



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AEROESPACIAL

ANDRÉ LUIS SIMÕES ANDRADE

**Avaliação da Frangibilidade de Conexões Aeronáuticas Produzidas
por Impressão 3D**

Recife
2024

ANDRÉ LUIS SIMÕES ANDRADE

**Avaliação da Frangibilidade de Conexões Aeronáuticas Produzidas
por Impressão 3D**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (REDE), Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Aeroespaciais.

Orientador: Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos

Coorientador: Dr. Marcos Pereira

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Andrade, André Luis Simões.

Avaliação da frangibilidade de conexões aeronáuticas produzidas por impressão 3D / André Luís Simões Andrade. - Recife, 2024.

85f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Engenharia Aeroespacial, 2024.

Orientação: Tiago Felipe de Abreu Santos.

Coorientação: Marcos Pereira.

1. Componentes aeronáuticos; 2. Frangibilidade; 3. Manufatura aditiva. I. Santos, Tiago Felipe de Abreu. II. Pereira, Marcos. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

ANDRÉ LUIS SIMÕES ANDRADE

AVALIAÇÃO DA FRANGIBILIDADE DE CONEXÕES AERONÁUTICAS
PRODUZIDAS POR IMPRESSÃO 3D

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (REDE), Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Aeroespaciais.

Aprovada em: 01/02/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Oscar Olimpio de Araujo Filho (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Romildo Alves Berenguer (Examinador Externo)

Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. Marcos Pereira (Coorientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Dedico à Deus, à família e amigos, pois sem esses não somos nada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por não me deixar desviar nem para a direita nem para a esquerda no meu trilhar, à minha esposa, por ser sempre meu Norte e meu amor, aos meus filhos, por serem meus referenciais para o futuro.

Em especial destaque, ao meu Orientador, Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos, que tornou tudo isso possível e ao qual deposito grande estima e respeito, tendo superado todas as minhas expectativas em uma orientação acadêmica, mas sim para a vida, criando laços profundos de amizade e parceria.

Ao meu Coorientador, Dr. Marcos Pereira, pela atenção e colaborações neste trabalho e abrindo portas e janelas para futuros projetos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (PPGEA – UFPE) da Rede Nordeste Aeroespacial pela diferenciada oportunidade de me proporcionar um novo trilhar na Academia e no mercado de trabalho.

À Universidade Maurício de Nassau, em nome dos coordenadores, Thales Rossiter e Pedro Alvim, pelo apoio e suporte a cada momento da vida laboral.

À NAV Brasil S.A., por ter se tornado uma pedra angular nos meus caminhos.

Ao colega de trabalho e amigo Alexsandro Santos de Figueiredo, pela contribuição e colaboração para viabilizar a doação de peças aeronáuticas.

À Universidade Federal de Pernambuco e ao Instituto Nacional em União e Revestimento de Materiais (INTM), pela disponibilidade das infraestruturas laboratoriais para execução de ensaios dos materiais.

Especiais agradecimentos ao Sr. Manoel Felipe Felisdório dos Santos, que dedicou seu tempo e sua expertise para viabilizar o que era impossível, criando a possibilidade de um novo nicho de mercado para a impressão 3D.

Ao professor Dr. Justo Emílio Alvarez Jácomo, pela viabilização dos ensaios e insumos, sem os quais a pesquisa não teria saído do hipotético.

À ANP e FINEP, bem como ao Laboratório de impressão 3D, do Instituto LITPEG da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pela disponibilização dos equipamentos e ambiente para realização desse trabalho.

Aos amigos/colaboradores do PPGEA da UFPE (Soldamat, LITPEG e INTM), por me apoiarem, auxiliarem e darem forças para seguir e perseverar neste e em outros projetos. E a todos que, mesmo não sendo nominalmente citados, contribuíram de alguma forma com a realização desse trabalho.

“Per árdua, ad astra” - "Por (caminhos) árduos, aos astros" – (Força Aérea Real da Inglaterra)

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico de dispositivos empregados na aviação é uma atividade onerosa e complexa, que exige a realização de processos de certificação, homologação e autorização, pautadas em normativas internacionais e nacionais. Para atender esse fluxo, a indústria nacional precisa realizar ensaios comprobatórios em laboratórios certificados fora do país, gerando uma dependência técnica e onerando todo o processo. Desenvolver um produto aeronáutico, com inovação de processo em que os ensaios, realizados em solo brasileiro, atendam às normativas vigentes, permite contribuir de forma significativa para o crescimento tecnológico nacional no segmento aeronáutico. Com o objetivo de contribuir com esse desafio, nessa pesquisa, conexões frangíveis de equipamentos, instalados nas áreas de segurança das pistas de pouso e decolagem dos aeroportos, foram modeladas e confeccionadas por manufatura aditiva (MA) empregando o copolímero acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o polímero ácido láctico (PLA). Corpos de prova produzidos com ambos os polímeros foram manufaturados, empregando 30 e 100% de preenchimento, e caracterizados por inspeção visual, Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Análise Dinâmica Mecânica (DMA) e simulação numérica visando avaliar o caráter de frangibilidade dos produtos sob avaliação. Os resultados obtidos foram satisfatórios. A inspeção visual dos produtos demonstrou o atendimento aos parâmetros dimensionais necessários para aplicação no segmento aeronáutico. O desempenho mecânico das amostras de ABS e PLA, obtidas com 30% de preenchimento, foram compatíveis com os obtidos a 100% de preenchimento, sugerindo um ganho de eficiência do uso da matéria prima empregada, em termos de volume/massa-total, sem perdas de propriedades mecânicas exigidas aos componentes, de limites inferior de resistência e frangibilidade quando sob impacto. Isso foi confirmado pelas simulações numéricas, evidenciando desta forma que produtos aeronáuticos, a exemplo de conexões frangíveis obtidas por MA, podem ser produzidos por essa tecnologia atendendo às normativas do segmento aeronáutico. Os resultados também demonstram que há viabilidade tecnológica com potencial redução de insumos, custos produtivos e impactos ao meio-ambiente com o uso de MA como processo de manufatura dos componentes estudados nesta pesquisa. Resultados estes relevantes para a indústria aeronáutica nacional, uma vez que, demonstram viabilidade tecnológica e atendimento às certificações exigidas pelo segmento aeronáutico, tal qual laboratórios nacionais internacionais acreditados, estimulando assim a competitividade da indústria nacional e possibilitando o desenvolvimento de novos produtos para atender ao segmento aeronáutico nacional e internacional.

Palavras-chave: Componentes aeronáuticos; Frangibilidade; Manufatura aditiva; Propriedades mecânicas, Certificação Aeronáutica.

ABSTRACT

The technological development of devices used in aviation is a costly and complex activity since, for on-site applicability, it is necessary to carry out certification, homologation and authorization processes, based on international and national regulations. To meet this flow, the national industry needs to carry out evidentiary tests in certified laboratories outside the country, creating technical dependence and making the entire process more expensive. The possibility of carrying out these tests on Brazilian soil, in compliance with current regulations, will make it possible to contribute significantly to technological growth in the aeronautical segment with the development of national industrialized products. With the aim of contributing to this challenge, in this research, frangible connections of equipment, installed in the safety areas of airport runways, were modeled and manufactured by additive manufacturing (AM) using the acrylonitrile butadiene styrene (ABS) copolymer. and polylactic acid (PLA). Test specimens produced with both polymers were manufactured, employing 30 and 100% fill, and characterized by visual inspection, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Dynamic Mechanical Analysis (DMA) and numerical simulation aiming to evaluate the character of frangibility of the products under evaluation. The results obtained were satisfactory. Visual inspection of the products demonstrated compliance with the dimensional parameters necessary for application in the aeronautical segment. The mechanical performance of the ABS and PLA samples, obtained with 30% filling, were compatible with those obtained at 100% filling, suggesting a gain in efficiency in the use of the raw material used, in terms of total volume/mass, without losses of mechanical properties. This was confirmed by numerical simulations, thus demonstrating that aeronautical products, such as frangible connections obtained by AM, can be produced by this technology in compliance with aeronautical segment regulations. The results also demonstrate that there is technological feasibility with a potential reduction in inputs, production costs and impacts on the environment with the use of AM as a manufacturing process for the components studied in this research. The results of this research are relevant to the national industry, as they demonstrate that it is feasible to carry out the certifications required by the aeronautical segment in accredited national laboratories, thus stimulating the competitiveness of the national industry and enabling the development of new products to serve the national and international aeronautical segment.

Keywords: Aeronautical components; Frangibility; Additive manufacturing; Mechanical properties, Aeronautical certification.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de sinalização de aeroporto	26
Figura 2 - Sinalizadores aeronáuticos	28
Figura 3 - Junta frangível para aeroportos	31
Figura 4 - Representação das principais etapas do processo de manufatura aditiva ou impressão 3D	33
Figura 5 - Esquema da tecnologia FDM.....	37
Figura 6 - Esquema dos corpos de prova obtidos para ensaio de DMA, segundo a norma ASTM D5023-15 (dimensões em mm)	44
Figura 7 - Impressora utilizada na confecção dos corpos de prova, localizada no Instituto LITPEG/UFPE	44
Figura 8 - Impressão de corpos de prova de PLA com preenchimento de 100% (à esquerda) e em geometria treliçada com 30% de preenchimento (à direita)	45
Figura 9 - Representação esquemática do equipamento DMA 242	46
Figura 10 - Análise Dinâmico Mecânica do corpo de prova em PLA no laboratório de análises térmicas no INTM/UFPE	47
Figura 11 - Conectores frangíveis e kit haste - peça de fixação.....	48
Figura 12 - Peça danificada durante a fixação	49
Figura 13 - Efeito de pequeno deslizamento da peça do fixador	49
Figura 14 - Ensaio de desempenho mecânico do produto	50
Figura 15 - Modelo 3D da Peça Aeronáutica – Conector frangível	51
Figura 16 - Modelo 3D fatiado da Peça Aeronáutica – Conector frangível.....	51
Figura 17 - Comparativo entre peça original e obtida por impressão 3D	52
Figura 18 - Visão transversal do modelo 3D de ABS do conector frangível com preenchimento de 30%.	52
Figura 19 - Espectro de FTIR da amostra de PLA	53
Figura 20 - Espectro de FTIR da amostra de ABS.....	54
Figura 21 - Ensaio de DMA para o PLA impresso com 100% de preenchimento	55
Figura 22 - Ensaio de DMA para o PLA impresso com 30% de preenchimento	56
Figura 23 - Ensaio de DMA para o ABS impresso com 100% de preenchimento.....	58
Figura 24 - Ensaio de DMA para o ABS impresso com 30% de preenchimento.....	58
Figura 25 - Peça geométrica de um sinalizador aeronáutico: a) vista superior, b) vista inferior, c) vista lateral e d) vista em perspectiva.....	60

Figura 26 - Corte transversal e longitudinal do tubo (mm).	61
Figura 27 - Construção das malhas de elementos finitos na peça tubular de um sinalizador	62
Figura 28 - Carregamento distribuído utilizado na peça tubular de um sinalizador ...	63
Figura 29 - Regiões analisadas de rompimento	63
Figura 30 - Gráfico Tensão x Deformação - desempenho mecânico do produto	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mapa de Riscos - Probabilidade x Severidade - Equipamentos Críticos Aeroporto Galeão - 2019.....	25
Tabela 2 - Características e variáveis de processo dos filamentos empregados	42
Tabela 3 - Propriedades Mecânicas do PLA	61
Tabela 4 - Valores máximos obtidos na simulação	64
Tabela 5 - Tensão máxima de ruptura - ABS (30 e 100%).....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil ¹
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Ensaios e Materiais)
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo ²
DMA	Análise Dinâmico Mecânica
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i> (Administração Federal de Aviação dos EUA)
UE	União Europeia
EUA	Estados Unidos da América
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
FTIR	Espectroscopia na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier
INTM	Instituto Nacional em União e Revestimento de Materiais
NBRs	Normas Brasileiras, de responsabilidade da ABNT, Foro Nacional de Normalização
MA	Manufatura Aditiva
MAM	Manufatura Aditiva de Metal
MO	Microscopia Óptica
PLA	Poliácido Láctico
LITPEG	Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
SGSO	Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional

¹ Autarquia vinculada ao Ministério da Defesa, cujas atribuições são a regulação e a fiscalização das atividades de aviação civil e de infraestrutura aeronáutica e aeroportuária.

² Órgão do Comando da Aeronáutica que prove serviços de navegação aérea no Brasil, sendo responsável pelas atividades de controle do tráfego aéreo, busca e salvamento, meteorologia, telecomunicações, cartografia e informação aeronáutica, capacitação de recursos humanos e demais atividades afins.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS	18
2.1.	OBJETIVO GERAL	19
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1.	INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA	20
3.2.	SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA SEGURANÇA OPERACIONAL (SGSO)	22
3.3.	SINALIZADORES AERONAÚTICOS	25
3.4.	FRANGIBILIDADE	28
3.5.	MANUFATURA ADITIVA	31
3.5.1.	Modelagem por Fusão e deposição (FDM)/ Fabricação de Filamentos Fundidos (FFF).	36
3.5.2.	Poliácido láctico - PLA	39
3.5.3.	Acrilonitrila Butadieno Estireno ABS	40
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1.	MATERIAIS	42
4.2.	MÉTODOS	42
4.2.1.	Inspeção visual	42
4.2.2.	Modelagem 3D	42
4.2.3.	Confecção dos Corpos de Provas e Modelo 3D de Conexão Frangível.	43
4.2.4.	Espectroscopia na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier	45
4.2.5.	ANÁLISE DINÂMICO MECÂNICA (DMA)	45
4.2.6.	ENSAIO DE DESEMPENHO MECÂNICO DO PRODUTO	47
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1.	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E INSPEÇÃO VISUAL	51

5.2.	ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	52
5.3.	ANÁLISE DINÂMICO MECÂNICA	54
5.4.	ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO MECÂNICO DO COMPONENTE FRANGÍVEL DE PLA	59
5.5.	ENSAIO DE DESEMPENHO MECÂNICO DO PRODUTO	65
6.	CONCLUSÕES	67
7.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	68
	REFERÊNCIAS	70
	ANEXO	77

1. INTRODUÇÃO

Com a concepção do avião, os desenvolvimentos tecnológicos e as demandas impostas à sociedade no início do século XX, surgiu a necessidade do desenvolvimento de infraestruturas em solo para apoiar às operações aéreas (Bassi, 2022). Além disso, o processo histórico da aviação demonstra uma busca de melhoria contínua, exigindo o desenvolvimento de regulamentações, normativas, manuais e recomendações que norteassem as práticas operacionais e administrativas de todos os elos do ecossistema aeronáutico, os princípios buscavam além da segurança, mas também garantia da regularidade e da eficiência em todas as fases dos voos. Além do normativo e operacional, a busca constante por avanços de bases científicas e tecnológicas buscam colaborar tanto com promoção da aviação como com a prevenção dos acidentes, ou a redução dos danos diretos e indiretos causados por estes, dando destaque nestes cenários às infraestruturas de solo, a exemplo de torres de equipamentos meteorológicos, luzes de balizamento, placas de informações aos pilotos, entre outros, por serem estes críticos às operações de pouso e decolagem, fases mais vulneráveis das operações aéreas, em que, por estes equipamentos se situarem próximos às pistas de pouso e decolagens, devem apresentar a propriedade de frangibilidade, para evitar se tornarem potencializadores dos danos às aeronaves em situações de acidentes, ou incidentes.

Os equipamentos aeronáuticos com peças frangíveis (conectores, pinos, parafusos, uniões, torres de luzes aeronáuticas, ou de equipamentos meteorológicos etc.) são constituídos de materiais metálicos, plásticos e compósitos, que apresentem propriedades adequadas às especificações técnicas das NBRs, bem como às operacionais da ANAC / DECEA-COMAER (ABNT, 2006 ; ANAC, 2018; 2022; COMAER, 2019), de forma que resistam as intempéries e cargas, como ventos fortes provenientes de fenômenos meteorológicos, *jet blasts*³ e pequenos esforços nas manutenções. Os processos para obtenção de peças comumente utilizadas em infraestruturas aeroportuárias com característica de frangibilidade passam pela seleção dos materiais, onde o projeto considera os requisitos de aplicação e onde o

³ *Jet blast* é a turbulência de superfície causada pelos gases emitidos da queima dos combustíveis pelos motores a jato de aeronaves, particularmente durante ou antes da decolagem. O fenômeno produz ventos intensos e turbilhoados, a exemplo do motor a 40% da potência nominal máxima de um Boeing 737-800, que pode produzir ventos de até 100 nós, ou 185 km/h, a 60 metros de distância.

design, as dimensões e as propriedades mecânicas devem ser pré-estabelecidas por normativo do segmento aeronáutico.

A maior parte das peças e componentes com propriedades frangíveis são metálicas, produzidas a partir de materiais como aço, alumínio, latão ou ligas especiais, tratadas ou não termicamente. Entretanto, a possibilidade da substituição desses materiais por polímeros ou compósitos de matriz polimérica na produção de artefatos aeronáuticos, vêm ganhando destaque em função da possibilidade da redução dos custos, agilidade na troca e massa final da peça. Outra vantagem advinda com essa substituição é a facilidade de conformação dos artefatos pelas mais diversas técnicas empregadas para materiais plásticos, a saber: injeção, extrusão, termoformagem, RTM (Resin Transfer Molding) e mais recentemente manufatura aditiva.

A manufatura aditiva de metal (MAM) já vem sendo utilizada nos setores aeronáutico e aeroespacial (Ford; Despeisse, 2016; Gisario; Kazarian; Martina; Mehrpouya, 2019; Mohd Yusuf; Cutler; Gao, 2019; Monteiro; Carmona-Aparicio; Lei; Despeisse, 2022), entretanto, estudos envolvendo a manufatura aditiva (MA) de polímeros são escassos. A MA é um processo de fabricação que vem se destacando e consiste na fabricação de artefatos por meio de adição sucessiva de material na forma de camadas com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional tridimensional (3D) do componente (Volpato, 2021). Ela permite a prototipagem e a produção de geometrias complexas e inéditas sem a necessidade de ferramentas, dispositivos ou gabaritos especiais. A utilização de peças obtidas por MA desempenha um papel cada vez mais significativo nas mais diversas áreas da indústria, principalmente na produção de artefatos únicos ou de baixo volume (Hällgren; Pejryd; Ekengren, 2016).

Dentre as várias tecnologias de MA o método de Modelagem por Fusão e deposição (Fused Deposition Modeling - FDM) ou Fabricação de Filamentos Fundidos (Fused Filament Fabrication - FFF) para polímeros é o mais popularmente difundido (Budzik; Magniszewski; Oleksy; Oliwa *et al.*, 2018; Dolzyk; Jung, 2019; Frascio; Avallé; Monti, 2018; Moreno Nieto; Alonso-García; Pardo-Vicente; Rodríguez-Parada, 2021; Płatek; Rajkowski; Cieplak; Sarzyński *et al.*, 2020), devido ao custo relativamente baixo de dispositivos ou materiais dedicados a esse tipo de tecnologia, facilidade de uso, escalabilidade e sustentabilidade (Korey; Rencheck; Tekinalp; Wasti *et al.*, 2023).

O processo para que uma empresa desenvolva, valide, homologue e possa comercializar um produto aeronáutico que atenda às demandas Industriais e do Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional (SGSO) (ANAC; COMAER, 2017), pela gestão dos riscos operacionais da aviação, implícitos nas exigências dos órgãos reguladores (DECEA) e homologadores (COMAER, 2017) / fiscalizadores (ANAC) (ANAC, 2015), é significativamente extenso, burocrático e custoso, envolvendo além dos processos de seleção de materiais, design, ensaios em uso, validação comercial de preço para garantias das especificações, durabilidade e viabilidade mercadológica. Envolve a necessidade de simulações e testes em tamanho real das peças em laboratórios ou centros de certificação homologados internacionalmente (ANAC, 2018), algo que não existe na América do Sul, inserindo na equação de custos e tempo a logística do envio das peças para outros países.

Dentro desse contexto, a proposta desse trabalho é de desenvolver um componente frangível com propriedades que atendam ao normativo vigente, utilizando processo de manufatura aditiva, reduzindo custos industriais. Espera-se também que o resultado deste trabalho seja capaz de estimular aos órgãos normatizadores e certificadores de que a indústria nacional tem como certificar em solo brasileiro os produtos aeronáuticos, desta forma colaborando indiretamente com a competitividade da indústria aeronáutica nacional.

