador esquerdo utilizado no case 5.

Fonte: Autoria própria, 2024

Ressalta-se que o tempo de aplicação do estudo de caso 5 foi impactado em cerca de 20 minutos por ter sido realizado remotamente, utilizando o *software Microsoft Teams*, uma vez que existiriam intercorrências com os computadores e conexões de *internet* dos decisores. Portanto, o tempo de duração do *case 5*, apresentado na Tabela 14 e na Tabela 15, não foram contabilizados esses 20 minutos correspondentes às intercorrências.

4.2.2 Macro etapa Categorização

As PS da PAVNORTE foram selecionadas pelo colaborador (D7) da empresa PAVNORTE CONSTRUTORA. Segundo ele, a meia hélice, ao contrário da engrenagem do esticador, é uma peça que: apresenta alto nível de desgaste, como pode ser visto na Figura 18; possui baixa vida útil – cerca de quatro a doze meses –, podendo ser caracterizada como um consumível para a vibroacabadora; apresenta alta taxa de substituição, devido à elevada demanda de serviços exigidos para o equipamento, o qual pode ser utilizado até sete vezes por semana durante 24 horas. Além disso, existem apenas dois fornecedores localizados em Salvador (BA) e região metropolitana para a meia hélice. Apesar de existirem mais fornecedores a nível nacional, estes requerem um tempo de espera (do inglês, *lead time*) muito maior se

comparados com aqueles localizados regionalmente. Portanto, o decisor D7 levou em consideração, principalmente, o antagonismo entre as peças, uma vez que a engrenagem do esticador, ao contrário da meia hélice, sofrer com esforços mecânicos de alta intensidade, possui elevada vida útil e baixa taxa de substituição – podendo possuir vida útil equivalente ao tempo de uso da vibroacabadora e, portanto, não ser substituída –, além de existirem muitos fornecedores locais e nacionais para essa peça.

Figura 20. Vibradora BOMAG VDA 400 *dual concept*.



Nota:

a. Comparação entre as dimensões da vibroacabadora BOMAG VDA 400 *dual concept* em um caminhão prancha e do seu operador.

b. Dimensões reais da vibroacabadora BOMAG VDA 400 *dual concept*.

Fonte: Adaptado de BOMAG, 201-?

No que se refere às características funcionais e construtivas das PS selecionadas e os esforços que estas sofrem, a meia hélice é uma peça que faz parte da rosca transportadora de massa cuja função consiste em transportar o CBOQ no estado líquido para pavimentar o solo. Ela possui 320 mm de diâmetro, passo de 140 mm, é fabricada em aço fundido de alta resistência a abrasão, apresenta dureza mínima de 500 HB (BOMAG, 201-?), possui massa de 5,9 kg e custa cerca de R\$ 88,00. Sofre elevado grau de solicitações térmicas – atuando numa faixa de temperatura entre 20 a 120°C – e mecânicas, como fadiga, cisalhamento, torção, além de apresentar os quatro tipos principais de desgaste, a saber: abrasivo, adesivo, corrosivo e por fadiga (KATO e KADASHI, 2001).

Por sua vez, a engrenagem do esticador possui a seguinte função global: tensionar a corrente que conecta a engrenagem de saída da caixa de transmissão da vibroacabadora com a esteira transportadora cujo objetivo consiste em promover a movimentação ao equipamento. Apesar do fabricante adotar a nomenclatura de “engrenagem” na sua lista de PS, esta peça caracteriza-se por ser uma roda dentada cilíndrica de dentes retos e furo retos (do inglês, *plain bore*) com onze dentes de espessura igual a 0,75”, passo de 1 ¼”, diâmetros

externo e primitivo iguais a, respectivamente, 7,010” e 6,213”, largura total de 1,5”, massa aproximada de 3,7 kg e custa em torno de R\$ 324,00. Feita em aço fundido, possui bucha feita em liga de bronze – fabricante não especifica as ligas metálicas e pós-tratamentos –, a engrenagem do esticador peça trabalha a temperatura ambiente (entre 20 e 30°C, aproximadamente) e sofre elevados esforços mecânicos de fadiga e desgastes abrasivo e corrosivo. As informações técnicas da meia hélice e engrenagem do esticador encontram-se, respectivamente, na Tabela 13.

Selecionadas as PS para os estudos de caso, estas foram submetidas à Avaliação *Go/No-Go* (Figura 12) e apresentaram os seguintes resultados: a meia hélice, ao contrário da engrenagem do esticador, foi considerada como consumível e intercambiável. Ambas não possuem contrato de manutenção vigente e funcionam através da interação com outras peças. Além disso, possuem volume inferior a 0,06 m³ e são feitas em aço fundido. Isto significa que existem máquinas de MA capazes de fabricar as peças selecionadas (MARANHA et al., 2023). Com o intuito de validar a metodologia desenvolvida, a meia hélice e a engrenagem do esticador foram consideradas como viáveis para manufatura aditiva, apesar de possuírem interações com outras peças e, no caso da meia hélice, também entrar em contato com o solo e ser classificada como uma PS consumível. O resultado da Avaliação *Go/No-Go* pode ser verificado no Anexo 3.

Tabela 13. Informações técnicas das peças dos *cases* 4 e 5

Engrenagem do esticador esquerdo (roda dentada cilíndrica de dentes retos)		Meia hélice esquerda	
Número de dentes	11	Diâmetro	320 mm
Passo	1,75 in	Passo	140 mm
Diâmetro primitivo	6,213 in	Espessura da hélice	38 mm
Diâmetro externo	7 in	Massa	5,9 kg
Diâmetro do cubo	4 in	Volume aproximado	1x10 ⁻³ m ³
Espessura do dente	0,75 in	Preço estimado	R\$ 88,00
Espessura total	1,5 in		
Diâmetro furo	2 in		
Espessura da bucha	0,375 in		
Massa	3,7 kg		
Volume aproximado	7x10 ⁻⁸ m ³		
Preço estimado	R\$ 324,00		

Fonte: Aatoria própria, 2024

Finalizada a filtragem das PS da companhia e conhecidos os objetivos estratégicos delas, aplicou-se o Método *Delphi* (Figura 13). Para o *case* 4, os decisores selecionaram um total de 5 CEs e 7 CTs. Já para o *case* 5, os participantes escolheram, ao todo, 11 CEs e 9 CTs, como pode ser visto no Anexo 4. Ao realizar o cálculo do CVR, para validação dos CEs e CTs selecionados previamente, obteve-se, para o *case* 4, 4 CEs e 3 CTs para serem avaliados posteriormente. Contudo, para o *case* 5, dos 11 CEs selecionados previamente, 9 apresentaram CVR < 29%. Para solucionar este impasse, os decisores avaliariam estes 9 CEs tendo em vista o objetivo estratégico definido (garantir suprimentos) e a função da peça para

a vibroacabadora. Os critérios “risco de falta de estoque” e “custo de falta de estoque” foram considerados equivalentes ao critério “estoque/inventário de segurança”. Já os critérios “substituibilidade”, “confiabilidade de fornecimento” e “tempo de espera / tempo de espera médio / prazo de reposição” foram excluídos pelos decisores, uma vez que foram avaliados como pouco estratégicos. Por fim, para o *case* 5, foram escolhidos 5 CEs e obtidos, através do cálculo do CVR, 3 CTs. O Anexo 4 apresenta o resultado do método *Delphi* e cálculo do CVR dos critérios de elegibilidade selecionados pelos decisores que participaram dos estudos de caso feitos para a PAVNORTE.

Com os CEs e CTs definidos para os *cases* 4 e 5, foi aplicado o método multicritério AHP através do *software* Calculadora de Prioridade AHP. A Tabela 14 apresenta o número de tentativas de aplicação do método AHP, através do programa AHP-OS, até que os CEs e CTs de cada *case* alcançassem a razão de consistência exigida por esse método (10%). Posteriormente, os critérios foram normalizados subjetivamente através da aplicação da escala *Linkert* de cinco pontos, pois não existiam informações ou indicadores suficientes na companhia para realizar normalização objetiva dos critérios de elegibilidade previamente definidos. Os resultados do *software* Calculadora de Prioridade AHP, isto é, o ranqueamento dos critérios de elegibilidade e das normalizações dos *cases* 4 e 5 estão disponíveis no Anexo 9.

Tabela 14. Número de tentativas do método AHP para CEs e CTs dos *cases* feitos para a PAVNORTE.

Companhia	Case	Decisores	Tentativas CE	Tentativas CT	Duração (min)
PAVNORTE	4	D7, D8	5	2	120
	5	D7, D8, D9	1	2	98

Fonte: Autoria própria, 2024

Realizadas as normalizações dos critérios de elegibilidade, a meia hélice esquerda apresentou valores de 0,76 para o CE e 0,81 para o CT, enquanto que a engrenagem do esticador esquerdo obteve 0,63 para o CE e 0,85 para o CT. Logo, a categoria resultante dos *cases* 4 e 5 foram “AM”, indicando que ambas as peças sobressalentes analisadas poderiam ser fabricadas pela AM. Todavia, o resultado para a meia hélice esquerda foi julgado como inesperado por se tratar de uma PS classificada pelos decisores como consumível, sofrer elevados níveis e tipos de desgastes, além de possuir de interações com outras peças da vibroacabadora e com o solo. Por estes motivos, esperava-se que esta peça fosse classificada como “MC”, ou seja, manufatura convencional. A justificativa para esse resultado peculiar pode ser atribuída ao fato de apenas dois decisores (D7 e D8) participarem do *case* 4, quantidade insuficiente para a aplicação adequada da metodologia, pois quanto menor o número de decisores, maior a probabilidade de conclusões equivocadas (LYNN, 1986). Além disso, mais tendenciosos se tornam os resultados do método AHP e da normalização subjetiva. Este fenômeno ocorre devido ao aumento na ocorrência de vieses cognitivos vinculados às tomadas de decisão, sendo, necessário, portanto, a participação de outros decisores para

atuarem como se fossem mediadores ou facilitadores durante a escolha a ser feita com o objetivo de tornar os resultados menos tendencioso e mais acurados (CAPUTO, 2016; NORTJE, 2020). Em contrapartida, a análise da engrenagem do esticador esquerdo contou com três decisores, reduzindo, deste modo, a tendenciosidade do seu resultado. Esta peça apresentou a categoria esperada (“AM”) pelos decisores, visto que se trata de uma peça mais relevante para o equipamento, além de não ser considerada como um consumível, apesar dos esforços mecânicos sofridos devido à sua interação com outros componentes da vibroacadora.

Complementarmente, atendendo-se apenas para os valores dos CEs e CTs encontrados, percebe-se que a meia hélice esquerda e a engrenagem do esticador esquerdo possuem CEs iguais a 0,76 e 0,63, respectivamente. Estes resultados significam que, na teoria, a meia hélice esquerda é uma peça mais estratégica para a companhia, quando comparada com a engrenagem do esticador esquerdo. Entretanto, com base nos julgamentos dos decisores, esta engrenagem é mais relevante para a vibroacabadora e, conseqüentemente, para a PAVNORTE, quando comparada com a meia hélice. Quanto aos valores dos CTs, a engrenagem do esticador esquerdo e a meia hélice esquerda possuem CTs correspondentes à 0,85 e 0,81, nesta ordem. Em termos práticos, isto significa que a engrenagem é mais complexa de ser fabricada do que a meia hélice. Contudo, como pode ser visto na Figura 18, a meia hélice esquerda possui uma complexidade geométrica maior, além sofrer esforços térmicos e mecânicos mais elevados do que a engrenagem do esticador esquerdo (Figura 19). Este acontecimento pode configurar como um equívoco nos resultados obtidos para a meia hélice esquerda, que contou com a avaliação de apenas dois decisores, quantidade inferior à estabelecida pela metodologia elaborada (Figura 16).

Posteriormente, para avaliar o nível de satisfação dos decisores quanto à metodologia desenvolvida e aplicada, foi enviado o formulário (Anexo 5) para preenchimento. O Anexo 7 apresenta o Índice de Satisfação (I.S.) estratificado da PAVNORTE cujo resultado foi igual a 100%, apontando o nível de qualidade “Excelente”, segundo a escala de I.S., descrita na Tabela 10. O Anexo 8 apresenta o comentário feito pelo decisor D7 – único decisor dos estudos de caso para a PAVNORTE que fez considerações adicionais sobre a metodologia – e as respostas completas dos participantes.

4.2.3 Macro etapa Análise de Resultados

A meia hélice esquerda, apesar de ser categorizada como elegível para a AM, foi submetida a avaliações estratégica e técnica e, portanto, julgada como uma peça mais viável de ser produzida pelos métodos convencionais de fabricação, como a fundição, por se tratar de uma PS classificada como consumível pelos decisores. Entretanto, a engrenagem do esticador esquerdo, que também foi classificada como elegível para a AM, mostrou-se mais promissora para ser fabricada unicamente por AM, não necessitando do auxílio dos métodos convencionais, como nos *cases* 1, 2 e 3. Isto se deve porque essa engrenagem, além de ser estratégica para a companhia, não é considerada como um componente consumível nem intercambiável, apresenta volume inferior a 0,06 m³ (60 litros) e é fabricada em liga de aço

fundido. Logo, segundo MARANHA et al. (2023), há máquinas disponíveis para a fabricação dessa peça pelas tecnologias de AM.

Uma vez que não foi uma peça categorizada para *DfAM*, ignorou-se esta etapa da metodologia. Devido ao elevado nível de esforços mecânicos exercidos sobre essa engrenagem, como fadiga e desgastes abrasivo e corrosivo, torna-se adequado a realização de pós-processamentos, a exemplo da têmpera, revenimento e cementação, por com o intuito de aumentar a dureza dos dentes e a ductilidade do núcleo da engrenagem, elevando, conseqüentemente, a sua vida útil (CALLISTER, 2024). Por se tratar de uma peça feita em liga de aço por exigir boas resistências mecânica e aos desgastes, recomenda-se a sua qualificação para atender aos critérios estabelecidos pela norma DNV-BT-203, descritos brevemente no capítulo Normas Técnicas para Qualificação e Certificação.

Por fim, a Tabela 15 resume as informações relevantes dos estudos de caso realizados para o SENAI CIMATEC E PAVNORTE CONSTRUTORA, a saber: a companhia cujos *cases* foram aplicados, denominação das peças selecionadas, quantidade de decisores em cada *case*, os objetivos estratégicos traduzidos pelos participantes tendo em vista os requisitos das companhias, o valor dos CEs e CTs e o resultado da Matriz de Categorização após as aplicações do método multicritério AHP, a duração de cada estudo de caso até a realização da Matriz de Categorização da metodologia (Figura 17) e o índice de satisfação (I.S.) dos participantes de cada *case*.

Tabela 15. Resumo dos resultados dos *cases*.

Empresa	Case	Peça	Decisores	Objetivos Estratégicos	CE	CT	Categoria	Duração (min)	I.S. (%)
SENAI CIMATEC	1	Colar batente	3	Garantir suprimentos e manter a peça	0,47	0,82	MC + AM	100	99,2
	2	Placa batente	3	Garantir suprimentos	0,50	0,67	AM ou MC + AM	60	99,2
	3	<i>Handle</i>	3	Garantir suprimentos	0,46	0,77	MC + MA	55	93,3
	6	Rolete	3	Inovar e reduzir custos	0,86	0,93	AM	79	100
PAVNORTE	4	Meia Hélice Esquerda	2	Garantir suprimentos e reduzir custos	0,76	0,81	AM	120	100
	5	Engrenagem do esticador esquerdo	3	Garantir suprimentos	0,63	0,85	AM	98	100

Fonte: Autoria própria, 2024

Observando a Tabela 15, é possível verificar que cinco dos seis estudos de caso contaram com a quantidade mínima de decisores – isto é, 3 participantes – prevista para a metodologia. A única exceção foi o *case* 4, que contou com duas pessoas, com o intuito de verificar a existência ou não de inconsistências na metodologia e dos processos decisórios envolvidos. É importante salientar que há uma forte dependência entre o número de

decisores e o resultado das categorias das peças, pois uma maior quantidade de participantes com perfil profissional adequado para a metodologia pode gerar resultados mais consistentes e coerentes com as necessidades da companhia e para uma categorização mais adequada para as PS avaliadas. Entretanto, aumentar demasiadamente o número de pessoas – acima de 10, por exemplo –, pode gerar um incremento na duração da metodologia. Além disso, percebe-se uma gradativa redução no tempo de aplicação dos estudos de caso do CIMATEC e da PAVNORTE, evidenciando que, quanto maior nível de familiaridade com a metodologia, mais rápidos se tornam os processos decisórios. Outra evidência é o elevado índice de satisfação dos participantes com a metodologia, a qual apresentou nível “Excelente”, como pode ser visto na Tabela 10. Este resultado baseia-se, principalmente, na utilidade que a metodologia possui para auxiliar e simplificar processos decisórios que envolvem gerenciamento de peças sobressalentes para as companhias.

Além disso, é possível notar que a maioria dos estudos de caso têm como objetivo estratégico em comum a garantia de suprimentos. Isto se deve porque, atualmente, a companhia cliente do CIMATEC e a PAVNORTE buscam com a AM a substituição direta das PS com as características originais do fabricante. Ademais, há uma concentração dos resultados das peças sobressalentes entre as categorias “MA” e “MC + AM”, como pode ser verificado na Figura 17. Este acontecimento evidencia que: (i) as três peças analisadas pelos decisores do CIMATEC já haviam sido orientadas para a AM; (ii) ainda existem limitações para adoção da AM como processo de fabricação final de peças, quando comparados com os métodos convencionais de manufatura, no que se refere, principalmente, aos materiais a serem fabricados e às características do processo de AM empregado (VOLPATO, 2017), exigindo, por conseguinte, a utilização de pós-processamentos para adequar as peça fabricada por AM; e (iii) emprego da normalização subjetiva para a maioria dos CEs e CTs, pois deste modo não foi possível reduzir a subjetividade intrínseca às tomadas de decisão dos decisores por meio das normalizações objetivas, a qual necessita de dados e indicadores existentes e confiáveis.

