



Renan Ferreira Fraga Wanderley

**Análise das Resistências de Componentes Fabricados por
Manufatura Aditiva**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico
Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Rio de Janeiro
Maio de 2022.



Renan Ferreira Fraga Wanderley

**Análise das Resistências de Componentes Fabricados por
Manufatura Aditiva**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Orientador e Presidente

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC Rio

Prof. Florian Alain Yannick Pradelle

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC Rio

Prof. Ana Rosa Fonseca de Martins

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de maio de 2022.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Renan Ferreira Fraga Wanderley

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro em 2017.

Iniciou seu Mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2018, no Departamento de Engenharia Mecânica.

Ficha Catalográfica

Wanderley, Renan Ferreira Fraga

Análise das resistências de componentes fabricados por manufatura aditiva / Renan Ferreira Fraga Wanderley ; orientador: Jaime Tupiassú Pinho de Castro. – 2022.

124 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2022.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Propriedades mecânicas. 3. Manufatura aditiva. 4. Aço PH1. 5. Impressão 3D. 6. Fabricação digital. I. Castro, Jaime Tupiassú Pinho de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Dedico este projeto à minha mãe, Regina Celia Ferreira Fraga, à minha
companheira em todos os momentos, Flávia de Miranda Gonçalves e ao meu
chefe e amigo, Felipe de Castro Gouvea.

Agradecimentos

Ao meu orientador Jaime Tupiassú Pinho de Castro pela oportunidade, apoio, orientação e confiança depositados durante a realização deste trabalho.

A CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido durante o curso de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

Aos amigos, colegas, professores, pesquisadores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) e ao Departamento de Engenharia de Química e de Materiais (DEQM) da PUC-Rio, pelos ensinamentos, sugestões e conversas durante a realização deste trabalho.

Resumo

Wanderley, Renan Ferreira Fraga; Castro, Jaime Tupiassú Pinho de. **Análise das Resistências de Componentes Fabricados por Manufatura Aditiva**. Rio de Janeiro, 2022. 124p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A manufatura avançada, mais especificamente a manufatura aditiva, tem sido explorada cada vez mais, desde o surgimento da chamada Indústria 4.0. As técnicas de impressão 3D, incluindo a grande diversidade de tecnologias e de materiais que podem ser utilizados, permitem uma grande gama de aplicações. Com o intuito de explorar mais e aprofundar os estudos ligados a este tema, esta pesquisa investigou as propriedades mecânicas do aço inoxidável PH1, fabricado numa impressora EOS M280 através do processo de sinterização de camadas por laser. Buscou-se explorar as características do material, identificando influências da forma de fabricação e comparando as suas propriedades medidas, com as que são informadas pelo fabricante da impressora e com materiais laminados similares encontrados no mercado. Os ensaios de tração, rugosidade, dureza, impacto, M.E.V. e fadiga foram selecionados considerando a obtenção das propriedades mais relevantes do material para a indústria das peças produzidas pela tecnologia. Os resultados medidos foram comparados com os obtidos pela manufatura tradicional, para que fosse possível analisar a viabilidade e confiabilidade de substituição do método de fabricação. Estes indicam que o material impresso é resistente e pode substituir peças obtidas pela manufatura tradicional, mas deve ser utilizado com algumas considerações pois este sofre grande influência da orientação de impressão. Adicionalmente, foi desenvolvido um roteiro de fabricação digital de peças de reposição, para permitir a fabricação de peças que, juntamente com os ensaios mecânicos realizados, permite a avaliação do caminho a ser seguido dentro da manufatura aditiva para cada peça.

Palavras - chave

Propriedades Mecânicas; Manufatura Aditiva; Aço PH1; Impressão 3D; Fabricação Digital.

Abstract

Wanderley, Renan Ferreira Fraga; Castro, Jaime Tupiassú Pinho de. **Strength Analysis of Components Produced by Additive Manufacturing**. Rio de Janeiro, 2022. 124p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Advanced manufacturing, more specifically additive manufacturing, has been increasingly explored since the emergence of the so-called Industry 4.0. 3D printing techniques, including the great diversity of technologies and materials that can be used, allow a wide range of applications. In order to further explore and deepen the studies related to this topic, this research investigated the mechanical properties of PH1 stainless steel, manufactured in an EOS M280 printer through the laser layer sintering process. The characteristics of the material were explored, identifying influences of the form of manufacture and comparing its measured properties with those reported by the printer manufacturer and with similar laminated materials found on the market. The tensile, roughness, hardness, impact, M.E.V. and fatigue tests were selected considering obtaining the most relevant properties of the material for the industry of the parts produced by the technology. The measured results were compared with those obtained by traditional manufacturing, so that it was possible to analyze the feasibility and reliability of replacing the manufacturing method. These indicate that the printed material is resistant and can replace parts obtained by traditional manufacturing, but it must be used with some considerations as it is greatly influenced by the printing orientation. Additionally, a script for the digital manufacturing of spare parts was developed, to allow the manufacture of parts that, together with the mechanical tests performed, allows the evaluation of the path to be followed within the additive manufacturing for each part.

Keywords

Mechanical Properties; Additive Manufacturing; PH1 Steel; 3D printing; Digital Manufacturing.

Sumário

1. Introdução	14
2. Objetivo	16
2.1.1. Objetivo Geral	16
2.1.2. Objetivos Específicos	16
3. Revisão Bibliográfica	18
3.1. Manufatura Aditiva	18
3.1.1. Técnicas de Impressão 3D	20
3.1.2. Orientações de impressão	21
3.1.3. Normas Técnicas Relevantes	22
3.1.4. Rotas de fabricação por MA	24
3.2. Impressora EOS M280	27
3.2.1. Informações técnicas	27
3.2.2. Materiais do equipamento	28
3.2.3. PH1	28
3.3. Ensaios	29
3.3.1. Tração	29
3.3.2. Rugosidade	37
3.3.2.1. Altura média aritmética (Ra)	37
3.3.2.2. Altura máxima (Rz)	42
3.3.2.3. Altura média quadrática (Rq)	43
3.3.2.4. Altura média (Rc)	44
3.3.3. Dureza	45
3.3.3.1. Vickers e Knoop	49
3.3.4. Impacto	49
3.3.5. Microscopia Eletrônica de Varredura	54
3.3.6. Fadiga	56
4. Materiais e métodos	58
4.1. Matéria prima	58
4.2. Estratégia de fabricação	58
4.3. Tração	59
4.4. Rugosidade	60
4.5. Dureza	63

4.6. Impacto	64
4.7. Microscopia Eletrônica de Varredura	66
4.8. Fadiga	66
5. Resultados e Discussão	68
5.1. Caracterização	68
5.1.1. Tração	68
5.1.2. Rugosidade	75
5.1.3. Dureza	84
5.1.4. Impacto	90
5.1.5. Microscopia Eletrônica de Varredura	96
5.1.6. Fadiga	104
5.2. Roteiro de fabricação digital de <i>spare parts</i> 3D	107
5.2.1. Introdução	107
5.2.2. Etapa I – Envio/Recebimento das Demandas	107
5.2.3. Etapa II – Análise das Demandas	108
5.2.4. Etapa III – Execução das Demandas	108
5.2.5. Processos de Produção Utilizados.	115
6. Conclusões	118
7. Recomendações	120
8. Referência Bibliográfica	121

Lista de Figuras

<i>Figura 1 - Impactos ambientais analisados pelo estudo. Em azul está representada a manufatura subtrativa e em vermelho a aditiva. Estes resultados são para uma razão de volume requerido de matéria prima por volume da peça sendo maior que 7. Retirado de Paris et al., 2016.</i>	20
<i>Figura 2 - Possíveis direções de construção das peças (Stratasys Ltd, 2021).</i>	21
<i>Figura 3 - Fluxograma proposto por Bauer et. al. para a medição e posterior replicação de uma turbina. Adaptado de Bauer et al., 2019.</i>	25
<i>Figura 4 - Diagrama típico de tensão versus deformação fora de escala (Gere & Goodno, 2018).</i>	30
<i>Figura 5 - Curvas de tensão-deformação do aço UNS S15500 sob diferentes tratamentos térmicos (ASM International, 2002)</i>	32
<i>Figura 6 - Representação esquemática de curvas de tensão-deformação para materiais frágeis e dúcteis (Callister & Rethwisch, 2009).</i>	33
<i>Figura 7 - Curvas de tensão-deformação para corpos de prova de Inconel 718 (Krahmer et al., 2016).</i>	34
<i>Figura 8 - Opções de impressões por FDM (Hanon et al., 2019)</i>	35
<i>Figura 9 - Curvas de tensão-deformação para diferentes corpos de prova de PETG impressos por FDM (Hanon et al., 2019)</i>	36
<i>Figura 10 - Perfil medido versus perfil nominal (ASME B46.1, 2002)</i>	37
<i>Figura 11 - Definição do parâmetro de rugosidade Ra (Gadelmawla, 2002)</i>	38
<i>Figura 12 - Rugosidade obtida através de métodos comuns de fabricação da manufatura tradicional (ASME B46.1, 2002)</i>	39
<i>Figura 13 - Redução na resistência à fadiga do ferro fundido submetido à várias operações de acabamento superficial (Kalpakjian & Schmid, 2001).</i>	40
<i>Figura 14 - Deslocamento da curva de fadiga de um aço ANSI 4340 devido a operações de esmerilhamento diferentes (Kalpakjian & Schmid, 2001)</i>	41
<i>Figura 15 - Rugosidade superficial em superfícies metálicas (Somthong & Yang, 2016).</i>	41
<i>Figura 16 - Definição do parâmetro de rugosidade Rz (Gadelmawla, 2002)</i>	43
<i>Figura 17 - Definição do parâmetro de rugosidade Rq (Nicolas-Silvente et al., 2020)</i>	44
<i>Figura 18 - Definição do parâmetro de rugosidade Rc (NBR ISO 4287, 2002)</i>	44
<i>Figura 19 - Comparação entre a Escala de Mohs e a dureza Vickers (Angus, 1979)</i>	46
<i>Figura 20 - Técnicas de testes de dureza (Callister & Rethwisch, 2009)</i>	48
<i>Figura 21 - Corpos de prova de impacto Charpy. Tipos A, B e C (ASTM E23, 2007)</i>	50
<i>Figura 22 - Curvas de força por deslocamento para falhas em testes de Charpy e Izod (Rogers & Plumtree, 1992).</i>	51
<i>Figura 23 - Energia de absorção com dependência de temperatura (curva A) e porcentagem de fratura cisalhante (curva B) para um aço A283 (Callister & Rethwisch, 2009).</i>	52
<i>Figura 24 - Foto de diferentes superfícies de fratura do aço A36 (Callister & Rethwisch, 2009).</i>	52
<i>Figura 25 - Curva de transição dúctil-frágil para o aço A36 (Terán et al., 2016)</i>	53
<i>Figura 26 - Comparação padrão da porcentagem de shear lip (Hertzberg, 1995).</i>	53
<i>Figura 27 - Ilustração das variáveis para cálculo da porcentagem de shear lip (Hertzberg, 1995).</i>	54
<i>Figura 28 - Faixas de tamanhos para diversas microestruturas (Callister & Rethwisch, 2009).</i>	55
<i>Figura 29 - Faixas de resolução de várias técnicas de microscopia (Callister & Rethwisch, 2009).</i>	55
<i>Figura 30 - Classificação de vários tipos de falha por fadiga em materiais de engenharia (Adaptado de Sharma et al., 2020).</i>	56