A relevância do estudo se dá pelo objetivo de contribuir com a demanda apontada acima, em que a pesquisa, sobre conexões frangíveis de equipamentos, instalados nas áreas de segurança das pistas de pouso e decolagem dos aeroportos, especificamente balizamento, após a validação pelos órgãos normativos e reguladores, demonstrará que a modelagem e confecção por manufatura aditiva (impressão 3D) poderá ser empregada pelos gestores aeroportuários, empresas de manutenção, indústria aeronáutica e empresas prestadoras de serviços auxiliares de tráfego aéreo, utilizando materiais comumente encontrados no mercado, como o copolímero acrilonitrila butadieno estireno (ABS), o poliácido láctico (PLA) entre outros, reduzindo custos, tempo de indisponibilidade de serviços e aumentando a eficiência, segurança e regularidade da aviação.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho mecânico quanto a frangibilidade de conexões aeronáuticas, empregadas em equipamentos de sinalização de pistas de pouso e decolagem de aeroportos, modeladas e confeccionados por manufatura aditiva (impressão 3D), empregando o copolímero Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o Políácido Láctico (PLA).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterização dimensional da peça frangível;
- ✓ Modelagem de uma conexão frangível;
- ✓ Obtenção de amostras e corpos de provas de ABS e PLA com 30% e 100% de preenchimento;
- ✓ Caracterização dimensional da peça frangível obtidas por manufatura aditiva;
- ✓ Realização de DMA dos corpos de prova de ABS e PLA;
- ✓ Simulação computacional de DMA;
- ✓ Realização de FTIR dos corpos de prova de ABS e PLA;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA

Segundo (Ashford; Stanton; Moore; Coutu *et al.*, 2015), a infraestrutura aeroportuária refere-se ao conjunto de instalações físicas, equipamentos e serviços necessários para um aeroporto operar. Ela é projetada e construída de modo a atender tanto às necessidades de passageiros, tripulantes, visitantes, bem como garantir a operacionalidade das aeronaves, movimentação de veículos, logística de cargas, prestação de serviços e realização de negócios etc., proporcionando um ambiente seguro e eficiente. Alguns elementos-chave da infraestrutura aeroportuária incluem: pistas de pouso e decolagem; pátio de estacionamento de aeronaves; terminais de passageiros; instalações de carga; torre de controle de tráfego aéreo; estacionamento e acesso terrestre.

Além dessas instalações acima citadas, um aeroporto pode ter outras adicionais, como áreas de manutenção de aeronaves, instalações de *catering*, postos de abastecimento de combustível, instalações de treinamento e centros de gerenciamento de emergências (Lopes; Rodrigues Filho, 2022). A infraestrutura aeroportuária é projetada levando em consideração fatores como demanda de tráfego, segurança, eficiência operacional e regulamentos aplicáveis, com o objetivo de fornecer um ambiente seguro e eficiente para todos os envolvidos na aviação (Young; Wells, 2014).

Existem diversos equipamentos de auxílio às operações de pouso e decolagem em aeroportos, que desempenham um papel fundamental na orientação e segurança das aeronaves durante as fases críticas do voo (Fernandes; Müller; Alves, 2018; ICAO, 2022; Maroja; de Fatima Correia; alves da Silva; da Silva Aragão *et al.*, 2022). Alguns dos principais equipamentos de auxílio são:

- *Instrument Landing System* (ILS): sistema de auxílio à navegação por rádio que fornece informações precisas de direção e altura para os pilotos durante a aproximação e pouso. Consiste em antenas localizadas no início, meio e fim da pista, além de equipamentos de bordo nas aeronaves. Ele permite que os pilotos alinhem a aeronave com a pista de pouso e determinem a altitude correta durante a descida.

- *Precision Approach Path Indicator (PAPI)*: O PAPI é um conjunto de luzes localizado ao lado da pista de pouso. Essas luzes emitem uma indicação visual aos pilotos, mostrando se a aeronave está na trajetória correta de aproximação. O PAPI ajuda o piloto a ajustar sua altitude e ângulo de descida para garantir uma aproximação precisa.
- *Visual Approach Slope Indicator (VASI)*: sistema de luzes de aproximação visual semelhante ao PAPI que também fornece uma indicação visual aos pilotos sobre a trajetória correta de aproximação à pista. O VASI é composto por luzes coloridas que indicam se a aeronave está alta, baixa ou na trajetória correta.
- *Runway Edge Lights*: luzes instaladas ao longo das bordas da pista de pouso e decolagem com o intuito de fornecer uma orientação visual clara aos pilotos durante as operações noturnas ou em condições de baixa visibilidade. As luzes de borda da pista são geralmente brancas, mas podem mudar de cor para indicar pontos de referência ou zonas de segurança.
- *Runway Centerline Lights*: luzes instaladas no centro da pista para fornecer uma indicação visual aos pilotos sobre a localização exata da pista durante a decolagem e o pouso. Elas ajudam os pilotos a manter a aeronave alinhada com a pista e a realizar manobras com precisão.
- *Approach Lighting System (ALS)*: sistema de luzes localizado próximo ao final da pista de pouso e que ajudam os pilotos a realizar uma aproximação suave e segura. O ALS pode incluir luzes de rampa, luzes de sequência, luzes de eixo, entre outros, dependendo do tipo e da categoria do aeroporto.

Esses equipamentos de auxílio às operações de pouso e decolagem, bem como os de movimentação e manobras das aeronaves, veículos e pessoas atendem a normativos que objetivam a segurança das operações e minimização de danos em caso de acidentes aéreos (ANAC, 2018; ICAO, 2022).

3.2. SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA SEGURANÇA OPERACIONAL (SGSO)

De acordo com do Nascimento Silva e de Andrade Silva (2023), a segurança das operações aéreas evoluiu muito desde as primeiras tentativas de realização de voos, em que, além de calcular o empuxo, a sustentação e a aerodinâmica para se elevar do chão e voar, os pioneiros da aviação também buscavam soluções para o retorno ao solo em segurança, de forma que para o sucesso da operação não bastava decolar, manter o controle do voo e pousar, era necessário previamente identificar os perigos, analisa-los e realizar ações para manter os riscos associados no menor nível aceitável possível.

Com o aumento das operações áreas, do número de pessoas e quantidades de cargas as preocupações com a segurança também evoluíram, assim, as tecnologias, procedimentos e estudos mais estruturados sobre o assunto buscaram atender a gestão da segurança operacional, através de várias formas de abordagens, passando por três eras distintas: técnica, de fatores humanos e organizacional.

A primeira é a de fatores técnicos que iniciou-se no final da II Guerra Mundial, tendo como marco a realização da “Convenção sobre Aviação Civil Internacional”, promovida pela ONU (Organização das Nações Unidas) e a criação da OACI (Organização da Aviação Civil Internacional), tendo como objetivos desenvolver a navegação aérea internacional, através de estudos e normatizações, e proporcionar o progresso dos transportes aéreos focando a segurança, a eficiência. (ICAO, 2016)

Essa era culminou em uma grande evolução técnica na aviação, proporcionando maior confiabilidade aos equipamentos de infraestrutura aeroportuária, de navegação e às aeronaves. Em decorrência disso, os acidentes aeronáuticos diminuíram consideravelmente, entretanto ainda se mantiveram em um patamar elevado o bastante para gerar certo incômodo às empresas pelas perdas materiais e insegurança aos passageiros devido às vidas humanas perdidas. Isso exigiu mais investimentos em segurança operacional a partir da década de 1970, conforme afirma Cunha (2022).

A partir desta constatação iniciou-se a era dos fatores humanos, que perdurou até a década de 1990. O destaque deste período se deu graças às investigações de acidentes, que revelaram através de estatísticas que o erro humano passou a ser o maior causador ou fator contribuinte dos acidentes e incidentes aeronáuticos. Esta constatação fez com que os investimentos em pesquisa sobre o comportamento e

desempenho do ser humano na aviação aumentassem, buscando compreender as causas do erro humano para poder implantar medidas mitigadoras a fim de evitá-lo, como empregar melhorias em treinamento, contribuição psicológica e técnica, e até em ergonomia, para melhorar a capacidade física do pessoal envolvido com a aviação.

A era organizacional se deu a partir da década de 90, quando iniciou-se a priorização da segurança operacional, visto que se percebeu que a aviação não é uma operação isolada, mas a integração de diversos sistemas, exigindo que a segurança operacional abrangesse ao mesmo tempo fatores humanos, técnicos e organizacionais. A segurança operacional passou, então, a focar seus esforços na prevenção de acidentes baseando-se em princípios da administração como aspectos organizacionais e sistêmicos, como preconiza o pensamento sistêmico da administração, que capacita o observador a ver os elementos de um conjunto como um todo e não cada parte em sua singularidade (Chiavenato, 2003).

A criação de novos métodos para prevenção, investigação, organização e normatização da navegação aérea, manutenção e operação de aeronaves em voo e no solo promoveu a criação, no âmbito da OACI, do Safety Management System - SMS, adotado no Brasil como o Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional (SGSO). O SGSO é um método sistemático e integrado para o gerenciamento da segurança operacional que inclui a estrutura orgânica, as linhas de responsabilidade, as políticas e os procedimentos necessários para a manutenção da segurança operacional em um nível aceitável. (Cunha, 2022)

A segurança é um conceito que pode ter inúmeras conotações, e isto depende do sujeito a que se refere, do tempo que se aponta e do contexto em que se apresenta a questão da segurança. Na aviação este conceito de segurança também pode ter vários significados de acordo com o ponto de vista. O DOC 9859 – Safety Management - Manual (ICAO, 2016), por exemplo, cita cinco situações com noções diferentes sobre segurança. A primeira é o conceito de zero acidente ou incidente grave, que normalmente é compartilhada e desejada pelos passageiros, estes que não querem imaginar a menor possibilidade de uma ocorrência grave como um acidente ou um incidente grave. A segunda é o conceito de que uma operação esteja livre de perigos, ou seja, não haja nenhum fator que possa ameaçar a operação causando danos a algo ou a alguém. A terceira é o conceito que recai sobre os

empregados das organizações de aviação civil, quando se espera que eles estejam agindo de forma segura em suas atividades. A quarta é a concepção de que não haja a possibilidade de se acontecer erros humanos e a quinta é o conceito da existência de uma regulamentação que, posta em prática, seja uma defesa para os riscos inerentes às atividades de um aeroporto evitando-se assim a ocorrência de acidentes.

O DOC 9859 (ICAO, 2016) apresenta o modelo de causas de acidentes nas organizações criado pelo Professor James Reason. Este modelo demonstra como a aviação (ou qualquer sistema produtivo) trabalha eficientemente ou, conseqüentemente, sofre falhas. Sistemas complexos como a aviação são regidos por princípios de segurança (defesas) do tipo *Failsafe System*, isto é, não são afetados por um fator único isolado. A significância disto é que é necessário haver um conjunto de elementos que juntos venham desencadear uma sucessão de eventos que podem ocasionar um acidente.

As defesas de um sistema como a aviação são redundantes e funcionam em camadas bloqueando a passagem dos fatores que podem provocar um acidente. Estes fatores podem ser de dois tipos. O primeiro está relacionado aos elementos chamados de condições latentes que são brechas do sistema que advêm de decisões nos mais altos níveis da organização. O segundo está relacionado às falhas ativas, relacionadas a erro humano. Segundo o modelo conceitual de REASON (2016), estas falhas podem ser ações ou omissões cometidas por funcionários, incluindo erros e violações das normas e procedimentos do sistema.

Para se reforçar as defesas sistêmicas apresentadas no modelo Reason, ou seja, a tecnologia, o treinamento e a regulamentação, há que se empenhar na observação dos processos. Assim o SGSO é a representação máxima da sistematização de normatização dos esforços em prol da segurança operacional, buscando a identificação sistêmica dos perigos⁴, inerentes a atividade fim da Empresa, gerenciamento dos riscos⁵ e manutenção e melhoria contínua dos indicadores de gestão para que o nível aceitável seja sempre garantido.

Um exemplo de gerenciamento de riscos operacionais pode ser observado no estudo de Owadokun (2022), onde ele apresenta as considerações sobre

⁴ Perigo é qualquer condição, objeto ou atividade que potencialmente pode causar lesões às pessoas, danos a bens (equipamentos ou estruturas), perda de pessoal ou redução da habilidade para desempenhar uma função determinada.

⁵ Risco é a probabilidade e severidade de ocorrerem consequências da exposição ao um perigo.

gerenciamento de riscos operacionais em um estudo de caso sobre o Aeroporto Internacional do Galeão – Antonio Jobin, Rio de Janeiro/RJ (Código IATA: GIG/ Código ICAO: SBGL), destacando na Tabela 1, um exemplo de Mapa de Riscos - Probabilidade (nível de 1 a 5) versus Severidade (nível de 1 a 5), identificando o grau de relevância (nível de 5 a 25 – acréscimos em intervalos de 5 – baixa, média, alta, muito alta) da gestão do riscos associados a ocorrência de um acidente / incidente aeronáutico na pista de pouso/decolagem, ou nas taxi-ways, devido a inoperância total ou parcial dos auxílios visuais dos sinalizadores de luzes de pista e taxi (sistema de balizamento), podendo indisponibilizar o aeroporto às operações aeronáuticas, sendo necessário a mitigação deste risco com a reposição do sistema de balizamento da forma mais imediata possível, com grau de relevância média.

Tabela 1 - Mapa de Riscos - Probabilidade x Severidade - Equipamentos Críticos Aeroporto Galeão - 2019

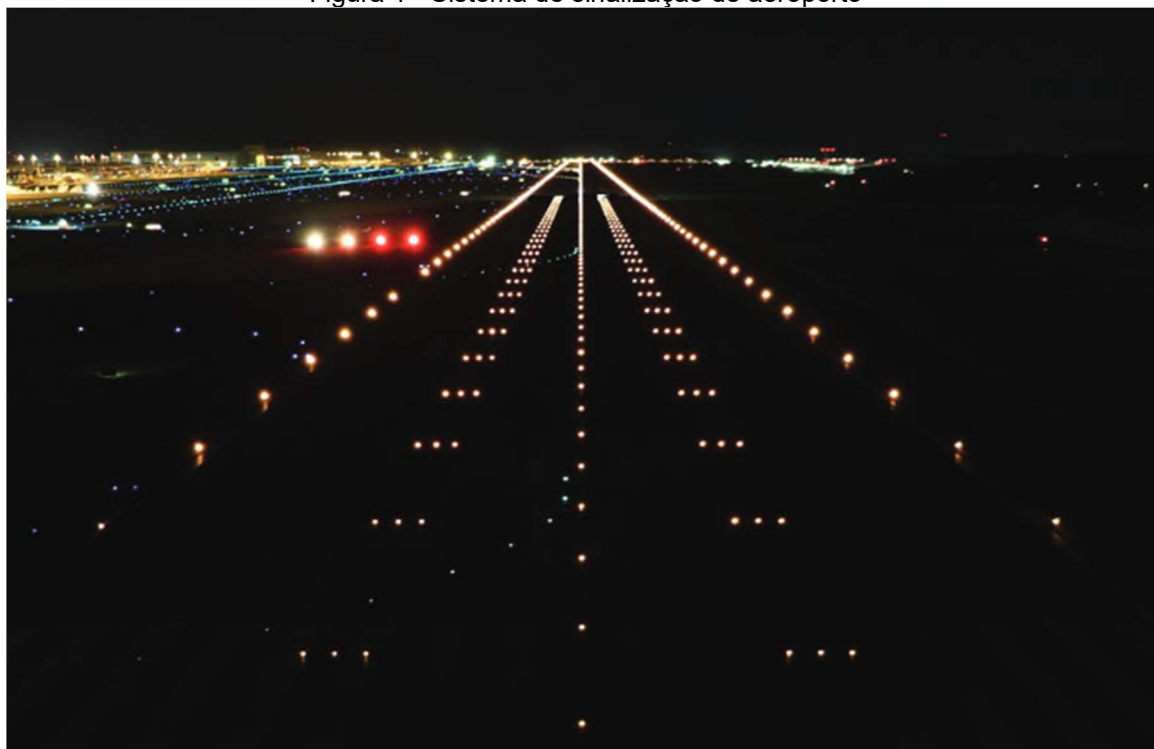
Equipamento	Risco	Efeito do Risco	Percepção do Cliente	Localização	Probabilidade	Severidade	Relevância
Pista 15-33	Falha estrutura I	1- Acidente / incidente aeronáutico 2- Inoperância da pista de pouso e decolagem	Sim	Sistema 15-33	3	5	15
Taxiway Y	Falha estrutura I	1- Interdição das posições código F do Pier Sul 2 - Interdição do fluxo entre pátio 3 e pátio 2 3- Aumento de fluxo nas taxiways K e B	Sim	Pátio	4	4	16

Fonte. Owadokun (2022)

3.3. SINALIZADORES AERONÁUTICOS

Os sinalizadores aeronáuticos desempenham um papel fundamental na segurança e orientação das aeronaves nos aeroportos e áreas de pouso. Esses sinalizadores são usados para transmitir informações importantes aos pilotos e tripulações, garantindo uma operação segura e eficiente (ANAC, 2021; ICAO, 2022). Na Figura 1, pode-se observar um aeroporto dotado de sistemas de sinalização completo.

Figura 1 - Sistema de sinalização de aeroporto



Fonte: Anexo 14 – Aeroportos - DOC 9157, OACI, 2021.

Alguns exemplos de sinalizadores aeronáuticos segundo o DOC 9157, ICAO (2005), incluem:

- Sinais de orientação de pista: esses sinalizadores são usados para indicar a direção correta da pista de pouso e decolagem. Podem incluir setas direcionais, sinais de seta de avanço, setas de retrocesso e setas de curva, que indicam aos pilotos como se mover na área de superfície do aeroporto.
- Sinais de posição de aeronaves: sinalizadores usados para indicar a posição correta de uma aeronave no pátio de estacionamento ou na área de manobra. Podem incluir cones coloridos, barras de delimitação e sinalizadores luminosos para indicar onde uma aeronave deve ser estacionada ou movimentada.
- Balizamento de pistas de pouso e decolagem: sistema de sinalização visual que tem como objetivo fornecer orientação clara e precisa para os pilotos durante as operações de voo. É composta por uma variedade de luzes instaladas ao longo da pista, auxiliando os pilotos na navegação, especialmente em condições de baixa visibilidade ou durante a noite. Alguns dos principais componentes do balizamento de pistas incluem:

- ✓ Luzes de Borda de Pista: instaladas ao longo das bordas da pista de pouso e decolagem, são normalmente brancas e fornecem uma referência visual clara para os pilotos, delimitando a extensão da pista.
- ✓ Luzes de Threshold: dispostas no início da pista, tanto no lado direito quanto no lado esquerdo, elas são normalmente verdes e indicam o início da área de pouso para os pilotos.
- ✓ Luzes de Zona de Toque: instaladas antes do ponto de contato inicial da aeronave com a pista, ajudam os pilotos a identificarem a área ideal para o toque inicial durante a aproximação para o pouso, são normalmente brancas.
- ✓ Luzes de Pista Iluminada: luzes brancas que iluminam toda a extensão da pista com o intuito de fornecer uma visibilidade clara da pista durante a noite ou em condições de baixa visibilidade, permitindo que os pilotos acompanhem visualmente a pista durante as fases de pouso e decolagem.
- ✓ Luzes de Barramento Central: colocadas ao longo do centro da pista com o objetivo de fornecer orientação adicional aos pilotos durante as operações de pouso e decolagem.
- ✓ Luzes de Setas de Táxi: instaladas nas áreas de manobra e de taxiamento próximo às pistas, são geralmente verdes e ajudam os pilotos a identificar as rotas de taxiamento corretas.

Além das luzes, o balizamento de pistas também pode incluir outras sinalizações visuais, como marcas pintadas no pavimento da pista, indicando as zonas de toque e os limites da pista.

Os sinalizadores são dispositivos de comando elétrico, cuja função é a sinalização de ocorrências, indicando o estado de funcionamento da máquina ou do equipamento. Nos aeroportos, a localização dos sinalizadores podem representar um perigo para a aeronave, em caso de impacto acidental durante o pouso, decolagem ou manobras no solo (Abeyratne, 2014). Todos esses equipamentos e seus suportes devem ser frangíveis e montados o mais baixo possível para garantir que o impacto não resulte na perda de controle da aeronave, ou maiores danos em caso de acidentes. Essa frangibilidade é alcançada pelo uso de materiais leves e/ou pela

introdução de mecanismos de quebra ou falha que permitem que o objeto quebre fragilmente, distorça ou ceda sob impacto. Os sinalizadores e seus suportes podem ser constituídos de peças metálicas, poliméricas, ou de materiais compósitos. Na Figura 2 estão apresentados exemplos de alguns sinalizados típicos.

Figura 2 - Sinalizadores aeronáuticos



Fonte: https://www.aeroexpo.online/pt/fabricante-aeronautico/luz-aeroporto-742-_3.html

3.4. FRANGIBILIDADE

A frangibilidade é um conceito utilizado em diversas áreas, como na engenharia de materiais, engenharia mecânica e ciência dos materiais. Refere-se à propriedade de um material ou estrutura se romper ou quebrar sob a ação de uma força externa aplicada (FAA, 2021; ICAO, 2022).