4.3 Comparação dos resultados com *software* CASTOR

Com o objetivo de validar os resultados “AM” obtidos para a meia hélice esquerda e engrenagem do esticador esquerdo através da metodologia produzida, foram enviados os seus respectivos arquivos em formato CAD para o *site* de AM israelense denominado CASTOR, o qual é capaz de identificar automaticamente peças adequadas para a AM (CASTOR, 2024). A justificativa para a escolha deste programa se deve ao fato dele disponibilizar um teste *online* gratuito, para avaliação de peças adequadas para a AM. Portanto, utilizou-se o teste grátis (*Free Trial*) deste programa cujo layout pode ser visto na Figura 21. Neste tipo teste não é possível obter detalhes sobre análises de prazo de entrega (*Lead time analysis*) e de estressores (*Stress analysis*) dos componentes.

O arquivo em formato CAD da meia hélice esquerda foi enviado por completo para o *software*. Por sua vez, para a engrenagem do esticador esquerdo foi necessário enviar dois arquivos separadamente: a roda dentada e a sua bucha. Para as três peças foram escolhidas

para o ciclo de vida do projeto a opção *Spare Parts* – tradução em inglês para o termo “peças de reposição” –; a quantidade de produção anual estimada selecionada para a bucha e a engrenagem foi uma peça e seis unidades para a meia hélice esquerda. O valor estimado para cada unidade das peças foi US\$ 20,00, para a meia hélice esquerda, e US\$ 70,00, para a bucha e a engrenagem – a cotação do dólar utilizado para conversão dos preços dessas peças em reais para dólar foi de R\$ 5,09 no dia 11 de abril de 2024. Foram selecionados os materiais aço fundido (do inglês, *cast carbon steel*) para meia hélice esquerda e engrenagem do esticador esquerdo e liga de cobre (da língua inglesa, *copper*) para a bucha desta engrenagem. Não foram selecionadas as opções do *software* denominadas de “*Advanced settings*” e “*This project’s tolerance according to DIN ISO 2768 standard is*”. O CASTOR não solicitou as especificações dos tipos e intensidade dos estressores que essas três peças estão sujeitas.

De acordo com o CASTOR, as peças se mostraram adequadas para a AM com mudanças. As mudanças apresentadas pelo CASTOR para as PS analisadas dizem respeito a alteração dos tipos dos materiais a ser aplicado e ao cuidado com deformações das peças por calor durante a impressão, uma vez que o *software* caracterizou as peças com áreas volumosas. Estas mudanças poderiam ser previstas pela metodologia na macro etapa Análise de Resultados, pois é nesta macro etapa da metodologia desenvolvida que especialistas em MA analisam os detalhes técnicos das peças, como tipo de material e geometria, bem como os processos de AM que podem ser empregados para essas peças.

Portanto, os resultados do *software* CASTOR e da Matriz de categorização da metodologia desenvolvida foram convergentes. Isto leva a crer que a metodologia apresenta resultados confiáveis, reforçando o atingimento dos objetivos geral e específicos desta dissertação. Ressalta-se que as peças dos *cases* 1, 2 e 3 não foram submetidas ao CASTOR porque não foram disponibilizados os arquivos em formato CAD ou STL dessas peças. O Anexo 10, o Anexo 11 e o Anexo 12 mostram, nesta ordem, os resultados do CASTOR encontrados para a meia hélice esquerda, engrenagem do esticador esquerdo e sua respectiva bucha.

O resumo dos resultados encontrados no CASTOR para a meia hélice esquerda, engrenagem do esticador esquerdo e a sua respectiva bucha estão disponíveis na Tabela 16. O *software* estima para as três peças um prazo de entrega de quatro dias, contabilizado o tempo de fabricação e logística dessas peças. O processo e a máquina de AM sugeridos para a meia hélice esquerda e engrenagem do esticador esquerdo são os mesmos: jateamento de aglutinante, do inglês *binder jetting*, e X160Pro, da fabricante estadunidense *DesktopMetal*; já para a bucha da engrenagem do esticador esquerdo são recomendados o processo de fusão em leito de pó denominado de fusão seletiva a laser – que em inglês significa *selective laser melting* (SLM) –, e a máquina SLM-280 2.0, da companhia *Nikon SLM Solutions*. Quanto aos materiais indicados para a meia hélice, engrenagem do esticador e sua bucha são, respectivamente, as ligas Aço SAE 316 L, Aço SAE 304 L e AISi10Mg. Os custos totais estimados para produção e entrega equivalem a US\$ 757,00 para a meia hélice esquerda e bucha da engrenagem do esticador esquerdo, e correspondem a US\$ 1.242,00 para a engrenagem do esticador. Ressalta-se que não foram considerados os custos com pós-processamentos.

Figura 21. Página *on-line* do teste gratuito do *software* CASTOR.

The screenshot displays the CASTOR software interface, divided into three main sections:

- 1. Details:** This section contains a 'Project name' input field. Below it, a note states 'This project life cycle is planned for' followed by four buttons: 'Prototype/NPI', 'Spare parts', 'Low volume production' (which is selected), and 'Production'. Further down, there is an 'Estimated yearly production quantity' input field with the value '50'. At the bottom of this section, a question asks 'What is your current estimated standard cost?' with a currency symbol '\$' and a checkbox for 'Use CASTOR's Traditional Manufacturing cost estimation'.
- 2. Type:** This section is for file uploads. It shows three options: '3D CAD' (selected), '2D Drawing', and 'Meta Data'. Below this, a note says 'Please set the materials for the uploaded parts/assembly' with a radio button for 'Use a single material for all parts'. There are three input fields: 'Original Material Type' (set to 'Plastic'), 'Original Material Category' (set to 'Plastics'), and 'Original Material' (set to 'Nylon 101'). There are also 'ADVANCED SETTINGS' buttons for 'Included AM technologies' and 'Materials categories match'. At the bottom, a checkbox is labeled 'This projects tolerance according to DIN ISO 2768 standard is'.
- 3. Files:** This section features a cloud upload icon and the text 'Drop your files here or click to upload'. It lists supported formats: 'Native 3D CAD file formats are supported (Creo, SOLIDWORKS, NX, CATIA, Inventor, Solid Edge), STEP (or STP) files and STL files'. A large empty box is provided for file uploads. At the bottom, there are two buttons: 'Don't have a file? Use ours' and 'Start uploading'. A small note at the very bottom states 'Your files will not be shared with any 3rd party'.

Fonte: CASTOR, 2024

Tendo em vista os resultados dispostos na Tabela 16, o prazo para entrega de quatro dias e os materiais sugeridos pelo CASTOR para as três peças atende às expectativas pelo decisor D7 e exigências da vibroacabadora, respectivamente. Contudo, o custo total estimado é bem alto se comparado com as peças originais, demonstrando, deste modo, que os custos com a AM ainda são elevados quando comparados com os métodos convencionais de fabricação (VOLPATO, 2017; LEARY, 2019). Os custos totais estimados para produzir a engrenagem do esticador esquerdo devem levar em consideração os custos da engrenagem e da bucha, uma vez que trabalham conjuntamente. Logo, a soma dos custos destas peças equivale a US\$ 1.999,00 e é 2,6 vezes superior ao custo total estimado para a meia hélice. Este valor representa um indicativo de que a engrenagem do esticador é mais estratégica para a PAVNORTE quando comparada com a meia hélice. Além disso, a seleção do material do componente, seu respectivo processo de fabricação pelas tecnologias aditivas e a máquina apropriada para a manufatura das peças são selecionadas exclusivamente pelo *software* CASTOR. Esta companhia não divulga o tipo de tecnologia aplicado para realizar as análises das peças candidatas para a AM.

Tabela 16. Resumo dos resultados obtidos do CASTOR.

Case	Peça sobressalente	Material sugerido	Prazo de entrega estimado	Custo total estimado (US\$)	Processo de AM	Máquina de AM
4	Meia hélice esquerda	Aço SAE 316 L		757,00	BJ	X160Pro
5	Engrenagem do esticador esquerdo	Aço SAE 304 L	4 dias	1.242,00	BJ	X160Pro
5	Bucha da engrenagem do esticador esquerdo	AlSi10Mg		757,00	SLM	SLM-280 2.0

Fonte: Autoria própria, 2024

4.4 Comparação dos resultados com outros *softwares* e metodologias

A metodologia desenvolvida, os resultados obtidos dos cinco *cases* aplicados para o SENAI CIMATEC e para a PAVNORTE, além das saídas para as duas peças simuladas no *software* CASTOR foram comparados com os resultados e metodologias divulgados pelos periódicos DIAS (2020), GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022) e CARDEAL, LEITE e RIBEIRO (2023), dispostos no Anexo 1. Os critérios adotados para selecionar esses periódicos foram os seguintes: alto nível de afinidade com os objetivos desta dissertação; desenvolvimento de metodologias próprias para classificação ou seleção de peças sobressalentes adequadas para AM; realização de estudos de casos para validar as metodologias criadas. A justificativa para escolha dos critérios supracitados advém do interesse em avaliar os benefícios e os pontos de melhoria da metodologia desenvolvida (Figura 17). A Tabela 17 apresenta as análises das comparações. Os critérios de avaliação considerados como vantajosos estão marcados com um “✓” (*check*) e destacados em verde. Aqueles critérios que não foram atendidos pelos trabalhos científicos ou pelo CASTOR estão identificados com um “x”. Foi registrado com “N/A” (não se aplica) aquelas informações que não estão declaradas.

Comparando as informações descritas na Tabela 17, é possível perceber que a metodologia desenvolvida (FRANÇA, 2024) possui uma quantidade maior de benefícios – evidenciados em verde – que as demais metodologias e *software* CASTOR, tendo em vista os critérios apresentados. Dentre os 11 benefícios destacados em verde, evidenciam-se três vantagens exclusivas da ferramenta concebida, a saber: estabelece critérios para aquisição de peças de reposição, permite o alinhamento entre os critérios de elegibilidade de PS para AM e os objetivos estratégicos da companhia para SPM, além de conceder aos decisores o livre-arbítrio para a seleção dos critérios de elegibilidade mais alinhados com os objetivos estratégicos da companhia. Ressalta-se que essas vantagens foram inseridas na metodologia criada com o propósito de aprimorar as tomadas de decisão dos decisores da companhia quanto ao SPM e às avaliações, feitas pelos decisores, dos componentes elegíveis para AM, além de tornar a ferramenta elaborada abrangedora, capaz de admitir a participação de pessoas com pouco ou nenhum conhecimento em AM.

De acordo com os critérios adotados para comparação, podem ser elencados os seguintes pontos de melhoria para a aprimorar a ferramenta criada: avaliação de estimativa

do ciclo de vida das PS produzidas por AM; comparação de custos de produção e logística, por exemplo, entre MA e manufatura convencional; disponibilização de banco de dados baseado em normas técnicas para tolerâncias de projeto orientado para AM. Segundo CARDEAL, LEITE e RIBEIRO (2023), avaliar a estimativa do ciclo de vida das PS feitas por AM facilita a implementação de estratégias aprimoradas de SPM e análise do impacto ambiental e econômico da introdução de AM nas cadeias de suprimentos. Comparar os custos de produção e logística entre AM e MC permite que a companhia avalie as vantagens competitivas que podem adquiridas com a adoção da manufatura aditiva (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022). A existência de um banco de dados baseado em normas técnicas para tolerâncias de projeto orientado para AM pode ser considerada um benefício para metodologias e *softwares* para avaliação e classificação de peças sobressalentes elegíveis para MA, pois, consoante RONCHINI, MORETTO e CANIATO (2023), a falta de padrões e especificações técnicas são consideradas barreiras operacionais para a admissão da AM para SPM.

Além de comparar a metodologia desenvolvida com outras metodologias publicadas previamente e com o *software* CASTOR, realizou-se uma segunda comparação da estrutura de trabalho concebida, desta vez com outros *softwares* comerciais disponíveis. Deste modo, pode-se examinar o nível de maturidade da metodologia criada, além das suas vantagens e desvantagens. A Tabela 18 divulga os julgamentos das comparações. Os critérios avaliados como positivos estão descritos com um “✓” (*check*) e sinalizados em verde. Já os critérios não atendidos estão marcados com um “x”. Usou-se “N/A” (não se aplica) para aquelas informações que não estão declaradas pelos *softwares*.

Observando a Tabela 18, é possível verificar que os *softwares* comerciais e a metodologia concebida são destinados para aplicações industriais e capazes de realizar análises de competitividade estratégica e viabilidade técnica das peças sobressalentes. Estes fatores visam o atendimento das necessidades de companhias que consideram soluções para uso da MA para aprimoramento do SPM, as quais auxiliam nas tomadas de decisão a nível gerencial. Destaca-se como vantagem competitiva da metodologia desenvolvida em comparação com os *softwares* comerciais a integração da AM com outros métodos de fabricação para a manufatura de peças sobressalentes, pois a AM aliada à manufatura convencional tem propósito reduzir custos e otimizar a produção destes tipos de componentes (MAHA 3D, 2021), além de combinar possibilidade de fabricar geometrias complexas, flexibilidade de combinação materiais e acabamento superficial superior com intuito de produzir peças de reposição em baixo volume de forma mais econômica (FRANSEN, 2019).

Já uma vantagem competitiva em destaque da *SPARE PARTS 3D*, em comparação à ferramenta criada (FRANÇA, 2024) e os outros *softwares* comerciais citados nesta dissertação, é a posse de propriedade intelectual sobre determinadas PS. Segundo o diretor-executivo da *SPARE PARTS 3D*, Paul Guillaumot, em entrevista concedida em 2019 ao canal de notícias francês *BFM Business TV Interview*, a empresa trabalha geralmente com fabricantes – e,

portanto, proprietários da propriedade intelectual – de PS (SPARE PARTS 3D, 2019). A posse da propriedade intelectual pode ser apontada como uma vantagem competitiva visto que ela é considerada uma das barreiras externas, descritas no Anexo 1, para adoção da MA pelas empresas (RONCHINI, MORETTO e CANIATO, 2023). Os *softwares* da DIMANEX, CASTOR e 3YOURMIND, por sua vez, não divulgaram se possuem ou não a propriedade intelectual de PS.

Tabela 17. Comparação entre metodologias e *software* CASTOR aplicados para seleção de peças elegíveis para AM.

Autor(es)	FRANÇA	CASTOR (Free Trial)	CARDEAL, LEITE e RIBEIRO	GHUGE, DOHALE e AKARTE	DIAS
Ano de publicação	2024	2017 ¹	2023	2022	2020
País de publicação	Brasil	Israel	Portugal	Índia	Brasil
Nº PS avaliadas	6	1	1	8	1
Nº Decisores	9	1	N/A ²	12	1
Aplica MCDM?	✓	N/A ²	✓	✓	✓
Nº de critérios de elegibilidade para AM	83	7 ³	5	35	12
Avalia critérios estratégicos para companhia?	✓	✓	✓	✓	✓
Avalia critérios técnicos de Engenharia da PS ou máquina/processo de AM?	✓	✓	✓	✓	✓
Avalia qualificação profissional dos decisores?	✓	x	x	✓	x
Estabelece critérios para aquisição de PS?	✓	x	x	x	x
Categoriza PS também para MC, DfAM ou MC + AM?	✓	x	x	✓	x
Avalia do nível de satisfação dos decisores?	✓	✓ ⁴	x	x	x
Avalia estimativa de ciclo de vida das PS feitas em AM?	x	x	x	✓	x
Compara custos de AM e MC?	x	x	x	✓	✓
Possui banco de dados baseado em normas técnicas para tolerâncias de projeto orientado para AM?	x	✓	x	x	x
Permite alinhamento entre os critérios de elegibilidade de PS para MA e os objetivos estratégicos da companhia para SPM?	✓	x	x	x	x
Permite de decisores escolham os critérios de elegibilidade mais alinhados com os objetivos estratégicos da companhia?	✓	x	x	x	x
Permite participação de decisores com pouco ou nenhum conhecimento em AM?	✓	✓	x	x	x

Notas:

¹ Ano de fundação da companhia; ² Informação não declarada; ³ Quantidade de informações que precisam ser preenchidas ou selecionadas para que o software CASTOR avalie as peças desejadas.; ⁴ Após a realizados dos estudos de caso, um funcionário da empresa enviou um e-mail solicitando um feedback do software.

Fonte: Adaptado de DIAS, 2020; GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022; CARDEAL, LEITE e RIBEIRO, 2023; CASTOR, 2024

Portanto, os quatro programas possuem os seguintes pontos em comum que são vantajosos em comparação à metodologia criada: são próprios, isto é, desenvolvidos exclusivamente pelas empresas; são comercializados, ou seja, estão disponíveis no mercado para aquisição; e possuem banco de dados de peças com especificações técnicas orientadas para a fabricação das PS por AM. Portanto, a partir dos pontos elencados anteriormente, pode-se inferir que os *softwares* comerciais apresentados nesta dissertação (Tabela 18) possuem um nível de maturidade tecnológica acima da metodologia desenvolvida, o que os torna mais adequados para as companhias que desejam soluções mais profissionais e imediatas para o seu SPM.

Tabela 18. Comparação entre metodologia desenvolvida e softwares para seleção de PS elegíveis para AM.

Autor(es)	FRANÇA	SPARE PARTS 3D	DIMANEX	CASTOR	3YOURMIND
Nacionalidade	Brasil	França e Cingapura	Holanda	Israel	EUA e Alemanha
Ano de lançamento/publicação	2024	2015	2015	2017	2014
Metodologia comercializada	x	✓	✓	✓	✓
Existência de banco de dados técnicos de AM	x ¹	✓	✓	✓	✓
<i>Softwares</i> utilizados	<i>Microsoft Excel e AHP On-line</i>	Próprio	Próprio	Próprio	Próprio
Tecnologia embarcada	x	<i>Machine Learning</i>	<i>Machine Learning</i>	N/A ³	N/A
Aplicações industriais	✓	✓	✓	✓	✓
Análises de competitividade estratégica e viabilidade técnica das PS	✓	✓	✓	✓	✓
Considera integração da MA com outros métodos de fabricação	✓	x	x	x	x
Possui propriedade intelectual sobre PS	x	✓ ²	N/A	N/A	N/A

Notas:

¹ Na ausência das especificações técnicas das peças sobressalentes e de indicadores de processos produtivos, a metodologia desenvolvida permite o uso da experiência profissional para seleção e classificação das PS elegíveis para AM; ² Empresa trabalha com propriedade intelectual de peças sobressalente, segundo o diretor executivo da SPARE PARTS 3D, Paul Guillaumot, em entrevista ao BFM Business TV Interview (França); ³ Informação não declarada.