Figura 31 - Dimensões possíveis para o corpo de prova para o ensaio de tração (ASTM E8, 2013).....	59
Figura 32 - Impressão dos corpos de prova para avaliação de rugosidade e dureza	61
Figura 33 - Equipamento utilizado no ensaio de rugosidade.....	62
Figura 34 - Equipamento utilizado no ensaio de dureza	63
Figura 35 – Equipamento utilizado durante o ensaio de impacto	64
Figura 36 – Unidades de medida do equipamento.....	65
Figura 37 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de fadiga (ASTM E 606).....	67
Figura 38 - Corpos de prova de tração impressos na direção flat	68
Figura 39 - Corpo de prova flat separado do suporte devido à tensão residual	69
Figura 40 - Corpo de prova on-edge separado do suporte devido à tensão residual.....	69
Figura 41 - Deformação da placa de impressão devido às tensões residuais (Prabhakar et al., 2015).....	69
Figura 42 - Modelo tridimensional modificado do corpo de prova flat.....	70
Figura 43 - Modelo tridimensional modificado do corpo de prova on-edge.....	70
Figura 44 - Comparação entre os corpos de prova com e sem tratamento térmico	71
Figura 45 - Comparação das curvas de tensão-deformação de engenharia	72
Figura 46 - Verificação do raio do filete na extremidade superior do corpo de prova.....	73
Figura 47 - Verificação do raio do filete na extremidade inferior do corpo de prova.....	73
Figura 48 - Comparação entre as curvas de tensão-deformação de engenharia e real ...	74
Figura 49 - Ensaio de rugosidade.....	75
Figura 50 - Perfil de rugosidade do corpo de prova 1.1	76
Figura 51 - Perfil de rugosidade do corpo de prova 1.5	77
Figura 52 - Cubos sendo jateados com esferas de vidro.....	81
Figura 53 - Perfil de rugosidade do corpo de prova 1.1 após jateamento com esferas de vidro	82
Figura 54 - Imagens da metalografia optica realizada nas amostras após o polimento por laser (Zhihao et al., 2018).....	83
Figura 55 - Diferença na microdureza de peças polidas por laser utilizando diferentes métodos (Xu et al., 2021)	83
Figura 56 - Faces do cubo que foram analisadas no ensaio	84
Figura 57 - Sentido do fluxo de gás de inerte	88
Figura 58 - Sinterização do material (EOS GMBH, 2022).....	89
Figura 59 - Sentido de distribuição de material com o recoater.....	90
Figura 60 – Foto das superfícies de fratura dos corpos de prova on-edge.....	91
Figura 61 – Interpretação dos coeficientes da equação da tangente hiperbólica (Oldfield, 1979).....	93
Figura 62 – Curva de transição dúctil-frágil para os corpos de prova flat.....	94
Figura 63 – Curva de transição dúctil-frágil para os corpos de prova On-edge.....	95
Figura 64 – Análise comparativa entre as duas curvas de transição dúctil-frágil.....	96
Figura 65 - Imagem de MEV do PH1 com aproximação de 1,2k x.....	97
Figura 66 - Imagem de MEV do PH1 analisada no EDS.....	97
Figura 67 - Espectros identificados pelo EDS no PH1	98
Figura 68 - Imagens de MEV da superfície do entalhe do corpo de prova impresso na posição (a) flat e (b) on-edge após ensaio de impacto.....	99
Figura 69 - Imagens de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição flat após ensaio de impacto à -40 °C: (a) com aproximação de 400 x, (b) com aproximação de 1.0k x e (c) com aproximação de 2.0k x.....	100
Figura 70 - Imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição flat após ensaio de impacto à 28 °C	101
Figura 71 - Imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição flat após ensaio de impacto à 350 °C	102

<i>Figura 72 - Imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição on-edge após ensaio de impacto à -40 °C</i>	<i>103</i>
<i>Figura 73 - Imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição on-edge após ensaio de impacto à 28 °C.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 74 - Imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição on-edge após ensaio de impacto à 100 °C</i>	<i>103</i>
<i>Figura 75 - Imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição on-edge após ensaio de impacto à 240 °C</i>	<i>103</i>
<i>Figura 76 - Laços obtidos para o corpo de prova 3 com deformação de 0,40%</i>	<i>105</i>
<i>Figura 77 - Laços obtidos para o corpo de prova 5 com deformação de 0,45%</i>	<i>105</i>
<i>Figura 78 - Laços obtidos para o corpo de prova 8 com deformação de 0,50%</i>	<i>106</i>
<i>Figura 79 - Superfície de fratura do corpo de prova 2, ensaiado com 0,3% de deformação</i>	<i>107</i>
<i>Figura 80 - Fluxograma da Etapa I – Recebimento das demandas</i>	<i>112</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 – Normas para a manufatura aditiva.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 2 - Composição do PH1 (Adaptado de EOS GMBH, 2019).....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço PH1 (EOS GMBH, 2019).</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 4 - Simbologia de rugosidade (adaptado da NBR6402).....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 5 - Classes de rugosidade (adaptado da NBR8404)</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 6 - Escala de Mohs (West, 1986).....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 7 - Valores de rugosidade obtidos após os ensaios</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 8 - Comparação entre os parâmetros de rugosidade dos cubos.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 9 - Médias das colunas.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 10 - Média das linhas.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 11 - Valores de Ra obtidos dos CP's, de acordo com sua posição na mesa de impressão</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 12 - Valores de Rz obtidos dos CP's, de acordo com sua posição na mesa de impressão</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 13 - Valores de Rq obtidos dos CP's, de acordo com sua posição na mesa de impressão</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 14 - Valores de Rc obtidos dos CP's, de acordo com sua posição na mesa de impressão</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 15 - Valores de rugosidade obtidos antes e após o jateamento de esferas de vidro.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 16 - Valores de dureza obtidos após os ensaios.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 17 - Comparação entre as faces dos cubos.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 18 - Médias das colunas</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 19 - Média das linhas.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 20 - Valores médios de dureza obtidos na face superior dos CP's, de acordo com sua posição na mesa de impressão</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 21 - Valores médios de dureza obtidos na face lateral dos CP's, de acordo com sua posição na mesa de impressão</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 22 – Valores de temperatura avaliados e energia absorvida obtidos</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 23 – Valores encontrados para as variáveis da Equação 17 e seus respectivos R²</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 24 - Composição qualitativa identificada por EDS do PH1.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 25 - Resumo dos ensaios de fadiga</i>	<i>104</i>

1.

Introdução

A indústria brasileira, e em particular o setor de óleo e gás, está diante de uma nova janela de oportunidade com as transformações da quarta onda da Revolução Industrial, a chamada Indústria 4.0. A indústria de fabricação tradicional está no início de uma transformação digital acelerada, pela adoção de tecnologias como robôs e sensores inteligentes, drones autônomos, impressão 3D, dentre outras tecnologias inovadoras. Essa transformação pode ser comparada à automação da produção no início dos anos 70, que elevou substancialmente a produtividade da indústria. Hoje, a associação das tecnologias da informação e da comunicação está permitindo uma verdadeira abordagem inovadora em todas as cadeias produtivas, dentro de um processo crescente de digitalização (Bosch, 2021).

Considerando os rápidos avanços tecnológicos envolvendo a Indústria 4.0 e a consequente necessidade de transformação digital das empresas, a manufatura aditiva vem ganhando espaço e gerando novos desafios para a engenharia. Um dos principais desafios está na necessidade de transição e mudança de concepção, no desenvolvimento de novos produtos e na fabricação de bens, onde gradativamente o modelo mental baseado na manufatura tradicional passará para o modelo baseado em manufatura aditiva e outras técnicas de fabricação digital (Chakrabarti & Arora, 2019).

Ocorre que essa transição vem acontecendo na prática mais por tentativas e erros, num processo de aprendizado que demonstra uma certa incompatibilidade do modelo mental baseado em manufatura tradicional com os modernos recursos de manufatura aditiva. Essa incompatibilidade é percebida quando, por exemplo, uma peça fabricada numa impressora 3D necessita de vários tratamentos posteriores (e.g. retirada de suportes excessivos, usinagens diversas, etc.), reduzindo a eficácia da manufatura aditiva, além de agregar novos custos. Esses tratamentos posteriores, seus custos agregados e tempo de fabricação podem ser reduzidos através da utilização dos recursos de design para manufatura aditiva (Chakrabarti & Arora, 2019).

Na indústria de óleo e gás, em muitas situações, as operações em qualquer fase da cadeia produtiva podem ser interrompidas pela falha de um equipamento, demandando o acionamento de seu par, em *stand-by*, e a imediata manutenção do equipamento agora inoperante. Porém, vários itens de reposição (*spare parts*) são de difícil suprimento rápido. Este é o caso de equipamentos e maquinários antigos cujo os fabricantes não mais existem, da mudança de modelos (obsolescência programada) ou da complexidade e/ou do prazo de

fabricação pelos métodos tradicionais (ex: usinagem, fundição, forjamento, extrusão, etc.). Esse fato pode atrasar muito os cronogramas de manutenção tanto preventivas quanto corretivas (Inovação Industrial, 2021).