A propriedade de frangibilidade envolve princípios e teorias relacionadas à resistência dos materiais e à mecânica dos sólidos, tais como: tensão e deformação, limite de resistência, tenacidade; propagação de trincas e microestrutura (composição, tamanho de grão, inclusões e fase cristalina). Em seu conceito mais genérico, frangibilidade é a qualidade do que é frangível, frágil. Um objeto frangível, por sua vez, pode ser entendido no contexto da aviação como um objeto de pouca massa, projetado para quebrar, deformar ou ceder sob impacto de modo a minimizar o perigo às aeronaves (ANAC, 2018; FAA, 2021; ICAO, 2005). O estudo e entendimento desses princípios são importantes para o projeto e a análise de estruturas e materiais, visando garantir a segurança e o desempenho adequado em várias aplicações.

A frangibilidade de produtos aeronáuticos refere-se à capacidade de um componente, peça ou estrutura de se quebrar, deformar ou fragmentar de forma

controlada em caso de impacto. Essa característica é importante para minimizar os danos causados por colisões, acidentes ou aterrissagens forçadas, reduzindo os riscos para os ocupantes da aeronave e outras pessoas envolvidas (Salih, 2021).

No contexto da aviação, a frangibilidade é uma propriedade importante de estruturas e equipamentos próximos às pistas de pouso e decolagem. A Organização de Aviação Civil Internacional (ICAO) e outras organizações de aviação estabelecem normas e diretrizes relacionadas à frangibilidade (FAA, 2021; ICAO, 2005). Algumas das principais normas incluem:

- ICAO, Aerodrome Design. Operations - Annex 14. Fifth Edit, v. 1, 2009 - Aeródromos da ICAO: esse anexo aborda os padrões e recomendações para a construção, operação e manutenção de aeródromos. O seu capítulo 6 especifica os requisitos para a frangibilidade de obstáculos próximos às pistas.
- ACI-NA/AAAE (*Airport Consultants Council and American Association of Airport Executives*): essas organizações têm publicado diretrizes e recomendações para a frangibilidade de objetos em áreas de proteção de pista (*Runway Protection Zone*) e áreas de transição de superfície (*Surface Transition Zone*).
- FAA Engineering Brief 67: emitido pela Administração Federal de Aviação (FAA) dos Estados Unidos, este documento fornece diretrizes e critérios para a frangibilidade de obstáculos próximos a pistas de pouso e decolagem.
- IEC 61827: esta publicação da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) estabelece diretrizes para a frangibilidade de equipamentos de auxílio à navegação aérea, como luzes de obstáculos, faróis de aeródromo e outros dispositivos eletrônicos.

Para que um produto aeronáutico, como um conector frangível, possa ser certificado, homologado e autorizado para uso, é necessário atender a várias normas e regulamentações, especialmente para aqueles que serão instalados próximos as pistas de pouso e decolagem, que devem atender explicitamente aos requisitos de apresentar a propriedade de frangibilidade. No Anexo I é possível observar o processo de certificação de uma torre de equipamento meteorológico da empresa Hobeco como demonstração do rigor de uma certificação de frangibilidade, que onera a indústria aeronáutica, especialmente a nacional, por exigir que estes requisitos e critérios sejam certificados por empresas credenciadas e autorizadas para tal fim, o que atualmente não existem no Brasil. Algumas dessas normas incluem:

- Regulamento de Certificação de Aeronaves (FAR Part 25): emitido pela Administração Federal de Aviação (FAA) dos Estados Unidos. O FAR Part 25 estabelece os padrões de certificação para aeronaves de transporte de passageiros e carga. Essa regulamentação inclui requisitos relacionados à frangibilidade de componentes, como superfícies de controle, trens de pouso e componentes externos.
- European Aviation Safety Agency (EASA): a EASA é a agência reguladora da aviação na União Europeia. Ela emite diretrizes e regulamentos de segurança, que podem abordar a frangibilidade de produtos aeronáuticos, conforme necessário.

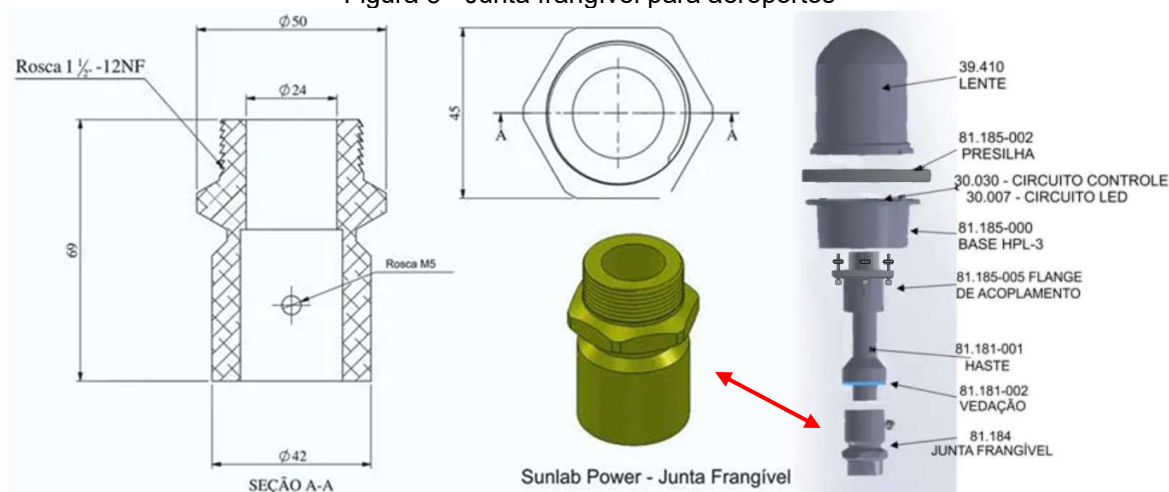
No setor aeronáutico é imprescindível que testes e ensaios de frangibilidade sejam realizados com o objetivo de avaliar a capacidade de componentes, estruturas ou equipamentos de se quebrarem, deformarem ou fragmentarem de forma controlada em caso de impacto. Esses testes ajudam a garantir os requisitos de segurança e frangibilidade dos produtos, estabelecidos pelas normas e regulamentos. Para serem aceitos no processo de certificação os laboratórios que realizam os ensaios e testes devem ser credenciados junto ao Comando da Aeronáutica, conforme a Diretriz DCA 800-2 (2019). Alguns dos testes e ensaios comumente utilizados incluem: teste de impacto dinâmico, teste de penetração, teste de flexibilidade e teste de carga estática.

Além desses testes, também podem ser realizados ensaios não destrutivos, como inspeções visuais, ultrassom e radiografia, além de simulações computacionais, para detectar discontinuidades internas ou falhas ocultas que possam comprometer a frangibilidade do produto. Os ensaios mecânicos são comumente utilizados para certificações de materiais e peças, somando-se às simulações pode-se reduzir os custos operacionais, como quando os ensaios são comparados com resultados de simulações utilizando Método de Elementos Finitos (JUNIOR, 2012; Maia, 2008; Secchi, 1995).

Um exemplo de produto frangível empregado no setor aeronáutico está apresentado na Figura 3. Trata-se de uma junta para sinalizador elevado de heliponto, tipo SN-05/ HPL, da Lábramo Centronics. Sua área de seção transversal (apontada pela seta) apresenta redução de dimensão e design de forma que, sob esforço de impacto, concentrará as tensões fraturando fragilmente.

Usualmente estas peças são constituídas de materiais metálicos como ferro fundido, alumínio aeronáutico, aço inoxidável, etc., variando conforme o fabricante, mas sempre atendendo às especificações normativas de resistência mecânica (Abeyratne, 2014; Kazda; Caves, 2015; Spring; McNerney, 1996).

Figura 3 - Junta frangível para aeroportos



Fonte: <http://labramocentronics.commercesuite.com.br>

3.5. MANUFATURA ADITIVA

O uso de tecnologias como a manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, vem impactando de forma significativa e positiva a indústria abrangendo uma ampla gama de produtos em diversos segmentos industriais tais como: farmacêutico (Varghese; Salvi; Sood; Karsiya *et al.*, 2022), biomédico (Osman; Lu, 2023; Touri; Kabirian; Saadati; Ramakrishna *et al.*, 2019), da engenharia (Weng; Wang; Senthil; Wu, 2016), da eletrônica (Du; Liang; Luo; Zheng *et al.*, 2017), aeroespacial (Mami; Revéret; Fallaha; Margni, 2017), etc. Isso se deve em parte à grande diversidade de materiais que podem ser empregados como matérias-primas tais como: metais, cerâmicas, polímeros, dentre outros (Guo; Zhang; Yue; Wang, 2019), além das vantagens que a própria tecnologia oferece em comparação com outras técnicas convencionais de manufatura.

De acordo com (Almeida; Alves, 2020), o que impulsiona o uso da manufatura aditiva é a possibilidade de se atender a necessidades específicas, através de capacidades tecnológicas características do processo e a produção de peças personalizadas economicamente e tecnicamente viáveis. Por isso, a sua utilização em

áreas distintas da manufatura tem crescido consistentemente como é o caso da indústria aeroespacial (na fabricação de pás de turbinas e elementos estruturais), da educação (na modelagem conceitual e resolução de problemas), da área médica e odontológica (na fabricação de órteses e próteses e de modelos para planejamento cirúrgico), dentre outras.

De acordo com o relatório *O Futuro do Trabalho*, do Fórum Econômico Mundial de 2018 (Mundial, 2018), a expectativa era de que até o final de 2022 aproximadamente 41% de empresas de diferentes segmentos industriais pretendiam investir na tecnologia de impressão 3D (Mundial, 2018). No relatório de 2020 a previsão é que esse percentual cresça 10% até 2025, já englobando também a impressão 4D⁶ (World Economic Forum, 2020). Assim, é notório que a manufatura aditiva se consolide como um dos maiores desenvolvimentos tecnológicos de processos de manufatura das últimas décadas.

A manufatura aditiva (MA) remonta à década de 1970, mas só foi consolidada no final da década de 80 com as primeiras máquinas de prototipagem rápida (*rapid prototyping*), especificamente a estereolitografia⁷. Com o tempo, a MA evoluiu para o uso de várias tecnologias, como sinterização seletiva a laser, modelagem de deposição fundida, entre outras (Mateti; Jain; Shruthi; Laha *et al.*, 2023) e possibilitando a fabricação direta de produtos sofisticados com multifuncionalidade como propriedades mecânicas, elétricas, térmicas e magnéticas etc. (Guo; Zhang; Yue; Wang, 2019). A MA é um processo de fabricação que cria objetos tridimensionais camada por camada a partir de um modelo digital (Rodrigues; de Senzi Zancul; Mançanares; Giordano *et al.*, 2017), como ilustrado na Figura 4.

⁶ A impressão quadridimensional (4D) foi introduzida pela primeira vez em 2013 e corresponde à impressão 3D de objetos que podem, imediatamente após impressos, se autotransformar em forma ou função quando expostos a estímulos predeterminados (pressão, calor, corrente, luz ultravioleta ou outras fontes de energia, etc. ou seja, são estruturas 3D responsivas à estímulos (Miao *et al.*, 2017; Haleem *et al.*, 2021).

⁷ Estereolitografia é uma forma de tecnologia de impressão 3D usada para criar modelos, protótipos, padrões e peças de produção em camada por camada, usando processos fotoquímicos pelos quais a luz faz com que monômeros e oligômeros químicos se cruzem para formar polímeros

Figura 4 - Representação das principais etapas do processo de manufatura aditiva ou impressão 3D

			
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)	Planejamento de processo (fatiamento)	Processamento por adição das camadas	Peça fabricada
Modelo eletrônico 3D		Modelo físico	

Fonte: Volpato (2021)

A American Society for Testing and Materials (ASTM) define a impressão 3D como a “fabricação de objetos através da deposição de materiais usando uma cabeça de impressão, bocal ou outra tecnologia de impressão” (Varghese; Sood; Salvi; Karsiya *et al.*, 2022).

A fundamentação teórica da impressão 3D envolve vários conceitos e princípios, incluindo (Volpato, 2021):

- Modelagem 3D: começa com um modelo digital tridimensional. A modelagem é o processo de criação de um modelo virtual usando software de design assistido por computador (CAD) ou por meio de técnicas de digitalização, como a digitalização a laser. O modelo 3D é geralmente salvo em um formato de arquivo padrão, como o formato STL (*Standard Tessellation Language*).
- Princípios de fabricação aditiva: consiste em adicionar material camada por camada para construir um objeto. Existem diferentes métodos incluindo a fusão seletiva a laser (SLM), a sinterização seletiva a laser (SLS), a estereolitografia (SLA) e a Modelagem por Fusão e deposição (FDM). Cada método utiliza uma abordagem específica para adicionar e solidificar o material.
- Preparação do modelo: antes da impressão, o modelo precisa ser preparado. Isso geralmente envolve a divisão do modelo em camadas finas, chamadas de fatias, que serão impressas sequencialmente. Um software de fatiamento é usado para converter o modelo em instruções

de modo que a impressora 3D possa entender, como coordenadas de movimento e parâmetros de deposição de material.

- Materiais de impressão: uma variedade de materiais é utilizada, incluindo plásticos, metais, cerâmicas, resinas e até mesmo biológicos. Cada um deles tem propriedades específicas que afetam a qualidade, resistência e acabamento do objeto impresso. Alguns materiais requerem processos de pós-processamento, como cura por UV ou tratamentos térmicos, para obter as propriedades desejadas.
- Controle de processo: durante a impressão, vários parâmetros precisam ser controlados para garantir a qualidade e a precisão do objeto impresso. Isso inclui a temperatura da plataforma de construção, a velocidade de movimento da cabeça de impressão, a taxa de deposição de material e a resolução dos eixos de movimento da impressora. O controle adequado desses parâmetros é crucial para obter resultados consistentes e confiáveis.
- Design para impressão 3D: o design de peças para impressão 3D difere do design tradicional, pois a fabricação aditiva permite a criação de formas e estruturas complexas que seriam difíceis ou impossíveis de serem alcançadas por outros métodos. O design para impressão 3D envolve considerações como a orientação da peça durante a impressão, o suporte necessário para estruturas suspensas e a otimização da geometria para minimizar o uso de material e reduzir o tempo de impressão.

Ainda de acordo com (Volpato, 2021) e (Guo; Zhang; Yue; Wang, 2019), de modo geral, o processo de manufatura aditiva ou impressão 3D compreende as seguintes etapas:

- 1) Modelagem tridimensional, com a geração de um modelo geométrico 3D da peça (por exemplo através de CAD);
- 2) Obtenção de modelo geométrico 3D num formato específico para manufatura aditiva, geralmente representado por uma malha de triângulos, em um padrão adequado;

- 3) Planejamento do processo para fabricação por camada (fatiamento e definição de estruturas de suporte e estratégias de deposição do material);
- 4) Fabricação propriamente dita da peça em equipamento de manufatura aditiva; e
- 5) Pós- processamento (limpeza, usinagem, etc.), que irá variar de acordo com a tecnologia aplicada.

O advento das impressoras 3D para manufatura aditiva trouxe consigo grandes impactos disruptivos na produção global e na cadeia de suprimentos do setor manufatureiro. O seu crescente desenvolvimento e sofisticação indicam ao longo dos anos uma redução significativa de custo de manufatura, com isso a tecnologia vem se tornando mais acessível (Kolade; Owoseni, 2022), principalmente quando comparada a outras técnicas convencionais de processamento para materiais plásticos que representam grandes investimentos iniciais em termos de maquinário e ferramental, a exemplo das injetoras de plásticos.

Dentre as muitas vantagens da manufatura aditiva podemos destacar: liberdade geométrica na fabricação de peças complexas e mais leves; automação; uso de materiais de baixo custo; baixo desperdício de matéria prima e alta eficiência energética; flexibilidade com o uso de diferentes materiais; confiabilidade relativamente alta; não requerer dispositivos específicos de fixação nem troca de ferramentas durante fabricação da peça; permitir que a peça seja fabricada em equipamento único do início ao fim (a exceção é para aquelas peças que necessitam de pós-processamento, por exemplo para aumentar a resistência mecânica, precisão, etc.); possibilidade de mistura de diferentes materiais ou de mudar a densidade do material durante processamento que permite a variação de propriedades como resistência mecânica, dureza, porosidade, flexibilidade, etc., ampliando assim, as aplicações do produto (Carneiro; Silva; Gomes, 2015; Volpato, 2021). Permite ainda uma produção sob demanda, mais enxuta, com a criação de produtos sob medida e personalizados a um custo menor - tanto em termos de produção quanto de logística de distribuição (Kolade; Owoseni, 2022).

Dentre as desvantagens da MA podemos destacar a obtenção de materiais com propriedades diferentes dos obtidos por técnicas convencionais (materiais anisotrópicos); precisão e acabamento superficial das peças inferiores às das obtidas

por métodos convencionais (formação de degraus nas superfícies de regiões inclinadas, desvio dimensional na direção da construção, etc.); limitação da maioria das tecnologias em termos de materiais que podem ser utilizados e limitação na fabricação de lotes grandes em virtude da lentidão e custo, quando comparado à técnicas convencionais. No entanto, para aplicações específicas ou de baixa produção, como nas áreas médicas e aeroespacial, esses processos tem ganho cada vez mais espaço como método de manufatura e produção final de componentes (Volpato, 2021).

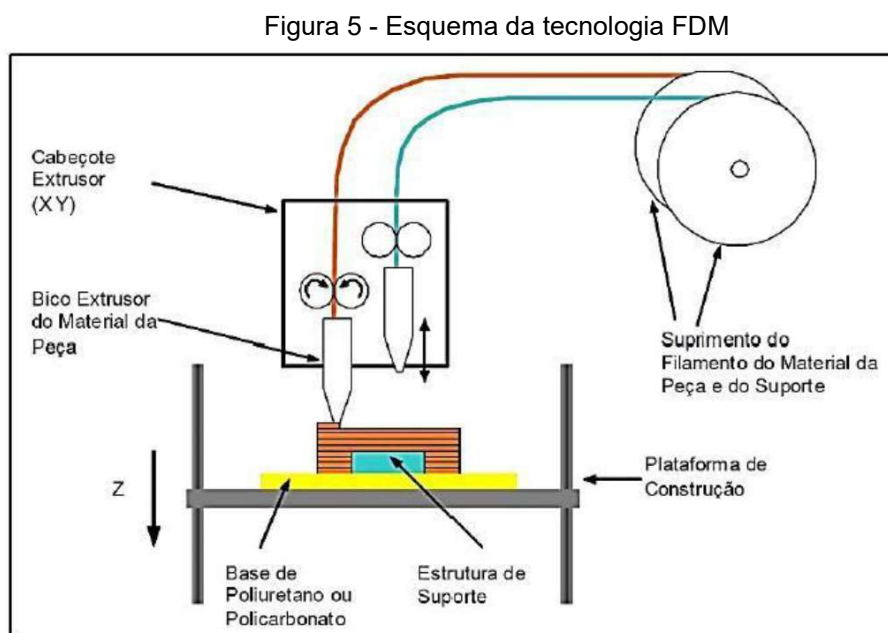
Segundo (Volpato, 2021), o advento da MA vem sendo considerado um marco em termos de tecnologia de manufatura, com crescente crescimento em termos de investimentos e ampliação da aplicabilidade, o que tem impactado positivamente vários setores. Entretanto, observa-se que existe ainda muito espaço para novos aperfeiçoamentos e desenvolvimentos, o que gera um cenário de grandes possibilidades de pesquisas, tanto em materiais quanto em processos e aplicações. Uma dessas possibilidades é a ampliação do uso de materiais poliméricos em substituições à materiais cerâmicos e metálicos nas mais distintas aplicações. Uma dessas aplicações, segundo Almeida e Alves (2020), é a adoção de polímeros de engenharia como matéria-prima para fabricação de partes de equipamentos que já deixou de ser uma tendência e se tornou uma realidade, especialmente na tecnologia de modelagem por fusão e deposição (FDM) ou manufatura aditiva de Fabricação de Filamentos Fundidos (FFF), amplamente empregada e acessível na atualidade.

3.5.1. Modelagem por Fusão e deposição (FDM)/ Fabricação de Filamentos Fundidos (FFF).

A modelagem por fusão e deposição⁸ ou fabricação de filamentos fundidos é uma técnica de MA baseada na extrusão, onde o material é depositado na forma de um filamento de diâmetro reduzido, obtido através do processo de extrusão em um bico calibrado. O cabeçote extrusor é montado sobre um sistema com movimentos controlados no plano X-Y para se obter a geometria de cada camada. Em geral, o sistema opera sobre uma plataforma de construção constituída de um mecanismo

⁸ Fused Deposition Modeling (FDM) é um nome comercial registrado pela Stratasys empresa que desenvolveu originalmente a tecnologia.

elevador, que se desloca para baixo na direção do eixo Z ao término de cada camada, numa distância equivalente à espessura desta. Em alguns equipamentos o cabeçote extrusor pode se deslocar para cima, enquanto a plataforma permanece estacionária. O processo é repetido a cada camada de material depositado até que toda a peça seja erguida. Na Figura 5 está apresentada uma representação esquemática da tecnologia FDM (Volpato, 2021).