Fonte: Adaptado de SPARE PARTS 3D, 2023; DIMANEX, 2023; PITCHBOOK, 2024; CASTOR, 2024

Estima-se que o investimento necessário para aplicação da metodologia para avaliação de um *case* é equivalente a R\$ 341,95. Esta quantia baseia-se no valor de quatro horas de mão de obra de um pesquisador nível 1 do SENAI CIMATEC (R\$ 71,24/hora), além de considerar 5% de Imposto sobre serviços (ISS) e 15% referente ao Imposto sobre a renda das pessoas jurídicas (IRPJ) como encargos atuantes sobre a prestação de serviços. A Tabela 19 detalha a estimativa de investimento para aplicação da metodologia para um *case*.

Tabela 19. Estimativa de investimento para aplicação da metodologia para um *case*.

Descrição	QTD	UND	Investimento (R\$)	
1. Mão de obra	4	horas técnicas	R\$	284,96
<i>1.1. Avaliação dos fatores motrizes e barreiras para a adoção da AM</i>	<i>1</i>	<i>hora técnica</i>	<i>R\$</i>	<i>71,24</i>
<i>1.2. Aplicação do método AHP para o case definido</i>	<i>1</i>	<i>hora técnica</i>	<i>R\$</i>	<i>71,24</i>
<i>1.3. Realização de normalizações e Matriz de Categorização para o case definido</i>	<i>1</i>	<i>hora técnica</i>	<i>R\$</i>	<i>71,24</i>
<i>1.4. Consultoria de acompanhamento até finalização do projeto</i>	<i>1</i>	<i>hora técnica</i>	<i>R\$</i>	<i>71,24</i>
2. Encargos				
<i>2.1. Imposto sobre serviços (ISS)</i>	<i>5</i>	<i>%</i>	<i>R\$</i>	<i>14,25</i>
<i>2.2. Imposto sobre a renda das pessoas jurídicas (IRPJ)</i>	<i>15</i>	<i>%</i>	<i>R\$</i>	<i>42,74</i>
Total			R\$	341,95

Fonte: Autoria própria, 2024

5 Conclusões

A metodologia elaborada para classificar e selecionar de PS elegíveis para AM e destinadas a aplicações industriais foi desenvolvida a partir de uma revisão sistemática da literatura e de boas práticas aplicadas nos processos de desenvolvimento de produtos. Concebida mediante essas diretrizes, a metodologia apresentou resultados contundentes uma vez que foi validada por meio da aplicação de 12 estudos de casos realizados em duas companhias de diferentes ramos industriais, a saber: petróleo e gás, empresa cliente do SENAI CIMATEC; e construção civil, com atuação em infraestrutura e pavimentação, através da PAVNORTE CONSTRUTORA.

O I.S. da metodologia desenvolvida foi de 98% para os decisores do SENAI CIMATEC, e 100% para os participantes dos cases realizados para a PAVNORTE CONSTRUTORA. O I.S. acumulado, que levou em consideração todos decisores das duas companhias, foi de 98%. Estes resultados mostram um nível de satisfação com a metodologia classificado como “Excelente”. Salienta-se que não foi divulgado, na revisão da literatura realizada, um índice capaz de avaliar o nível de satisfação dos decisores participantes dos processos decisórios de elegibilidade de peças para AM, demonstrando uma característica exclusiva da metodologia apresentada.

O tempo de aplicação da metodologia concebida foi diretamente influenciado pelo conhecimento dos decisores sobre o método multicritério para tomada de decisão AHP, os fatores motrizes e barreiras para a sua adoção AM, bem como as suas tecnologias de fabricação. Para reduzir o tempo de aplicação da metodologia elaborada, pode-se incorporar treinamentos prévios com aqueles decisores que desconhecem ou saibam pouco sobre a AM e o AHP. Ademais, outros métodos multicritérios, como aqueles apresentados na Figura 7, podem ser aplicados para auxiliar as tomadas de decisão dos decisores, contanto que as etapas definidas para a metodologia elaborada não sejam descaracterizadas.

A fim de eliminar as incertezas e subjetividade dos processos avaliativos e decisórios inerentes aos estudos de caso e à ferramenta criada, sugere-se aplicar as seguintes soluções: realizar os estudos de caso com profissionais mais qualificados, em maior quantidade (acima de três decisores) e convidar os clientes dos projetos para que participem diretamente da aplicação da metodologia desenvolvida. Além disso, pode-se reduzir a subjetividade dos decisores inerente às análises intermediárias da metodologia utilizando o método de normalização objetivas através da aplicação de dados ou indicadores mensuráveis à técnica de transformação de escala linear min-máx para os CEs objetivos e à abordagem *fuzzy* para os CTs objetivos.

Destacam-se como vantagens competitivas da ferramenta a determinação de critérios para aquisição de PS, que é capaz de alinhar os critérios de elegibilidade de PS para MA com os objetivos estratégicos da companhia para gerenciamento de peças de reposição, além de conceder aos decisores o livre-arbítrio quanto a seleção dos critérios de elegibilidade mais alinhados com os objetivos estratégicos da companhia. O baixo custo, estimado em R\$ 341,95,

para implementação da metodologia também se destaca como uma vantagem competitiva diante dos elevados custos com os *softwares* existentes no mercado. Os pontos de melhoria evidenciados foram baixo nível de maturidade tecnológica, quando comparada com os *softwares* comerciais existentes e apresentados nesta dissertação, além de não fornecer uma estimativa do ciclo de vida das peças sobressalentes produzidas por MA, comparar os custos de produção e logística entre MA e MC, disponibilizar de banco de dados baseado em normas técnicas para tolerâncias de projeto orientado para MA.

Uma vez que existem *softwares* dedicados para classificação e seleção de peças sobressalentes destinadas para aplicações industriais disponíveis comercialmente, a metodologia desenvolvida torna-se uma ferramenta mais recomendada para as empresas de pequeno e médio porte, ou seja, que não possuem capital financeiro suficiente para adquirir os programas existentes ou adquirir máquinas capazes de fabricar peças por AM, ou que não estão tecnicamente estruturadas para adoção da AM como alternativa para o SPM, isto é, ou não realizam a gestão das próprias peças sobressalentes, ou não possuem conhecimento técnico suficiente em AM para auxiliar nas análises de viabilidade de produção de peças por AM.

Portanto, a metodologia desenvolvida mostrou-se como uma ferramenta analítica promissora para seleção e classificação de PS elegíveis para AM e destinadas a aplicações industriais, sendo uma alternativa viável para o SPM, apesar de necessitar de melhorias para torná-la mais competitiva. Além disso, a metodologia é capaz de auxiliar no processo decisório de equipes de projeto quanto à estocagem uma PS em um inventário digital. Essas evidências foram validadas por meio dos seis estudos de caso realizados para duas companhias de ramos industriais distintos e contando com a participação de 12 profissionais previamente avaliados quanto às suas competências profissionais.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Os estudos de caso foram aplicados utilizando até três decisores. Contudo, a ferramenta prevê a participação de até 10 pessoas no processo de avaliação das PS elegíveis para AM. Assim sendo, sugere-se que novos *cases* sejam feitos para validar as quantidades mínima, máxima e ideal de pessoas para aplicação da metodologia. Ademais, com a adoção desta prática poderia ser reduzida a subjetividade intrínseca aos processos de análises e tomadas de decisão dos participantes durante a aplicação da metodologia.

Somente três dos 12 decisores que participaram dos estudos de caso possuíam conhecimento sobre AM e apenas um conhecia o método AHP. Além disso, nenhum dos decisores possuía um cargo de nível estratégico elevado nas companhias, como gerência ou direção. Em vista desta circunstância, é recomendado que novos estudos de caso sejam feitos para aferir o nível de influência, nos resultados da metodologia, das competências técnicas em AM e AHP, além da experiência profissional – no que se refere a cargos profissionais mais estratégicos – dos decisores.

Com exceção da meia hélice esquerda que foi admitida para elegível para AM, mas que deveria ser categorizada como um consumível – sendo, portanto, mais adequada para compra ao invés de fabricação –, as demais peças sobressalentes avaliadas pela ferramenta desenvolvida ficaram agrupadas entre os quadrantes “AM” e “MC + AM”. Portanto, sugere-se que sejam feitos mais estudos de caso para verificar a eficácia da metodologia quanto à avaliação das outras duas categorias existentes para as peças de reposição, a saber: MC e *DfAM*.

Adotou-se majoritariamente, para os seis *cases* analisados, a abordagem de normalização subjetiva a partir da escala *Linkert* de cinco pontos, demonstrada na Tabela 9. O método da transformação linear min-máx (Equação 1), concebido para os CEs objetivos, assim como a técnica *fuzzy* (Equação 2), idealizada para os CTs objetivos, foram pouco aplicados, uma vez que as companhias não dispunham de dados ou indicadores suficientes para normalizá-los objetivamente. Isto posto, novos *cases* são necessários para avaliar a eficácia ou a necessidade dos métodos de normalização transformação linear min-máx e técnica *fuzzy* para a metodologia.

O nível de maturidade tecnológica da metodologia é baixo quando comparada com alguns *softwares* comerciais existentes para avaliação de PS elegíveis para AM. Então, com o intuito de tornar a ferramenta concebida comercial, sugere-se a sua otimização, integrando tecnologias consolidadas, como o *Machine Learning*, e a inserção de um banco de dados contendo as seguintes informações: normas técnicas e processos de AM, pós-processamentos necessários, estimativas de volume de produção e demanda de peças de reposição, comparação entre os custos de produção e logística da AM com métodos de fabricação convencionais, além de propriedade intelectual de PS.

Sugere-se aplicar a ferramenta para estudos de casos que envolvam avaliação de PS elegíveis para a AM com finalidades acadêmicas para discentes com nível de formação superior ou médio com o intuito de avaliar a abrangência de aplicação da metodologia.

Referências

ABBASZADEH, Behzad et al. Development of a procedure for risk-based qualification of additively manufactured components: adopting to oil and gas industrial applications. **Applied Science**, Basileia, v. 12, n. 10313, p. 20. Out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122010313>.

ALFAIFY, Abdullah; et. al. Design for additive manufacturing: a systematic review. **Sustainability Journal**, Basileia, v. 12, n. 19, p. 7936-7958, Sep. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12197936>.

AKMAL et al. Switchover to industrial additive manufacturing: dynamic decision-making for problematic spare parts. **International Journal of Operations & Production Management**, Bingley, v. 42, n. 13, p. 358-384, Dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2021-0041>.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 20S**: additively manufactured metallic components for use in the petroleum and natural gas industries. Washington, 2021.

AMPOWER. **AMPOWER Report 2021**: Metal Additive Manufacturing Degree of Industrialization. Disponível em <<https://additive-manufacturing-report.com/report-2021/metal-am-industrialization-2021/#003>>. Acesso em 12 dez. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **O que são normas técnicas ABNT e para que servem?** Disponível em: < <https://www.abntcatalogo.com.br/faq.aspx>>. Acesso em: 15 Fev. 2023.

ATZENI, E.; SALMI, A. Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Nova York, v. 62, p. 1147–1155 Fev. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1>.

AYRE, C.; SCALLY, A. J. Critical Values for Lawshe's Content Validity Ratio: Revisiting the Original Methods of Calculation. **Measurement and Evaluation in Counseling and Development**, Oxfordshire, v. 47, n. 1, p. 79-86. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1177/0748175613513808>.

BÉCHET, E.; CUILLIERE, Marco; TROCHU, F. Generation of a finite element MESH from stereolithography (STL) files. **Computer-Aided Design**, Amsterdã, v. 34, n. 1. Jan. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(00\)00146-9](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(00)00146-9).

BLÖSCH-PAIDOSH, Alexandra; SHEA, Kristina. Design heuristics for additive manufacturing. **Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)**, v. 5: Design for X, Design to X, Vancouver. Aug. 2017. ISSN: 2220-4342.

BOMAG MARINI. **Vibro acabadora VDA 400 | VDA 421**. 201-?. Disponível em < https://www.luquips.com.br/downloads/VDA_400.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2024.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 13306**: maintenance — maintenance terminology. Bruxelas, 2017.

BROMBERGER, Jörg; ILG, Julian e MIRANDA, Ana Maria. The mainstreaming of additive manufacturing. **MCKINSEY & COMPANY**. 15 março 2022. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-mainstreaming-of-additive-manufacturing>>. Acesso em: 10 out. 2022.

BRU, Kristian. **A mathematical model for evaluating spare parts qualification costs considering different manufacturing technologies**. 2022. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial – Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia, Trondheim.

BPMSG. **Calculadora de Prioridade AHP**. 2022. Disponível em: <https://bpmsg.com/ahp/ahp-calc.php?lang=pt>>. Acesso em: 21 mar. 2024.

CALLISTER Jr., William D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2024.

CAPUTO, Andrea. Overcoming judgmental biases in negotiations: a scenario-based survey analysis on third party direct intervention. **Journal of Business Research**, Amsterdã, v. 69, n. 10, p. 4304-4312. Out. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.04.004>.

CALDERARO, Doulgas Rhoden. **Modelo de apoio à decisão para seleção de tecnologias de manufatura aditiva em sistemas produtivos**. 2019. Dissertação de Mestrado Engenharia de Produção e Sistemas – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

CALDERARO, D. R.; LACERDA, D. P.; VEIT, D. R. Selection of additive manufacturing technologies in productive systems: a decision support model. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 27, n.3, p. 1-45. Nov. 2019. DOI:<https://doi.org/10.1590/0104-530X5363-20>.

CASTOR. **CASTOR: Manufacturing Software**. 2024. Disponível em <<https://www.3dcastor.com/>>. Acesso em: 23 jan. 2024.

CASTOR. **Hi, ready to upload a new project?** 2024. Disponível em <<https://console.3dcastor.com/home/uploadProject>>. Acesso em: 23 jan. 2024.

CARDEAL, Gonçalo; LEITE, Marco; RIBEIRO, Inês. Decision-support model to select spare parts suitable for additive manufacturing. **Computers in Industry**, Amsterdã, v. 144, n. 103798. Out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103798>.

CHAUDHURI et al. Selecting spare parts suitable for additive manufacturing: a design science approach. **Production Planning & Control**, Oxfordshire, v. 32, n. 8, p. 670-687. Apr. 2020. DOI: <https://10.1080/09537287.2020.1751890>.

CORUZZOLO, A. M.; BALUGANI, E.; GAMBERINI, R. Spare parts management with Additive Manufacturing (AM): a critical review. **IFAC-PapersOnLine**, Amsterdã, v. 55, n. 10, p. 1159-1164. Jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.546>.

CRAFTS, Trevor D. et al. Three-dimensional printing and its applications in otorhinolaryngology—head and neck surgery. **Otolaryngol Head Neck Surgery**, Washington, v. 156, n. 6, p. 999-1010. Nov. 2016. DOI: 10.1177/0194599816678372.

DE BERNARDI, Carlo et al. Additive manufacturing in the oil & gas industry and status update on the new api 20s standard "qualification of additively manufactured metallic materials for use in the petroleum and natural gas industries". **Offshore Technology Conference**. Houston. Mai. 2020. DOI: <https://doi.org/10.4043/30603-MS>.

DESPEISSE, M.; MINSHALL, T. Skills and education for additive manufacturing: a review of emerging issues. *In*: LÖDDING, H. et al. *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*. **IFIP Advances in Information and Communication Technology**, Hamburgo, v. 513. Set. 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_34

DELLOITE. **3D opportunity in aerospace and defense**: additive manufacturing takes flight. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-aerospace/DUP_706-3D-Opportunity-Aerospace-Defense_MASTER2.pdf>. Acesso em: 29 Jun. 2022.

DELLOITE. **Challenges of additive manufacturing**: why companies don't use additive manufacturing in serial production. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/operations/Deloitte_Challenges_of_Additive_Manufacturing.pdf>. Acesso em: 29 Jun. 2022.

DET NORSKE VERITAS HOLDING AS. **Additive manufacturing standards and guidelines**. 2021. Disponível em: <<https://www.dnv.com/oilgas/additive-manufacturing/standards-guidelines.html>>. Acesso em: 20 Jun. 2022.

DET NORSKE VERITAS HOLDING AS. **DNV-CG-0197**: additive manufacturing – qualification and certification process for materials and components. Høvik, 2021.

DET NORSKE VERITAS HOLDING AS. **DNV-BT-203**: additive manufacturing of metallic parts. Høvik, 2022.

DIAS, Pedro Henrique Fonteles. **Processo de seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D para reparos de danos de combate em aeronaves**. 2020. Dissertação de Mestrado Profissional em Segurança Aeronáutica e Aeronavegabilidade Continuada – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

DIMANEX. **Dimanex converts traditional, physical supply chains into future proof, digital supply chains**. Disponível em <<https://www.dimanex.com>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

DOHALE, V. et al. Examining the barriers to operationalization of humanitarian supply chains: lessons learned from COVID-19 crisis. **Annals of Operations Research**, v. 335, p. 1137–1176. Mai. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04752-x>.

EMOVON, I.; NORMAN, R. A.; MURPHY, A. J. Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 29, p. 519–531. Jul. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1133-6>.

FELIX, Luiz Antonio Girianelli. **Potencial disruptivo da manufatura aditiva - Influência nas cadeias de suprimentos e uma aplicação na Marinha do Brasil**. 2017. Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Pontífica Universidade Católica, Rio de Janeiro.

FONTANIVE, Fernanda et al. Aplicação do método de análise multicriterial ahp como ferramenta de apoio a tomada de decisão. **Revista Espacios**, Caracas, v. 38, n. 19, p. 6-23. Nov. 2016. DOI: <https://10.48082/espacios-a17v38n19p06>

FRANCISCHINI, Paulino G.; FRANCISCHINI, Andresa. **Indicadores de desempenho: dos objetivos à ação — métodos para elabora KPIs e obter resultados**. Alta Books: Rio de Janeiro, 2017.