Um outro exemplo desse fato são os eventos não previstos que ocorrem durante as paradas programadas (ex: em refinarias, plataformas, FPSOs, etc.), quando um equipamento é aberto e a equipe de manutenção se depara com elementos internos e/ou componentes deteriorados cuja a substituição não fora prevista durante o planejamento da parada. Logo, a agilidade no fornecimento de determinadas *spare parts* é um elemento estratégico dentro da indústria. Ocorre que da identificação das partes necessárias até o seu fornecimento decorre um precioso tempo na aquisição e fornecimento desses itens, principalmente para os itens de reposição complexa, como exposto no parágrafo anterior. Mesmo optando-se pela fabricação digital/impressão 3D dos itens necessários, ainda decorrerá um tempo considerável para a identificação das especificações técnicas, geração dos desenhos, modelagem para fabricação digital e impressão 3D (Manufatura Digital, 2021).

2. Objetivo

2.1.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar as propriedades mecânicas de componentes fabricados através de manufatura aditiva com o material PH1. Nesse sentido, esta pesquisa tem por intenção respaldar o processo de fabricação digital, visando a otimização e máxima utilização dos recursos da manufatura aditiva e da impressão 3D para acelerar o processo de desenvolvimento de produtos e a disponibilidade de itens de reposição a indústria e óleo e gás. Em particular, será estudada a impressão 3D em metal, através da avaliação das propriedades mecânicas de corpos de prova impressos.

Assim, ensaios de tração, dureza, rugosidade, impacto, microscopia eletrônica de varredura e fadiga foram realizados em corpos de prova fabricados por impressão 3D. Devido às diferentes aplicações na indústria, este trabalho teve como foco o uso do aço inox PH1, o qual é similar ao material tradicional UNS S15500.

2.1.2. Objetivos Específicos

Este estudo foi realizado através das seguintes etapas:

- Avaliar a influência da orientação de impressão nas propriedades mecânicas de tração e impacto;
- Avaliar as características de rugosidade e dureza dos componentes impressos em função do posicionamento na mesa de impressão.
- Analisar a vida desses componentes em fadiga, com base nas propriedades cíclicas, medidas por procedimentos do método ϵN ;

Os ensaios mecânicos foram feitos segundo as normas e procedimentos adequados. Diferentes orientações de impressão foram avaliadas nestes ensaios. Adicionalmente,

também foi desenvolvido um roteiro de fabricação de *spare parts* para agregar e facilitar sua aplicação na indústria de óleo e gás.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Manufatura Aditiva

Há diversos estudos das diferenças da manufatura aditiva (MA) e da manufatura tradicional ou subtrativa (MS). Para começar, foram investigados impactos ambientais e a demanda de energia de cada tipo de manufatura, tendo em vista que cada vez mais é necessário buscar técnicas que permitam reduzir tanto a quantidade de material e processos necessários, quanto a quantidade de energia consumida (Allwood *et al.*, 2011).

MA é um processo que pode reduzir muito os impactos ambientais, pois requer um menor consumo de material e tem uma maior eficiência energética (Reeves, 2009). A MA gera muito menos resíduos que a manufatura tradicional, pois requer apenas a quantidade de material necessária para a produção da peça, gerando poucos excessos que precisem ser retirados nas fases de pós-processamento (Kreiger *et al.*, 2014; Watson & Taminger, 2018).

Watson & Taminger (2018) propuseram um modelo para determinar a vantagem de usar a MA ou a MS, em termos de consumo de energia. Este estudo analisou todo o ciclo de manufatura, tanto a fase de produção e transporte, quanto as etapas finais do ciclo de uma peça, como seu sucateamento para reciclagem.

Determinar qual tipo de manufatura é a mais eficiente em termos de energia é um desafio, pois a MA otimiza a quantidade de material usado e os pós-processamentos necessários. Porém, em alguns casos, quando a quantidade de material que deve ser retirado por MS é pouca, a MS pode ser mais atrativa, consumindo menos energia e tempo de fabricação.

As máquinas usadas na MS geralmente consomem uma quantidade substancial de energia quando estão em uma condição operacional; porém, na maior parte do tempo elas não se encontram em operação, consumindo energia sem processar a matéria prima. As máquinas usadas na MA, por sua vez, costumam sempre estar em operação, tendo, portanto, seu consumo de energia otimizado para a produção.

Dada todas as variáveis de produção, o estudo levou em consideração vários fatores para desenvolver o modelo de consumo de energia da MA e MS. Alguns destes fatores foram: energia gasta por equipamentos, energia gasta pelo transporte da matéria prima entre o estoque e o setor de produção, transporte do produto, etc.

O modelo desenvolvido foi simplificado em duas equações, uma para o consumo de energia da MA e o outro da MS. Como cada peça produzida possui suas próprias características, o autor concluiu que a utilização da MA ou da MS depende de cada caso. Porém, afirmou que em geral a MA pode reduzir o consumo de energia e reduzir as emissões de CO₂ associadas. O estudo de Paris *et al.* (2016) avaliou as condições na quais seria mais ambientalmente correto utilizar a MA ou a MS. Para tal, foi analisada a produção de uma turbina de avião, e o estudo tentou generalizar a metodologia aplicada para outras peças e processos.

Nesse estudo, foi considerada a produção de uma turbina de 13 lâminas com um diâmetro de 130 mm e uma altura de 30 mm, para operar numa rotação de até 50 mil rpm. A turbina foi manufaturada em uma liga de titânio (Ti6AlV).

Para a fabricação da turbina por MS, usina-se um cilindro em várias etapas sucessivas, até obter-se a peça finalizada. Neste processo, cerca de 87% do material inicial do cilindro deve ser subtraído, gerando assim uma grande quantidade de material residual.

Na fabricação por MA, foi utilizada a tecnologia EBM (*Electron Beam Melting*), que é similar à tecnologia DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*). Após a etapa de impressão 3D, etapas de retirada de suporte e acabamento da superfície foram usadas para obter da peça finalizada. O estudo avaliou, utilizando uma metodologia de avaliação do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment* (LCA)), 10 tipos de impactos causados por cada tipo de manufatura:

1. Esgotamento abiótico;
2. Acidificação;
3. Aquecimento global;
4. Ecotoxicidade de água doce;
5. Ecotoxicidade de água marinha;
6. Ecotoxicidade terrestre;
7. Utilização de energia não renovável;
8. Utilização de energia nuclear;
9. Potencial de utilizar energias renováveis;
10. Utilização de água.

Para avaliar a melhor opção de manufatura, foi considerada a razão entre volume de matéria prima com o volume da peça. O estudo constatou que sempre que esta razão é maior do que 7, a manufatura aditiva sempre terá menores impactos em todas as variáveis analisadas. Na Figura 1, estão apresentados alguns dos resultados obtidos pelo estudo. O estudo ainda indicou que a MA sempre será a melhor opção, na visão ambiental, para peças com alta complexidade geométrica. Porém, para peças que requeiram pouca usinagem e tenham baixa complexidade geométrica, a manufatura subtrativa pode ser menos danosa ao meio ambiente.

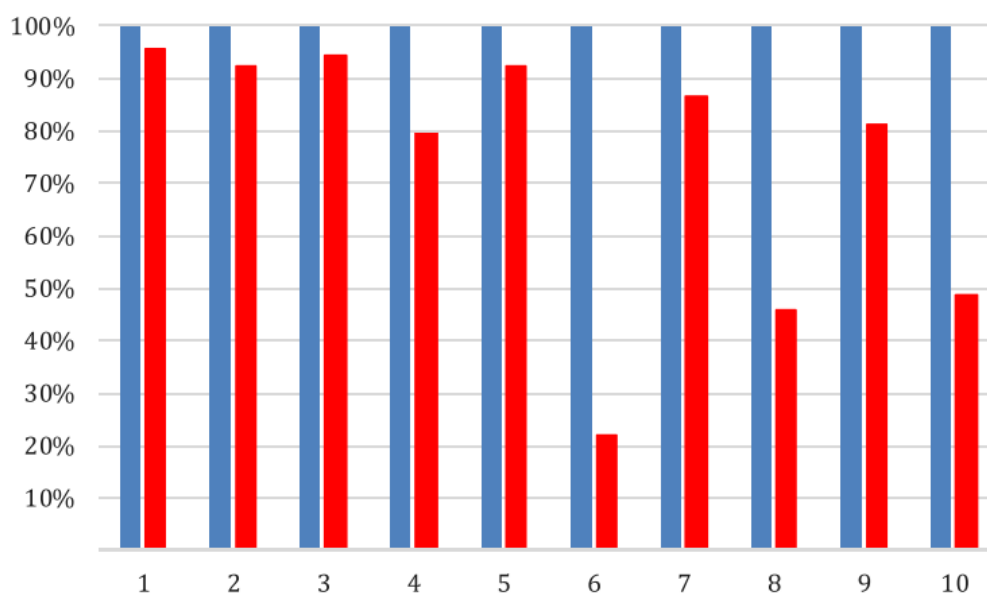


Figura 1 - Impactos ambientais analisados pelo estudo. Em azul está representada a manufatura subtrativa e em vermelho a aditiva. Estes resultados são para uma razão de volume requerido de matéria prima por volume da peça sendo maior que 7. Retirado de Paris *et al.*, 2016.

A literatura citada inclui estudos que comparam as propriedades mecânicas de componentes fabricados por MA com peças fabricadas através da manufatura tradicional. Usualmente são comparadas as propriedades para mais de um tipo de orientação de impressão, para entender o comportamento de peças impressas (Paris *et al.*, 2016).

3.1.1. Técnicas de Impressão 3D

Algumas das principais técnicas de impressão 3D são descritas a seguir.

Selective Laser Sintering (SLS)

A SLS é uma técnica de MA que emprega a poliamida (PA, nylon) como matéria prima. O pó de PA é fundido seletivamente na mesa de impressão de modo a formar a peça 3D. O material é primeiramente aquecido até perto de seu ponto de fusão, e então fundido com o laser, camada por camada, formando assim a peça desejada (Xometry, 2019). Essa técnica tem a vantagem de não necessitar de suportes especiais para a fabricação e permitir a manufatura de geometrias complexas.