Fonte: Volpato (2021)

Dentre as vantagens das técnicas de FDM se destacam: simplicidade do princípio de deposição quando comparado a outras técnicas; fabricação de peças com geometrias complexas e cavidades; o fato de ser uma tecnologia limpa; o baixo custo; versatilidade; a utilização de termoplásticos de commodities e de engenharia - materiais mecanicamente, termicamente, quimicamente e ambientalmente estáveis; não requer etapa de pós-cura. Uma característica importante é que os equipamentos de FDM podem trabalhar em amplas faixas de temperatura desde que atinja a temperatura de fusão do polímero empregado, o que garante a manufatura de diferentes polímeros. Isso significa dizer que o bico extrusor pode trabalhar desde a temperatura ambiente até a temperatura de fusão específica do material, o importante é garantir a solidificação no tempo adequado do material (seja por reação física ou química) para consequente adesão rápida na plataforma de construção e aos filamentos previamente depositados, caso contrário haverá o descolamento o que comprometerá

a construção da peça. Também é importante a manutenção da pressão constante durante a deposição, para que, combinado com uma velocidade controlada de deslocamento do cabeçote, a seção transversal do filamento se mantenha constante (Guo; Zhang; Yue; Wang, 2019; Volpato, 2021).

Como desvantagens da técnica de FDM apontadas por alguns autores podemos citar: restrição na precisão dimensional e resolução dos detalhes; propriedades mecânicas insatisfatórias e velocidade de impressão limitada para algumas aplicações industriais; necessidade de estruturas de suporte em regiões suspensas ou com geometrias negativas com ângulo de inclinação abaixo do ângulo de autossuporte; desconhecimento mais profundo acerca dos filamentos disponíveis comercialmente (presença de aditivos, grade, etc.); baixo acabamento superficial; presença de poros; necessidade de pós-processamento para remoção das estruturas de suporte; limitação no número de fabricantes e de insumos que os produzem; lentidão do processo quando comparado a outras técnicas de MA e técnicas convencionais, etc. Vale salientar que a maioria dessas limitações ou desvantagens vem sendo eliminadas ou minimizadas na medida em que estudos e investimentos na tecnologia de FDM vem sendo realizados. Além disso, com a expiração do tempo e quebra das primeiras patentes associadas a tecnologia, centros e institutos de pesquisa tem disponibilizado os resultados de pesquisas na área propiciando um avanço significativo nos processos de desenvolvimento da FDM (Guo; Zhang; Yue; Wang, 2019; Volpato, 2021).

A tecnologia FDM utiliza os mesmos polímeros usados nos processos de manufatura tradicionais e que são empregados nas mais diversas aplicações que demandam tolerâncias, dureza e estabilidade ambiental exigentes ou ainda propriedades especializadas como dissipação eletroestática, translucência, biocompatibilidade, inflamabilidade, etc. Exemplos de filamentos termoplásticos, e elastoméricos disponíveis comercialmente incluem: acrilonitrila butadieno estireno (ABS), ácido polilático (PLA), acrilonitrila estireno acrilato (ASA), poliamida (PA), polipropileno (PP), policarbonato (PC), polifenilsulfona (PPSF, PPS ou PPSU), polieterimida (PEI), álcool butenodiol vinílico (BVOH), poliuretano termoplástico (TPU), polietileno tereftalato (PET), PET reciclado (rPET), elastômero termoplástico (TPE), poliestireno de alto impacto (HIPS), elastômero de copoliéster termoplástico (TPC), álcool polivinílico (PVA), poliéter éter cetona (PEEK), floreto de polivinildeno (PVDF),

polioximetileno (POM), polihidroxialcanoato (PHA) misturado com PLA e algumas outras misturas dos polímeros mencionados anteriormente formando blendas ou compósitos a exemplos do PLA/fibra de carbono (Ahmad; Ishak; Taha; Mustapha *et al.*, 2023; Liu; Wang; Wu; Cui *et al.*, 2019; Osman; Lu, 2023; Xiang; Zhang; Harkin-Jones; Zhu *et al.*, 2020).

3.5.2. Políácido láctico - PLA

O Políácido láctico (PLA), polímero termoplástico biodegradável e biocompatível amplamente utilizado na impressão 3D é obtido a partir de fontes renováveis, como amido de milho, cana-de-açúcar ou outras matérias-primas ricas em amido. Sua estrutura química é baseada em unidades repetitivas de ácido láctico, que são unidas por meio de ligações éster. Essa estrutura dá ao PLA suas características únicas de biodegradabilidade e biocompatibilidade.

O PLA possui propriedades mecânicas adequadas para muitas aplicações na impressão 3D (Abreu, 2015; Ahangar; Cooke; Weber; Rosenzweig, 2019; Marques; Sánchez; Spohr, 2021), pois combina rigidez e tenacidade. De fato, esse termoplástico apresenta maior rigidez quando comparado a outros filamentos comumente usados, como o ABS, entretanto, é menos resistente a impactos. As propriedades mecânicas do políácido láctico podem ser afetadas por fatores como a taxa de resfriamento durante a impressão e o processo de pós-resfriamento. Possui uma temperatura de fusão relativamente baixa, o que o torna adequado para impressoras 3D comumente utilizadas, como as que utilizam o método FDM (Modelagem por Fusão e deposição) (Bhagia; Bornani; Agrawal; Satlewal *et al.*, 2021). Geralmente, a temperatura de extrusão do PLA varia entre 180°C e 220°C, embora isso possa variar de acordo com o fabricante e as especificações da impressora.

Uma das principais vantagens do PLA é sua biodegradabilidade. Ele se decompõe em condições adequadas de compostagem, sendo metabolizado por microrganismos em dióxido de carbono (CO₂) e água. No entanto, é importante ressaltar que esse termoplástico não se decompõe facilmente em ambientes comuns, como em aterros sanitários ou no solo, e pode exigir condições específicas para uma degradação eficiente (Gonzaga, 2021; Ruis; Zeferino, 2021).

O PLA é considerado seguro para contato com alimentos e aplicações médicas, por isso, é aprovado pelas agências reguladoras em muitos países para uso em

embalagens de alimentos descartáveis, talheres, copos e outros produtos (Godinho, 2021). Além disso, sua biocompatibilidade permite o seu emprego em dispositivos médicos temporários, como suturas absorvíveis e implantes biodegradáveis (de Oliveira; Borges, 2020).

Apesar de suas vantagens, o PLA também apresenta algumas limitações. Ele tem menor resistência térmica em comparação com outros filamentos, o que significa que não é adequado para aplicações que exigem alta resistência a altas temperaturas (Santana; Alves; Sabino Netto; Merlini, 2018). Além disso, ele pode ser mais propenso a deformações térmicas durante a impressão, requerendo cuidados extras no resfriamento adequado das peças impressas (Vinyas; Athul; Harursampath; Thoi, 2019).

Perante os aspectos técnicos relacionados ao PLA deve-se avaliar a sua adequação em um projeto de impressão 3D, pois a seleção deste material deve ser adequada para a aplicação que se pretende.

3.5.3. Acrilonitrila Butadieno Estireno ABS

O copolímero Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) é um termoplástico amplamente utilizado na impressão 3D. É obtido da combinação dos monômeros acrilonitrila, butadieno e estireno que conferem a esse polímero propriedades únicas quando comparadas com outros materiais poliméricos (Rodríguez-Reyna; Mata; Díaz-Aguilera; Acevedo-Parra *et al.*, 2022). A acrilonitrila proporciona resistência e rigidez, o butadieno contribui para a tenacidade e a resistência ao impacto, enquanto o estireno melhora a estabilidade dimensional e a facilidade de processamento, gerando diferenciais para o ABS como insumo para a impressão 3D (Johnson; French, 2018).

O ABS possui um equilíbrio de propriedades mecânicas que o torna adequado para muitas aplicações na impressão 3D. Ele é conhecido por sua resistência, rigidez e tenacidade, bem como por sua boa resistência ao impacto. Essas propriedades são influenciadas pela proporção de cada monômeros presente e pelas condições de processamento, como temperatura e taxa de resfriamento. A sua temperatura de fusão é relativamente alta em comparação com outros filamentos comumente usados na impressão 3D. Sua faixa de temperatura típica de impressão varia entre 220°C e

250°C, isso requer o uso de impressoras 3D capazes de atingir temperaturas mais altas e sistemas de aquecimento controlados (Nathaphan; Trutassanawin, 2021).

A propriedade térmica do ABS é interessante para aplicações como a MA, pois apresenta estabilidade dimensional em uma ampla faixa de temperatura (Özenç; Tezel; Kovan, 2022). Ele pode suportar temperaturas moderadas sem deformação ou perda significativa de suas propriedades mecânicas. Isso o torna adequado para aplicações que exigem resistência ao calor, como peças de encaixe, carcaças eletrônicas e componentes automotivos. Este material apresenta boa resistência a produtos químicos, como ácidos, álcalis, óleos e solventes, o que o torna adequado para aplicações industriais onde a resistência química é essencial (Simões Júnior; Brambratti Júnior; Hemkemeieri, 2014).

O ABS é um material que permite várias opções de pós-processamento, podendo ser lixado, polido, perfurado, pintado e adesivado facilmente. Além disso, é suscetível à acetona, o que permite o acabamento suave das peças impressas em ABS por meio da aplicação controlada de vapor de acetona.

Dentre as limitações do uso de filamento de ABS para FDM está o fato que durante a impressão, pode ocorrer empenamento e deformação térmica, devido à contração durante o resfriamento. Isso pode exigir a utilização de uma superfície de impressão aquecida e/ou a aplicação de adesivos para melhor adesão da primeira camada (Souza, 2020). Além disso, durante impressão, o ABS pode liberar vapores potencialmente tóxicos, sendo recomendado o uso em ambientes bem ventilados ou com sistemas de filtragem de ar adequados (Khosravani; Reinicke, 2020; Liu; Wang; Wu; Cui *et al.*, 2019).

A aplicação do ABS na impressão 3D é vantajosa, mas deve-se compreender quais propriedades apresentam adequação, qualidade e funcionalidade às peças impressas em uso.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS

Filamentos de Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e Políácido láctico (PLA), obtidos junto a 3D Print Academy. Na Tabela 2. Estão apresentadas algumas características e variáveis de processamento de cada insumo, de acordo com o fornecedor.

Tabela 2 - Características e variáveis de processo dos filamentos empregados

Polímero	Diâmetro do filamento (mm)	Temperatura de impressão (°C)	Temperatura da mesa (°C)	Velocidade de impressão (mm/s)
ABS	1,75 ± 0,05	220C – 240	≥ 100	30
PLA	1,75 ± 0,05	190 – 200	≥ 60	30

Fonte: 3D Print Academy (2022).

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Inspeção visual

A inspeção visual foi utilizada para identificar as principais características da peça original, das amostras e peças impressas em 3D, tais como descontinuidades, sinais de danos, rebarbas etc., bem como foram dimensionadas com paquímetro digital, Western, Modelo DC-60. Durante a inspeção visual busca-se encontrar soluções para os defeitos encontrados, estabelecendo relações dos problemas de conformação da peça por MA com os parâmetros de processamento. Os dados da peça original foram utilizados para o modelamento das peças obtidas por impressão 3D, e para análise comparativa. Assim, os resultados da inspeção visual permitem a avaliação indicativa dos possíveis problemas a serem considerados na modelagem, bem como no processamento, selecionando as peças adequadas para a fase da caracterização mecânica.

4.2.2. Modelagem 3D

Com o dimensionamento de uma sinalização aeronáutica de balizamento de pista, o modelo 3D foi criado utilizando o software Fusion 360, licença educacional pela

UFPE, obtendo os arquivos de dados com os parâmetros dos corpos de prova e da peça aeronáutica (conexão frangível de uma sinalização de pista de pouso e decolagem).

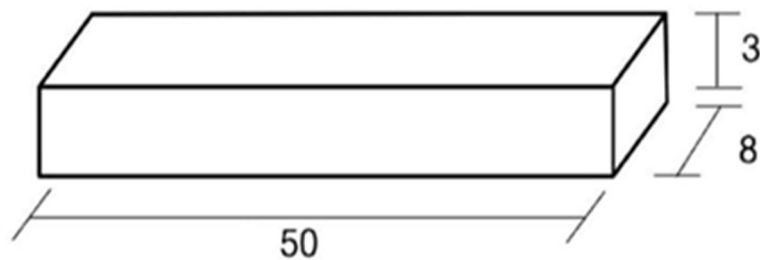
Para preparação do modelo para impressão 3d, realizou-se o fatiamento empregando o software de licença livre, Ultimaker Cura 5.3.1, inserindo os parâmetros de impressão conforme as especificações do fabricante, tanto para o ABS, como para o PLA, de forma que a impressora pudesse reproduzir os corpos de prova adequadamente.

A simulação computacional foi realizada através do software NX Siemens, licença educacional pela UFPE.

4.2.3. Confeção dos Corpos de Provas e Modelo 3D de Conexão Frangível.

Corpos de provas foram confeccionados de acordo com o recomendado na norma ASTM D5023-15 -*Standard Test Method for Plastics Dynamic Mechanical Properties - In Flexure (Three-Point Bending)* para testes no DMA para polímeros. Os parâmetros de medida adotados foram de dimensões de 50x8x3 mm (Figura 6). As análises foram conduzidas empregando 6 (seis) corpos de prova, 3 a 100% de preenchimento e 3 a 30% preenchimento na forma de grade (treliçados). Os tempos totais de impressão foram de aproximadamente 5 e 4h para os corpos de prova preenchidos a 100 e 30%, respectivamente. Em ambos os casos, a impressora trabalhou com o bico de saída do fio entre 220°C para o ABS e 200°C para o PLA e a mesa onde ele foi depositado ficou com temperatura constante de 100°C para o ABS e 60°C para o PLA. Os corpos de prova foram confeccionados no LITPEG, localizado na UFPE, empregando impressora da marca Ender (Figura 7). Na Figura 8 está apresentada a impressão 3D de corpos de prova de PLA a 100 e 30% de preenchimento. O modelo 3D da peça (conector frangível), também foi produzido nas mesmas condições.

Figura 6 - Esquema dos corpos de prova obtidos para ensaio de DMA, segundo a norma ASTM D5023-15 (dimensões em mm)



Fonte: Autor (2023)

Figura 7 - Impressora utilizada na confecção dos corpos de prova, localizada no Instituto LITPEG/UFPE



Fonte: O autor (2023).

Figura 8 - Impressão de corpos de prova de PLA com preenchimento de 100% (à esquerda) e em geometria treliçada com 30% de preenchimento (à direita)



Fonte: O autor (2023).

4.2.4. Espectroscopia na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier

Para identificar os grupos químicos comuns nas moléculas de ABS e PLA, garantindo assim que os insumos fornecidos realmente são dos materiais esperados, corpos de prova foram caracterizados por FTIR em um espectrofotômetro FTIR Bruker® modelo Tensor 27, nos seguintes parâmetros: resolução: 4 cm^{-1} ; número de varreduras: 2 scans; método de análise: Transmissão Direta; unidade de medida: Transmitância; região espectral de 4.000 a 400 cm^{-1} .

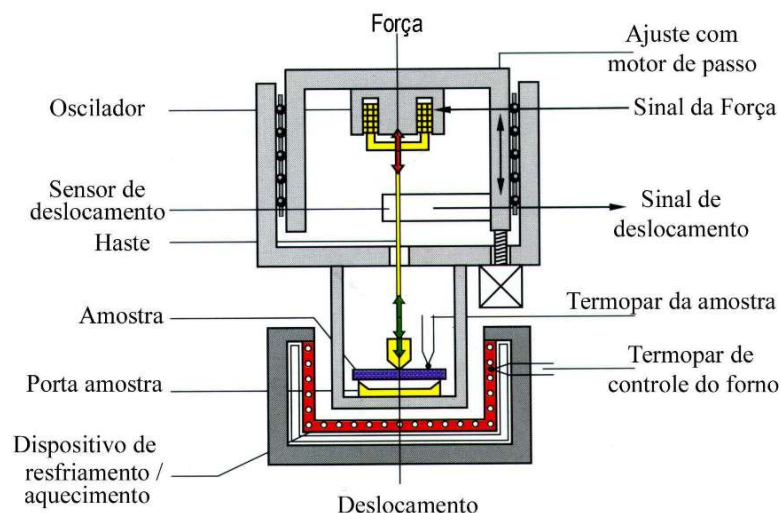
4.2.5. ANÁLISE DINÂMICO MECÂNICA (DMA)

A resposta de um material polimérico à esforços cíclicos podem ser estimada durante uma fase de aquecimento (ou resfriamento) através de DMA (*Dynamic Mechanical Analysis*), neste tipo de análise térmica, onde aplica-se deformações cíclicas, (de tração, flexão, cisalhamento ou torção) medindo-se a tensão necessária para exercer esses esforços é possível analisar o Módulo de Armazenamento (E'), observando mudanças durante os ciclos térmicos indicando alterações na rigidez e na transição vítrea. (Rabello, 2021).

A Análise Dinâmico Mecânica, cujo esquema está apresentado na Figura 9, fornece informações do comportamento viscoelástico dos materiais poliméricos através da aplicação de uma força senoidal. A componente elástica e a componente viscosa do material são definidas pela análise da resposta a uma força dinâmica, que

atua sobre a amostra de acordo com uma ou um conjunto de frequências pré-estabelecidas a determinadas condições de temperatura.

Figura 9 - Representação esquemática do equipamento DMA 242



Fonte: NETZSCH, 2019.

A resposta do material é caracterizada pelo estado conformacional das moléculas, o qual se modifica no decorrer do ensaio. A forma que ocorre esta modificação é descrita pela variação inercial da deformação da amostra (Lorandi, Cioffi e Ornaghi, 2016).

O equipamento DMA utilizado para a caracterização dos corpos de prova das amostras foi um Artemis® modelo DMA 242, segundo a norma ASTM-D4065 - *Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties - Determination and Report of Procedures*.

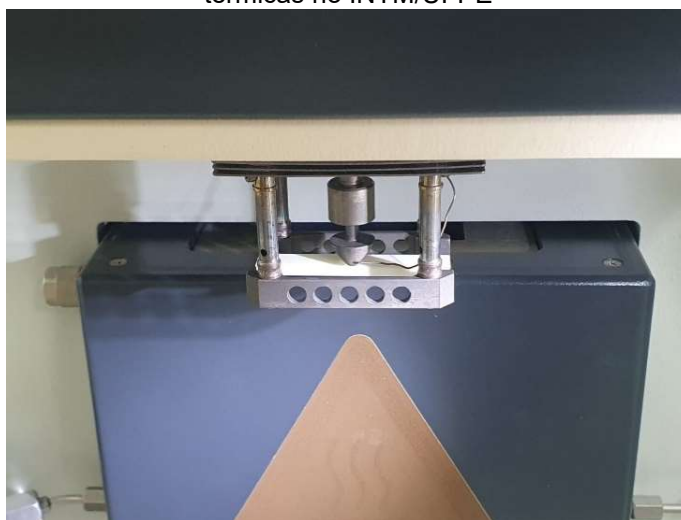
Os experimentos DMA foram conduzidos através dos seguintes parâmetros:

- Modo de Flexão em três pontos: usando o acessório de flexão de três pontos com um comprimento livre de 50 mm;
- Tipo de teste: *standard mode*;
- Rampa de aquecimento: de 25 a 120 °C;
- Taxa de aquecimento constante: de 5 °C.min⁻¹;
- Frequência: 1 Hz / carga de 4,0 N.

Os corpos de prova de ABS e PLA foram submetidos a Análise Dinâmico Mecânica no Laboratório de Análises Térmicas do INTM (Figura 10). A partir de

medições na frequência pré-definida (Dhinesh; Arun; Senthil; Megalingam, 2021), foram obtidos dados do módulo de armazenamento (E') que representa o armazenamento de energia na região elástica pelo material polimérico e do fator de amortecimento ($\tan \delta$) ou tangente de perda⁹, razão entre do módulo de armazenamento e módulo de perda(E'')¹⁰, também chamado, em função da temperatura.

Figura 10 - Análise Dinâmico Mecânica do corpo de prova em PLA no laboratório de análises térmicas no INTM/UFPE



Fonte: O autor (2023).

O $\tan \delta$ (fator de amortecimento) é um dos mais indicados para mensurar a temperatura de transição vítrea. Isso, devido às incertezas existentes nos cálculos a partir do módulo de armazenamento e de perda, que utilizam a tangente do ponto de inflexão da curva para estimar a T_g . De acordo com Li (2000), relata-se a T_g através da temperatura do pico $\tan \delta$

4.2.6. ENSAIO DE DESEMPENHO MECÂNICO DO PRODUTO

Buscou-se desenvolver um ensaio de desempenho mecânico do produto obtido por impressão 3D, de forma que com o equipamento universal de ensaio mecânico, na configuração de ensaio de flexão, as peças foram submetidas a uma tensão crescente no sentido transversal, até que atingissem o regime plástico e ruptura.

⁹ A tangente de perda ($\tan \delta$) avalia a magnitude da dissipação viscosa durante os esforços cíclicos e, portanto, está intimamente associada com o fenômeno viscoelástico dos polímeros (Rabello, 2021).