FRANSEN et al. In search for classification and selection of spare parts suitable for additive manufacturing: a literature review. **International Journal of Production Research**, Oxfordshire, v. 58, n. 4, p. 970-996. Abr. 2019. DOI: <https://10.1080/00207543.2019.1605226>.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

GILBERT, Gregory E.; ION, Susan. Making Sense of Methods and Measurement: Lawshe's Content Validity Index. *Clinical Simulation in Nursing*, Chicago, v. 12, n. 12, p. 530-531. Set. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecns.2016.08.002>.

GHUGE, DOHALE and AKARTE. Spare part segmentation for additive manufacturing – A framework. **Computers & Industrial Engineering**, Amsterdã, v. 169, n. 10827. May. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108277>.

GLAS, A. H.; MEYER, M. M.; EßIG, M. Business Models for Additive Manufacturing: A Strategic View from a Procurement Perspective. *In: Meboldt, M.; Klahn, C. Industrializing Additive Manufacturing*. AMPA: International Conference on Additive Manufacturing in Products and Applications. Basiléia, 2020, p. 483–499. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54334-1_34.

GOH, G.D.; SING, S.L.; YEONG, W.Y. A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges. **Artificial Intelligence Review**, Basiléia, v. 54, p. 63–94. Jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09876-9>.

GOKHARE, Vinod G.; RAUT, D. N.; SHINDE, D. K. A review paper on 3d-printing aspects and various processes used in the 3d-printing. **International Journal of Engineering Research & Technology**, Mumbai, v. 6, n. 6, p. 953-958. Jun. 2017. DOI: [IJERTV6IS060409](https://doi.org/10.1007/s10462-020-09876-9)

GOMEZ, P.; RATCLIFF, R.; PEREA, M. A model of the go/no-go task. **Journal of Experimental Psychology: General**, Washington, v.136, n. 3, p. 389-413. Ago. 2007. DOI: [10.1037/0096-3445.136.3.389](https://doi.org/10.1037/0096-3445.136.3.389).

GROOVER, Mikell P. **Fundamentos da Moderna Manufatura**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

HIEBLER, Felix. **Investigation of Additive Manufacturing of Components for the Oil & Gas Industry**. 2020. Master's Thesis (Chair of Drilling and Completion Engineering). Montanuniversität Leoben, Leoben, 2020.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Risk management**: risk assessment techniques. Genebra, 2019.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Spare parts provisioning**. Genebra, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Standards by ISO/TC 261**: additive manufacturing. Disponível em: <<https://www.iso.org/committee/629086/x/catalogue/>>. Acesso em: 20 Jun. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/ASTM additive manufacturing standards structure**. Disponível em: <<https://committee.iso.org/sites/tc261/home/projects.html>>. Acesso em: 15 Fev. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ISO/ASTM 52910**: Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing. Geneva, 2017.

KAWALKAR, Rajat; DUBEY, Harrsh Kumar; LOKHANDE, Satish P. A review for advancements in standardization for additive manufacturing. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdã, v. 50, Parte 5, p. 1983-1990, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.333>.

KATO, Koji; ADACHI, Koshi. Wear Mechanisms. In: BUSHAN, Bharat. **Modern tribology handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

KIM, Hoejin; LIN, Yirong; TSENG, Tzu-Liang Bill. A review on quality control in additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, Bingley, v. 24, n. 3, p. 645-669. Abr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2017-0048>.

KIM, Mincheol; Jang, Yong-Chul; LEE, Seunguk. Application of Delphi-AHP methods to select the priorities of WEEE for recycling in a waste management decision-making tool. **Journal of Environmental Management**, v. 128, p. 941-948. Jul. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.049>.

KNOFIUS, N.; van der HEIJDEN, M.C.; ZIJM, W.H.M. Selecting parts for additive manufacturing in service logistics. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Bingley, v. 27, n. 7, p. 915-931. Sep. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2016-0025>.

KODAMA, Hideo. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. **Review of Scientific Instruments**, Maryland, v. 52, n. 11, p. 1770-1773, Aug. 1981 DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1136492>.

KRETZSCHMAR, N. et al. J. Evaluating the readiness level of additively manufactured digital spare parts: an industrial perspective. **Applied Science**, Basiléia, v. 8, n. 10, p. 1837-1852. Out. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8101837>.

LASTRA et al. Spare Parts Made by Additive Manufacturing to Improve Preventive Maintenance. **Applied Science**, Basiléia, v. 12, n. 10564. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122010564>.

LAJARIN, S. F.; FISCHER, L. A. S.; VOLPATO, N. Projeto para manufatura aditiva: revisão. *In: Anais do 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, COBEF, Curitiba. 2021.

LAWSHE, C. H. A quantitative approach to content validity1. **Personnel psychology**, Nova Jersey, v. 28, n. 4, p. 563–575. 1975. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.1975.tb01393>.

LEARY, Martin. **Design for Additive Manufacturing**. 1 ed. Amsterdã: Elsevier, 2020.

LENGUA, C. A. G. History of Rapid Prototyping. *In: Farooqi, K. Rapid Prototyping in Cardiac Disease*. Basiléia, p. 3-7. 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-53523-4_1

LEZAMA-NICOLÁS et. al. A Bibliometric Method for Assessing Technological Maturity: The Case of Additive Manufacturing. **Scientometrics**, Basiléia, 17, n. 3, p. 1425-1452, Nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2941-1>.

LINDEMANN et al. Towards a sustainable and economic selection of part candidates for additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, Bingley, v. 21, n. 2, p. 216-227. Mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2014-0179>.

LYNN, M. R. Determination and quantification of content validity. **Nursing Research**, Filadélfia, 1986 Nov-Dec, v. 35, n. 6, p.382-385. DOI: <https://doi.org/10.1097/00006199-198611000-00017>.

MAHA 3D. **Manufatura aditiva x manufatura convencional**. 24 maio 2021. Disponível em: <[MARANHA, João et al. A decision-support framework for selecting additive manufacturing Technologies. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Bingley, v. 34, n. 7, p. 1279-1311. Out. 2023. DOI: 10.1108/JMTM-02-2023-0047.](https://maha3d.com/manufatura-aditiva-x-manufatura-convencional/#:~:text=Manufatura%20Aditiva%20aliada%20%C3%A0%20Manufatura%20Convencional&text=Portanto%2C%20em%20determinados%20projetos%2C%20torna,a%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20determinados%20componentes.>. Acesso em: 10 abr. 2024.</p></div><div data-bbox=)

MEDELLIN-CASTILLO, H.I.; ZARAGOZA-SIQUEIROS, J. Design and manufacturing strategies for fused deposition modelling in additive manufacturing: a review. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, Pequim, v. 32, n. 53, p. 1-16. Jun. 2019. <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0368-0>.

MEISEL, Nicholas A. et al. Decision support for additive manufacturing deployment in remote or austere environments. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Bingley, v. 27, n. 7, p. 898-914. Set. 2016. DOI: 10.1108/JMTM-06-2015-0040.

METAL AM. **API publishes Additive Manufacturing standards for natural gas & oil industry.** 2021. Disponível em: <<https://www.metal-am.com/api-publishes-additivemanufacturing-standards-for-natural-gas-oil-industry/>>. Acesso em: 27 Jun. 2022.

METAL AM. **ZEISS works with Brazil-based partners to evaluate AM processes for the oil and gas industry.** 2021. Disponível em: <<https://www.metal-am.com/zeissworks-with-brazil-based-partners-to-evaluate-am-processes-for-the-oil-and-gasindustry/>>. Acesso em: 31 Jul. 2023.

MUVUNZI, Rumbidzai; MPOFU, Khumbulani; DANIYAN, Ilesanmi. An Evaluation Model for Selecting Part Candidates for Additive Manufacturing in the Transport Sector. **Metals**, Basileia, v. 11, n. 5, p. 756-773. Mai. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11050765>.

NIAKI, Khorram et al. Economic sustainability of additive manufacturing: Contextual factors driving its performance in rapid prototyping. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Bingley, v. 30, n. 2, p. 353-365. Fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1108/JMTM-05-2018-0131>.

NORSK SOKKELS KONKURRANSEPOSISJON. **NORSOK Z-008: Risk based maintenance and consequence classification.** Lysaker, 2011.

NORTJE, Alicia. What Is Cognitive Bias? 7 Examples & Resources (Incl. Codex). **Positive CBT.** 5 agosto 2020. Disponível em: <<https://positivepsychology.com/cognitive-biases/#overcome>>. Acesso em: 4 abr. 2024.

PARRY, Elen J. BEST, Joshua M.; BANKS, Craig E. Three-dimensional (3D) scanning and additive manufacturing (AM) allows the fabrication of customised crutch grips. **Materials Today Communications**, Amsterdã, v. 25, n. 101225. Jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101225>.

PAVNORTE CONSTRUTORA. **Pavnorte construtora.** Disponível em: <<https://pavnorte.com.br/#>>. Acesso em: 25 mar. 2024.

PONFOORT, Onno; TATHGAR, Harsharn Singh. New horizons for additive manufacturing in the oil, gas and maritime industries. **METAL AM.** 4 setembro 2019. Disponível em: <<https://www.metal-am.com/articles/new-horizons-for-additive-manufacturing-in-the-oil-gas-and-maritime-industries/>>. Acesso em: 1 Jun. 2022.

RATAN, S.K.; ANAND T.; RATAN J. Formulation of research question – Stepwise approach. **Journal of Indian Association of Pediatric Surgeons**, Mumbai, v. 15, n. 1, p. 15-20. Jan-Mar. 2019. DOI: https://10.4103/jiaps.JIAPS_76_18.

RONCHINI, Alessio; MORETTO, Antonella Maria; CANIATO, Frederico. Adoption of additive manufacturing technology: drivers, barriers and impacts on upstream supply chain design. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, Bingley, v. 53, n. 4, p. 532-554. Jun. 23. DOI: [10.1108/IJPDLM-12-2021-0541](https://doi.org/10.1108/IJPDLM-12-2021-0541).

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, Oxford, v. 9, n. 3-5, p. 161-176. 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).

SAATY, Thomas L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, Hershey, v. 1, n. 1, 2008, p. 83-98. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>.

SAATY, Thomas L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, Amsterdã, v. 48, n. 1, 1990, p. 9-26. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-l](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-l).

SALDANHA, Luan. Spare Parts 3D: transformando a cadeia de fornecimento através da Impressão 3D. **MANUFATURA DIGITAL**. 10 novembro 2022. Disponível em: <<https://www.manufaturadigital.com/spare-parts-3d-transformando-a-cadeia-de-fornecimento-atraves-da-impressao-3d/>>. Acesso em: 15 mar. 2024.

SCIAKY INC. **The EBAM® 300 series produces the largest 3d printed metal parts & prototypes in the additive manufacturing market**. 2024. Disponível em: <<https://www.sciaky.com/largest-metal-3d-printer-available>>. Acesso em: 4 abr. 2024.

SEIFI, M. et al. Progress towards metal additive manufacturing standardization to support qualification and certification. **The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society**, Bingley, v. 69, p. 439–455. Fev. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2265-2>.

SENAI CIMATEC. **Sobre o CIMATEC**. Disponível em: <<https://www.senaicimatec.com.br/sobre/>>. Acesso em: 25 mar. 2024.

SILVA, Edna Lúcia da. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4 ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SIRESSHA, Merum et al. A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry. **RSC Advances**, Londres, v. 8, n. 22460. Jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8RA03194K>.

SGARBOSSA et al. Conventional or additive manufacturing for spare parts management: an extensive comparison for Poisson demand. **International Journal of Production Economics**, Amsterdã, v. 233, n. 107993. Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107993>.

SLATER, Neil James. DNV's additive manufacturing (3D printing) standard updated with new edition. **DET NORSKE VERITAS HOLDING AS**. 19 dezembro 2022. Disponível em: <<https://www.dnv.com/news/dnv-s-additive-manufacturing-3d-printing-standard-updated-with-new-edition-237085/>>. Acesso em: 20 Jun. 2022.

SPARE PARTS 3D. **BFM business tv interview - paul guillaumot, ceo, spare parts 3d**. YOUTUBE. 21 novembro 2018. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=QfrldGrWkRM>>. Acesso em: 2 dez 2023.

STROGATZ, Steve. **O poder do infinito**: como o cálculo revela os segredos do universo. Rio de Janeiro: Sextante, 2019.

SZILVÍSI-NAGY, M.; MÁTYÁSI, Gy. Analysis of STL files. **Mathematical and Computer Modelling**, Amsterdã, v. 38, n. 7-9, p. 945-960. Out. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(03\)90079-3](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(03)90079-3).

TAHERDOOST, Hamed; MADANCHIAN, Mitra. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. **Encyclopedia**, Basileia, v. 3, n. 1, p. 77-87. Jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>.

THOMAS-SEALE, L.E.J. et al. The barriers to the progression of additive manufacture: perspectives from UK industry. **International Journal of Production Economics**, Amsterdã, v. 198 p. 104-118. Fev. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.02.003>.

TEIXEIRA, Catarina; LOPES, Isabel; FIGUEIREDO, Manuel. Classification methodology for spare parts management combining maintenance and logistics perspectives. **Journal of Management Analytics**, Oxfordshire, v. 5, n. 2, p. 116-135. Fev. 2018. DOI: [10.1080/23270012.2018.1436989](https://doi.org/10.1080/23270012.2018.1436989).

TRACSUL EQUIPAMENTOS. **Vibroacabadoras de asfalto**: o que são, para que servem e modelos. 29 agosto 2022. Disponível em <<https://tracsul.com/maquinas-pesadas/vibroacabadoras-de-asfalto/#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20uma%20vibroacabadora,tratora%20e%20a%20de%20nivelamento.>>>. Acesso em: 10 abr. 2024.

VAF AEI, N.; RIBEIRO, R. A.; CAMARINHA-MATOS, L. M. Normalization techniques for multi-criteria decision making: analytical hierarchy process case study. *In*: CAMARINHA-MATOS, L.M., FALCÃO, A.J., VAF AEI, N., NAJDI, S. **Technological Innovation for Cyber-Physical Systems**. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Basileia, v. 470, 2016, p. 261–269. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-31165-4_26.

VAF AEI, N.; RIBEIRO, R. A.; CAMARINHA-MATOS, L. M. Selecting Normalization Techniques for the Analytical Hierarchy Process. *In*: CAMARINHA-MATOS, L.M., FALCÃO, A.J., VAF AEI, N., NAJDI, S. **Technological Innovation for Cyber-Physical Systems**. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Basileia, v. 577, 2020, p. 43-52 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-45124-0_4

VANEKER et al. Design for additive manufacturing: framework and methodology. **Manufacturing Technology**, Amsterdã, v. 69, n. 2, p. 578-599, Aug. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.006>.

VARGAS, Luis G. An overview of the analytic hierarchy process and its applications. **European Journal of Operational Research**, Amsterdã, v. 48, n. 1, 1990, p. 2-8. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90056-H](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90056-H).

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI-Standards**: Setting state-of the-art Benchmarks. Disponível em: < https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/page/4?tx_vdiguidelines_guidelinelist%5Bfilter%5D%5Borganizations%5D=&tx_vd

iguidelines_guidelinelist%5Bfilter%5D%5BpublicationMonth%5D=&tx_vdiguidelines_guidelinelist%5Bfilter%5D%5BpublicationYear%5D=&tx_vdiguidelines_guidelinelist%5Bfilter%5D%5BsearchTerm%5D=additive%20manufacturing%20&tx_vdiguidelines_guidelinelist%5Bfilter%5D%5Bstatus%5D=&cHash=f896cfe9bf1f25b9e04cd49d9fb1acf5#richtlinien>. Acesso em: 15 Fev. 2023.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva**: tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Blucher, 2017.

WIBERG, Anton; PERSSON, Johan; ÖLVANDER, Johan. An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and postprocessing. **Rapid Prototyping Journal**, Bingley, v. 27, n. 11, p. 90-105, Dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2021-0041>.

WILSON, F. R.; PAN, W.; SCHUMSKY, D. A. Recalculation of the Critical Values for Lawshe's Content Validity Ratio. **Measurement and Evaluation in Counseling and Development**, Oxfordshire v. 45, n. 3, p. 197–210. Mar. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1177/0748175612440286>.

WOHLERS, Terry; GORNET, Tim. **History of Additive Manufacturing**. Wohlers Report 2016-2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4474824>>. Acesso em: 31 Jul. 2023.

YANG, Sheng et al. Towards an automated decision support system for the identification of additive manufacturing part candidates. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Nova York, v. 31, p. 1917-1933. Fev. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01545-6>.

ZE CHEN et al. A review on qualification and certification for metal additive manufacturing. **Virtual and Physical Prototyping**, Oxfordshire, v. 17, n. 2, p. 382-405. DOI: [10.1080/17452759.2021.2018938](https://doi.org/10.1080/17452759.2021.2018938).

ZERBST, Uwe et al. Damage tolerant design of additively manufactured metallic components subjected to cyclic loading: state of the art and challenges. **Progress in Materials Science**, Amsterdã, v. 121, Ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100786>.

Anexo 1. Comparação entre os níveis de afinidade dos periódicos selecionados na literatura com os objetivos.

Título	Autor(es)	Ano	Abordagem dos critérios de elegibilidade aos temas					Nível de afinidade
			Estoque e Supply chain	Manufatura	Manutenção	Reprojeto	MCDM	
Towards a sustainable and economic selection of part candidates for AM	LINDEMANN et al.	2015		✓		✓		Baixo
Selecting parts for AM in service logistics	KNOFIUS, van der HEIJDEN e ZIJM	2016	✓	✓			✓	Moderado
In search for classification and selection of spare parts	FRANSEN et al.	2019	✓	✓	✓	✓		Alto
Processo de seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D para reparos de danos de combate em aeronaves	DIAS, Pedro Henrique Fonteles	2020	✓	✓	✓		✓	Alto
Selecting spare parts suitable for AM - A design science approach	CHAUDHURI et al.	2020	✓	✓			✓	Moderado

Spare part segmentation for additive manufacturing – A framework	GHUGE, DOHALE e AKARTE	2022	✓	✓	✓		✓	Alto
An Evaluation Model for Selecting Part Candidates for Additive Manufacturing in the Transport Sector	MUVUNZI, MPOFU e DANIYAN	2021		✓			✓	Moderado
Conventional or additive manufacturing for spare parts management: An extensive comparison for Poisson demand	SGARBOSSA et al.	2021		✓	✓			Baixo
Spare Parts Made by Additive Manufacturing to Improve Preventive Maintenance	LASTRA et al.	2022	✓	✓	✓			Moderado
Spare parts management with Additive Manufacturing (AM): a critical review	CORUZZOLO, BALUGANI e GAMBERINI	2022	✓	✓	✓		✓	Alto
Decision-support model to select spare parts suitable for AM	CARDEAL, LEITE e RIBEIRO	2023	✓	✓	✓		✓	Alto
Metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva e	FRANÇA, Arthur Gomes Lima	2024	✓	✓	✓		✓	Não se aplica

destinadas às aplicações industriais

Escala de nível de afinidade						
Muito baixo	✓					
Baixo	✓	✓				
Moderado	✓	✓		✓		
Alto	✓	✓		✓	✓	
Muito alto	✓	✓		✓	✓	✓

Fonte: Autoria própria (2024)

Anexo 2. Critérios para filtragem de peças sobressalentes.