Fused Deposition Modeling (FDM)

A FDM é um processo de MA onde a peça é construída a partir da deposição, camada por camada, de material fundido em uma mesa aquecida, seguindo uma rota pré-determinada. Os materiais usados são polímeros termoplásticos, normalmente na forma de filamentos. Esse processo é o mais usado na impressão 3D. Primeiramente, os bicos extrusores devem ser devidamente aquecidos para fundir o material do filamento. Esse bico extrusor é acoplado a um sistema de até três graus de liberdade para movimento nas direções X, Y e Z, dependendo da impressora. Dessa forma, o material fundido é derretido e depositado em uma mesa, também aquecida, mas em uma temperatura menor, para resfriar e solidificar enquanto é depositado camada por camada até o final do processo (Stratasys Ltd., 2021).

Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Na técnica DMLS de MA, um laser de alta potência e precisão funde micropartículas de metal, em geral ligas de alumínio, aço inox e titânio. Essa tecnologia se assemelha muito à SLS, pois o pó da matéria prima é aquecido até perto do seu ponto de fusão e então é depositado na mesa de impressão 3D, onde a energia proveniente do laser funde o pó seletivamente, camada por camada, formando a peça desejada (Stratasys Ltd., 2021).

3.1.2. Orientações de impressão

A orientação na qual a peça é fabricada influencia as propriedades finais da impressão, podendo afetar muito as propriedades mecânicas da peça, a quantidade de matéria prima requerida e o tempo de impressão. Sendo assim, um ponto essencial nos projetos de MA é determinar a melhor orientação de impressão (Zeltmann, *et al.*, 2016). A Figura 2 ilustra as principais orientações de impressão possíveis.

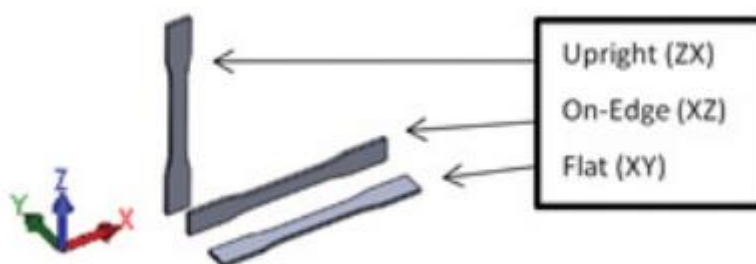


Figura 2 - Possíveis direções de construção das peças (Stratasys Ltd, 2021).

Um dos fatores determinantes para a definição da orientação de impressão de uma peça é a sua condição de operação. Peças submetidas a forças trativas, não deverão ser impressas na orientação ZX (Figura 2), pois as camadas de material estariam sobrepostas na direção perpendicular em relação a força aplicada (3D Hubs, 2021).

3.1.3. Normas Técnicas Relevantes

Normas técnicas, que permitem a avaliação da viabilidade de peças impressas serem certificadas para seu uso comum, são listadas a seguir na Tabela 1.

Tabela 1 – Normas para a manufatura aditiva

Grupo de requisitos	Norma	Nome da norma
Design	ISO / ASTM52915 – 16	Norma padrão para o formato de arquivo de fabricação aditiva versão 1.2
	ISO / ASTM52910 – 18	Manufatura aditiva - Design - Requisitos, diretrizes e recomendações
	ISO / ASTM52911 - 1 – 19	Manufatura aditiva – Design – Parte:1 Fusão de metais em pó à base de laser
	ISO / ASTM52911 - 2 – 19	Manufatura aditiva - Design - Parte 2: Fusão de polímeros em pó à base de laser
	ISO / TS 10303-1835 – 18	Sistemas de automação industrial e integração - Representação e troca de dados do produto - Parte 1835: Módulo de aplicação: peça de manufatura aditiva e informações de construção
Materiais e processo	ASTM F2924 - 14	Norma padrão para manufatura aditiva de titânio-6 alumínio-4 vanádio com <i>Powder Bed Fusion</i> .
	ASTM F3001 - 14	Norma padrão para manufatura aditiva de Titânio-6 alumínio-4 vanádio ELI (<i>Extra Low Interstitial</i>) com <i>Powder Bed Fusion</i> .
	ASTM F3049 - 14	Norma padrão para caracterizar propriedades de pós metálicos usados em processos de manufatura aditiva
	ASTM F3055 - 14A	Especificação para manufatura aditiva utilizando liga de níquel (UNS N07718) com <i>Powder Bed Fusion</i> .
	ASTM F3056 - 14E1	Especificação para manufatura aditiva utilizando liga de níquel (UNS N06625) com <i>Powder Bed Fusion</i> .

	ASTM F3091 / F3091M - 14	Especificação para fusão de materiais plásticos em pó
	ASTM F3184 - 16	Especificação para manufatura aditiva utilizando aço inoxidável (UNS S31603) com <i>Powder Bed Fusion</i> .
	ASTM F3187 - 16	Norma Padrão para energia direta de deposição metais.
	ASTM F3213 - 17	Padrão para manufatura aditiva - Propriedades da peça acabada - Especificação padrão para o cobalto-28 cromo-6 molibdênio com <i>Powder Bed Fusion</i> .
	ASTM F3301 - 18A	Padrão para manufatura aditiva - Métodos de pós-processamento - Especificação padrão para pós-processamento térmico de peças de metal fabricadas por <i>Powder Bed Fusion</i> .
	ASTM F3302 - 18	Padrão para manufatura aditiva - Métodos de pós-processamento - Especificação padrão para ligas de titânio por <i>Powder Bed Fusion</i> .
	ISO/ASTM 52904 - 19	Padrão para manufatura aditiva - características e desempenho do processo: Prática para o processo <i>Powder Bed Fusion</i> (PBF) de metal para atender a aplicações críticas.
	ASTM F3318 - 18	Padrão para manufatura aditiva - Propriedades da peça acabada - Especificação para AISi10Mg com <i>Powder Bed Fusion</i> - Raio laser.
	ISO / ASTM52901 – 16	Guia padrão para manufatura aditiva - Princípios gerais - Requisitos para peças MA compradas.
	ISO 17296-2 - 15	Manufatura aditiva - Princípios gerais - Parte 2: Visão geral de categorias de processo e matéria-prima.
Terminologia	ISO/ASTM 52900 - 15	Manufatura aditiva - Princípios gerais – Terminologia.
Método de teste	ASTM F2971 - 13	Prática padrão para relatórios de dados de testes para amostras fabricadas por manufatura aditiva.
	ASTM F3122 - 14	Guia padrão para avaliação de propriedades mecânicas de materiais metálicos fabricados por processos de manufatura aditiva.
	ISO / ASTM52902 – 19	Manufatura aditiva - Artefatos de teste - Avaliação da capacidade geométrica de sistemas de manufatura aditiva.
	ISO / ASTM52921 – 13	Terminologia padrão manufatura aditiva- Sistema de coordenadas e metodologias de teste.
	ISO 17296-3 - 14	Manufatura aditiva - Princípios gerais - Parte 3: Características

		principais e métodos de ensaio correspondentes.
	ISO 17296-4 - 14	Manufatura aditiva - Princípios gerais - Parte 4: Visão geral do processamento de dados.

3.1.4.

Rotas de fabricação por MA

O uso da manufatura aditiva (MA) como uma alternativa para a fabricação de peças vem crescendo. Empresas como a Siemens, General Eletric e Boeing já usam esta tecnologia de forma consolidada. Mas devido à falta de normas para validação da produção por MA, ainda é necessário criar metodologias de fabricação para padronizar a linha de produção. Neste contexto, alguns trabalhos recentes propõem possíveis rotas de fabricação por MA (Bauer *et al.*, 2019; Bonnard *et al.*, 2017; Paulic *et al.*, 2014).

Bauer *et al.*, 2019, propuseram um fluxograma para replicar de uma pá de turbina por MA, com etapas separadas em: Escaneamento, definição das regiões de interesse, geração do modelo CAD 3D, manufatura e medição das dimensões da peça. A etapa de escaneamento, foi realizada em duas subetapas, uma utilizando tomografia computadorizada (TC) de alta e baixa energia, e outra utilizando-se um scanner ótico. A TC foi utilizada para determinar a geometria interna da pá, e o scanner ótico para determinar a geometria externa. A Figura 3 apresenta o fluxograma desta etapa.