¹⁰ O módulo de perda (E'') representa a dissipação de energia do polímero na forma de calor

Buscou-se determinar a condição máximas de resistência mecânica, pela determinação da tensão na qual o material se rompeu. Assim, desenvolveu-se um sistema simples e com custo reduzido para a determinação da propriedade mecânica das peças analisadas, por meio de ensaio de flexão adaptado, com um kit constituído de uma haste de aplicação da força e sistema de fixação lateral da peça em uma máquina universal de ensaio mecânicos (Figura 11).

Figura 11 - Conectores frangíveis e kit haste - peça de fixação



Fonte: O autor

Os testes experimentais foram realizados com o apoio do pessoal e infraestrutura do laboratório SOLDAMAT do INTM da Universidade Federal de Pernambuco.

Como a máquina de teste é equipada com um computador que permite a aquisição de dados e controle de deslocamento e carga aplicada, foi possível acompanhar o desenvolvimento da análise e identificar possíveis comprometimentos dos resultados devido a proposta de adaptação e descartar possíveis resultados não conclusivos. As amostras impressas foram testadas à temperatura ambiente.

Comumente utilizada para ensaios de aço e concreto, a máquina de ensaios universal possui um sistema de travamento que poderiam dificultar o acoplamento das peças poliméricas, em razão de sua natureza sensível, o que necessitou ajustes ao longo do processo.

O primeiro teste realizado, evidenciou a fragilidade do material em relação a força aplicada no sistema de fixação, provocando tensões e possíveis deformações plásticas no material. A Figura 12 apresenta uma amostra que foi comprometida

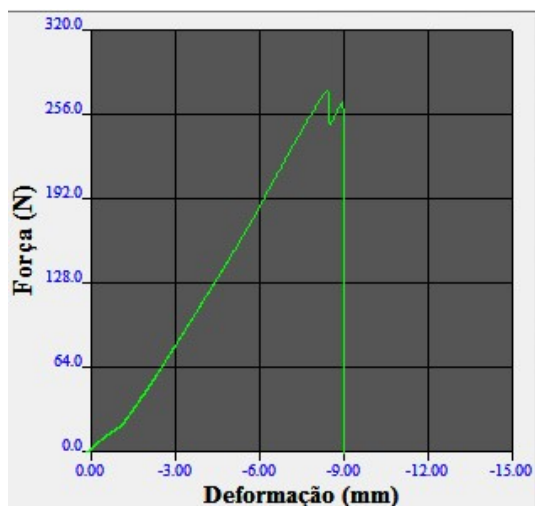
Figura 12 - Peça danificada durante a fixação



Fonte: O autor

Na Figura 13 pode-se observar uma falha não significativa no resultado final do ensaio, devido pequeno deslizamento da peça do fixador.

Figura 13 - Efeito de pequeno deslizamento da peça do fixador



Fonte: O autor

Após os devidos ajustes no sistema de fixação, foi possível realizar os ensaios, Figura 14.

Figura 14 - Ensaio de desempenho mecânico do produto



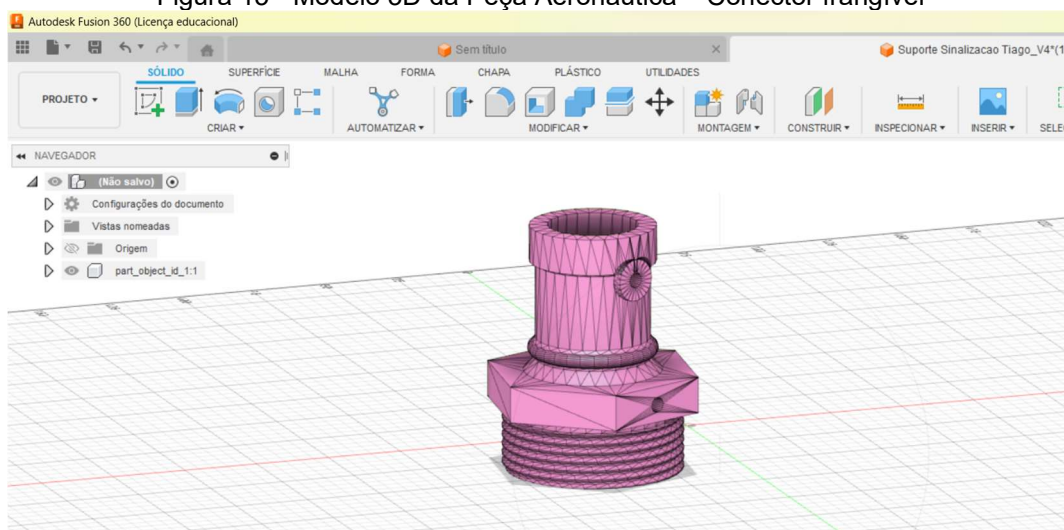
Fonte: O autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E INSPEÇÃO VISUAL

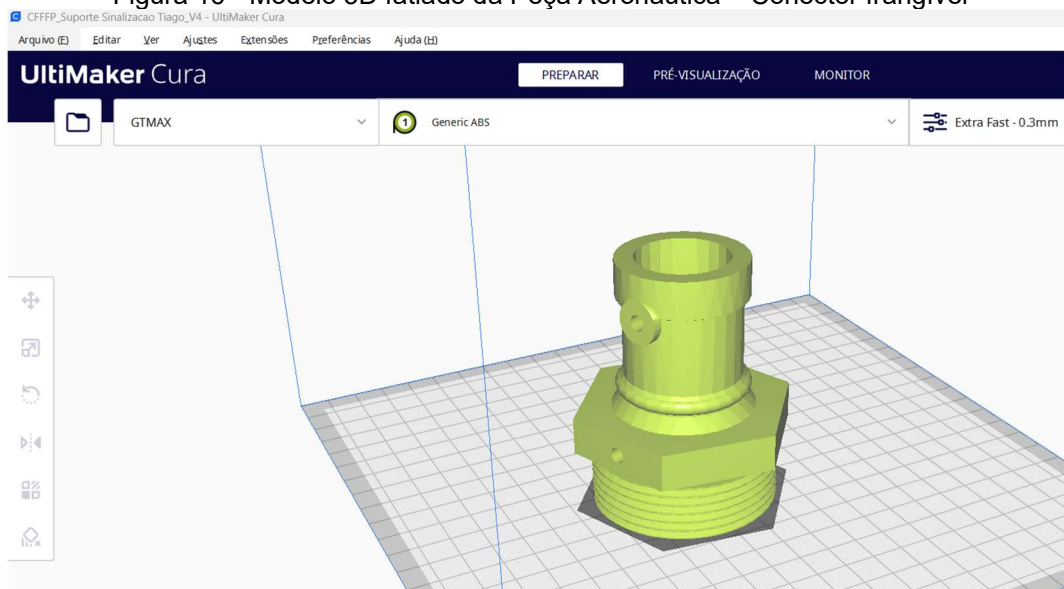
Como já mencionado o modelo 3D da peça foi obtido com o software Fusion 360 (Figura 15) e o fatiamento através do software Ultimaker Cura 5.3.1 (Figura 16). **Erro! Autoreferência de indicador não válida..**

Figura 15 - Modelo 3D da Peça Aeronáutica – Conector frangível



Fonte: O autor

Figura 16 - Modelo 3D fatiado da Peça Aeronáutica – Conector frangível



Fonte: O autor

A Figura 17 apresenta um comparativo visual entre a peça original e os modelos obtido por impressão 3D, em ABS, com diferentes porcentagens de preenchimento (15, 30 e 100%), tendo como único processo de acabamento necessário para obtenção de peças idênticas ao original, a remoção das rebarbas da mesa de adesão do processo de impressão 3D. A semelhança entre as peças é de grande precisão dimensional, comprovado pelas medições com paquímetro digital.

Figura 17 - Comparativo entre peça original e obtida por impressão 3D



Fonte: O autor

A Impressão 3D dos modelos das peças em ABS e PLA com 30% de preenchimento (Figura 18) foram realizados com o processamento do fatiamento no Software Ultramaker Cura na configuração de “grade”, para avaliação se as propriedades mecânicas seriam compatíveis às dos modelos 3D de peças 100% preenchidas.

Figura 18 - Visão transversal do modelo 3D de ABS do conector frangível com preenchimento de 30%.

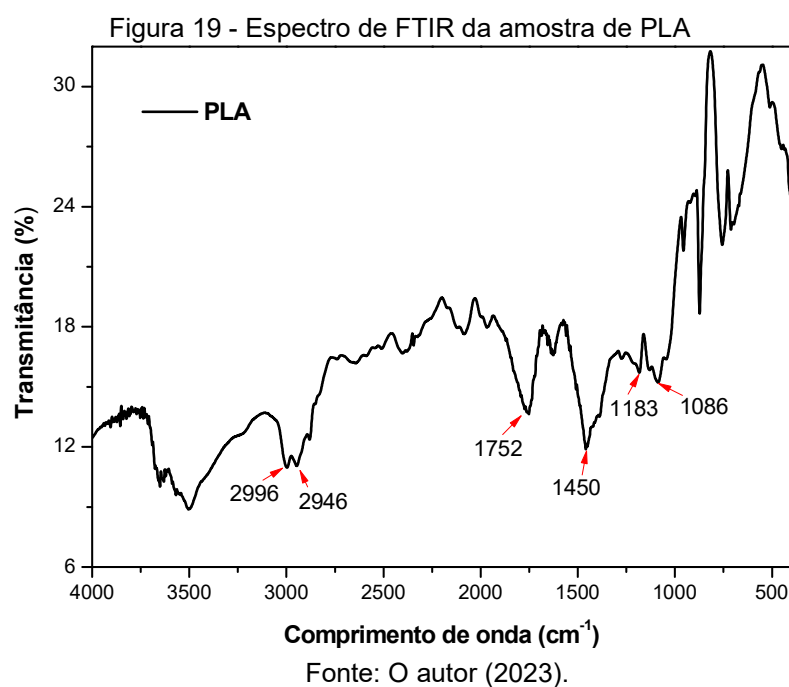


Fonte: O autor

5.2. ESPECTROSCOPIA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

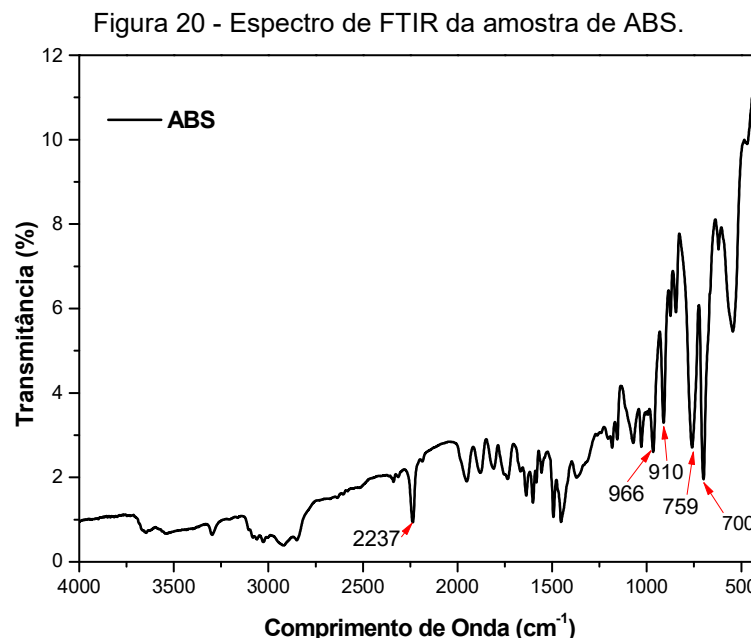
A fim de se obter informações dos grupos funcionais presentes nos polímeros foi empregada a técnica de espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

Na Figura 19 tem-se o espectro de FTIR do PLA, verifica-se bandas de absorção para o PLA a 2996 e 2946 cm^{-1} , atribuídas ao estiramento assimétrico e simétrico da ligação C-H do grupo CH_3 , a 1752 cm^{-1} atribuída ao estiramento da carbonila (C=O) do grupo éster do PLA, a 1450 cm^{-1} atribuída a flexão e deformação da ligação C-H, a 1183 e 1086 cm^{-1} atribuídas ao estiramento da ligação C-O do C-O-C do PLA. Esses resultados estão de acordo com a literatura e comprovam que a amostra se trata do termoplástico homopolímero Polilático (PLA)(Araújo; Agrawal; Mélo, 2015; Djellali; Haddaoui; Sadoun; Bergeret *et al.*, 2013; Meng; Deng; Liu; Wu *et al.*, 2012).



Na Figura 20 está apresentado o espectro de FTIR do ABS. Em 966 cm^{-1} e 910 cm^{-1} tem-se os picos característicos de vibração de flexão no plano de trans-1, 4-butadieno e picos da vibração de flexão característica fora do plano de cis-1, 2-butadieno, respectivamente. Os picos infravermelhos característicos em 759 cm^{-1} e 700 cm^{-1} correspondem a absorção de vibração de deformação fora do plano do único anel de benzeno substituído. O pico característico do grupo nitrílico presente no ABS

está em torno de 2237 cm^{-1} . Esses resultados estão de acordo com a literatura e comprovam que a amostra se trata do terpolímero Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) (Meng; Li; AlMasoud; Wang *et al.*, 2023; Shu; Li; Li; Wang *et al.*, 2020).



5.3. ANÁLISE DINÂMICO MECÂNICA

Na temperatura de transição vítrea (T_g) o material passa de um estado vítreo (rígido) para um estado elástico (elastomérico ou borrachoso). Nas Figura 21 e Figura 22 estão apresentados os resultados de Análise Dinâmico Mecânica das amostras de PLA a 100 e 30% de preenchimento, respectivamente. Em ambas as figuras, observa-se um pico que é atribuído a α -relaxação e está associado à temperatura de transição vítrea do PLA (Araújo *et al.*, 2015). Também é possível identificar na curva de $\tan \delta$ um pequeno deslocamento da T_g , com a redução do fator de preenchimento, passando de $60,2$ para $58,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (uma diferença de $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), para as amostras a 100 e 30% de preenchimento, respectivamente, evidenciando que a redução no fator de preenchimento favoreceu a mobilidade molecular do PLA. Os valores obtidos estão dentro do esperado para esse polímero semicristalino visto que, segundo a literatura a T_g do PLA se encontra na faixa de 55 a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ahmed; Rahman; Roos, 2017).

Houve também pequena redução no módulo de armazenamento (E') com a redução do fator de preenchimento das amostras, evidenciando que a amostra a 100% é mais rígida que a preenchida a 30%. Entretanto, como a variação não foi

significativa, demonstra-se a viabilidade técnica da utilização do fator de preenchimento a 30% na obtenção de conectores frangíveis para aplicação aeronáutica. De acordo com Rabello (2021), como o módulo de armazenagem é equivalente ao módulo de Young, a determinação de E' através de DMA tem grande importância para materiais poliméricos caso se deseje conhecer essa propriedade para fins de projeto de componentes a exemplo desse estudo.

Figura 21 - Ensaio de DMA para o PLA impresso com 100% de preenchimento

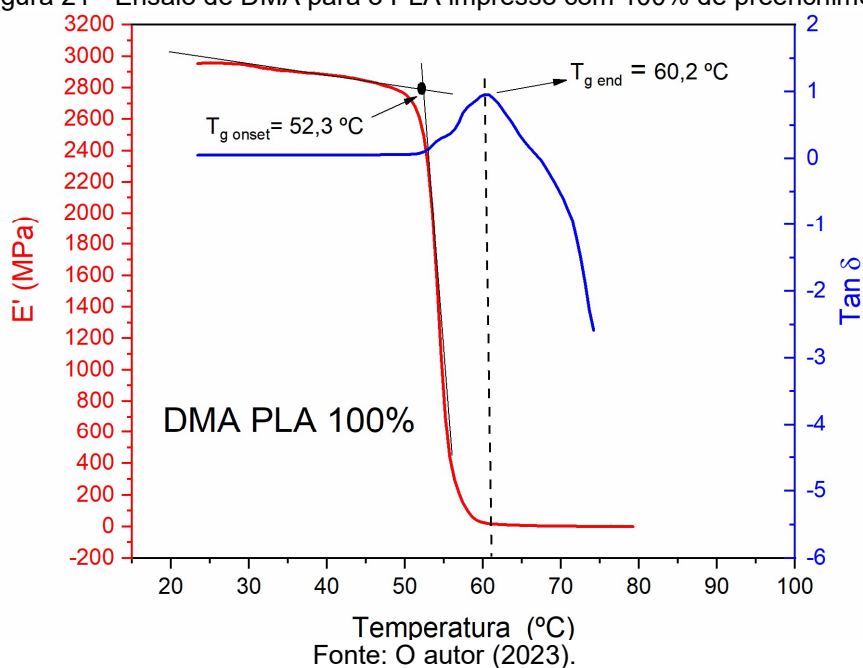
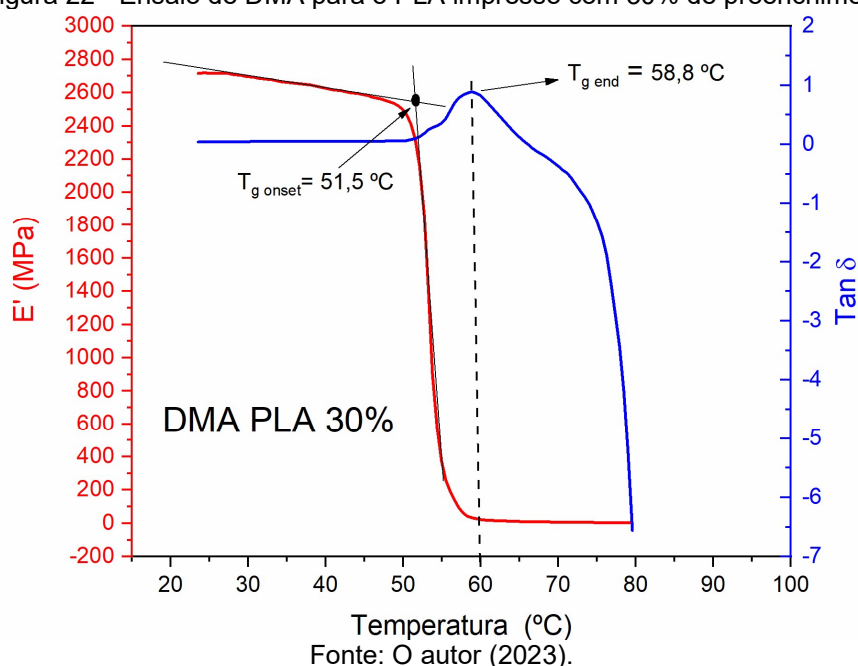


Figura 22 - Ensaio de DMA para o PLA impresso com 30% de preenchimento



Os dados obtidos por DMA são amplamente utilizados para descrever a resposta termomecânica de polímeros sob uma deformação senoidal (Madkour; Tirkes; Tayfun, 2021). Os parâmetros de módulo de armazenamento (G') e $\tan \delta$ das amostras de ABS, a 100 e 30% de preenchimento, respectivamente, com suas curvas dependentes da temperatura são exibidos na Figura 23 e Figura 24.

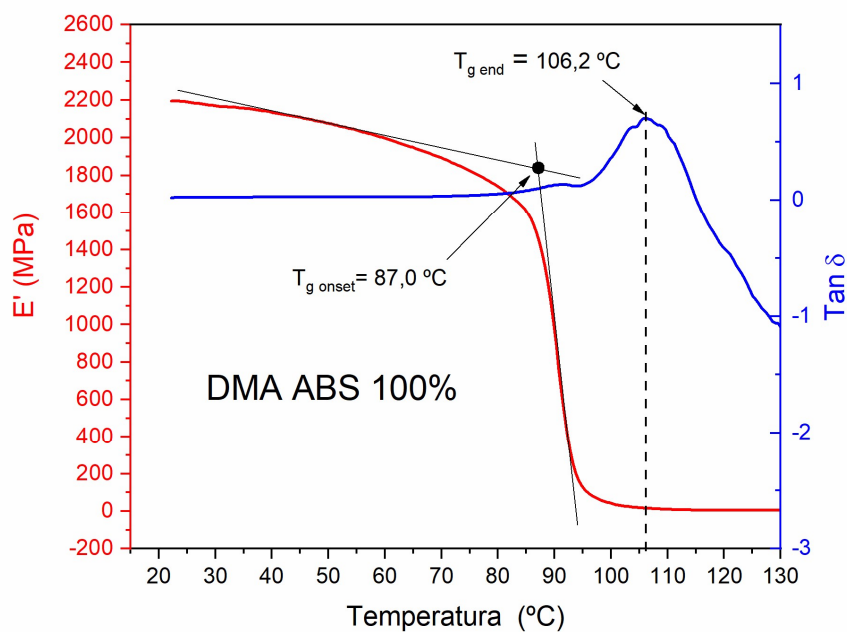
Nas curvas do módulo de armazenamento (E') dos corpos de prova do ABS, para ambos os fatores de preenchimento, é possível observar de maneira geral uma diminuição gradual de E' à medida que a temperatura aumenta seguida de um declínio acentuado em aproximadamente 90 °C, ao progredir através da região de transição. O ABS é um terpolímero formado por uma fase elastomérica, que corresponde à componente butadieno a qual confere flexibilidade, e uma outra componente rígida formada por dois polímeros amorfos e vítreos, o SAN (copolímero de estireno acrilonitrila), o percentual de cada componente varia de acordo com a composição do ABS. Logo, esse declínio acentuado próximo de 90°C corresponde à transição vítrea (T_g) do segmento rígido do terpolímero, ou seja, da fase SAN. A outra T_g correspondente a fase elastomérica (butadieno) aparece em torno de -70°C entretanto, como a análise de DMA realizada nesse estudo foi conduzida a partir de temperaturas maiores, acima de 20°C, não foi possível identificar a T_g correspondente a essa fase.