Critério	Terminologia em inglês	Descrição	Justificativa	Referências
Consumibilidade	<i>Consumability</i>	Se PS é consumível ou não. Leva em consideração o tempo de vida útil da PS.	Geralmente apresenta baixo preço para aquisição de consumíveis no mercado.	CARDEAL, LEITE e RIBEIRO (2023)
Intercambialidade	<i>Interchangeability</i>	PS capaz de se adequar a equipamentos similares.	Geralmente apresenta baixo preço para aquisição de PS padronizadas no mercado.	RODA et al. (2014)
Contrato de manutenção	<i>Maintenance contract</i>	Prazo de vigência do contrato de manutenção da PS com fornecedores.	Fabricar PS com contratos vigentes configura-se como desvantagem financeira.	CARDEAL, LEITE e RIBEIRO (2023)
Montagem	<i>Assembly</i>	Nível de interação com outros componentes da máquina ou equipamento.	Avaliação da manufacturabilidade da PS.	CARDEAL, LEITE e RIBEIRO (2023); LASTRA et al. (2022)
Material	<i>Material</i>	O material específico do qual a PS é produzida.	Avaliação da disponibilidade de máquina capaz de fabricar PS por AM.	LINDEMANN et al. (2015); KNOFIUS, van der HEIJDEN e ZIJM (2016); FRANSEN et al. (2019); DIAS (2020); CHAUDHURI et al. (2020); LASTRA et al. (2022); CARDEAL, LEITE e RIBEIRO (2023)
Volume	<i>Volume / Build envelope volume</i>	O volume do componente sem embalagem.	Avaliação da disponibilidade de máquina capaz de fabricar PS por AM.	LINDEMANN et al. (2015); KNOFIUS, van der HEIJDEN e ZIJM (2016); FRANSEN et al. (2019); DIAS (2020); CHAUDHURI et al. (2020); LASTRA et al. (2022); GHUGE, DOHALE e AKARTE (2022)

Fonte: Autoria própria (2024)

Anexo 3. Resumo das Avaliações Go/No-Go dos estudos de caso.

Companhia	Case	Peça	Consumível	Intercambiável	Contrato Manutenção	Montagem	Volume estimado ¹	Material	Viável para AM
SENAI CIMATEC	1	Colar batente	Não	Não	Não	Não	< 0,06 m ³	Metálico	Sim
	2	Placa batente	Não	Não	Não	Não	< 0,06 m ³	Metálico	Sim
	3	Handle	Não	Não	Não	Não	< 0,06 m ³	Metálico	Sim
	6	Rolete	Não	Não	Não	Não	< 0,06 m ³	Metálico	Sim
PAVNORTE	4	Meia hélice esquerda	Sim	Sim	Não	Sim	1x10 ⁻³ m ³	Metálico	Não ²
	5	Engrenagem do esticador esquerdo	Não	Não	Não	Sim	7x10 ⁻⁸ m ³	Metálico	Sim ³

Notas:

¹ Não foi informado o volume exato das três peças avaliadas pelos profissionais do SENAI CIMATEC, porém eles informaram que o volume dessas peças era inferior a 0,06 m³.

² Meia hélice esquerda foi admitida para validação da metodologia apesar de não atender a três dos seis requisitos da Avaliação Go/No-Go.

³ Engrenagem do esticador esquerdo não atende ao requisito “montagem” da Avaliação Go/No-Go, porém foi considerada como viável para AM após os decisores da PAVNORTE avaliarem que essa peça possui um baixo nível de interação com a vibroacabadora, atuando com o eixo de transmissão do motor e a corrente da esteira transportadora.

Fonte: Autoria própria (2024)

Anexo 4. Resultado do método *Delphi* e cálculo do CVR dos critérios de elegibilidade selecionados pelos decisores para os estudos de caso.

	#	Case 1 - Colar Batente	N = 3		Case 2 - Placa Batente	N = 3	
			NPE	CVR		NPE	CVR
Critérios Estratégicos	1	Custos de inatividade (criticidade)	3	1,00	Confiabilidade de fornecimento	1	-0,33
	2	Especificidade	1	-0,33	Custos de inatividade (criticidade)	1	-0,33
	3	Previsibilidade do tempo de entrega	2	0,33	Disponibilidade (criticidade)	2	0,33
	4	Substituibilidade	2	0,33	Inventário / Estoque de segurança	3	1,00
	5	Tempo de espera / Tempo de espera médio / Prazo de reposição	2	0,33	Número de Fornecedores	1	-0,33
	6	Confiabilidade de fornecimento	1	-0,33	Previsão / Previsibilidade de demanda	1	-0,33
	7	Custos indiretos	1	-0,33	Previsibilidade / Probabilidade de falha / Durabilidade (criticidade)	2	0,33
	8	“Efeito dominó” (criticidade)	1	-0,33	Risco de falta de estoque	1	-0,33
	9	Previsibilidade / Probabilidade de falha / Durabilidade (criticidade)	1	-0,33	Capacidade de estoque / Armazenamento / Espaço do armazém	1	-0,33
	10				Especificidade	1	-0,33
	11				Localização Geográfica / Proximidade	1	-0,33
	12				Tempo de espera / Tempo de espera médio / Prazo de reposição	1	-0,33
	13				Custo de falta de estoque	1	-0,33
	14				Custo do inventário / Custo em estoque	1	-0,33
	15				Custos indiretos	1	-0,33
Critérios Técnicos de Engenharia	1	Complexidade	1	-0,33	Alongamento na ruptura	1	-0,33
	2	Resistência à água	2	0,33	Resistência à água	3	1,00
	3	Resistência à tração	2	0,33	Resistência à fadiga	2	0,33
	4	Tensão de escoamento	3	1,00	Resistência à tração	1	-0,33
	5	Tamanho das peças / Volume para impressão	3	1,00	Tensão de escoamento	1	-0,33
	6	Massa	1	-0,33	Confiabilidade	2	0,33
	7	Tipo de material	2	0,33	Tipo de material	1	-0,33
	8	Espessura da camada	1	-0,33	Espessura da camada	1	-0,33
	9	Acabamento da superfície / Rugosidade da superfície	1	-0,33	Precisão dimensional necessária	1	-0,33
	10	Relação resistência/peso e relação rigidez/peso	1	-0,33			

	#	Case 3 - Handle		Case 4 - Meia hélice esquerda			
		N = NPE	3 CVR	N = NPE	2 CVR		
Critérios Estratégicos	1	Peso da peça	3	1,00	Tipo de peça sobressalente	2	1,00
	2	Tempo de espera / Tempo de espera médio / Prazo de reposição	2	0,33	Custo de falta de estoque	2	1,00
	3	Substituibilidade	2	0,33	Disponibilidade de especificações técnicas	1	0,00
	4	Localização Geográfica / Proximidade	1	-0,33	Status atual do item	2	1,00
	5	Número de fornecedores	1	-0,33	Valor de consumo anual / consumo anual	2	1,00
	6	Perecibilidade	1	-0,33			
	7	Disponibilidade	1	-0,33			
	8	Inventário / Estoque de segurança	1	-0,33			
	9	Risco de falta de estoque	1	-0,33			
	10	Confiabilidade de fornecimento	1	-0,33			
	11	Criticidade do equipamento	1	-0,33			
	12	Previsão / Previsibilidade de demanda	1	-0,33			
	13	Quantidade média de pedidos	1	-0,33			
Critérios Técnicos de Engenharia	1	Complexidade	2	0,33	Propriedade térmica	2	1,00
	2	Relação resistência/peso e relação rigidez/peso	3	1,00	Relação resistência/peso e relação rigidez/peso	1	0,00
	3	Resistência à água	2	0,33	Resistência à fadiga	2	1,00
	4	Massa	2	0,33	Resistência à tração	1	0,00
	5	Confiabilidade	1	-0,33	Tensão de escoamento	2	1,00
	6	Precisão dimensional necessária	1	-0,33	Confiabilidade	1	0,00
	7	Tamanho das peças / Volume para impressão	1	-0,33	Velocidade de construção	1	0,00
	8	Remoção de material	1	-0,33			
	9	Tensão de escoamento	1	-0,33			
	10	Alongamento na ruptura	1	-0,33			

	#	Case 5 - Engrenagem do esticador esquerdo	N = 3		Case 6 - Rolete	N = 3	
			NPE	CVR		NPE	CVR
Critérios Estratégicos	1	Confiabilidade de fornecimento	1	-0,33	Crítico para o equipamento	3	1,00
	2	Disponibilidade (criticidade)	3	1,00	Custo unitário / Custo unitário médio / Preço unitário / Preço	3	1,00
	3	Inventário / Estoque de segurança	3	1,00	Previsibilidade / Probabilidade de falha / Durabilidade (criticidade)	3	0,33
	4	Substituibilidade	1	-0,33	Substituibilidade	2	1,00
	5	Tipo de peça sobressalente	3	1,00	Segurança externa e meio ambiente	1	-0,33
	6	Capacidade de estoque / Armazenamento / Espaço do armazém	1	-0,33	Volume de demanda	1	-0,33
	7	Criticidade do equipamento	2	0,33	Custos de certificação / qualificação	1	-0,33
	8	Custos de inatividade (criticidade)	2	0,33	Custos indiretos	1	-0,33
	9	Risco de falta de estoque	1	-0,33	Especificidade	1	-0,33
	10	Custo de falta de estoque	1	-0,33	Localização Geográfica	1	-0,33
	11	Tempo de espera / Tempo de espera médio / Prazo de reposição	1	-0,33	Tempo de troca de peças sobressalentes	1	-0,33
Critérios Técnicos de Engenharia	1	Confiabilidade	2	0,33	Acabamento da superfície / Rugosidade da superfície	2	0,33
	2	Precisão dimensional necessária	1	-0,33	Resistência à tração	2	0,33
	3	Resistência à tração	2	0,33	Precisão dimensional necessária	2	0,33
	4	Tensão de escoamento	1	-0,33	Confiabilidade	1	-0,33
	5	Resistência à fadiga	2	0,33	Relação resistência/peso e relação rigidez/peso	1	-0,33
	6	Relação resistência/peso e relação rigidez/peso	1	-0,33	Tensão de Escoamento	1	-0,33
	7	Massa	1	-0,33	Complexidade	1	-0,33
	8	Velocidade de construção	1	-0,33	Tamanho das peças / Volume para impressão	1	-0,33
	9	Propriedade intelectual	1	-0,33	Resolução / Tamanho mínimo do recurso	1	-0,33
	10				Tipo de material	1	-0,33
	11				Quantidade de peças para impressão	1	-0,33

Fonte: Autoria própria, 2024

Anexo 5. Formulário para avaliação da satisfação dos decisores com a metodologia desenvolvida.

Avaliação da "Metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva e destinadas às aplicações industriais"

Olá, estimado(a) avaliador(a)!

A seguir estão dispostas 6 perguntas e 1 espaço destinado para comentários gerais para que possa avaliar a "Metodologia para classificação e seleção de peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva e destinadas às aplicações industriais".

Agradeço antecipadamente pela sua participação!

** Indica uma pergunta obrigatória*

1. E-mail *

2. Como avaliar seu nível de satisfação geral com o processo de aplicação da metodologia? *

Marcar apenas uma oval.

- Insatisfeito
 Indiferente
 Satisfeito

3. Qual é a probabilidade de utilizar novamente a metodologia para a classificação e seleção de novas peças sobressalentes? *

Marcar apenas uma oval.

- Nenhuma
 Baixa
 Alta

4. Como avalia a eficiência da metodologia quanto à sua pretensão em classificar e selecionar peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva? *

Marcar apenas uma oval.

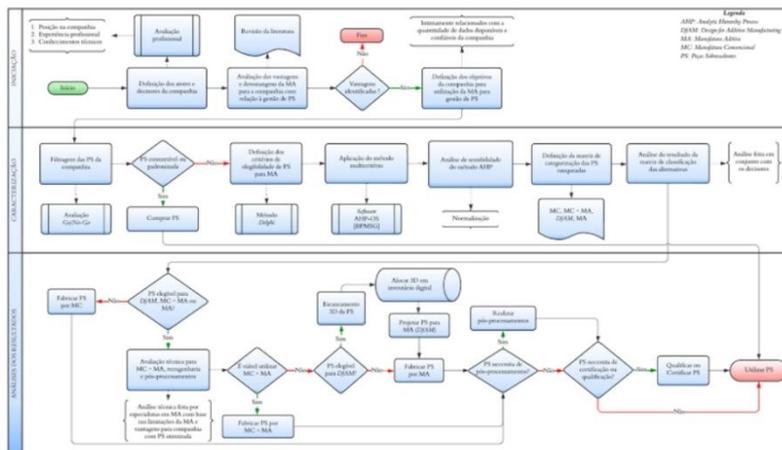
- Insatisfeito
 Indiferente
 Satisfeito

5. Como avaliar seu nível de satisfação com o tempo destinado para a aplicação da metodologia? *

Marcar apenas uma oval.

- Insatisfeito
 Indiferente
 Satisfeito

6. Como avaliar seu nível de facilidade para compreensão da metodologia? *



Marcar apenas uma oval.

- Insatisfeito
 Indiferente
 Satisfeito

7. Como avaliar seu nível de satisfação com o uso do software AHP-OS Calculator para realizar a *
priorização dos critérios estratégicos (CE) e critérios técnicos de Engenharia (CT)?

Calculadora de Prioridade AHP

Language: [English](#) [Deutsch](#) [Español](#) [Português](#)

Critério AHP

Selecione o número e nomes do critério, em seguida inicie a comparação entre pares para calcular as prioridades utilizando o Processo Analítico Hierárquico.

Selecione o número de critérios:

Entre com número e nomes (2 - 20) OK

Comparação entre pares

3 comparação entre o(s) par(es). Faça a comparação entre pares de todos os critérios. Quando completo, clique em *Verificar Consistência* para obter as prioridades.

Com relação a *AHP priorities*, qual critério é mais importante, e quanto mais em uma escala de 1 a 9?

A - wrt AHP priorities - or B?	Igual	Quanto mais?
1 <input checked="" type="radio"/> Crit-1 <input type="radio"/> Crit-2	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2 <input checked="" type="radio"/> Crit-1 <input type="radio"/> Crit-3	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3 <input checked="" type="radio"/> Crit-2 <input type="radio"/> Crit-3	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
CR = 0% Por favor inicie a comparação entre pares		
<input type="button" value="Calcular"/>		

Marcar apenas uma oval.

- Insatisfeito
- Indiferente
- Satisfeito

8. Caso avalie que a metodologia necessite de melhorias, registre-as a seguir. Caso contrário, *
responda "Não" a seguir.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

Fonte: Autoria própria (2024)

Anexo 6. Peso das perguntas do formulário de avaliação da satisfação dos decisores com metodologia.

Perguntas	Critérios de avaliação	Item do questionário de avaliação	Peso
P1	Interface com os decisores da companhia	Como avaliar seu nível de satisfação geral com o processo de aplicação da metodologia?	5%
P2	Reprodutibilidade	Qual é a probabilidade de utilizar novamente a metodologia para a classificação e seleção de novas peças sobressalentes?	15%
P3	Eficiência	Como avalia a eficiência da metodologia quanto à sua pretensão em classificar e selecionar peças sobressalentes elegíveis para manufatura aditiva?	35%
P4	Tempo de resposta	Como avaliar seu nível de satisfação com o tempo destinado para a aplicação da metodologia?	5%
P5	Simplicidade para compreensão das etapas	Como avaliar seu nível de facilidade para compreensão da metodologia?	20%
P6	Simplicidade para aplicação do método AHP	Como avaliar seu nível de satisfação com o uso do software AHP-OS Calculator para realizar a priorização dos critérios estratégicos (CE) e critérios técnicos de Engenharia (CT)?	20%
			100%

Fonte: Autoria própria, 2024

Anexo 7. Normalização das respostas do formulário de avaliação da satisfação dos decisores com a metodologia.

Normalização das respostas do formulário de satisfação

Perguntas	Peso	SENAI CIMATEC									PAVNORTE		
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D10	D11	D12	D7	D8	D9
P1	5%	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
P2	15%	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4
P3	35%	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
P4	5%	4	2	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4
P5	20%	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4
P6	20%	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Σ	100%	4,0	3,9	4,0	4,0	3,2	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
I.S. por companhia		98%									100%		
I.S. Acumulado		98%											

Conversão das respostas do formulário em números

Insatisfeito / Nenhuma	0
Indiferente / Baixa	2
Satisfeito / Alta	4

Fonte: Autoria própria (2024)

Anexo 8. Análises dos *feedbacks* dos decisores após preenchimento do formulário de satisfação.