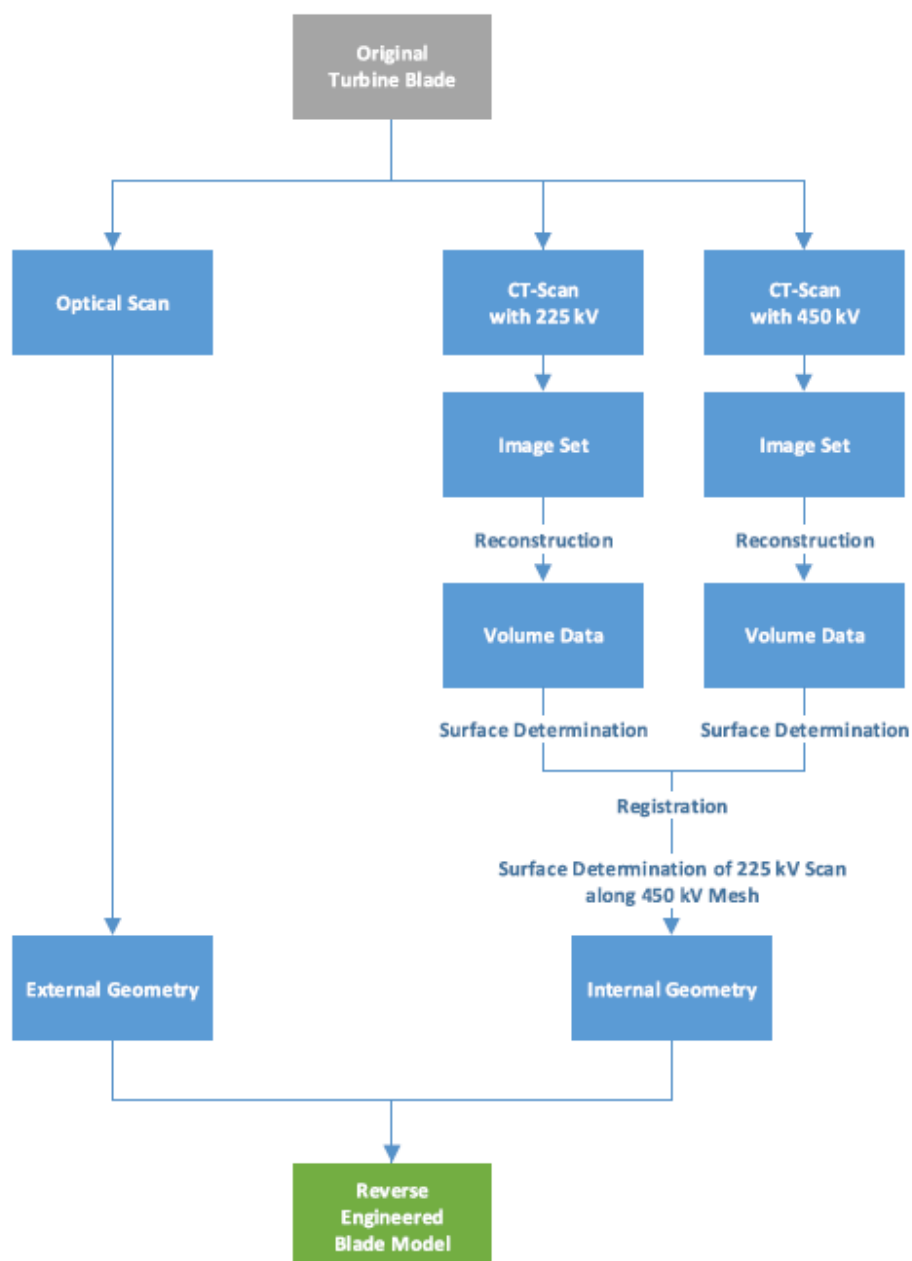


Figura 3 - Fluxograma proposto por Bauer *et. al.* para a medição e posterior replicação de uma turbina. Adaptado de Bauer *et al.*, 2019.

Após essa etapa, as regiões de interesse da peça foram determinadas para facilitar a etapa posterior de geração da malha 3D e do modelo CAD. Para tanto, foram criadas 4 regiões, uma região superior da pá e outra inferior, separadas nas partes interna e externa da pá.

A terceira etapa da metodologia foi gerar a geometria 3D da peça, incluindo a malha computacional e seu modelo CAD. Para gerar a malha 3D da parte externa da pá, foram utilizadas as medições do scanner ótico, e as geometrias internas foram geradas usando tanto as medições da TC de baixa energia quanto as de alta energia. Após a geração do modelo CAD 3D, a peça foi impressa por tecnologia DMLS. A peça para esse estudo não

recebeu nenhum pós processamento. Após a manufatura da peça, suas dimensões foram medidas utilizando a mesma metodologia da primeira etapa.

Após testar todo o ciclo de fabricação proposto, os autores concluíram que a metodologia proposta atingiu o nível de detalhamento desejado para a turbina, e que empregando cada etapa da metodologia, é possível replicar uma peça viável com dimensões dentro do erro esperado (Bauer *et al.*, 2019).

Bonnard *et al.* (2017) descreveram uma possível metodologia para a produção de peças por manufatura aditiva. Nessa metodologia, existem 7 (sete) níveis da produção das peças:

- 1) Informações básicas do projeto da MA. Esta fase consiste em especificar todas as informações necessárias para o projeto. Ela contém informações da equipe técnica do projeto, dos insumos necessários, etc.
- 2) Descrição das partes. É nesta etapa na qual as informações da peça que se deseja produzir são especificadas. Ela pode ser dividida em informações da geometria da peça e informações não geométricas (como materiais a serem utilizados, por exemplo).
- 3) Descrição das máquinas utilizadas. Nesta etapa, são descritas as especificações das máquinas e das tecnologias de MA a serem usadas. Esta etapa é fundamental em projetos de MA, pois existem uma grande variedade de tecnologias disponíveis.
- 4) Determinação dos parâmetros da fabricação. Nesta etapa, são definidos todos os parâmetros necessários para a impressão das peças. Ela engloba a definição do software de modelagem e os parâmetros das ferramentas e da impressão.
- 5) Programa de controle numérico. Esta etapa especifica o programa computacional de controle numérico.
- 6) Manufatura da peça. É a etapa de produção da peça, usando as informações geradas nas outras etapas.
- 7) Pós-produção e validação. Esta etapa inclui os métodos de inspeção necessários para validar as especificações das peças.

Este modelo de fabricação contém todas as informações necessárias para o projeto utilizando manufatura aditiva. Segundo Bonnard *et al.* (2018), este modelo de fabricação é uma descrição genérica para qualquer tecnologia de MA.

Outro trabalho que descreve um modelo de produção para MA é Paulic *et al.* (2014). Nele, foi proposta uma rota para a produção de uma peça por engenharia reversa. Neste projeto, o modelo de produção foi dividido em:

- Escaneamento 3D da peça;
- Geração do modelo CAD 3D;
- Criação/aperfeiçoamento das superfícies da peça;
- Seleção da tecnologia;
- Fabricação.

Na primeira etapa de produção, o escaneamento 3D visa gerar imagens digitais da peça, as quais serão usadas para criar sua malha computacional um modelo CAD 3D. No trabalho em questão, o software utilizado foi o Solidworks. A partir do modelo CAD 3D, os autores criaram as superfícies da peça usando uma função do Solidworks, que foram exportadas no formato .STL para o software de impressão, onde são definidos parâmetros como tamanho da camada e orientação de impressão.

Com o arquivo digital criado, a próxima etapa do projeto é a seleção da tecnologia de MA a ser usada na fabricação, incluindo o equipamento bem como as condições de impressão. Após a escolha da tecnologia e do equipamento, a peça é fabricada por MA e passa pelos pós-processamentos necessários para atingir os parâmetros desejados.

3.2.

Impressora EOS M280

3.2.1.

Informações técnicas

O equipamento utilizado neste trabalho usa a técnica de impressão 3D DMLS, a qual possui várias semelhanças com a tecnologia SLS. Suas principais características são:

- Tamanho do sistema: 2200 x 170 x 2290 mm;
- Volume de construção: 250 x 250 x 280 mm;
- Peso: 1250 kg;
- Espessura da camada para o PH1: 0,40 mm;
- Espessura da camada para o AlSi10Mg: 0,30 mm;
- Potência do Laser: 200W;
- Requerimentos de energia: 400V; 50/60 Hz; 32A;

Os parâmetros de operação das impressoras 3D influenciam no tempo de impressão, na qualidade e no acabamento da peça manufaturada. Variáveis como o tamanho de camada, atmosfera da impressão, temperatura, velocidade de impressão, potência do laser, podem otimizar as condições de operação na manufatura aditiva (Matilainen *et al.*, 2014).

Todavia, impressoras como a EOS M280 não permitem em sua configuração padrão que os parâmetros de operação sejam modificados, mantendo condições fixas para cada tipo de material usado. Isso cria empecilhos para o estudo de otimização na fabricação de novos materiais para criação de peças via manufatura aditiva (EOS GMBH, 2020).

Para permitir a modificação dos parâmetros de operação das impressoras 3D, alguns fabricantes disponibilizam softwares adicionais que as desbloqueiam, mas eles têm um alto custo de aquisição. Todavia, eles permitem otimizar a fabricação de uma grande variedade de matérias primas visando as melhores condições para operação.

3.2.2.

Materiais do equipamento

O equipamento possui diversas opções de materiais disponíveis para serem usados para a fabricação de peças. Contudo, deve-se lembrar que para a realização do processo de sinterização a laser do pó metálico é necessária a utilização de um gás inerte e cada material necessita de um gás específico, sendo nitrogênio ou argônio. Os materiais (com a nomenclatura utilizada pelo fabricante) encontram-se listados abaixo (EOS GMBH, 2022):

- EOS *MaragingSteel* MS1;
- EOS *StainlessSteel* GP1;
- EOS *StainlessSteel* PH1;
- EOS *CobaltChrome* MP1;
- EOS *CobaltChrome* SP2;
- EOS *Titanium* Ti64;
- EOS *Titanium* Ti64ELI;
- EOS *Titanium* TiCP;
- EOS *NickelAlloy* IN718;
- EOS *NickelAlloy* IN625;
- EOS *Aluminium* AlSi10Mg;

3.2.3.

PH1

O PH1, o material usado neste trabalho, é um aço inox martensítico endurecível por precipitação que possui boa resistência à corrosão e excelentes propriedades mecânicas. Ele é usado numa grande variedade de aplicações, desde em próteses médicas até em aplicações aeroespaciais, quando é necessário o uso de aços de altas resistências

mecânicas e à corrosão. Além disso, as estruturas de PH1 podem ser submetidas a diversos processos de fabricação como usinagem, eletroerosão, *Micro Shot Peening* (MSP), polimento e revestimento. As características e propriedades mecânicas deste aço, conforme informações do fabricante, estão registradas na Tabela 2 e Tabela 3 (EOS GMBH, 2019).

Tabela 2 - Composição do PH1 (Adaptado de EOS GMBH, 2019)

Elemento	Composição (% de massa)
Ferro	Equivalente
Cromo	14 - 15,5
Níquel	3,5 – 5,5
Cobre	2,5 – 4,5
Manganês	Máx 1
Silício	Máx 1
Molibdênio	Máx 0,5
Nióbio	0,15 – 0,45
Carbono	Máx 0,07

O tratamento térmico de solubilização seguido de envelhecimento, conforme descrito na especificação ASTM A564, melhora as propriedades do PH1. Esse tratamento consiste no aquecimento do material até a temperatura de 480°C por uma hora, seguido de resfriamento ao ar. A Tabela 3 lista os valores fornecidos pelo fabricante.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço PH1 (EOS GMBH, 2019).

Propriedade	Sem tratamento térmico	Com tratamento térmico (H900)
Resistência máxima a tração (XY)	1150 ± 50 MPa	1450 ± 100 MPa
Resistência máxima a tração (Z)	1050 ± 50 MPa	1450 ± 100 MPa
Limite de escoamento (XY)	1050 ± 50 MPa	1300 ± 100 MPa
Limite de escoamento (Z)	1000 ± 50 MPa	1300 ± 100 MPa
Alongamento (XY)	16% ± 4%	12% ± 2%
Alongamento (Z)	17% ± 7%	12% ± 2%
Dureza	30-35 HRC	40 HRC

3.3. Ensaaios

3.3.1. Tração

Na Figura 4, ilustra uma curva tensão vs. deformação de engenharia típica para aços de baixo C (contudo ela está fora de proporções para facilitar a visualização dos diferentes estágios do ensaio).