Da mesma forma que no PLA foi possível observar para o ABS uma pequena diminuição no módulo de armazenamento (E') com a redução do fator de preenchimento das amostras, evidenciando que a amostra a 100% é mais rígida que a preenchida a 30%.

Por outro lado, fazendo a correlação direta do máximo do $\tan \delta$ com a transição vítrea do ABS nas curvas, é possível observar um pequeno aumento no valor da T_g , com a redução do fator de preenchimento, passando de 106,2 para 108,6 °C (uma diferença de 2,4 °C para mais), para as amostras a 100 e 30% de preenchimento, respectivamente, evidenciando um aumento na restrição dos seguimentos moleculares do material com a redução no fator de preenchimento e com estrutura de treliça. Isso sugere uma possível mudança na morfologia com o favorecimento da cristalinidade do ABS, possivelmente devido à baixa taxa de aquecimento constante empregada (5 °C min⁻¹) durante a análise, os cristais formados podem ter atuado como cargas restringindo a mobilidade molecular e aumentando a T_g . Billah e colaboradores (2020) em seus estudos comparando amostras de ABS puro e de compósitos de matriz de ABS, obtidas por impressão 3D, concluíram que a presença das fibras reduziu a intensidade do pico de $\tan \delta$, os autores atribuíram essa redução à restrição da mobilidade molecular causada pela presença das fibras.

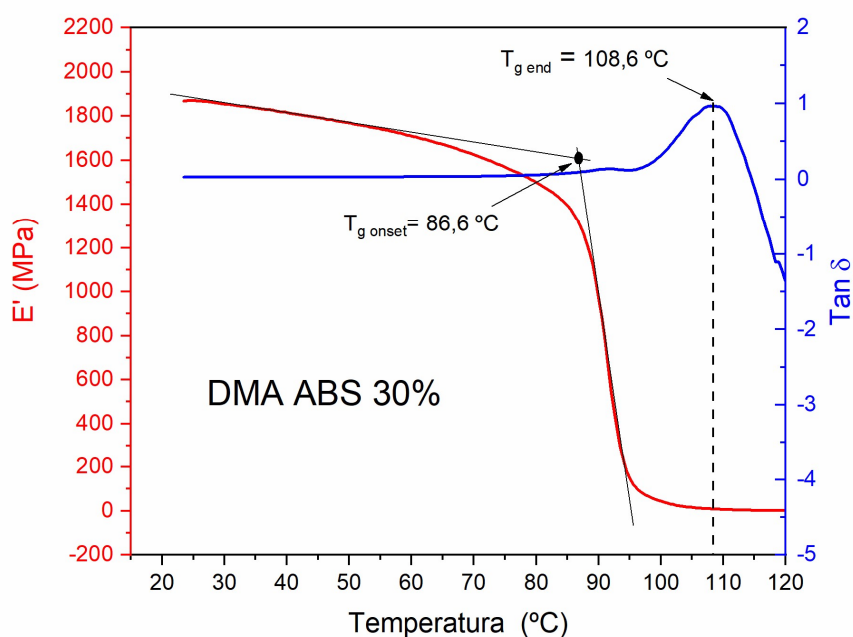
De acordo com os resultados, aparentemente, mesmo com as mudanças nos valores de E' e $\tan \delta$ e, conseqüentemente, na T_g do ABS a 30% de preenchimento, a contribuição das componentes elastoméricas (butadieno) e rígidas (SAN) no balanço entre a tenacidade e rigidez permaneceu. Isso indica que o ABS manteve suas propriedades, podendo ser indicado na manufatura aditiva de conectores frangíveis para o ecossistema aeronáutico. Vale salientar que, de qualquer modo, ambos os valores de T_g observados estão dentro do que se esperava para esse terpolímero, de acordo com a literatura.

Figura 23 - Ensaio de DMA para o ABS impresso com 100% de preenchimento



Fonte: O autor (2023).

Figura 24 - Ensaio de DMA para o ABS impresso com 30% de preenchimento



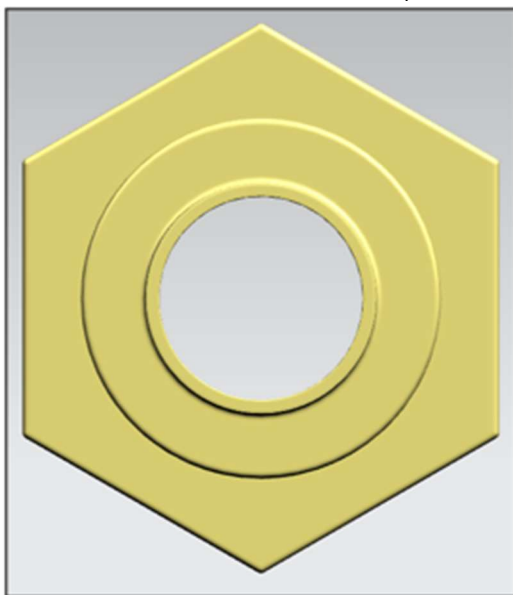
Fonte: O autor (2023).

De maneira geral, o desempenho mecânico, das amostras, de ABS e PLA, obtidas com 30% de preenchimento foram compatíveis com os obtidos a 100% de preenchimento, o que sugere um ganho significativo em termos de matéria prima sem perdas consideráveis de propriedades.

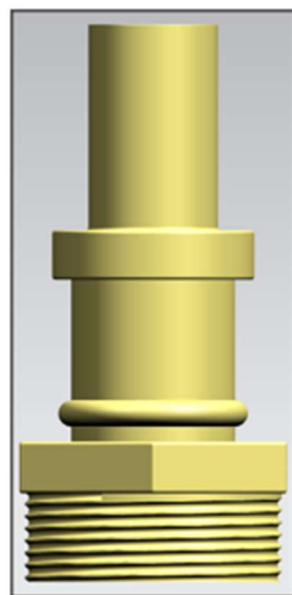
5.4. Análise Computacional do desempenho mecânico do componente frangível de PLA

A tecnologia de MA, prototipagem rápida para manufatura digital direta, lida com vários aspectos da união de materiais para formar peças. A MA é uma técnica automatizada para conversão direta de dados CAD 3D em objetos físicos usando uma variedade de abordagens. Os fabricantes têm utilizado essas tecnologias para reduzir os tempos de ciclo de desenvolvimento e colocar seus produtos no mercado de forma mais rápida, econômica e com valor agregado com a incorporação de recursos personalizáveis. Percebendo o potencial das aplicações do MA, muitos processos foram desenvolvidos, permitindo o uso de vários materiais, desde plásticos até metais, para o desenvolvimento de produtos, o componente frangível do estudo era o PVC, desta forma selecionou-se o material PLA, por ser o mais frágil, para realizar a análise de simulação computacional, buscando evidenciar se o preenchimento de 30% seria suficiente para atender aos normativos operacionais da aviação quanto a propriedade de frangibilidade, valor este estabelecido, para componentes frangíveis dos sinalizadores luminosos de pista (balizamento de pista), no DOC 9157 - Manual de Aeródromos da ICAO, Parte 6, como máximo de 45kN, sendo que o mínimo é referenciado a resistência aos *jet blasts*, ventos e intemperes (ICAO, 2005). Na Figura 25 a, b e c são apresentadas as vistas da peça geométrica que irá ser analisada.

Figura 25 - Peça geométrica de um sinalizador aeronáutico: a) vista superior, b) vista inferior, c) vista lateral e d) vista em perspectiva



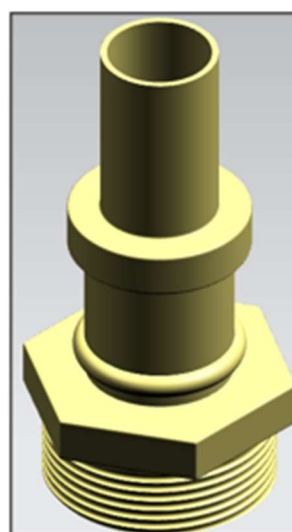
a) Vista Superior.



b) Vista Frontal.



c) Vista Inferior.



d) Perspectiva.

Fonte: O autor (2023).

O material que foi utilizado na impressão 3D neste projeto foi o *Polylactic Acid Biopolímero* (PLA). Com as informações coletadas das propriedades mecânicas do PLA e anotadas na Tabela 3 se conseguiu gerar no software dados de deslocamento, tensão, força de reação e simulação de uma deformação.

Tabela 3 - Propriedades Mecânicas do PLA

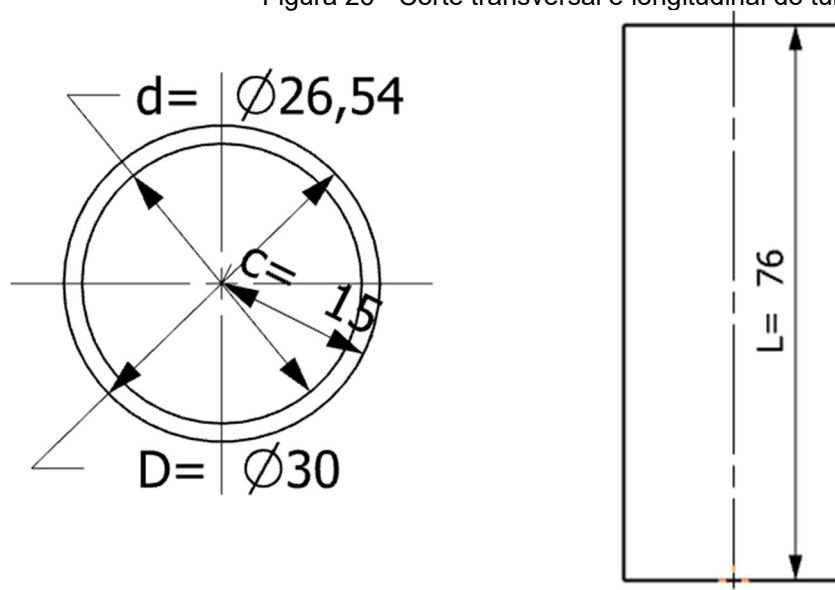
Módulo de Young (MPa)	Densidade (Kg/m ³)	Coefficiente de Poisson
2.340	1.300	0.331

Fonte: <https://www.matweb.com/>

Na Figura 26 pode-se observar as informações sobre as dimensões da tubulação.

- Diâmetro externo do tubo (D)= 30×10^{-3} [m];
- Diâmetro interno do tubo (d)= $26,54 \times 10^{-3}$ [m];
- Força aplicada na extremidade do tubo (V) = 10 [Kgf] = 98,06 [N];
- Centróide (c)= 15×10^{-3} [m] – Distância da região neutra ao diâmetro externo da sessão transversal do tubo, onde se aplica inicialmente a força.

Figura 26 - Corte transversal e longitudinal do tubo (mm).



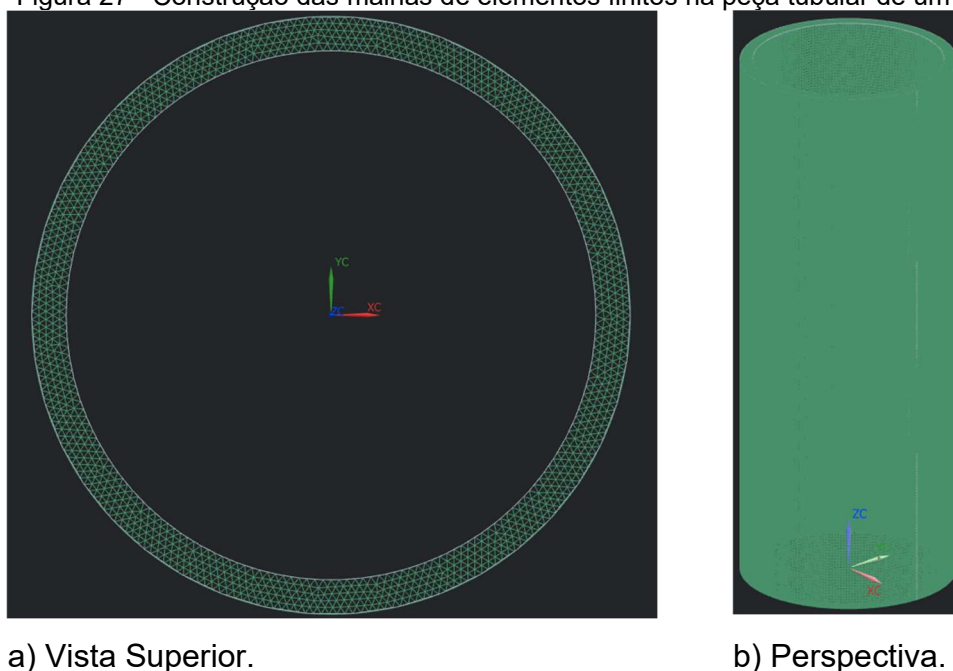
Fonte: O Autor

Na primeira etapa se aplicou elementos finitos com a geração de malhas na região da peça onde se deseja analisar, ilustradas na Figura 27. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a e b. FEA, ou *Finite Element Analysis*, é uma técnica para prever a resposta de estruturas e materiais a fatores ambientais. O processo começa com a criação de um modelo geométrico 3D. O modelo é então subdividido (em malha) em pequenos pedaços (elementos) de formas geométricas simples conectadas em pontos nodais específicos. Desta forma, as relações tensão-

deformação são mais facilmente aproximadas. Finalmente, o comportamento do material e as condições de contornos são aplicadas a cada elemento.

O Software NX SIEMENS utilizado, integra princípios baseados em conhecimento, design industrial, geometria de modelagem, análise avançada, simulação gráfica e engenharia, de forma que seus recursos de modelagem híbrida, integrando modelagem de recursos baseada em restrições e modelagem geométrica explícita, permite além de modelar peças de geometria padrão, o projeto de formas complexas, como aerofólios e coletores (Leu; Thomas; Kolan, 2013).

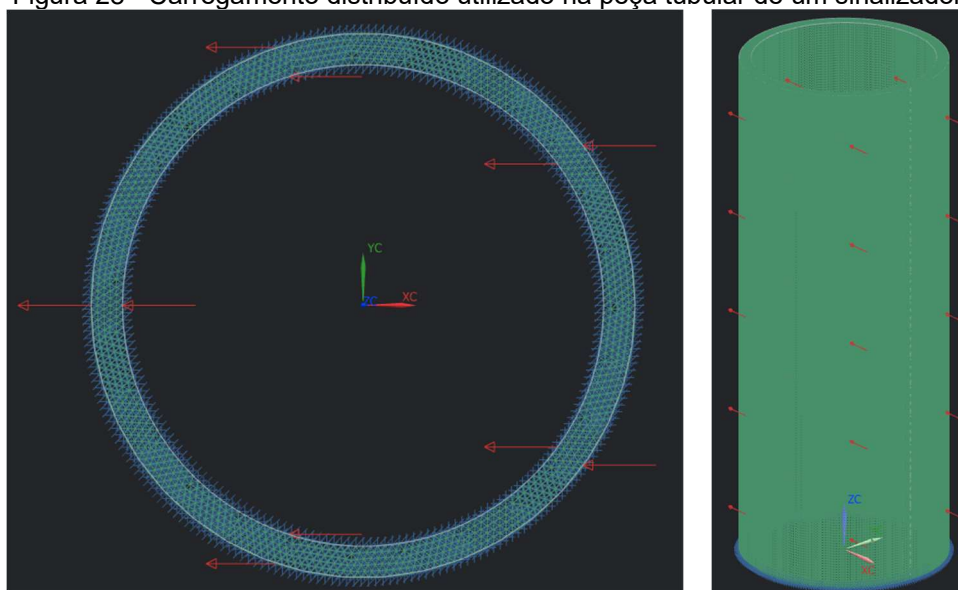
Figura 27 - Construção das malhas de elementos finitos na peça tubular de um sinalizador



Fonte: O autor (2023).

As forças foram aplicadas no modelo sólido e inseridas no sistema do programa. Para o impulsor, as forças atuaram de forma distribuída e unidirecional na superfície da peça. Já as regiões que se encontram em azul na Figura 28 a e b são as condições de contorno impostas, isto é, as restrições de movimento. Os ensaios devem se restringir a problemas simples e não a uma estrutura complexa e grande (Hibbeler, 2010).

Figura 28 - Carregamento distribuído utilizado na peça tubular de um sinalizador



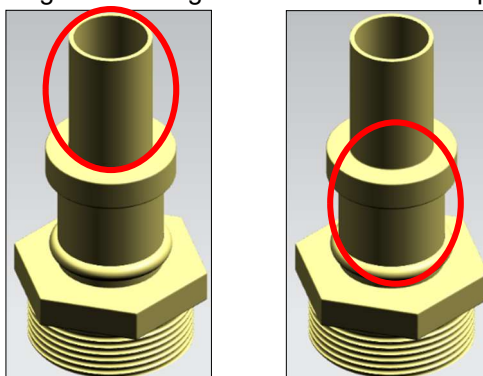
a) Vista inferior.

b) Perspectiva.

Fonte: O autor (2023).

De preferência foi escolhida a região mais vulnerável em termos de resistência que no caso seria o tubo da peça analisada, destacada em vermelho na Figura 29. Deduzimos que na região do tubo, haverá uma maior tendência a se romper primeiro, devido ao seu menor volume de material na espessura da parede do cilindro. Considerando o tubo com uma espessura de 1,8 mm.

Figura 29 - Regiões analisadas de rompimento



Fonte: O autor (2023).

Após uma aplicação de uma força de ação de 10 Kgf na simulação, obtivemos alguns resultados importantes apresentados na Tabela 4 e demonstrados na memória de cálculo que se segue.

Tabela 4 - Valores máximos obtidos na simulação

Deslocamento (mm)	Tensão (N/mm ² =MPa)	Força de Reação (N)
0,206	5,739	0,787

Fonte: O autor

Considerando os dados da tubulação:

Diâmetro externo do tubo (D)= 30×10^{-3} [m];

Diâmetro interno do tubo (d)= $26,54 \times 10^{-3}$ [m];

Força aplicada na extremidade do tubo (V) = 10 [Kgf] = 98,06 [N];

Centroide (c)= 15×10^{-3} [m] – Distância da região neutra ao diâmetro externo da seção transversal do tubo.

Foram utilizadas as Equações abaixo, para a memória de cálculo:

Equação sobre Momento

$$M = V \cdot Comp_{tubo}$$

$$M = 98,06[N] \cdot 76 \cdot 10^{-3}[m] = 7,45[N \cdot m]$$

Equação sobre a Inércia em tubos:

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (0,03^4 - 0,02654^4)$$

$$I = 1,54 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

Tensão máxima

$$\tau_{max} = \frac{M \cdot c}{I}$$

$$\tau_{max} = \frac{7,45 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{1,54 \cdot 10^{-8}} = 7256493,506 \text{ Pa} = 7,256 \text{ MPa}$$

$$\tau_{max} = 7,256 \text{ MPa} \geq \tau_{simulador} = 5,739 \text{ MPa}$$

$$V_{adm} = \frac{\tau_{simulador} \cdot I}{C \cdot Comp_{tubo}}$$

$$V_{adm} = \frac{(5739000) \cdot 1,54 \cdot 10^{-8}}{15 \cdot 10^{-3} \cdot 76 \cdot 10^{-3}}$$

$$V_{adm} = 77,52 \text{ N} = 7,90 \text{ kgf}$$

Concluimos que a tensão máxima aplicada é maior que a tensão do resultado da simulação, logo o material se romperá com o valor de 10 Kgf (98,06 N), sendo esta abaixo do valor máximo de resistência à impactos, conforme normativo de frangibilidade e superior ao mínimo de resistência aos esforços normais que tais componentes são submetidos em uso no ambiente aeroportuário. Porém, a faixa de temperatura estabelecida para os testes de conectores frangíveis não metálicos é de -55°C e $+55^{\circ}\text{C}$ ($\pm 15^{\circ}$), situação essa que impossibilita o PLA de continuar na avaliação deste estudo, devido as suas limitações de baixa estabilidade térmica dimensional (Pereira; de Jesus; Valverde; Roland *et al.*, 2021).