Decisor	Feedback	Análise
D1	Não.	Não se aplica.
D2	"Necessidade de utilização de fluxogramas mais simplificados para sinalizar cada etapa da metodologia para o participante".	Existem fluxogramas mais simplificados (Avaliação Go/No-Go, Método Delphi, por exemplo) para facilitar a compreensão das etapas intermediárias da metodologia.
D3	Não.	Não se aplica.
D4	Não.	Não se aplica.
D5	"Uma maior facilidade de selecionar os critérios seria interessante".	Um meio para facilitar a seleção dos critérios é reduzindo a quantidade disponível com base naqueles mais comuns para o gerenciamento das peças sobressalentes das empresas. Contudo, esta ação pode eximir as particularidades gerenciais de cada companhia quanto às suas práticas e indicadores relativos às peças de reposição.
D6	"Um tempo reduzido para a aplicação ajudaria a implementá-la (metodologia) a maior quantidade de componentes".	Uma vez que os decisores conhecem a metodologia, o tempo de sua aplicação é reduzido, como pode ser verificado a duração dos estudos de caso 1 e 2. Além disso, uma vez que os participantes conhecem a avaliação pareada de critérios do método AHP, o período de aplicação da metodologia também é reduzido, como pode ser verificado no estudo de caso 3. Outra maneira de reduzir o intervalo de tempo para realização da metodologia é otimizando o agrupamento dos critérios selecionados pelos decisores para apenas um documento, o qual pode, posteriormente, validar esses critérios de imediato, a partir do cálculo do CVR, e, num próximo passo, inserir aqueles critérios validados no método AHP para a realização da comparação pareada deles pelos participantes.
D7	"Pesquisa realizada de forma satisfatória, deve-se determinar com maior precisão o objeto a ser estudado, o qual irá depender mais de quem disponibiliza os dados, do que quem os avalia".	Decisor percebe a importância da disponibilização de dados da companhia para que os resultados da metodologia sejam mais acurados.
D8	Não.	Não se aplica.
D9	Não.	Não se aplica.
D10	"Seria interessante adicionar uma etapa em trabalhos futuros tentando definir o melhor processo com base nos critérios estratégicos técnicos.	A definição do melhor processo de fabricação das peças está contemplada na macro etapa "Análises dos Resultados" da metodologia desenvolvida.
D11	Não.	Não se aplica.
D12	Não.	Não se aplica.

Fonte: Autoria própria, 2024

Anexo 9. Resultado das normalizações dos critérios estratégicos e técnicos de engenharia.

Peça 1 - Colar batente								
	Critérios	Peso AHP	Min.	Ideal	Máx.	Normalização	Peso AHP x Normalização	
CEs	Objetivos	Previsibilidade do tempo de entrega	0,042	60	90	120	0,50	0,02
	Subjetivos	Custos de inatividade (criticidade)	0,692		Alto		0,51	0,35
		Substituibilidade	0,169		Médio		0,25	0,04
		Tempo de espera / Tempo de espera médio / Prazo de reposição	0,096		Alto		0,51	0,05
						Σ	0,47	
CTs	Subjetivos	Resistência à água	0,125		Alto		0,51	0,06
		Resistência à tração	0,272		Muito alto		1,00	0,27
		Tensão de escoamento	0,368		Muito alto		1,00	0,37
		Tamanho das peças / Volume para impressão	0,029		Médio		0,25	0,01
		Tipo de material	0,207		Alto		0,51	0,11
						Σ	0,82	

Peça 2 - Placa batente						
	Critérios	Peso AHP	Ideal	Normalização	Peso AHP x Normalização	
CEs	Subjetivos	Disponibilidade (criticidade)	0,471	Alto	0,51	0,24
		Inventário / Estoque de segurança	0,059	Médio	0,25	0,01
		Previsibilidade / Probabilidade de falha / Durabilidade (criticidade)	0,471	Alto	0,51	0,24
						Σ
CTs	Subjetivos	Resistência à água	0,361	Muito alto	1,00	0,36
		Resistência à fadiga	0,065	Médio	0,25	0,02
		Confiabilidade	0,574	Alto	0,51	0,29
					Σ	0,67

Peça 3 - Handle								
	Critérios	Peso AHP	Min.	Ideal	Máx.	Normalização	Peso AHP x Normalização	
CEs	Objetivos	Peso da peça	0,691	1,5	6,75	12	0,50	0,35
	Subjetivos	Tempo de espera / Tempo de espera médio / Prazo de reposição	0,091		Muito alto		1,00	0,09
		Substituibilidade	0,218		Baixo		0,12	0,03
								Σ
CTs	Objetivos	Massa	0,109	1,5	6,75	12	1,00	0,11
								Min. Des. < Ideal < Máx. Des. ∴ (i) Norm_CT₁ = 1
	Subjetivos	Complexidade	0,043		Muito baixo		0,08	0,00
		Relação resistência/peso e relação rigidez/peso	0,384		Alto		0,51	0,20
		Resistência à água	0,464		Muito alto		1,00	0,46
						Σ	0,77	

Peça 4 - Meia hélice esquerda						
	Critérios	Peso AHP	Ideal	Normalização	Peso AHP x Normalização	
CEs	Subjetivos	Custo de falta de estoque	0,591	Muito alto	1,00	0,59
		Status atual do item	0,308	Alto	0,51	0,16
		Tipo de peça sobressalente	0,051	Baixo	0,12	0,01
		Valor de consumo anual	0,05	Muito baixo	0,08	0,00
					Σ	0,76
CTs	Subjetivos	Resistência à fadiga	0,649	Muito alto	1,00	0,65
		Tensão de escoamento	0,279	Alto	0,51	0,14
		Propriedade térmica	0,072	Médio	0,25	0,02
						Σ

Peça 5 - Engrenagem do esticador esquerdo						
	Critérios	Peso AHP	Ideal	Normalização	Peso AHP x Normalização	
CEs	Subjetivos	Disponibilidade (criticidade)	0,291	Alto	0,51	0,15
		Inventário / Estoque de segurança	0,066	Médio	0,25	0,02
		Tipo de peça sobressalente	0,037	Baixo	0,12	0,00
		Criticidade do equipamento	0,291	Alto	0,51	0,15
		Custos de inatividade (criticidade)	0,316	Muito alto	1,00	0,32
					Σ	0,63
CTs	Subjetivos	Confiabilidade	0,731	Muito alto	1,00	0,73
		Resistência à fadiga	0,188	Alto	0,51	0,10
		Resistência à tração	0,081	Médio	0,25	0,02
					Σ	0,85

Peça 6 - Placa batente						
	Critérios	Peso AHP	Ideal	Normalização	Peso AHP x Normalização	
CEs	Subjetivos	Probabilidade de falha	0,433	Muito alto	1,00	0,43
		Crítico para o equipamento	0,384	Muito alto	1,00	0,38
		Substituibilidade	0,143	Médio	0,25	0,04
		Custo unitário	0,04	Baixo	0,12	0,00
					Σ	0,86
CTs	Subjetivos	Acabamento da superfície	0,455	Muito alto	1,00	0,46
		Precisão dimensional necessária	0,455	Muito alto	1,00	0,46
		Resistência à tração	0,091	Médio	0,25	0,02
					Σ	0,93

Fonte: Autoria própria (2024)

Anexo 10. Resultados do *software* CASTOR para meia hélice esquerda.

CASTOR You have reached the limit of uploads for this trial version. Please contact us to unlock your account.

meia_helice_esquerda Analysis Home > Projects > Meia hélice esquerda > meia_helice_esquerda

Best Match

BUY/FLY (?)

Result
Printable with changes

Cost estimation
Production cost: \$1,392 - 1,898
Total cost of ownership: \$1,587 - 2,149
Product life cycle: Low volume production (Qty: 6)

Lead time
4 days
for first shipment

Recommended printer
X160Pro

Material Analysis **Geometry Analysis** Cost Analysis

- ✓ Part size Dimensions are 325.49 x 165 x 140 mm, volume i
- ✓ Thickness The part passed 2 mm minimal thickness test.
- ✓ Tolerance No tolerance requirement set in CAD file or by use
- ✓ Holes Smallest hole detected is 20 mm in diameter.

Choose Orientation 3D

Pesquisar

Fonte: Autoria própria, 2024

Anexo 11 - Resultados do *software* CASTOR para engrenagem do esticador esquerdo.

CASTOR You have reached the limit of uploads for this trial version. Please contact us to unlock your

sprocket wheel Analysis Home > Projects > Sprocket Wheel > sprocket wheel

Upload Project

My Projects

Sprocket Wheel

Best Match

Result
✔️ Printable with changes

Cost estimation
Production cost: \$494 - 676
Total cost of ownership: \$944 - 1,242
Product life cycle: Low volume production (Qty: 1)

Lead time
4 days
for first shipment

Material Analysis

Geometry Analysis

✔️ Part size	Dimensions are 177.78 x 176.69
✔️ Thickness	The part passed 2 mm minimal t
✔️ Tolerance	No tolerance requirement set in C
✔️ Holes	Smallest hole detected is 70 mm

Choose Orientation 3D

Windows taskbar: Start, Search, Word, Clock, PDF, Mail, Chrome, File Explorer, Task View

Fonte: Autoria própria, 2024

Anexo 12. Resultados do *software* CASTOR para bucha da engrenagem do esticador esquerdo.

The screenshot displays the CASTOR software interface for a 'sleeve Analysis'. A pink banner at the top indicates: 'You have reached the limit of uploads for this trial version. Please contact us to unlock your a'. The interface includes a sidebar with 'Upload Project', 'My Projects', and 'Sprocket Wheel' containing a 'sleeve' sub-item. The main area shows a 'Best Match' dropdown and several analysis cards:

- Result:** Printable with changes
- Cost estimation:** Production cost: \$287 - 381; Total cost of ownership: \$601 - 757; Product life cycle: Low volume production (Qty: 1)
- Lead time:** 4 days for first shipment

Below these cards is a 3D model of the sleeve part with a coordinate system (x, y, z). To the right, the 'Geometry Analysis' tab is active, showing a list of checks:

Material Analysis	Geometry Analysis	Co:
✓ Part size	Dimensions are 70 x 70 x 38.10 mm	
✓ Thickness	The part passed 0.5 mm minimal th	
✓ Tolerance	No tolerance requirement set in CAI	
✓ Holes	Smallest hole detected is 50 mm in	

At the bottom of the interface, there are buttons for 'Choose Orientation' and '3D'. The Windows taskbar at the very bottom shows the search bar 'Pesquisar' and various application icons.

Fonte: Autoria própria, 2024

Anexo 13. Analytic Hierarchy Process (AHP).

Em concordância com SAATY (2008), os seres humanos são, consciente ou inconscientemente, tomadores de decisões e, para cumprir com esta função biológica e social, necessitam de informações. Porém, nem todas as informações coletadas são úteis para realizar um julgamento coerente ou satisfatório. Além disso, para tomar uma decisão é fundamental conhecer: o problema a ser solucionado; a necessidade, o propósito, os critérios e subcritérios dessa decisão; o que ou quem serão afetados pela escolha a ser tomada; e as ações alternativas a tomar. Portanto, ao tentar decidir a melhor alternativa possível para solucionar um problema ou necessidade, os seres humanos necessitam analisar as informações disponíveis e circunstâncias existentes a fim de priorizar aquelas alternativas mais adequadas para decisão a ser tomada. Nesse contexto, os métodos multicritérios para tomada de decisão - do inglês, *multi-criteria decision-making* (MCDM) - são considerados os principais métodos para tomada de decisão quando a finalidade é determinar a melhor alternativa considerando mais de um critério a ser julgado durante o processo de seleção (TAHERDOOST e MADANCHIAN, 2023). Dentre os MCDMs, destaca-se o método denominado Processo Analítico Hierárquico, do inglês *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

Para realizar as comparações pareadas, SAATY (2008) definiu uma escala de números, descrita na Tabela 20, com o intuito de designar quão importante ou dominante um elemento é sobre outro, levando em consideração os critérios ou subcritérios empregados para comparar os elementos. A matriz de comparação pareada "A", exibida na Figura 22 é positiva ($a_{ij} > 0$) e recíproca ($a_{ij} = 1/a_{ji}$), onde $i, j = 1, \dots, n$ representam os critérios ou subcritérios definidos para realizar as comparações (SAATY, 1987). DIAS (2020) apud SAATY (1987) salienta que a atratividade dos critérios, subcritérios e alternativas é mensurada por intermédio do vetor de prioridades, ou em termos técnicos, do autovetor associado à matriz A. "O objetivo do vetor prioridade é identificar a ordem de importância de cada critério. O critério com maior vetor prioridade exerce um maior impacto no objetivo central da análise" (CALDERARO, 2019). Um método simples para calcular um valor aproximado para os vetores de prioridades é através da normalização das médias geométricas para cada linha da matriz A. O resultado para este cálculo coincide com o autovetor quando o número de critérios (n) da matriz de julgamento A for $n \leq 3$. Outro modo para obter uma aproximação do autovetor é normalizar os elementos em cada coluna da matriz A e, por conseguinte, calcular a média de cada linha (SAATY, 1987).

Figura 22. Matriz de comparações pareadas do método AHP.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \text{ onde}$$

$$\begin{aligned} a_{ij} > 0 &\Leftrightarrow \text{positiva} \\ a_{ij} = 1 &\therefore a_{ij} = 1 \\ a_{ij} = 1/a_{ij} &\Leftrightarrow \text{recíproca} \\ a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk} &\Leftrightarrow \text{consistência} \end{aligned}$$

Fonte: CALDERARO, 2019, apud PIRAN, LACERDA e CAMARGO, 2018

Com o intuito de validar a consistência de uma matriz de julgamento “A” são empregados o índice de consistência e a razão de consistência – do inglês *Consistency Index* (CI) e *Consistency Ratio* (CR), respectivamente –, onde o $CR \leq 10\%$ para que a matriz de julgamento seja considerada aceitável. Caso $CR > 10\%$, deve-se melhorar a qualidade das comparações pareadas entre os critérios, subcritérios e alternativas (DIAS, 2020; CALDERARO, 2019, apud SAATY, 1983). O processo matemático para calcular o CR e validar a matriz A é dividido em quatro passos. No primeiro destes, calcula-se, utilizando a Equação 4, a razão dos resultados obtidos no vetor prioridade (CALDERARO, 2019):

$$AW = \lambda_{m\acute{a}x}W \quad \text{Equação 4}$$

Onde, A equivale à comparação efetuada na matriz de prioridade, W representa o vetor prioridade e $\lambda_{m\acute{a}x}$ é o autovalor máximo.

Em segundo lugar, é calculada, a partir da Equação 5, a razão entre a soma dos valores calculados neste novo vetor e o número de critérios, obtendo, assim, o autovalor máximo ($\lambda_{m\acute{a}x}$) aproximado (CALDERARO, 2019). Através do $\lambda_{m\acute{a}x}$, o método AHP pretende verificar se as comparações pareadas feitas estão logicamente consistentes (FONTANIVE et al., 2016).

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]_i}{w_i} \quad \text{Equação 5}$$

Onde, Aw é a matriz resultante do produto de comparação pareada pela matriz de pesos ponderados (w_i) e “n” indica o número de critérios ou subcritérios em análise.

No terceiro passo, é calculado o CI, aplicando a Equação 6 (CALDERARO, 2019):

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad \text{Equação 6}$$

Onde, CI é o *Consistency Index* ou índice de consistência e “n” indica o número de critérios ou subcritérios em análise.

Tabela 20. Escala fundamental de números absolutos do método AHP.

Intensidade da importância em escala absoluta	Definição	Explicação
1	Igual importância	Dois critérios contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de um sobre outro	Experiência e julgamento fortemente a favor de um critério sobre outro
5	Importância forte ou essencial	Experiência e julgamento fortemente a favor de um critério sobre outro
7	Importância muito forte	Um critério é fortemente favorecido e sua dominância demonstrada em prática
9	Importância extrema	A evidência favorece um critério sobre outro em sua maior ordem possível de afirmação
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	Quando é necessário compromisso
Recíprocos	Se o critério <i>i</i> tem um dos números acima quando comparado com <i>j</i> , então <i>j</i> tem o valor recíproco quando comparado com <i>i</i>	
Racionais	Relações decorrentes das escalas	Se a consistência fosse forçada obtendo <i>n</i> valores numéricos para abranger a matriz

Fonte: Adaptado de SAATY, 1987

Por fim, calcula-se o CR (Equação 7) cujo valor deve ser menor ou igual a 10% para que resultado da matriz de julgamento seja considerado consistente. CR é resultado da razão entre CI e o valor apropriado do índice randômico - do inglês *Random Index* (RI). Este índice, derivado de uma amostra de tamanho 500, é obtido da média de um grande número de matrizes recíprocas de mesma ordem gerada aleatoriamente (SAATY, 1987; SAATY, 1990). A Tabela 21 apresenta o RI, onde “n” se refere ao número de critérios avaliados pelos tomadores de decisão.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Equação 7}$$

Onde, CI é o *Consistency Index* e o RI trata-se do *Random Index* ou índice randômico.

Tabela 21. Índice randômico do método AHP.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,15	1,35	1,4	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57	1,58

Fonte: DIAS, 2020, apud SAATY, 1987

SAATY (1987) explica que se tolera 10% de inconsistência, pois este valor se refere ao erro intrínseco à medição da consistência da matriz de julgamentos, os quais são realizados pelos decisores, isto é, seres humanos. Além disso, levando em consideração uma escala normalizada de consistência, que varia entre 0 e 1, SAATY (1987) afirma que inconsistência

não deve ser muito menor que 10%, como 1% ou 0,1%. Ademais, elucida que a razão humana é considerada no cálculo da consistência no método AHP:

“[...] é que a própria inconsistência é importante, pois sem ela novos conhecimentos que alteram a ordem de preferência não podem ser admitidos. Assumir que todo o conhecimento é consistente contradiz a experiência que requer um ajuste contínuo na compreensão. Assim, o objetivo de desenvolver um método consistente e abrangente depende da admissão de alguma inconsistência” (SAATY,1987).

Tendo em vista as características intrínsecas do método AHP, definiu-se este método como ferramenta para auxiliar as tomadas de decisões dos participantes da metodologia desenvolvida para classificar e selecionar peças sobressalentes elegíveis para AM, pois os julgamentos envolvendo SPM envolvem múltiplos critérios a serem considerados e várias alternativas disponíveis. O método AHP é capaz de estruturar a hierarquia das decisões, comparar alternativas sistematicamente, garantindo a consistência das preferências dos decisores (SAATY, 1987), além de ser um dos MCDM predominantemente utilizados na literatura para classificação ou seleção de PS (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022; TEIXEIRA, LOPES e FIGUEIREDO, 2018). Uma das justificativas para esta predominância está associada ao fato do AHP ser considerado como “um dos métodos MCDM mais utilizados para determinar o peso dos critérios” (GHUGE, DOHALE e AKARTE, 2022). Ademais, esse método se notabiliza pela sua versatilidade, sendo capaz de adequar-se às aplicações de diferentes áreas do conhecimento, tais como engenharia, política, economia e medicina (DIAS, 2020).