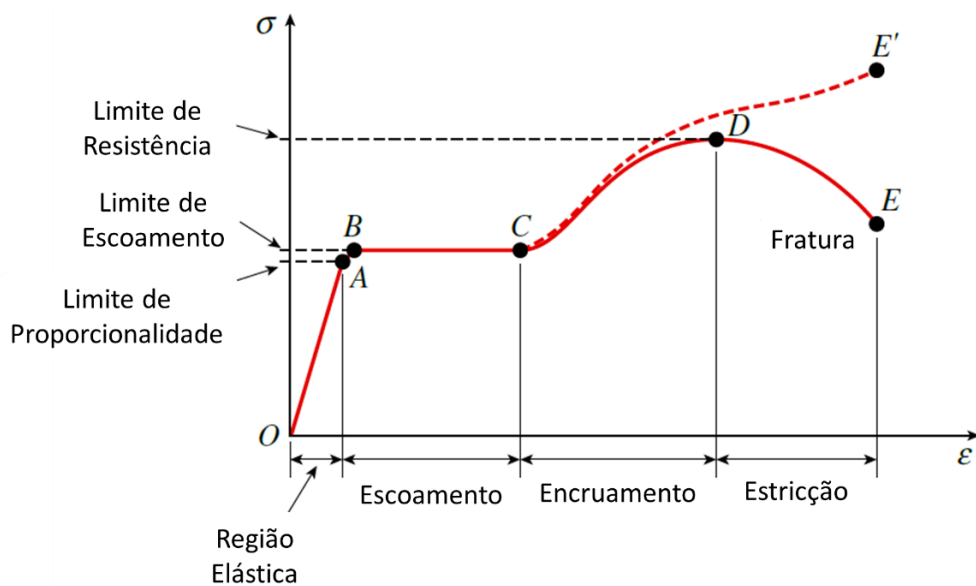


Figura 4 - Diagrama típico de tensão versus deformação fora de escala (Gere & Goodno, 2018)

É possível relacionar a tensão σ e deformação ε elásticas do gráfico através da Equação 1, onde E é o módulo de elasticidade. Na Equação 2 a tensão de engenharia σ é igual à razão entre a carga aplicada F e a área transversal inicial do corpo de prova A_0 , enquanto na Equação 3 a deformação de engenharia ε é a razão entre a diferença do alongamento instantâneo $l - l_0$ e o tamanho da base de medidas do transdutor, l_0 .

As curvas tensão-deformação de engenharia não caracterizam bem o comportamento do material, pois são baseadas nas dimensões originais do corpo de prova, que mudam continuamente durante o ensaio. A Equação 3 é satisfatória para deformações elásticas onde Δl é muito pequeno, porém as deformações plásticas são frequentemente grandes e por isso a deformação real descreve melhor os resultados do ensaio (Dieter, 1988).

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{Equação 1}$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Equação 2}$$

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Equação 3}$$

A deformação real é obtida através da soma de cada incremento $d l$ durante o ensaio, via a Equação 4. Utilizando a Equação 3, Equação 5 e Equação 6; e as relacionando com a

Equação 4, encontra-se a Equação 7, que relaciona a deformação de engenharia com a deformação real.

$$\varepsilon_T = \sum \frac{l_1 - l_0}{l_0} + \frac{l_2 - l_1}{l_1} + \frac{l_3 - l_2}{l_2} + \dots = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad \text{Equação 4}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad \text{Equação 5}$$

$$\varepsilon + 1 = \frac{l}{l_0} \quad \text{Equação 6}$$

$$\varepsilon_T = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(\varepsilon + 1) \quad \text{Equação 7}$$

A tensão real é a carga dividida pela seção transversal instantânea. A tensão de engenharia é a carga aplicada dividida pela seção original do corpo de prova. No comportamento elástico, não é necessário realizar esta distinção, mas em plasticidade é importante distinguir essas duas definições de tensão. Considerando a Equação 2 como sendo a definição da tensão de engenharia, a tensão real pode ser definida conforme a Equação 8. Considerando a relação de constância de volume da Equação 9 e correlacionando com a Equação 8 obtém-se finalmente a Equação 10 (Dieter, 1988).

$$\sigma_{real} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{A_0}{A} \quad \text{Equação 8}$$

$$\frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} = \varepsilon + 1 \quad \text{Equação 9}$$

$$\sigma_{real} = \frac{F}{A_0} (\varepsilon + 1) = \sigma (\varepsilon + 1) \quad \text{Equação 10}$$

O ensaio de tração pode quantificar as diferenças de propriedades geradas por tratamentos térmicos. A Figura 5 ilustra várias curvas do aço UNS S15500, que é semelhante ao PH1 analisado neste documento, obtidas após diversos tratamentos térmicos.

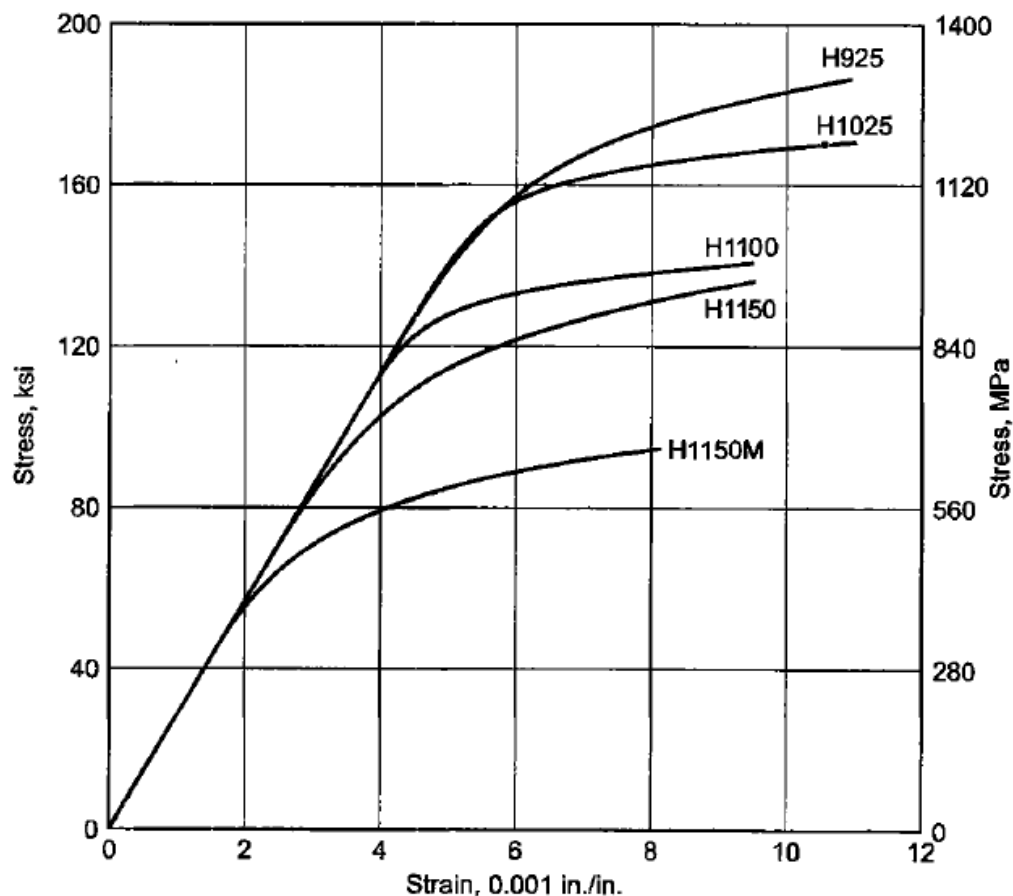


Figura 5 - Curvas de tensão-deformação do aço UNS S15500 sob diferentes tratamentos térmicos (ASM International, 2002)

A deformação máxima observada em cada curva varia pouco, enquanto os valores da tensão máxima podem até mesmo dobrar. As curvas de um material frágil (azul) e de um material dúctil (vermelho) são ilustradas na Figura 6.

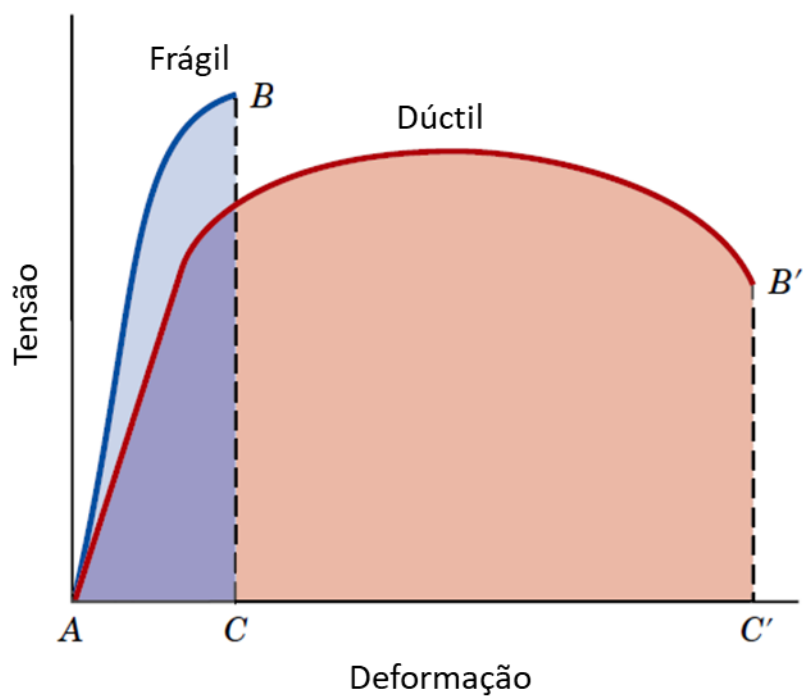


Figura 6 - Representação esquemática de curvas de tensão-deformação para materiais frágeis e dúcteis (Callister & Rethwisch, 2009)

No caso da manufatura tradicional, Krahmer *et al.* (2016) mostraram que o processo de fabricação do corpo de prova afeta os resultados obtidos dos ensaios de tração. Na Figura 7 mostra os resultados dos três processos analisados pelos autores: fresagem (curva azul), jato de água abrasivo (curva vermelha) e eletroerosão a fio (curva preta).