5.5. ENSAIO DE DESEMPENHO MECÂNICO DO PRODUTO

Em observação ao normativo da ICAO quanto a faixa de temperatura em uso e de execução dos testes de componentes frangíveis poliméricos, optou-se por realizar o ensaio de desempenho mecânico do produto com o material ABS, com variação de preenchimento (30 e 100%). Conforme os resultados dos ensaios, pode-se observar na Tabela 5 - Tensão máxima de ruptura - ABS (30 e 100%), que as respostas encontradas para os produtos obtidos por impressão 3D com preenchimento a 30% com a forma grade são próximas, da mesma forma que para 100% de preenchimento.

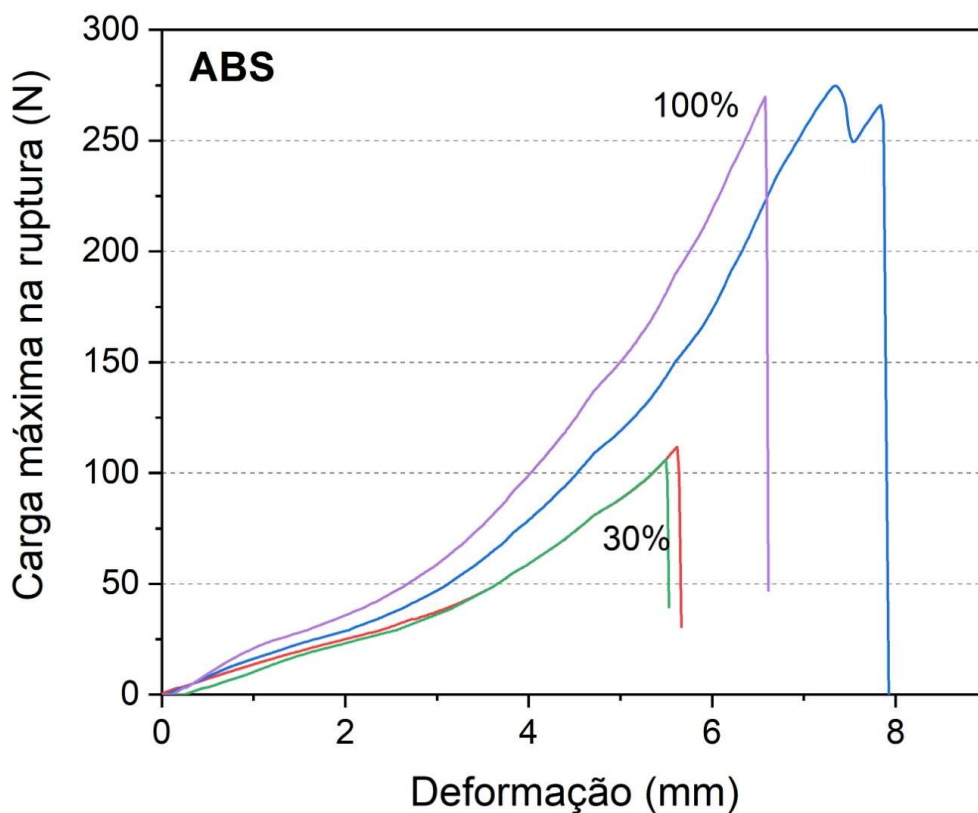
Tabela 5 - Tensão máxima de ruptura - ABS (30 e 100%)

Preenchimento (%)	1 - Tensão máxima (N)	2 - Tensão máxima (N)
30	105,95	111,81
100	269,76	274,79

Fonte: O autor

O gráfico da curva tensão x deformação apresentado na Figura 30, apresenta o comportamento das peças em análise, sendo possível notar que a redução do preenchimento dos componentes impressos em ABS com a tecnologia de impressão 3D por extrusão de material, pode reduzir em média em até 40% da resistência dessas peças, de forma parecida a encontrada nos estudos de Dhinesh; Arun; Senthil e Megalingam (2021); Rezende (2018); Wang; Ma; Deng; Zhang *et al.* (2020). Mesmo com esta variação, estes valores máximos encontram-se dentro da faixa normativa de frangibilidade de produtos aeronáuticos.

Figura 30 - Gráfico Tensão x Deformação - desempenho mecânico do produto



Fonte: O autor (2023)

Conforme os estudos citados anteriormente e Mamo; Tura; Santhosh; Ashok et al. (2022), estes resultados corroboram com o esperado, de que o ABS, por ser um material que apresenta propriedades mecânicas superior ao do PLA, é um material para impressão 3D via FDM mais adequado para aplicação no segmento aeronáutico em substituição aos materiais metálicos convencionais, bem como os poliméricos / compósitos obtidos por meios convencionais de produção, especialmente por viabilizar a reposição de componentes de forma mais rápida e com menor custo.

6. CONCLUSÕES

Mediante os resultados da pesquisa proposta neste trabalho as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- A manufatura aditiva se mostrou uma opção interessante para obtenção de conectores frangíveis para aplicação no segmento aeronáutico produzidas de PLA e ABS.
 - ✓ Através de FDM foram possíveis produzir corpos de prova e conexões de acordo com os parâmetros estabelecidos: normativos, de impressão e de qualidade nas duas condições, tanto de 100 e 30% de fator de preenchimento na configuração grade, sem comprometimento do acabamento superficial, nem tão pouco das propriedades mecânicas estabelecidas para aplicação no segmento aeronáutico.
 - ✓ Os espectros de FTIR confirmaram através das bandas características dos respectivos polímeros que os filamentos utilizados se tratava de PLA e ABS, garantindo que os resultados pudessem ser comparadas com os da literatura.
- A inspeção visual das conexões obtidas demonstrou o atendimento aos parâmetros dimensionais quando comparados à peça original sem a identificação de problemas, a exemplo da contração muitas vezes apresentada por peças produzidas em ABS e que poderia vir a se tornar um problema para a aplicação foco do estudo.
- Apesar da diferença observada nos valores do módulo de armazenamento (E') e T_g com a redução do fator de enchimento, de 100% para 30%, o desempenho mecânico, das amostras, de PLA e ABS obtidas foram compatíveis, o que sugere um ganho em termos de matéria prima sem perdas de propriedades, resultado corroborado pelas simulações e ensaio de desempenho mecânico dos produtos, sendo o ABS o que se adequa mais, pela maior faixa de estabilidade térmica deste material do que o PLA.
- Fica evidenciando que produtos aeronáuticos, a exemplo de conexões frangíveis obtidos por manufatura aditiva, podem ser produzidos por MA, atendendo às normativas do segmento aeronáutico quanto aos limites de resistência inferior e

superior, acima do qual se comporta fragilmente, assim, demonstrando viabilidade tecnológica e redução de insumos, custos produtivos e impactos ao meio-ambiente.

- Os resultados obtidos nesta pesquisa são relevantes, uma vez que apontam para uma viabilidade técnica e econômica do MA como processo de fabricação de produtos e peças frangíveis para o segmento aeronáutico, permitindo o aprofundamento do desenvolvimento tecnológico da indústria brasileira que podem levar à certificações bem sucedidas e realizadas em laboratórios nacionais credenciados pela ANAC e outras agências aeronáuticas internacionais.
- A pesquisa desenvolvida indica, de forma preliminar, uma possível forma de estimular a competitividade da indústria de produtos aeronáuticos brasileira, possibilitando o desenvolvimento de novos produtos para atender ao segmento aeronáutico nacional e internacional utilizando a MA.
- A impressão 3D, em geral, é um processo de manufatura que permite maior customização, imediata disponibilidade e redução de custos para obtenção de produtos, propiciando uma melhor adequação tanto do produto, como para a finalidade de reposição de componentes, diferentemente de métodos tradicionais, como moldagem e injeção. Embora seja uma tecnologia recente, ela apresenta um grande potencial para aplicações em diversas áreas, dentre elas o segmento aeronáutico.
- Com base na revisão sistemática da literatura realizada, foi possível observar que ainda há possibilidade de estudos em que os parâmetros tipo de material, orientação de impressão, entretrama, porcentagem e ângulo de preenchimento, número de contornos e cor do material podem influenciar nas propriedades mecânicas das peças finais.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir das conclusões explicitadas acima as seguintes recomendações podem ser oferecidas para trabalhos futuros:

- Recomenda-se realizar novos estudos, por meio do mapping study, para identificar a influência dos parâmetros na qualidade dos produtos manufaturados por MA.

- Recomenda-se realizar experimentos *in-loco* dos objetos confeccionados com os materiais (PLA, ABS e outros), pela tecnologia de impressão por extrusão de material, utilizando modelos de regressão construídos a partir dos resultados experimentais aqui obtidos, para buscar estimar a carga de ruptura média de componentes impressos, tendo como variáveis explicativas a porcentagem e o ângulo de preenchimento,
- Recomenda-se utilizar análise estatística dos modelos a serem criados, para analisar as variáveis quanto a influência nas propriedades mecânicas dos componentes confeccionados, de uma forma mais rigorosa, com a obtenção e uso de uma amostra maior de dados, em virtude das características mecânicas dos materiais aqui utilizados serem sensíveis à variações nos parâmetros de impressão e condições ambientais e operacionais, tornando mais conservadora a aplicação dos modelos.
- Recomenda-se realizar interação com os órgãos normatizadores e certificadores nacionais para viabilizar do processo de certificação em solo nacional de componentes aeronáuticos através de instituições de pesquisa e desenvolvimento ou laboratórios de ensaios acreditados pelo INMETRO.
- Recomenda-se a realização de estudos sistemáticos de fabricação de componentes aeronáuticos frangíveis, em parceria com os órgãos normatizadores nacionais com o objetivo de criar regulamentação dos produtos impressos em manufatura 3D para certificação, homologação e autorização para uso dos operadores aeronáuticos nacionais e internacionais.

REFERÊNCIAS

- ABEYRATNE, D. R. **Law and regulation of aerodromes**. Springer, 2014. 3319047809.
- ABNT, A. B. d. N. T. Sinalização aeronáutica de obstáculos. NBR 9541 2006
- ABREU, S. A. C. **Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo**. 2015. Dissertação (Mestrado) - FEUP - Faculdade de Engenharia, Uninversidade do Porto, Portugal.
- AHANGAR, P.; COOKE, M. E.; WEBER, M. H.; ROSENZWEIG, D. H. Current biomedical applications of 3D printing and additive manufacturing. **Applied sciences**, 9, n. 8, p. 1713, 2019.
- AHMAD, M. N.; ISHAK, M. R.; TAHA, M. M.; MUSTAPHA, F. *et al.* Mechanical, thermal and physical characteristics of oil palm (*Elaeis Guineensis*) fiber reinforced thermoplastic composites for FDM–Type 3D printer. **Polymer Testing**, 120, p. 107972, 2023.
- AHMED, J.; RAHMAN, M. S.; ROOS, Y. H. **Glass transition and phase transitions in food and biological materials**. John Wiley & Sons, 2017. 1118935721.
- ALMEIDA, A. G. S.; ALVES, T. P. UTILIZAÇÃO DA ENGENHARIA REVERSA E DA MANUFATURA ADITIVA NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS DE REPOSIÇÃO: UMA ALTERNATIVA PARA MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS MÉDICO-HOSPITALARES. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, 12, n. 3, 2020.
- ANAC, A. N. d. A. C. Programa de Segurança Operacional Específico para a Agência Nacional de Aviação Civil (PSOE-ANAC). Brasil, pp.
- ANAC, A. N. d. A. C. Manual de Frangibilidade Brasil, pp.
- ANAC, A. N. d. A. C. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil. Brasília, pp.
- ANAC, A. N. d. A. C. Certificação Operacional de Aeroportos. RBAC 139 2022.
- ANAC, A. N. d. A. C.; COMAER, C. d. A. PSO (Programa de Segurança Operacional). Brasil, pp.
- ARAÚJO, J. P.; AGRAWAL, P.; MÉLO, T. J. A. Blendas PLA/PEgAA: avaliação da reatividade entre os polímeros e da concentração de PEgAA nas propriedades e na morfologia. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, 10, n. 3, p. 118-127, 2015.
- ASHFORD, N. J.; STANTON, H. M.; MOORE, C. A.; COUTU, P. *et al.* **Operações Aeroportuárias**. Bookman Editora, 2015. 8582603312.
- BASSI, L. A. **História da Aviação**. Recife: 2022. 125 p. (Ciências Aeronáuticas).

BHAGIA, S.; BORNANI, K.; AGRAWAL, R.; SATLEWAL, A. *et al.* Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries. **Applied Materials Today**, 24, p. 101078, 2021.

BILLAH, K. M. M.; LORENZANA, F. A.; MARTINEZ, N. L.; WICKER, R. B. *et al.* Thermomechanical characterization of short carbon fiber and short glass fiber-reinforced ABS used in large format additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, 35, p. 101299, 2020.

BUDZIK, G.; MAGNISZEWSKI, M.; OLEKSY, M.; OLIWA, R. *et al.* Torsional strength testing of machine elements manufacture by incremental technology from polymeric materials. **Polimery**, 63, n. 11-12, p. 830-832, 2018.

CARNEIRO, O. S.; SILVA, A.; GOMES, R. Fused deposition modeling with polypropylene. **Materials & Design**, 83, p. 768-776, 2015.

CHIAVENATO, I. **Introdução à teoria geral da administração**. Elsevier Brasil, 2003. 8535213481.

COMAER, C. d. A. Plano Segurança Operacional Específico COMAER (PSO-COMAER). **Brasil**, pp.

COMAER, C. d. A. GARANTIA DA QUALIDADE E DA SEGURANÇA DE SISTEMAS E PRODUTOS NO COMAER (Comando da Aeronáutica). pp.

CUNHA, D. A. d. Modelo de estimativa de risco operacional em aeroportos. 2022.

DE OLIVEIRA, A. C. S.; BORGES, S. V. Poli (ácido láctico) aplicado para embalagens de alimentos: uma revisão. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, 15, n. 1, 2020.

DHINESH, S.; ARUN, P. S.; SENTHIL, K. K.; MEGALINGAM, A. Study on flexural and tensile behavior of PLA, ABS and PLA-ABS materials. **Materials Today: Proceedings**, 45, p. 1175-1180, 2021.

DJELLALI, S.; HADDAOUI, N.; SADOUN, T.; BERGERET, A. *et al.* Structural, morphological and mechanical characteristics of polyethylene, poly (lactic acid) and poly (ethylene-co-glycidyl methacrylate) blends. **Iranian Polymer Journal**, 22, p. 245-257, 2013.

DO NASCIMENTO SILVA, L.; DE ANDRADE SILVA, B. C. A IMPORTÂNCIA DO TÉCNICO DE MANUTENÇÃO DE LINHA PARA SEGURANÇA OPERACIONAL AEROPORTUÁRIA: THE IMPORTANCE OF THE LINE MAINTENANCE TECHNICIAN FOR AIRPORT OPERATIONAL SAFETY. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, 3, n. 1, p. 240-294, 2023.

DOLZYK, G.; JUNG, S. Tensile and fatigue analysis of 3D-printed polyethylene terephthalate glycol. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, 19, p. 511-518, 2019.

DU, C.-F.; LIANG, Q.; LUO, Y.; ZHENG, Y. *et al.* Recent advances in printable secondary batteries. **Journal of Materials Chemistry A**, 5, n. 43, p. 22442-22458, 2017.

FAA. Frangible Connections. USA, pp.

FERNANDES, H. F.; MÜLLER, C.; ALVES, C. J. P. Avaliação dos requisitos da faixa de pista em aeroportos regionais: uma análise de risco. **TRANSPORTES**, 26, n. 4, p. 76-91, 2018.

FORD, S.; DESPEISSE, M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. **Journal of cleaner Production**, 137, p. 1573-1587, 2016.

FRASCIO, M.; AVALLE, M.; MONTI, M. Fatigue strength of plastics components made in additive manufacturing: first experimental results. **Procedia Structural Integrity**, 12, p. 32-43, 2018.

GISARIO, A.; KAZARIAN, M.; MARTINA, F.; MEHRPOUYA, M. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. **Journal of Manufacturing Systems**, 53, p. 124-149, 2019.

GODINHO, G. K. d. S. **Desenvolvimento de embalagem biodegradável à base de PLA e casca de cenoura**. 2021. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Tecnologia, UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro Disponível em: <https://tede.ufrj.br/jspui/handle/jspui/6521>.

GONZAGA, G. L. **Comportamento da biodegradação de amostras de PLA natural e pigmentado obtidas por impressão 3D**. 2021. Dissertação (Mestrado) -, Centro Universitário FEI Disponível em: <https://repositorio.fei.edu.br/handle/FEI/3274>.

GUO, J.; ZHANG, J.; YUE, C.; WANG, F. Modeling of the CubeSat deployment and initial separation angular velocity estimation. **Aerospace Science and Technology**, 95, p. 105477, 2019.

HÄLLGREN, S.; PEJRYD, L.; EKENGREN, J. Additive Manufacturing and High Speed Machining-Cost comparison of short lead time manufacturing methods. **Procedia Cirp**, 50, p. 384-389, 2016.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. Pearson Educación, 2010. 1512940828.

ICAO, I. C. A. O. Aerodrome Design Manual. Part 6 - Frangibility. Washington. Doc 9157 2005.

ICAO, I. C. A. O. Safety Management Manual pp.

ICAO, I. C. A. O. Aerodrome Design and Operations pp.

JOHNSON, G. A.; FRENCH, J. J. Evaluation of infill effect on mechanical properties of consumer 3D printing materials. **Advances in Technology Innovation**, 3, n. 4, p. 179, 2018.

JUNIOR, A. F. D. S. **Método dos volumes finitos para equação de convecção e difusão em uma dimensão espacial**. 2012. -, Master's thesis, Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia/UFF.

KAZDA, T.; CAVES, B. Visual Aids for Navigation. *In: Airport Design and Operation*: Emerald Group Publishing Limited, 2015. p. 367-408.

KHOSRAVANI, M. R.; REINICKE, T. On the environmental impacts of 3D printing technology. **Applied Materials Today**, 20, p. 100689, 2020.

KOLADE, O.; OWOSENI, A. Employment 5.0: The work of the future and the future of work. **Technology in Society**, p. 102086, 2022.

KOREY, M.; RENCHECK, M. L.; TEKINALP, H.; WASTI, S. *et al.* Recycling polymer composite granulate/regrind using big area additive manufacturing. **Composites Part B: Engineering**, 256, p. 110652, 2023.

LEU, M. C.; THOMAS, A.; KOLAN, K. **NX 9.0 for Engineering Design**. Missouri: Siemens, 2013.

LIU, Z.; WANG, Y.; WU, B.; CUI, C. *et al.* A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 102, p. 2877-2889, 2019.

LOPES, D. R.; RODRIGUES FILHO, O. S. **Aeroportos: Tópicos em Planejamento e Projeto**. Editora Appris, 2022. 6525014417.

MADKOUR, S. A.; TIRKES, S.; TAYFUN, U. Development of barite-filled acrylonitrile butadiene styrene composites: Mechanical, thermal, melt-flow and morphological characterizations. **Applied Surface Science Advances**, 3, p. 100042, 2021.

MAIA, D. F. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA ACIARIA**. 2008. -, UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA.

MAMI, F.; REVÉRET, J. P.; FALLAHA, S.; MARGNI, M. Evaluating eco-efficiency of 3D printing in the aeronautic industry. **Journal of Industrial Ecology**, 21, n. S1, p. S37-S48, 2017.

MAMO, H. B.; TURA, A. D.; SANTHOSH, A. J.; ASHOK, N. *et al.* Modeling and analysis of flexural strength with fuzzy logic technique for a fused deposition modeling ABS components. **Materials Today: Proceedings**, 57, p. 768-774, 2022.

MAROJA, M. G. O.; DE FATIMA CORREIA, M.; ALVES DA SILVA, G.; DA SILVA ARAGÃO, M. R. *et al.* Relevância da infraestrutura aeroportuária na redução de atrasos e cancelamentos de voos em condições meteorológicas adversas. **Brazilian Journal of Development**, 8, n. 4, p. 30840-30852, 2022.

MARQUES, A. C.; SÁNCHEZ, F. A. L.; SPOHR, D. L. Desenvolvimento de um filamento compósito sustentável para impressão 3D baseado em matriz PLA reforçada com resíduos de fibras de madeira. 2021.

MATETI, T.; JAIN, S.; SHRUTHI, L. A.; LAHA, A. *et al.* An overview of the advances in the 3D printing technology. **3D Printing Technology for Water Treatment Applications**, p. 1-37, 2023.

MENG, B.; DENG, J.; LIU, Q.; WU, Z. *et al.* Transparent and ductile poly (lactic acid)/poly (butyl acrylate)(PBA) blends: Structure and properties. **European Polymer Journal**, 48, n. 1, p. 127-135, 2012.

MENG, X.; LI, Y.; ALMASOUD, N.; WANG, W. *et al.* Compatibilizing and toughening blends of recycled acrylonitrile-butadiene-styrene/recycled high impact polystyrene blends via styrene-butadiene-glycidyl methacrylate terpolymer. **Polymer**, 272, p. 125856, 2023.

MOHD YUSUF, S.; CUTLER, S.; GAO, N. The impact of metal additive manufacturing on the aerospace industry. **Metals**, 9, n. 12, p. 1286, 2019.