ADDITIVE MANUFACTURING: OVERVIEW ABOUT STANDARDS APPLIED TO OIL AND GAS INDUSTRY

Arthur Gomes Lima França, Valter Estevão Beal

University Center SENAI CIMATEC, Salvador, Bahia, Brazil

Abstract: Additive Manufacturing (AM) is a group of manufacturing methods capable of producing complex parts from digital models without investment in tooling. The applicability of AM in different industries has become increasingly common and this is no different for the oil and gas industry. In this way, seeking to ensure predictability in the supply chain, reduce lead time and cost, and assure safety and quality of parts obtained by AM throughout the oil and gas industry, standards are being developed and published to meet this market. This work aimed to evaluate if there is established standardized tools and methodologies for AM part designs for oil and gas fields.

Keywords: Additive Manufacturing; Design for Additive Manufacturing; Standards; Oil and Gas Industry.

MANUFATURA ADITIVA: UMA VISÃO GERAL SOBRE NORMAS APLICADAS À INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS

Resumo: A manufatura aditiva (AM, do inglês *Additive Manufacturing*) é um conjunto de métodos de fabricação capazes de produzir peças complexas a partir de modelos digitais sem investimento em ferramental. A aplicabilidade da AM em diferentes indústrias tem se tomado cada vez mais comum e isso não é diferente para a indústria de óleo e gás. Dessa forma, buscando garantir previsibilidade na cadeia de suprimentos, reduzir lead time e custo, e garantir a segurança e qualidade das peças obtidas pela AM em toda a indústria de óleo e gás, normas estão sendo desenvolvidas e publicadas para atender este mercado. Este trabalho teve como objetivo avaliar se existem ferramentas e metodologias padronizadas para projetos de peças obtidas por AM e destinadas aos campos de petróleo e gás.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Projeto para Manufatura Aditiva; Normas; Indústria de Petróleo e Gás.

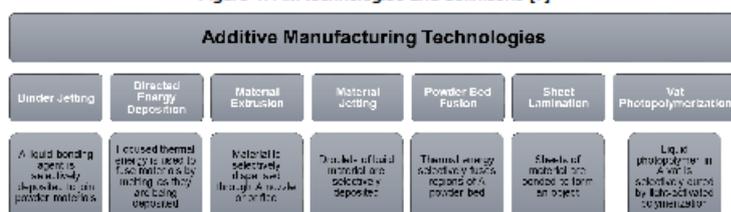
1. INTRODUCTION

1.1. Additive Manufacturing

Additive manufacturing (AM), also referred to as 3D printing, is classified as a process of joining materials to manufacture components from 3D model data, adding material in a layer-by-layer manner, as opposed to subtractive manufacturing methods [3, 7]. Additionally, 3D printing is defined as the manufacturing products through the deposition of a material using a print head, nozzle, or other printer. In a few cases, AM can be treated as a supplement to conventional manufacturing technologies. At other times, is the merely means through which complex products can be fabricated [3].

AM techniques are applied to provide rapid prototyping, rapid manufacturing and rapid tools, producing, on those ways, prototypes models, parts of end-use, and tools for long-term mass production of parts, respectively. The AM operations can be categorized into four main categories in agreement with the operation principle: addition, subtraction, hybrid, and forming operations [1]. AM technologies are divided into seven categories, as illustrated in Figure 1. AM technologies and definitions[7].

Figure 1. AM technologies and definitions [7]



The principal AM markets which include automotive, aerospace, medical, consumer products, and general industries announce similar accomplishment stories [9]. For the maritime and oil and gas economic sectors, the interest is increasing substantially. However, the challenge for these industries has been that there are no established methods of guaranteeing the quality of an additive manufacturing process and an additively manufactured component [4].

1.2. Design For Additive Manufacturing

As a process that enables many more degrees of freedom than other manufacturing processes [7], new design alternatives for additive manufacturing can be adopted, for instance, to merge an assembly of parts into one part and hence, to minimize the needed assembly work and costs. This assembly combination permit to an integration of functions from different parts, which could result in superior performance and to reduce maintenance [3]. Consequently, adaptations in current

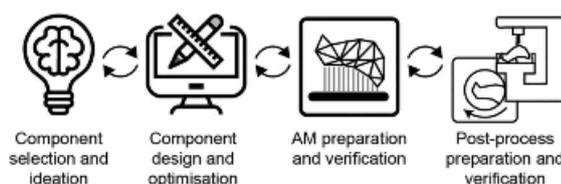
design-to-manufacturing practices have been required, giving rise to the recent Design for Additive Manufacturing concept (DfAM) [8].

DfAM is a category of methods and knowledge that assists the design process of parts by thoroughly using the advantages of AM [9]. Other concepts about DfAM subject to the capabilities of AM technologies can be defined, as maximize product performance through the synthesis of shapes, sizes, hierarchical structures and material compositions; or a design method by which functional performance and/or other important lifecycle considerations of the product, such as manufacturability, reliability, and cost, can be optimized, consistent with the capabilities of AM technologies [9].

From a design engineer's perspective, DfAM can be divided into four categories (component selection and ideation, design and optimization, AM preparation and postprocess preparation), as shown in

[9]. The crucial point of the first phase is the component selection and assembly design. In the second category, the focus is on the design support, where the computer-aided design (CAD) softwares and optimization methods and tools dominate. The third category focuses on to prepare and verify the success of the manufacturing through rules, software and simulation methods. Within the fourth step, the component is adapted and prepared for postprocessing, as well as removal from the build plate, elimination of support structures, heat treatment and achievable surface improvement methods [9].

Figure 2. Four steps in the design for additive manufacturing process [9]



1.3. Design for Additive Manufacturing: Sustainability Considerations

The DfAM sustainability guidelines include fabricating durable products, applying recycled materials, adjusting high efficiency manufacturing processes, removing/minimizing the usage of hazardous materials, and building a profound association within the product and the consumer. All approaches of the sustainability of AM methods based on three main dimensions, such that economic, environmental, and social dimensions [1].

There are some future challenges involving the AM suitability that must be more investigated, such as techniques for early cost estimation; the late life cycle steps of postprocessing, inspection and certification, once these steps are inadequately represented in present DfAM approaches; the majority of product designers and

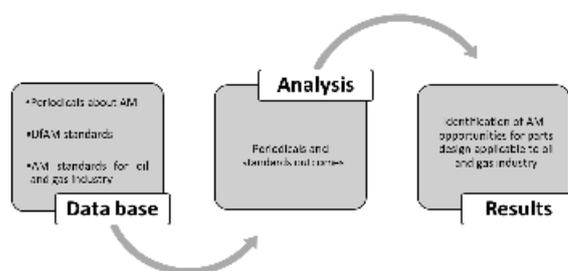
engineers are still educated "to think subtractive", then more education on (design for) Additive Manufacturing is necessary [9].

Therefore, this paper aims to provide AM analysis considering a literature overview in terms of definitions, classifications, technologies and sustainability. Moreover, the standards internationally applicable to oil and gas industries are examined to understand the AM opportunities once the AM standards applied on oil and gas sector are fresh and there is no internationally accepted framework for AM part design for oil and gas application.

2. METHODOLOGY

Figure 3 summarizes the activities that were carried out for the search about AM standards with a focus on guidelines for AM part design for oil and gas application.

Figure 3. Methodology used on the search about AM standards applied for oil and gas industry



The scientific databases of this work were: API, COBEF (Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação), ISO, MPDI, ScienceDirect, and Scholar google in general. Then, nine papers [1,2,3,4,5,6,7,8,9] were chosen based in their application for this initial study.

The guiding questions are a significant phase about the proposed overview because the search becomes more systematized.

Question 1: Are there standards applied to design for additive manufacturing?

Question 2: Are there standards applied to additive manufacturing of parts designed for the oil and gas industry?

Question 3: Are there guidelines applied to parts obtained by additive manufacturing and applied specifically to the oil and gas industry?

3. RESULTS AND DISCUSSION

To internationally prepare, develop and publish standards concerning to AM, the two main international institutions, ISO (International Standardization Organization) and ASTM (American Society for Testing and Materials), has been structured a joint standards development plan. The Table 1 shows the guidelines standards for DfAM developed by both organizations [6].

Table 1. Design standards for additive manufacturing [6]

Standard	Title	Status
ISO/ASTM 52910:2018	Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations	Published
ISO/ASTM DIS 52910	Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations	Under development
ISO/ASTM 52911-1:2019	Additive manufacturing — Design — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals	Published
ISO/ASTM 52911-2:2019	Additive manufacturing — Design — Part 2: Laser-based powder bed fusion of polymers	Published
ISO/ASTM DIS 52911-3	Additive Manufacturing — Design — Part 3: Electron beam powder bed fusion of metals	Under development
ISO/ASTM TR 52912:2020	Additive manufacturing — Design — Functionally graded additive manufacturing	Published

It is essential that products from AM technology are reliable, safe and legally approved to apply them in the oil and gas field. Consequently, the AM process needs to be standardized [5]. Furthermore, the premature nature of AM technologies induces uncertainties and strengthened risk exposure for involved stakeholders [3]. Along with, as health safety and environment (HSE) is a fundamental element of the oil and gas sector, the risk should always be mitigated [5]. Therefore, specific standards for products employed in petroleum and gas fields were recently published, such as API 20S: Additively Manufactured Metallic Components for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries, and DNV-ST-B203: Additive manufacturing of metallic parts.

The DNV GL (Det Norske Veritas Holding AS) published the DNV-ST-B203: Additive manufacturing of metallic parts, which is the first standard to afford an internationally acknowledged framework for producing and using high quality additively manufactured metal parts for the oil and gas, maritime and related industries [3]. Additionally, the API (American Petroleum Institute) published the first edition of API 20S, Additively Manufactured Metallic Components for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries, the standard that furnishes requirements for qualification of the manufacturing process, production, marking and documentation of metallic parts [2]. It is relevant to notice that both standards are in accordance with and complements relevant international AM standards published by ISO and ASTM.

Aiming to consider the natural gas and oil industry's emphasis on new technologies and innovations to satisfy the growing global requirement for energy while

protecting the environment Earth's [10] and to optimize part design to decrease lead time and force efficiency and improvement throughout the entire sections of that industry [2], the API published API Standard 20S. The three principal characteristics of Standard 20S contain [10]:

- Specifications for eligibility in the fabrication, production, marking and documentation of metallic components manufactured using Additive Manufacturing;
- Establishment of three AM specification levels that determine technical, quality and qualification requirements promoting metallic additively manufactured components made are appropriate for design goals;
- Conditions for training, inspection, monitoring and measuring machinery, including materials testing, acceptance and quality control of final products.

Seeking to guarantee predictability in the supply chain, reducing lead time and cost, as well as safety and quality of AM feedstock [4], equipment, components and parts, the DNV, through a joint industry project (JIP) that includes academic institutions, industry operators and companies across the oil and gas supply chain, published DNV-ST-B203 standard which specifies requirements and guidance for acquisition, quality mainframe for manufacturers and qualification of AM metal products manufactured for the oil and gas, maritime and related industries utilizing different types of technologies. A resume across the API 20S and DNV-ST-B203 are shown in Table 2.

Table 2. Published standards about additive manufacturing standards for oil and gas industries [2, 4]

Standard	Title	Scope	Applicability
API 20S	Additively Manufactured Metallic Components for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries	Requirements for qualification of the manufacturing process, production, marking, and documentation of additively manufactured metallic components used in the petroleum and natural gas industries when referenced by an applicable API equipment standard or otherwise specified as a requirement for conformance.	Additively manufactured metallic components produced by powder bed fusion (PBF), directed energy deposition (DED), and binder jetting (BJT) processes.
DNV-ST-B203	Additive manufacturing of metallic parts	Requirements and guidance for: the qualification of parts made by AM for the oil and gas and related industries; the purchasing of AM parts; quality management for manufacturers of AM parts; the manufacturing of AM parts.	Additively manufactured metallic components in general, with additional requirements for the following specific AM technologies: wire arc additive manufacturing (WAAM); laser beam powder bed fusion (PBF-LB).

4. CONCLUSION

API Standard 20S and DNV-ST-B203 are standards published with the intent to provide an internationally accepted framework for producing, marking and documentation for high quality additively manufactured metal parts applicable to oil and gas sector and other industries correlated [2, 3]. However, there is no specific guidelines for AM part design for oil and gas application, demonstrating, therefore, the need for standardized tools and methodologies applied to this market, although there is an effort by international standardization institutions, such as ASTM and ISO, to establish a general guideline for AM designs. Because of that, most researchers have identified specific niches to develop and apply project methods and tools [8].

Furthermore, both two international standards, API Standard 20S and DNV-ST-B203, presents requirements only for additively manufactured metal products, putting aside products manufactured with different types of materials. A feasible conclusion is that oil and gas fields are extremely severe, which demands acceptable toughness materials to resist the high pressure, temperature and corrosive agents [5]. This scenario can be seen as an opportunity to develop frameworks to design and manufacture parts made by unusual materials utilizing AM technologies.

5. REFERENCES

¹ ALFAIFY, Abdullah; et. al. Design for Additive Manufacturing: A Systematic Review. *Sustainability Journal*, Basel, v. 12, n. 19, p. 7936-7958, Sep. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12197936>.

² American Petroleum Institute. *API 20S: Additively Manufactured Metallic Components for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries*. Washington, 2021.

³ Det Norske Veritas Holding AS. *DNV-CG-0197: Additive manufacturing - qualification and certification process for materials and components*. Høvik, 2021.

⁴ DNV. *Additive manufacturing standards and guidelines*. 2021. Available at: <https://www.dnv.com/oilgas/additive-manufacturing/standards-guidelines.html>. Accessed on: 20 Jun. 2022.

⁵ HIEBLER, Felix. *Investigation of Additive Manufacturing of Components for the Oil & Gas Industry*. 2020. Master's Thesis (Chair of Drilling and Completion Engineering). Montanuniversität Leoben, Leoben, 2020.

⁶ International Organization for Standardization. **Standards by ISO/TC 261: Additive manufacturing**. Available at: <<https://www.iso.org/committee/629086/x/catalogue/>>. Accessed on: 20 Jun. 2022.

⁷ International Organization for Standardization; American Society for Testing and Materials. **ISO/ASTM 52910: Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing**. Geneva, 2017.

⁸ LAJARIN, S. F.; FISCHER, L. A. S.; VOLPATO, N. Projeto para manufatura aditiva: revisão. In: *Anais do 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, COBEF, Curitiba, PR, Brasil.

⁹ WIBERG, Anton; PERSSON, Johan; ÖLVANDER, Johan. An optimisation framework for designs for additive manufacturing combining design, manufacturing and post-processing. *Rapid Prototyping Journal*, Bingley, v. 27, n. 11, p. 90-105, Dec. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2021-0041>.

¹⁰ METAL AM. **API publishes Additive Manufacturing standards for natural gas & oil industry**. 2021. Available at: <<https://www.metal-am.com/api-publishes-additive-manufacturing-standards-for-natural-gas-oil-industry/>>. Accessed on: 27 Jun. 2022.

**A SYSTEMATIC REVIEW ABOUT CLASSIFICATION CRITERIA,
APPLIED METHODS AND METHODOLOGIES FOR SELECTING
SPARE PARTS SUITABLE FOR ADDITIVE MANUFACTURING**

Arthur Gomes Lima França, Valter Estevão Beal

University Center SENAI CIMATEC, Salvador, Bahia, Brazil

Abstract: Additive manufacturing (AM), also known as 3D printing, refers to a family of manufacturing technologies capable of producing products by progressively adding layers of materials. AM emerged in 1981 and is in a continuous process of technological and commercial improvement, demonstrating its relevance for the technological frontier. This fact is evidenced by the growing number of scientific publications aimed at investigating and describing the benefits and opportunities arising from 3D printing for the industrial scenario. A latent opportunity, for example, is the optimization of spare parts management through AM technologies. The aim of this paper is to present a systematic review of classification criteria, methods and methodologies for selecting suitable spare parts for MA.

Keywords: Additive Manufacturing; Classification Criteria; Selection Methodologies; Spare Parts.

**UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE OS CRITÉRIOS DE
CLASSIFICAÇÃO, MÉTODOS E METODOLOGIAS APLICADAS PARA
SELEÇÃO DE PEÇAS SOBRESSALENTES ADEQUADAS PARA
MANUFATURA ADITIVA**

Summary: A manufatura aditiva (AM), também conhecida como impressão 3D, refere-se a uma família de tecnologias de fabricação capazes de produzir produtos a partir da adição progressiva de camadas de materiais. A AM surgiu em 1981 e encontra-se em um processo contínuo de aprimoramento tecnológico e comercial. Este fato se evidencia através do número crescente de publicações científicas orientadas para investigar e descrever os benefícios e oportunidades oriundos da impressão 3D para o cenário industrial. Uma oportunidade latente, por exemplo, é a otimização do gerenciamento de peças sobressalentes através das tecnologias de AM. O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão sistemática dos critérios de classificação, métodos e metodologias para seleção de peças sobressalentes adequadas para a AM.

Key words: Manufatura Aditiva; Critérios de Classificação; Metodologias para Seleção; Peças Sobressalentes.

1. INTRODUCTION

Additive manufacturing (AM), also known as 3D printing, refers to the family of manufacturing technologies capable of adding sequentially, i.e., layer by layer, units of standardized input materials, thereby allowing the manufacture of physical products discrete data from digital models [1, 2]. In this way, this new manufacturing method differs from conventional manufacturing technologies (CM), which employ subtractive and formative methods of materials to produce components [3]. AM technologies are employed to manufacture prototypes, models, end-use parts, that is, ready-to-use, as well as tools for mass production of long-term components [4]. For the industrial application of parts obtained by AM, it is necessary to evaluate the level of technological maturity, described by the term TRL (Technology Readiness Level), of the additive manufacturing process [5]. The TRL scale was created by NASA (US National Aeronautics and Space Administration) in the 1970s and is widely applied to assess "technological maturity through proof of technical capabilities" [5]. Furthermore, additive manufacturing processes are divided into seven categories, namely: Binder Jetting (BJ), Directed Energy Deposition (DED), Material Extrusion (ME), Material Jetting (MJ), Powder Bed Fusion (PBF), Sheet Lamination (SL) and Vat Photopolymerization (VP).