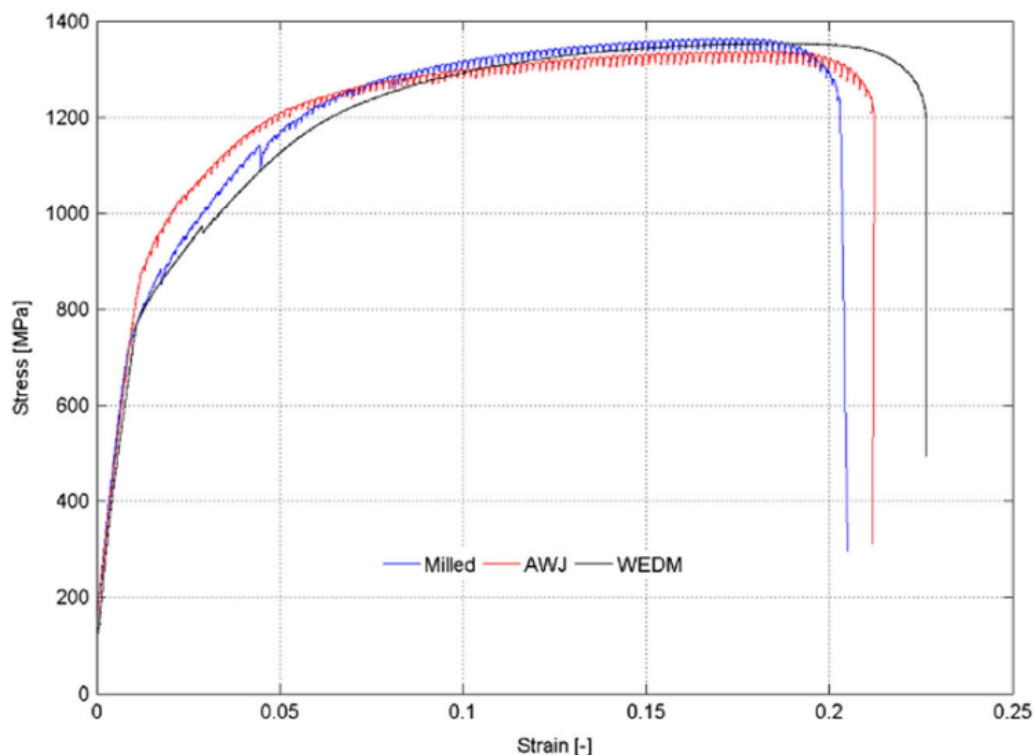


Figura 7 - Curvas de tensão-deformação para corpos de prova de Inconel 718 (Krahmer *et al.*, 2016)

No caso da manufatura aditiva, existem outras variáveis que influenciam no resultado final. Estas variáveis foram avaliadas detalhadamente por Hanon *et al.* (2019), que analisaram o posicionamento e o preenchimento de corpos de prova obtidos através de MA por FDM. É possível fabricar o espécime variando sua orientação de impressão com diversas formas de preenchimento, seja alterando sua direção, sua porcentagem ou até mesmo o padrão, de acordo com a Figura 8.

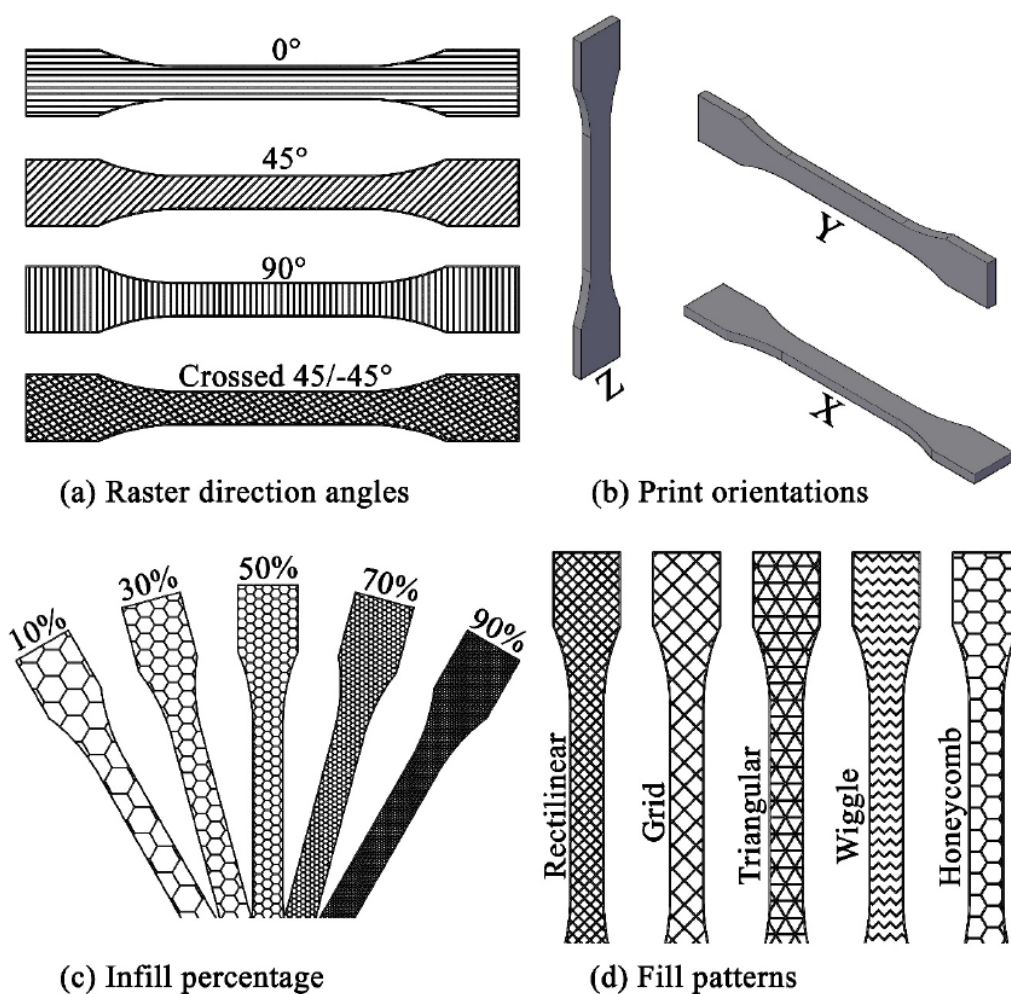


Figura 8 - Opções de impressões por FDM (Hanon et al., 2019)

Utilizando algumas variações, Hanon *et al.* (2019) realizaram ensaios de tração nestes corpos de prova e mediram a diferença nos valores obtidos para cada um. Os autores analisaram as três orientações diferentes (X, Y e Z) com 100% e 50% de preenchimento, vide Figura 9. Estas variações de fabricação na manufatura aditiva resultam em diferenças bem maiores que as obtidas por manufatura tradicional quando se altera o método de fabricação. Por este motivo, esta análise de direção no momento da impressão é crucial.

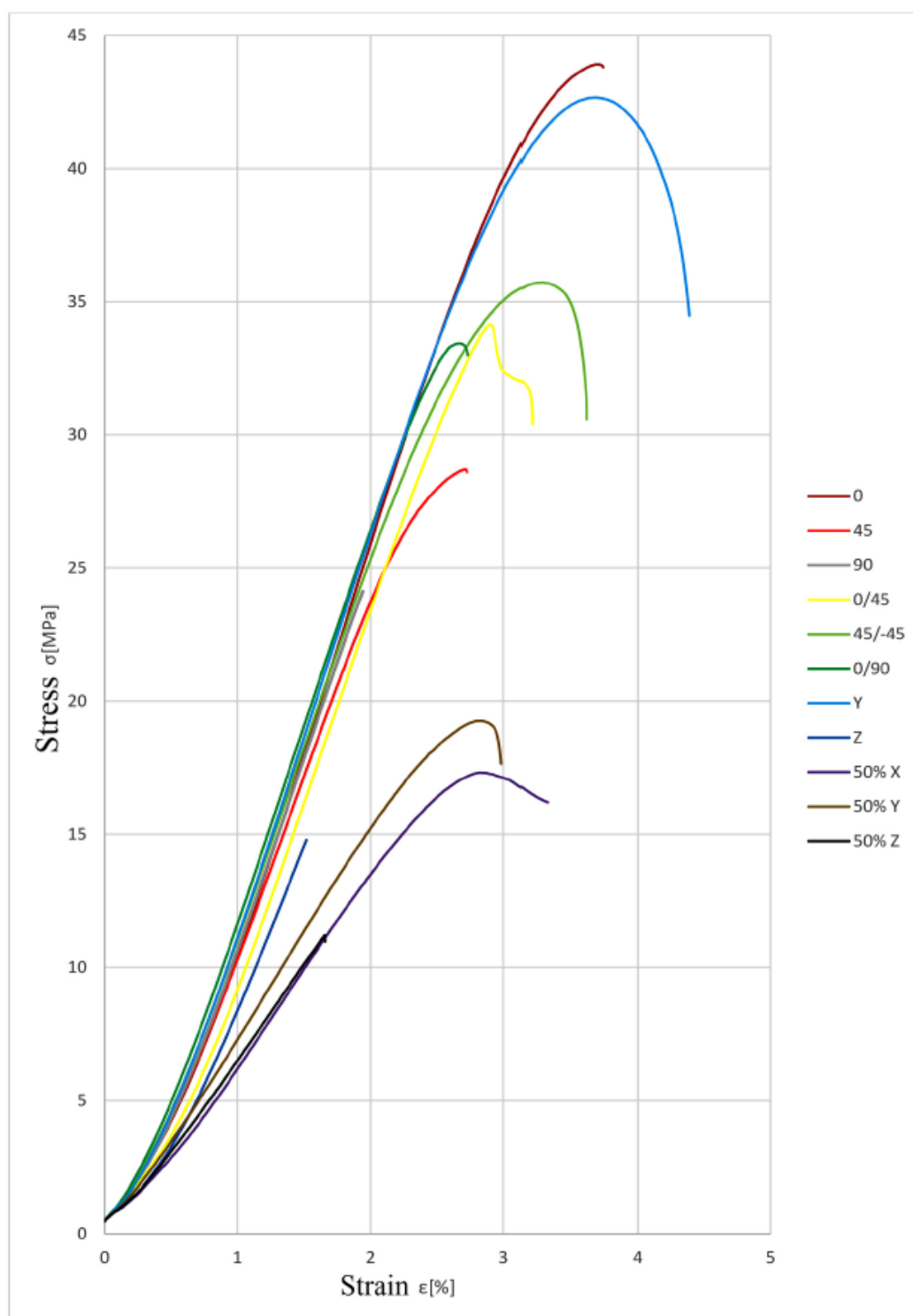


Figura 9 - Curvas de tensão-deformação para diferentes corpos de prova de PETG impressos por FDM (Hanon et al., 2019)