MONTEIRO, H.; CARMONA-APARICIO, G.; LEI, I.; DESPEISSE, M. Energy and material efficiency strategies enabled by metal additive manufacturing—A review for the aeronautic and aerospace sectors. **Energy Reports**, 8, p. 298-305, 2022.

MORENO NIETO, D.; ALONSO-GARCÍA, M.; PARDO-VICENTE, M.-A.; RODRÍGUEZ-PARADA, L. Product design by additive manufacturing for water environments: Study of degradation and absorption behavior of pla and petg. **Polymers**, 13, n. 7, p. 1036, 2021.

MUNDIAL, F. E., 2018, **The future of jobs report**.

NATHAPHAN, S.; TRUTASSANAWIN, W. Effects of process parameters on compressive property of FDM with ABS. **Rapid Prototyping Journal**, 27, n. 5, p. 905-917, 2021.

OSMAN, A.; LU, J. 3D printing of polymer composites to fabricate wearable sensors: A comprehensive review. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, 154, p. 100734, 2023.

OWADOKUN, I. K. S. **A influência do gerenciamento do risco em equipamentos na alocação do capital expenditure de uma empresa: o estudo de caso do Aeroporto Internacional do Galeão**. 2022. -.

ÖZENÇ, M.; TEZEL, T.; KOVAN, V. Investigation into impact properties of adhesively bonded 3D printed polymers. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 118, p. 103222, 2022.

PEREIRA, T.; DE JESUS, A. V.; VALVERDE, G.; ROLAND, R. *et al.* ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PADRÃO DE PREENCHIMENTO E DA ALTURA DE CAMADA DE

DEPOSIÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS FABRICADAS EM PLA A PARTIR DE IMPRESSÃO 3D. **DESAFIOS-Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, 8, n. 1, p. 95-103, 2021.

PLATEK, P.; RAJKOWSKI, K.; CIEPLAK, K.; SARZYŃSKI, M. *et al.* Deformation process of 3D printed structures made from flexible material with different values of relative density. **Polymers**, 12, n. 9, p. 2120, 2020.

RABELLO, M. Estrutura e propriedades de polímeros. **do autor, ISBNB**, p. 978-965, 2021.

REASON, J. **Managing the risks of organizational accidents**. Routledge, 2016. 1315543540.

REZENDE, S. M. F. d. Estudo e caracterização de componentes confeccionados por manufatura aditiva. 2018.

RODRIGUES, V. P.; DE SENZI ZANCUL, E.; MANÇANARES, C. G.; GIORDANO, C. M. *et al.* Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, 12, n. 3, p. 1, 2017.

RODRÍGUEZ-REYNA, S.; MATA, C.; DÍAZ-AGUILERA, J.; ACEVEDO-PARRA, H. *et al.* Mechanical properties optimization for PLA, ABS and Nylon+ CF manufactured by 3D FDM printing. **Materials Today Communications**, 33, p. 104774, 2022.

RUIS, L. S.; ZEFERINO, L. H. O Uso PLA na Impressão 3D: Uma Análise sobre sua Biodegradabilidade. **Confect**, 13, 2021.

SALIH, C. **International Aviation Law for Aerodrome Planning**. Springer, 2021. 3030568415.

SANTANA, L.; ALVES, J. L.; SABINO NETTO, A. d. C.; MERLINI, C. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, 23, 2018.

SECCHI, A. R. Modelagem e simulação de processos. **Notas de Aula**, 1995.

SHU, L.; LI, Y.; LI, J.; WANG, W. *et al.* Chain Extension, Phase Interface Reparation and Mechanical Property of Recycled Acrylonitrile-Butadiene-Styrene by Epoxidized Styrene-Butadiene-Styrene. **Macromolecular Materials and Engineering**, 305, n. 11, p. 2000284, 2020.

SIMÕES JÚNIOR, J.; BRAMBRATTI JÚNIOR, N.; HEMKEMEIERI, M. Aspectos ambientais da substituição de componentes em fibra de vidro por componentes em abs (acrilonitrila butadieno estireno) em uma indústria de produção de carrocerias de ônibus. **Science & Engineering Journal**, 23, n. 2, p. 33-38, 2014.

SOUZA, H. A. F. Avaliação do comportamento mecânico de polímero ABS na impressão 3D. 2020.

SPRING, C.; MCNERNEY, M. T. **A Comparative Study of FAA and ICAO Obstacle Clearance Regulations**. University of Texas at Austin. Aviation Research Center. 1996.

TOURI, M.; KABIRIAN, F.; SAADATI, M.; RAMAKRISHNA, S. *et al.* Additive manufacturing of biomaterials– the evolution of rapid prototyping. **Advanced Engineering Materials**, 21, n. 2, p. 1800511, 2019.

VARGHESE, R.; SALVI, S.; SOOD, P.; KARSIYA, J. *et al.* Recent advancements in additive manufacturing techniques employed in the pharmaceutical industry: A bird's eye view. **Annals of 3D printed medicine**, 8, p. 100081, 2022.

VARGHESE, R.; SOOD, P.; SALVI, S.; KARSIYA, J. *et al.* 3D printing in the pharmaceutical sector: advances and evidences. **Sensors International**, p. 100177, 2022.

VINYAS, M.; ATHUL, S.; HARURSAMPATH, D.; THOI, T. N. Experimental evaluation of the mechanical and thermal properties of 3D printed PLA and its composites. **Materials Research Express**, 6, n. 11, p. 115301, 2019.

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. Editora Blucher, 2021. 8521211511.

WANG, S.; MA, Y.; DENG, Z.; ZHANG, S. *et al.* Effects of fused deposition modeling process parameters on tensile, dynamic mechanical properties of 3D printed polylactic acid materials. **Polymer testing**, 86, p. 106483, 2020.

WENG, Z.; WANG, J.; SENTHIL, T.; WU, L. Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. **Materials & Design**, 102, p. 276-283, 2016.

WORLD ECONOMIC FORUM, V. The future of jobs report 2020. **Retrieved from Geneva**, 2020.

XIANG, D.; ZHANG, X.; HARKIN-JONES, E.; ZHU, W. *et al.* Synergistic effects of hybrid conductive nanofillers on the performance of 3D printed highly elastic strain sensors. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 129, p. 105730, 2020.

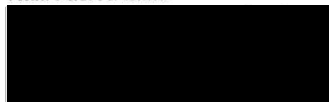
YOUNG, S. B.; WELLS, A. T. **Aeroportos-: Planejamento e Gestão**. Bookman Editora, 2014. 8582602065.

ANEXO

Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium
National Aerospace Laboratory NLR



SOCIEDADE CONSIGNATÁRIA HOBECO LTDA.
Attn. Mrs. A. Lima



from
M.H. van Houten/th
telephone
[redacted]
our order number
0320416
our reference
AVCE/1420/7927
Please mention our reference in your reply
date
26 July 2012

your reference
E-mail dated 15 June 2012
subject
Statement regarding the frangibility of the HOBECO meteorological mast

Dear Ms. Lima,

This letter concerns the frangibility of HOBECO's meteorological mast.

HOBECO requested the Dutch National Aerospace Laboratory to perform an assessment of the frangibility of the meteorological mast, your Purchase Order HBSA-008-I/12 dated 19 April 2012. NLR delivered the results of this study as Contract Report NLR-CR-2012-217, entitled 'Frangibility analysis of a weather station mast' by M.H. van Houten.

On 15 June 2012 HOBECO requested from NLR, by e-mail, a statement on the frangibility of the mast. Please consider this letter to be this statement.

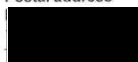
ICAO Annex 14 and ICAO Aerodrome Design manual, Part 6: Frangibility, require that airport equipment and installations within an operational area should be frangible. A frangible object is defined as "an object of low mass designed to break, distort or yield on impact so as to present the minimum hazard to aircraft".

In the current ICAO guidelines on frangibility, the requirements for the design and testing of approach light poles are described. It is stated there that the frangibility of the structure has to be proven by means of full scale testing or numerical simulation, accompanied with representative test data.

The work carried out by NLR based on information received from HOBECO consisted of the development of a numerical analysis model of the mast, and the simulation of the frangibility according to the ICAO Aerodrome Design Manual Part 6 Frangibility. ICAO defines a full-scale test at 1 meter below the top to show the frangibility. In addition the estimation should be done for all different scenarios of an aircraft impacting the structure. Therefore the impact simulations were carried out at different heights and impact angles too. To



Postal address



NLR Amsterdam



NLR Flevoland



page
2

to
SOCIEDADE CONSIGNATÁRIA HOBECO LTDA.
for the attention of
Mrs. A. Lima

our reference
AVCE/1420/7927
date
26 July 2012

represent the aircraft a rigid wing impactor with a mass of 3000 kg and impact velocity of 140 km/h was used. Resulting values of peak force, energy and failure mode were compared with the allowable values defined by ICAO, i.e. a maximum impact force of 45 kNewton and maximum energy of 55 kJoule.

The numerical simulations show that the maximum force and energy at an impact height one meter below the top of the mast (the full-scale test requirement) are lower than the maximum allowable values specified in the ICAO design manual. If a full-scale test would have been done on the mast at the specified location, the simulation results indicate that the weather station mast most likely would have passed the frangibility criteria. Recommendations for further improvement of the mast were given.

We trust this result satisfies your request, communicated to NLR by e-mail on 15 June 2012. If you have further queries, we are at your disposal.

With kind regards,



M.H. van Houten
Collaborative Engineering Systems Department



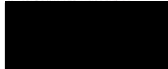
Gezien voor legalisatie de handtekening
van: M.H. van HOUTEN
Steenwijkerland, 26-07-2012
Namens de burgemeester van Steenwijkerland,
(De burgemeester is niet verantwoordelijk voor de inhoud van dit stuk!)



Gezien voor legalisatie van de handtekening
van: [redacted]
De minister van Buitenlandse Zaken voor deze,
#000 [redacted]
Den Haag [redacted]

27-JULI-12 0010 MW. C. VAN T VEER

Postal address



NLR Amsterdam



NLR Flevoland



Legalisatie Elektronisch 7:00 26-07-2012 16:59:11 160641 SML PLE

BRA **BRA** 052236MF

Consulado-Geral do Brasil em Roterdã
Solicitação nº 410.4.120727-000006

Reconheço verdadeira, por semelhança, a assinatura neste documento de C. van 't Veer - funcionária, do(a) Ministério dos Negócios Estrangeiros, em/no(a) Haia - Países Baixos. E, para constar onde convier, mandei passar o presente, que assinei e fiz selar com o selo deste(a) Consulado-Geral.

20,00
Pagou R\$ 20,00 - Ouro
€ 18,00 - TEC 410.4

052236MF ATENÇÃO
Se o número no código de barras for diferente, esta etiqueta É FALSA.

Roterdã, vinte e sete de julho de dois mil e doze
(27/07/2012)

Terceiro Secretário

- Dispensada a legalização da assinatura consular de acordo com o art. 2º, do Dec. 84.451/80.
- A presente legalização não implica aceitação do teor do documento.

EM BRANCO

EM BRANCO

EM BRANCO

MARIANA ERIKA HEYNEMANN
 TRADUTORA PÚBLICA E INTÉRPRETE COMERCIAL JURAMENTADA
 Sworn Public Translator
 CPF No. 021966117-00
 MAT. JUCERJA No. 091

Tradução AT 3276 - I

Eu, abaixo assinada, Tradutora Pública e Intérprete Comercial Juramentada, neste Estado e Cidade do Rio de Janeiro, República Federativa do Brasil, nomeada pela Junta Comercial do Rio de Janeiro e nela matriculada sob o No. 091, para o idioma INGLÊS, CERTIFICO e DOU FÉ de que me foi apresentado um documento exarado em idioma INGLÊS a fim de traduzi-lo para o vernáculo, o que cumpro em razão de meu Ofício, como segue:-----

Documento feito em papel timbrando de National Aerospace Laboratory NLR -----

SOCIEDADE CONSIGNATÁRIA HOBECO LTDA.-----

Atenção: Sra. A. Lima -----

Ladeira Madre de Deus, 1 - Gamboa - 20221-090 - Rio de Janeiro - RJ - BRASIL - [REDACTED]

De: M.H. van Houten/th - Telefone: [REDACTED]-----

Nosso número de compra: 0320416 - -----

Nossa referência: AVCE/1420/7927 -----

Favor mencionar nossa referência em sua resposta ---

Data: 26 de julho de 2012.-----

Sua referência-----

E-mail datado 15 de junho de 2012-----

Assunto:-----



Av. [REDACTED]

MARIANA ERIKA HEYNEMANN
 TRADUTORA PÚBLICA E INTÉRPRETE COMERCIAL JURAMENTADA
 Sworn Public Translator
 CPF No. 021966117-00
 MAT. JUCERJA No. 091

Tradução AT 3276 - 2

Declaração relativa à frangibilidade do mastro
 meteorológico HOBECO-----

Prezada Sra. Lima,-----

Esta carta diz respeito à frangibilidade do mastro
 meteorológico da HOBECO.-----

A HOBECO pediu ao Laboratório Aeroespacial Nacional
 da Holanda para realizar uma avaliação da
 frangibilidade do mastro meteorológico, através do
 seu pedido de compra HBSA-008-I/12 de 19 de Abril de
 2012. a NLR entregou os resultados deste estudo
 conforme o Relatório de Contrato NLR-CR-2012-217,
 intitulado "Análise de frangibilidade de um mastro
 de estação meteorológica" por van Houten. -----

Em 15 de junho de 2012, a HOBECO solicitou da NLR,
 por e-mail, uma declaração assinada, onde a
 assinatura precisa ser reconhecida por um tabelião
 público e pela embaixada brasileira. Por favor,
 considere esta carta como sendo esta declaração.-----

O Anexo 14 de ICAO e o Manual do Projeto de
 Aeródromo de ICAO, Parte 6: Frangibilidade exige



MARIANA ERIKA HEYNEMANN
TRADUTORA PÚBLICA E INTÉRPRETE COMERCIAL JURAMENTADA
Sworn Public Translator
CPF No. 021966117-00
MAT. JUCERJA No. 091

Tradução AT 3276 - 3

que esses equipamentos e instalações de aeroporto dentro de uma área operacional sejam Frangíveis. Um objeto frangível é definido como "um objeto de massa baixa projetado para quebrar, torcer ou ceder sobre impacto de forma a apresentar o risco mínimo a aeronaves".-----

Nas diretrizes atuais de ICAO sobre frangibilidade, os requisitos para a concepção e o teste de postes de luz de aproximação são descritos. Afirma-se ali que a frangibilidade da estrutura tem de ser comprovada por meio de testes em escala real ou simulação numérica, acompanhado com dados de teste representativas.-----

O trabalho executado por NLR baseado em informações recebidas da HOBEKO consistiu no desenvolvimento de um modelo de análise numérica do mastro, e da simulação da frangibilidade, de acordo com a Parte 6 - Frangibilidade - do Manual de Projeto de Aeródromos de ICAO. ICAO define um teste em grande escala a 1 metro abaixo da superfície para mostrar a frangibilidade. Além disso, a estimativa deve ser feita para todos os cenários diferentes de uma aeronave que impacte a estrutura. Por conseguinte,



Av. [REDACTED]

MARIANA ERIKA HEYNEMANN
TRADUTORA PÚBLICA E INTÉRPRETE COMERCIAL JURAMENTADA
Sworn Public Translator
CPF No. 021966117-00
MAT. JUCERJA No. 091

Tradução AT 3276 - 4

as simulações de impacto foram conduzidas em diferentes alturas e ângulos de impacto também. Para representar a aeronave, um pêndulo de asa rígida com uma massa de 3000 kg e velocidade de impacto de 140 km/h foi utilizado. Valores resultantes de força de pico, em modo de falha e energia foram comparados com os valores admissíveis definidos por ICAO, ou seja, uma força máxima de impacto de 45 kNewton e energia máxima de 55 kJoule.-----

As simulações numéricas mostram que a força máxima e a energia na altura do impacto de um metro abaixo do topo do mastro (o requisito de teste em grande escala) são mais baixos do que os valores máximos permitidos especificados no manual de projeto de ICAO. Se um teste em grande escala fosse feito no mastro, os resultados da simulação indicariam que o mastro da estação meteorológica provavelmente teria passado nos critérios de frangibilidade.-----

Recomendações para outras melhorias do mastro foram dadas.-----

Acreditamos que este resultado satisfaça o seu pedido, comunicado à NLR por e-mail em 15 de junho de 2012. Se houver qualquer outra dúvida, estamos ao



Av. [REDACTED]

MARIANA ERIKA HEYNEMANN
 TRADUTORA PÚBLICA E INTÉRPRETE COMERCIAL JURAMENTADA
 Sworn Public Translator
 CPF No. 021966117-00
 MAT. JUCERJA No. 091

Tradução AT 3276 - 5

seu dispor.-----

Cordialmente,-----

[Consta assinatura de [REDACTED] - Engenheiro
 de Colaboração, Departamento de Sistemas de
 Engenharia.]-----

[Constam carimbo e firma de legalização de M.H.van
 Houten em 27 de julho de 2012 .]-----

Consulado Geral do Brasil em Roterdã-----

Reconheço verdadeira, por semelhança, a assinatura
 neste documento de C. van't Veer - funcionária
 do(a) Ministério dos Negócios Estrangeiros em/no(a)
 Haia - Países Baixos.-----

E para constar onde convier, mandei passar o
 presente, que assinei e fiz selar com o Selo deste
 Consulado Geral.-----

Roterdã, vinte e sete de julho de dois mil e doze.--
 (27/07/2012) -----

[Consta embaixo assinatura Miguel Paiva Lacerda -
 Terceiro Secretário]-----

Recebi R\$ 20,00 ouro ou \$ 18,00 - Tec. 410,4-----



Av. [REDACTED]

MARIANA ERIKA HEYNEMANN
TRADUTORA PÚBLICA E INTÉRPRETE COMERCIAL JURAMENTADA
Sworn Public Translator
CPF No. 021966117-00
MAT. JUCERJA No. 091

Tradução AT 3276 - 6

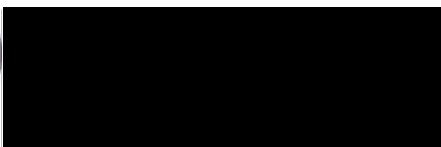
Dispensada a legalização da assinatura Consular de
acordo com o artigo 2º do Decreto 84451/80.-----

A presente legalização não implica aceitação do
teor do documento-----

Ilegível- ATENÇÃO - se o número no código de
barras for diferente, está etiqueta é FALSA.-----

Nada mais continha ou declarava o presente
documento em testemunho do que apus a minha
assinatura.-----

Rio de Janeiro, 14 de agosto de 2012.-----



HMT330MIK Meteorological Installation Kit



The HMT337 with warmed probe installed with the HMT330MIK kit is the right choice for reliable humidity measurement in humid weather conditions.

Features/Benefits

- For outdoor humidity and temperature measurements
- Can be ordered in a variety of configurations
- Used together with HMT337 transmitter

HMT337 Features

- Warmed probe provides true humidity readings in condensing conditions
- Humidity measurement expressed as relative humidity and/or dewpoint temperature
- Easy field calibration with the HM70 hand-held meter
- Vaisala SPH 10/20 Static Pressure Head eliminates effectively pressure variations in the barometer caused by wind

The Vaisala Meteorological Installation Kit HMT330MIK enables the Vaisala HUMICAP® Humidity and Temperature Transmitter HMT337 to be installed outdoors to obtain reliable measurements for meteorological purposes.

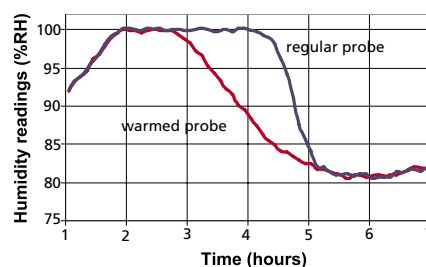
True humidity readings in condensing conditions

In weather observations dew formation makes reliable humidity measurement difficult. When dew has formed on the humidity sensor, it is impossible to obtain a true reading until this dew evaporates.

The HMT337 avoids this problem by warming the probe. When warmed, the relative humidity inside the probe stays below the ambient level. With an accurate temperature measurement, the ambient dewpoint can be calculated precisely. To obtain the ambient relative humidity, an additional probe measures the ambient temperature, and the transmitter

calculates the relative humidity from the dewpoint and temperature values.

Open shield prevents



After a period of 100 % relative humidity, the warmed probe measures the true humidity, whereas the non-warmed probe takes time to recover from the condensation.

microclimates

The warmed humidity probe of the HMT337 is mounted in a shield which is open at the bottom to ensure steady air circulation to the sensor even in calm weather.

In traditional radiation shields sleet or snow can accumulate on the shield

and prevent the proper air circulation through the shield, and create a humid microclimate until the snow melts.

Essential for critical weather measurements

Obtaining a true humidity reading is particularly important e.g. in traffic safety: at airports and at sea as well as on the roads. It is essential, for example, in fog and frost prediction.



For calibration, a portable HMP77 reference probe is easy to attach beside the HMT337 probe.