AM is in a continuous process of technological and commercial improvement. Its history begins in 1981, with the registration of the first rapid prototyping patent developed by Professor Hideo Kodama, in Japan [6]. Three years later, American physicist Charles W. Hull, founder of the multinational company 3D Systems Corporation, registered the most significant patent, called stereolithography, from the English stereolithography apparatus (SLA), as it resulted in the commercialization of AM [7], which emerged in 1987, from the SLA production process [8]. With the academic, technological and commercial advancement involving MA, in 2018, the German automotive company BMW announced its one millionth component manufactured in series from 3D printing [9]. It was reported, in 2021, that the Brazilian companies PETROBRAS, SENAI Joinville and the Federal University of Santa Catarina (UFSC) and the German company ZEISS Group joined in a research project whose object of study was a compact heat exchanger made of AISI 316L steel and manufactured by MA [10]. In addition to these examples, taking into account the Science Direct database, in the interim between 1999 and 2023, the number of publications with the term "additive manufacturing" increased by 467,330%. Therefore, over the years, AM and its benefits have been explored in academic and industrial circles, in addition to being disseminated by the media and political circles [11].

The benefits of AM compared to CM stand out: manufacture of small batches of customized parts, consolidation of geometric features of components, possibility of creating lighter and more efficient designs [12]. In addition, there are advantages in using AM for spare parts (SP) management, such as reducing manufacturing costs, improving supply chain responsiveness, reducing inventory and its inherent costs, in addition to minimizing transportation, energy and downtime costs among other benefits [13, 14]. Consequently, studies have been published with the aim of identifying, classifying and selecting SP eligible for MA. Therefore, the aim of this article is performing a systematic review of eligibility criteria, methods and methodologies used for selecting spare parts suitable for AM.

2. METHODOLOGY

With the intention of identifying the research problems, its guiding questions, from the English research question (RQ), were elaborated, as it is a fundamental step before starting any research. RQs are intended to explore existing uncertainties in an area of concern and address identified research needs. Therefore, it is concluded that it is pertinent to formulate the RQs suitable for the research even before starting it [15]. Thus, the guiding questions of this dissertation are the following: RQ1. What are the criteria that should be considered when identifying spare parts eligible for additive manufacturing? RQ2. How to define the most appropriate eligibility criteria for the companies' interests when deciding to adopt additive manufacturing as an alternative for managing spare parts? RQ3. How to select spare parts eligible for additive manufacturing as a method to produce replacement parts and optimize their management? Therefore, in order to answer the aforementioned guiding questions, a literature review was carried out using keywords corresponding to the main themes of this research, that is, Additive Manufacturing (AM), spare parts management (SPM) and a multi-criteria decision making (MCDM). In other words, the keywords chosen were those that are frequently used in the literature to search for criteria, methods and models for selecting and classifying spare parts for AM, in addition to collecting technical standards corresponding to additive manufacturing and PS management.

After carrying out the necessary search for the literature review, those reference materials more in line with the objectives of this dissertation were selected. After that, the most used criteria in the literature for classification and selection of SP eligible for AM were identified and analyzed. Subsequently, with the aim of identifying problems and suggested and/or applied solutions, methods and methodologies existing in the literature for classification and selection of appropriate SP for AM were examined. Therefore, aiming to solve the identified problems, it was decided to develop a methodology capable of classifying and selecting PS eligible for MA and intended for industrial applications.

The scientific database used in the collection of reference materials available in English was CAPES Periódicos. As for the search for literature written in Portuguese, Google Scholar and the CAPES Catalog of Theses and Dissertations were defined as the database. Appropriate search operators for publications in English and Portuguese were identified by combining keywords, including their synonyms, with Boolean modifiers, as shown in Table . The search in the literature published in English was restricted to research and review journals, peer-reviewed and published in any year. For the search carried out in Google Scholar and in the Catalog of CAPES theses and dissertations, periodicals, theses and dissertations available in Portuguese and published in any period were applied as a filter. This strategy is based on the attempt to find reference materials published in Brazil and in Portuguese, thus expanding the database for this dissertation. Therefore, one can list as a differential of this research the search for keywords relevant to MA, SPM and MCDM in different scientific databases widely recognized and used for literature review, in addition to this research being oriented to the search for materials previously published in more than one language, that is, English and Portuguese.

Table 1. Search operators used in scientific databases defined for literature search.

Publications	Search operators	Data base
in English	<i>(("selection" OR "classification") AND ("additive manufacturing" OR "3d printing") AND ("spare part" OR "spare parts"))</i>	Periodic CAPES
In Portuguese	<i>(("selection" OR "classification") AND ("additive manufacturing" OR "3D printing") AND ("spare part" OR "spare parts"))</i>	Academic Google CAPES Theses and Dissertations Catalog

The decision-making process regarding the reference materials used in the literature review consists of five phases, as described in Table 2.

Table 2. Inclusion and exclusion criteria of reference materials for the literature review

Phase	Inclusion and/or exclusion criteria
1	Perform search on the defined scientific databases with the given search operators.
2	Exclude reference materials found in duplicate in scientific databases.
3	Perform evaluation of titles and keywords and exclude materials that are not relevant to the dissertation objectives.
4	Perform review of abstracts and exclude material that is not relevant.
5	Perform evaluation of full texts and exclude materials without relevance.

In order to perform the systematic review present in this article, eight publications were selected, namely: [13, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22].

3. RESULTS AND DISCUSSION

Table 3 summarizes the classification criteria for spare parts eligible for additive manufacturing used by the eight selected publications.

Table 3. Classification criteria for spare parts eligible for additive manufacturing

Reference	Classification Criteria and Selection Method
[16]	*Part definition: Dimensions, mass, quantity of parts per printing cycle, type of material. *Preliminary selection: 1) MA machine working volume. 2) PS complexity. 3) Possibility of removing assemblies. 4) Need for post-processing. 5) Applicability of MA material already used for aerospace parts: take into account the requests or loads that the part will undergo throughout its useful life. 6) Complement of specific geometric conditions from PS to MA. 7) Improved part property by design optimization. 8) Material consumption. 9) Manufacturing time. *Final trade-off: 10) Possibility of changing material. 11) Comparison of material consumption between MA and machining. 12) Comparison of manufacturing time between MA and machining. 13) Comparison of manufacturing cost between MA and machining.

[13]	<p>*Matrix for evaluating the potential for improvement with AM: - Attributes of PS: 1) Type of material. 2) Part size. 3) Demand rate. 4) Replenishment lead time. 5) Agreed response time. 6) Usage period remaining. 7) Manufacturing/ordering costs. 8) Safety stock costs. 9) Quantity of supply options. 10) Supply risk. * Go/No-Go Analysis: the last 8 criteria of the Matrix for evaluating the potential for improvement with AM. *AHP method: 11) Safety stock costs. 12) Manufacturing/ordering costs. 13) Demand rate. 14) Probability of Survival: Spare parts with high supply risk can be obtained from AM. 15) Usage period remaining. 16) Replenishment lead time. 17) Type of plane.</p>
[17]	<p>*Criteria for most relevant PS classification: 1) Probability of failure. 2) Number of suppliers. 3) Demand forecast. 4) Out-of-stock cost. 5) Availability for production. * Most appropriate technical characteristics for classification from PS to MA: 6) Dimension. 7) Weight. 8) Material specifications.</p>
[18]	<p>*Go/No-Go Analysis: 0.1) Technical characteristics of the component: material, density, print volume, weight. 0.2) Technical characteristics of 3D printers: manufacturing method. *AHP: 1) Lead time: total time until PS available for application. 2) Restoration level: PS quality to meet aircraft combat damage repairs. 3) Cost of care: total cost up to the PS available for application.</p>
[14]	<p>*Filtering: technical characteristics: 1) Material: The specific material the item is made of. 2) Dimensions: The height, width and depth of the spare part (1000 x 1000 x 1000 mm). 3) Weight: The weight of the component without packaging. 4) Tolerances (technical drawing): If the spare part can be produced according to the specifications. *TOPSIS: 1) Lead time. 2) Overhead cost. 3) Demand. * Grouping: carried out from the results found from the TOPSIS method. 8 groups were made.</p>
[19]	<p>1) Manufacturing option: manufacturing technology and post-processing treatment. * Spare parts app features: 2) MTTF of foundry technology. 3) Size. 4) Complexity. 5) Retention rate. 6) Unit cost of backorders. * Mechanical properties: 7) Ratio between MTTF of chosen manufacturing option and MTTF of foundry. 8) Failure rate. *Economic and technological parameters: 9) Lead time for the acquisition of the chosen manufacturing option. 10) Unit cost of production of the chosen manufacturing option. *Decision variables: 11) Deadline for revision of chosen manufacturing option. 12) Level order of chosen maintenance option. * Restrictions: 13) Maximum order level. *Costs: 14) Maintenance cost per unit of time. 15) Backorder cost per unit of time. 16) Cost of production per unit of time.</p>
[21]	<p>*Rating: 1) Unit price equal to or greater than €80. 2) High consumption: based on maintenance criteria. 3) Availability of part drawings. 4) Hardness. 5) Size. 6) Diameter. 7) Mounts. *Categorization: 1) Structure: single piece or with assemblies. 2) Size: bulk. 3) Material: Polymer. 4) Stiffness: qualitative assessment; define whether material is rigid or flexible. 5) Printability: qualitative assessment made by a specialist. 6) Functionality: based on surface finish (roughness).</p>
[22]	<p>*Multicriteria ranking (score: -1, 0, 1): 1) Maturity (spare part status): defined by the number of historical orders; if the PS is new, in use or obsolete. 2) Frequency of demand: based on maintenance records. 3)</p>

ISSN: 2357-7592

IX INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INNOVATION AND TECHNOLOGY

Engineering and the Future of the Industry - 2023

	<p>Criticality: represented by the cost of losing sales. 4) Value of PS: manufacturing or acquisition cost. 5) Lead time uncertainty: represented by the lead time standard deviation. *Operational pre-selection: low potential (-1), non-evident potential (0) and high potential for MA (1): decision based on the sum of intermediate results found in the multicriteria classification. *Technological pre-selection: evaluate the manufacturability and select the most suitable additive manufacturing process/technology (depends on the know-how of MA specialists): 6) Material. 7) Geometry. 8) Available manufacturing technologies. 9) Technical and quality requirements. 10) Potential for reengineering. *Definition of strategy: estimation of costs and environmental impacts is highly dependent on technology. 11) LCC (Life Cycle Cost). 12) LCA (Life Cycle Assessment).</p>
[20]	<p>* Pre-selection of specific PS considered strategic: 0.1) Print volume (piece size). 0.2) Type of material. * AHP and Segmentation: ** Impact on business: 1) Delivery time (service time). 2) Unit cost. 3) Annual demand. 4) Annual budget allocated for critical spare parts. 5) Critical for the equipment. 6) Number of Suppliers. 7) Out-of-stock cost. **Technical compatibility: 8) Product complexity. 9) Surface Finishing. 10) Dimensional Accuracy. 11) Reliability.</p>

Summary, about the methodologies, [16] developed a methodology for identifying suitable candidate parts for redesign and manufacturing based on AM technologies considering the entire PS life cycle. [13] discussed the discrepancies between the value of AM for the logistics sector and its practical application, in addition to developing a method to simplify the identification of economically valuable and technologically viable business cases through AM. [17] generated a database so that companies can use it in order to develop methodologies capable of identifying the most suitable spare parts for AM. [18] presented a model for selecting spare parts for aeronautical components in the context of repairing combat damage to aircraft. [14] developed a process to identify PS eligible for MA from a portfolio of approximately 64,000 spare parts available. [19] addressed a statistical comparison between the inventory management of PS manufactured by MC and by MA. [20] presented a systematic approach to assist in the selection of spare parts that are technically compatible with AM from the point of view of business competitiveness. [21] identified the applicability of AM for PS in the automotive industry, specifically around preventive maintenance. [22] with the aim of contributing to the large-scale adoption of additive manufacturing, developed a method to support decision-making. This was designed to identify PS suitable for MA, in addition to providing support for defining new and optimized inventory management strategies.

4. CONCLUSION

A latent scientific commitment to methodologies aimed at managing PS through AM in the industrial context is noticeable. Even so, there are gaps in knowledge to be explored, which are the basis for the justifications for the present research project, such as the lack of methodologies, nationally and internationally, consolidated or standardized, thus allowing the opportunity for the generation of new methodologies, best suited to the needs of each company. In addition, of those methodologies that are available in academia, few are inclusive, that is, they allow the participation of people with insufficient technical knowledge in AM to make decisions involved in the management of PS using 3D printing. In addition, in order to better meet the needs of stakeholders, it is necessary to have a clear alignment between the eligibility criteria

ISSN: 2357-7592

IX INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INNOVATION AND TECHNOLOGY

Engineering and the Future of the Industry - 2023

of SP for MA and the strategic objectives of the company when it wants to adopt additive manufacturing as an alternative for managing spare parts.

5. REFERENCES

- ¹ LEARY, Martin. *Design for Additive Manufacturing*. 1 ed. Amsterdam: Elsevier, 2020.
- ² DET NORSKE VERITAS HOLDING AS. *DNV-CG-0197: Additive manufacturing - qualification and certification process for materials and components*. Høvik, 2021.
- ³ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ISO/ASTM 52910: Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing*. Geneva, 2017.
- ⁴ ALFAIFY, Abdullah; et. al. Design for Additive Manufacturing: A Systematic Review. *Sustainability Journal*, Basel, v. 12, n. 19, p. 7936-7958, Sep. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12197936>.
- ⁵ LEZAMA-NICOLÁS et. al. A Bibliometric Method for Assessing Technological Maturity: The Case of Additive Manufacturing. *Scientometrics*, Budapest, 17, n. 3, p. 1425-1452, Nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2941-1>.
- ⁶ KODAMA, Hideo. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, Maryland, v. 52, n. 11, p. 1770-1773, Aug. 1981 DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1136492>.
- ⁷ GROOVER, Mikell P. *Principles of Modern Manufacturing*. 5 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- ⁸ WOHLERS, Terry; GORNET, Tim. *History of Additive Manufacturing*. Wohlers Report 2016-2022 Available at: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4474824>. Accessed on: 31 Jul. 2023.
- ⁹ VANEKER et al. Design for Additive Manufacturing: Framework and methodology. *Manufacturing Technology*, Amsterdam, v. 69, n. 2, p. 578-599, Aug. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.006>.
- ¹⁰ METAL AM. *ZEISS works with Brazil-based partners to evaluate AM processes for the oil and gas industry*. 2021. Available at: <https://www.metal-am.com/zeiss-works-with-brazil-based-partners-to-evaluate-am-processes-for-the-oil-and-gas-industry/>. Accessed on: 31 Jul. 2023.
- ¹¹ BLÖSCH-PAIDOSH, Alexandra; SHEA, Kristina. Design Heuristics for Additive Manufacturing. *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)*, v. 5: Design for X, Design to X, Vancouver. Aug. 2017. ISSN: 2220-4342.
- ¹² WIBERG, Anton; PERSSON, Johan; ÖLVANDER, Johan. An Optimisation Framework for Designs for Additive Manufacturing Combining Design, Manufacturing and Post-Processing. *Rapid Prototyping Journal*, Bingley, v. 27, n. 11, p. 90-105, Dec. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2021-0041>.
- ¹³ KNOFIUS, N.; van der HEIJDEN, M.C.; ZIJM, W.H.M. Selecting parts for additive manufacturing in service logistics. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Bingley, v. 27, n. 7, p. 915-931. Sep. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2016-0025>.

- ¹⁴ CHAUDHURI et al. Selecting spare parts suitable for additive manufacturing: a design science approach. *Production Planning & Control*, Oxfordshire, v. 32, n. 8, p. 670-687. Apr. 2020. DOI: <https://10.1080/09537287.2020.1751890>.
- ¹⁵ RATAN, S.K.; ANAND T.; RATAN J. Formulation of research question – Stepwise approach. *Journal of Indian Association of Pediatric Surgeons*, Mumbai, v. 15, n. 1, p. 15-20. Jan-Mar. 2019. DOI: https://10.4103/jiaps.JIAPS_76_18.
- ¹⁶ LINDEMANN et al. Towards a sustainable and economic selection of part candidates for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, Bingley, v. 21, n. 2, p. 216-227. Mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2014-0179>.
- ¹⁷ FRANSEN et al. In search for classification and selection of spare parts suitable for additive manufacturing: a literature review. *International Journal of Production Research*, Oxfordshire, v. 58, n. 4, p. 970-996. Apr. 2019. DOI: <https://10.1080/00207543.2019.1605226>.
- ¹⁸ DIAS, Pedro Henrique Fonteles. Processo de seleção de componentes aeronáuticos candidatos a impressão 3D para reparos de danos de combate em aeronaves. 2020. Professional Master's Dissertation in Aviation Safety and Continuing Airworthiness – Postgraduate Program in Aeronautical and Mechanical Engineering – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- ¹⁹ SGARBOSSA et al. Conventional or additive manufacturing for spare parts management: An extensive comparison for Poisson demand. *International Journal of Production Economics*, Amsterdam, v. 233, n. 107993. Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107993>.
- ²⁰ GHUGE, DOHALE and AKARTE. Spare part segmentation for additive manufacturing – A framework. *Computers & Industrial Engineering*, Amsterdam, v. 169, n. 10827. May. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108277>.
- ²¹ LASTRA et al. Spare Parts Made by Additive Manufacturing to Improve Preventive Maintenance. *Applied Science*, Basel, v. 12, n. 10564. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122010564>.
- ²² CARDEAL, Gonçalo; LEITE, Marco; RIBEIRO, Inês. Decision-support model to select spare parts suitable for additive manufacturing. *Computers in Industry*, Amsterdam, v. 144, n. 103798. Oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103798>.