3.3.2. Rugosidade

A superfície é a fronteira, que separa um objeto de outro objeto, substância ou espaço. Ela pode ser nominal, medida ou real. A superfície nominal possui o limite pretendido (excluindo qualquer rugosidade superficial), e sua forma e extensão são mostradas e dimensionadas em desenhos ou especificações descritivas. A superfície medida é obtida através do uso de um instrumento de medição. E por fim, a superfície real é o verdadeiro limite do objeto. Os desvios da superfície nominal resultam dos processos de fabricação. Métodos de medição da textura de uma superfície podem ser classificados geralmente como tri ou bidimensionais. O perfil medido é usualmente apresentado no sistema de coordenadas x-z (ASME B46.1, 2002).

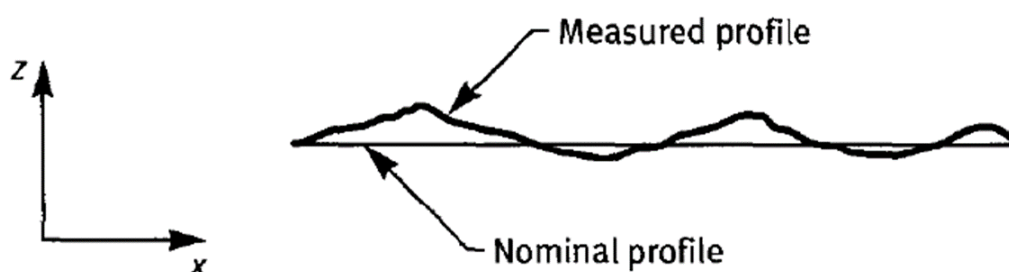


Figura 10 - Perfil medido versus perfil nominal (ASME B46.1, 2002)

Existem diversos parâmetros para descrever a rugosidade de uma superfície, dentre eles os parâmetros de amplitude são os mais importantes. Eles são usados para medir características verticais dos desvios da superfície e são descritos nos tópicos a seguir.

3.3.2.1. Altura média aritmética (Ra)

Este parâmetro, também conhecido como rugosidade média ou média da linha de centro (CLA), é o parâmetro de rugosidade mais usado para o controle de qualidade de modo geral. Ele é definido como a média absoluta do desvio das irregularidades da rugosidade da linha média ao longo de um comprimento de amostra conforme mostrado na Figura 11. Esse parâmetro é fácil de se definir e de se medir, e fornece uma boa descrição geral das variações de alturas. A definição matemática deste parâmetro segue na Equação 11:

$$R_a = CLA = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

Equação 11

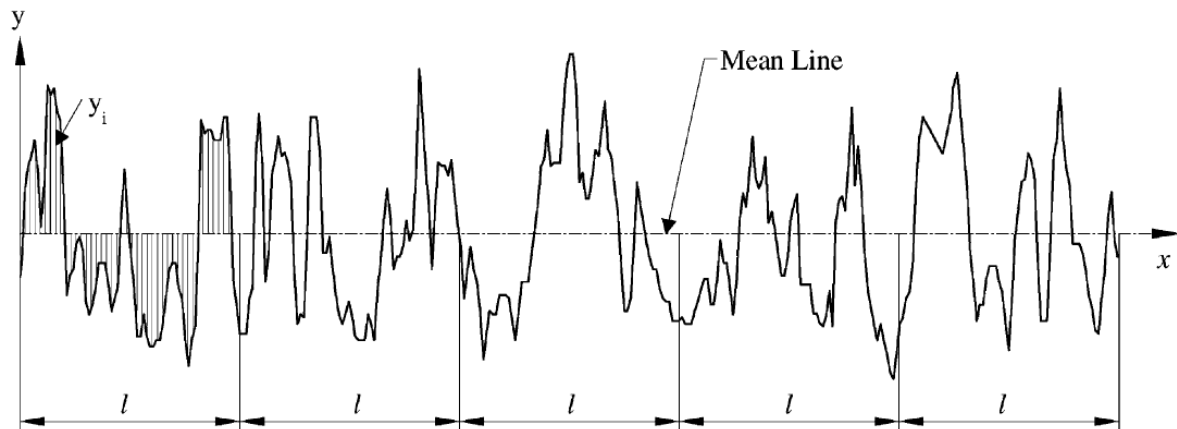


Figura 11 - Definição do parâmetro de rugosidade Ra (Gadelmawla, 2002)

Este parâmetro é utilizado para avaliar, de forma comparativa, a rugosidade obtida através de cada processo de fabricação de peças ou equipamentos através da manufatura tradicional. A Figura 12 lista estes processos e suas faixas de rugosidades alcançáveis sendo as faixas pretas as aplicações mais comuns. Nota-se que as faixas de rugosidade variam desde 0,012 até 50 μm . Para facilitar a visualização destes valores de rugosidade, na Figura 15 observa-se a superfície metálica referente à diferentes valores de Ra variando de 0,4 até 50 μm .

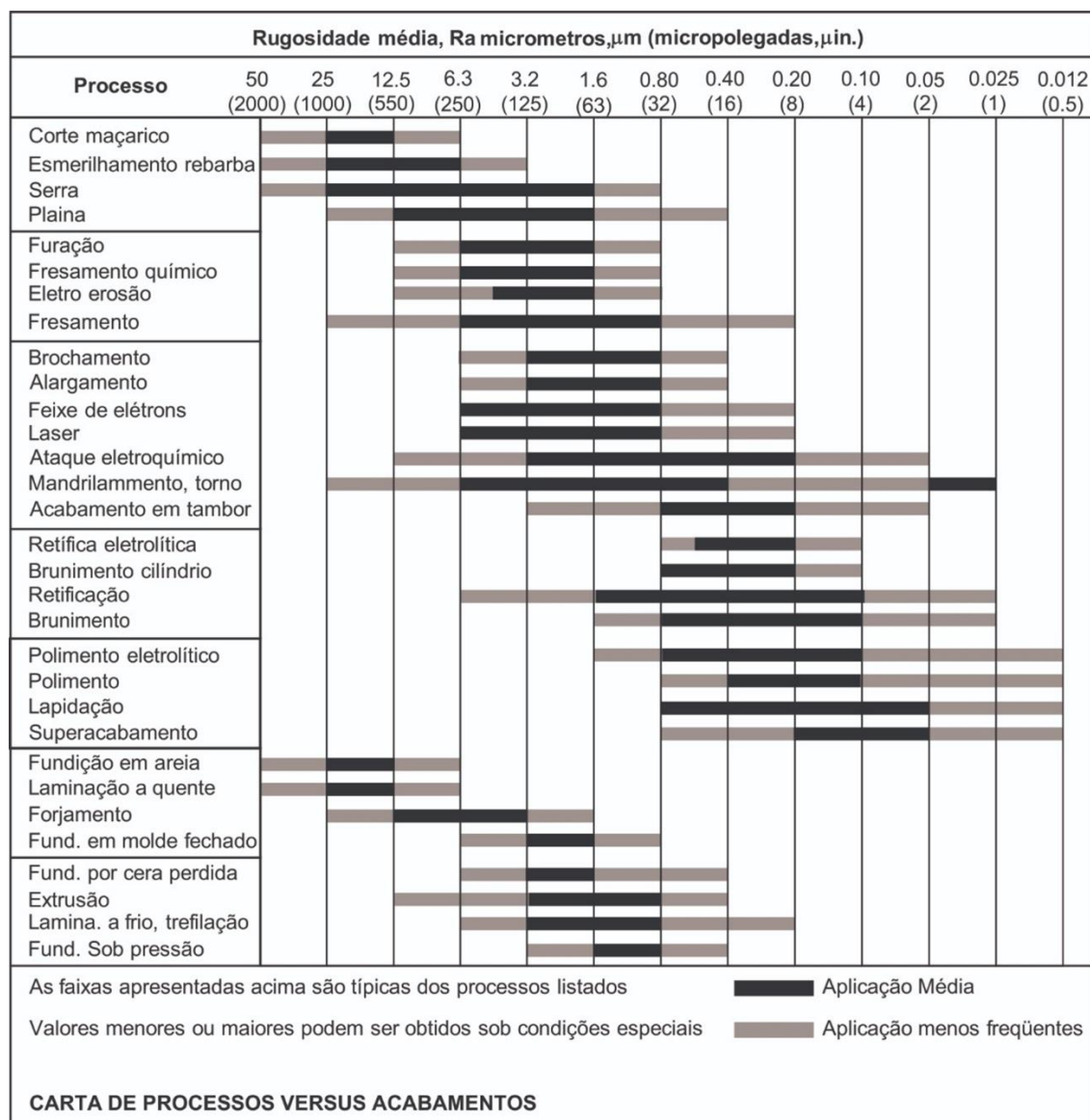


Figura 12 - Rugosidade obtida através de métodos comuns de fabricação da manufatura tradicional (ASME B46.1, 2002)

A rugosidade obtida através destes processos da manufatura tradicional listados na Figura 12, também afeta outras propriedades mecânicas do material. Por exemplo, a Figura 13 mostra a influência do acabamento superficial na resistência à fadiga de um ferro fundido. Esta resistência depende da operação de usinagem escolhida para acabamento da superfície de uma peça e da resistência à tração do material (Kalpakjian & Schmid, 2001).

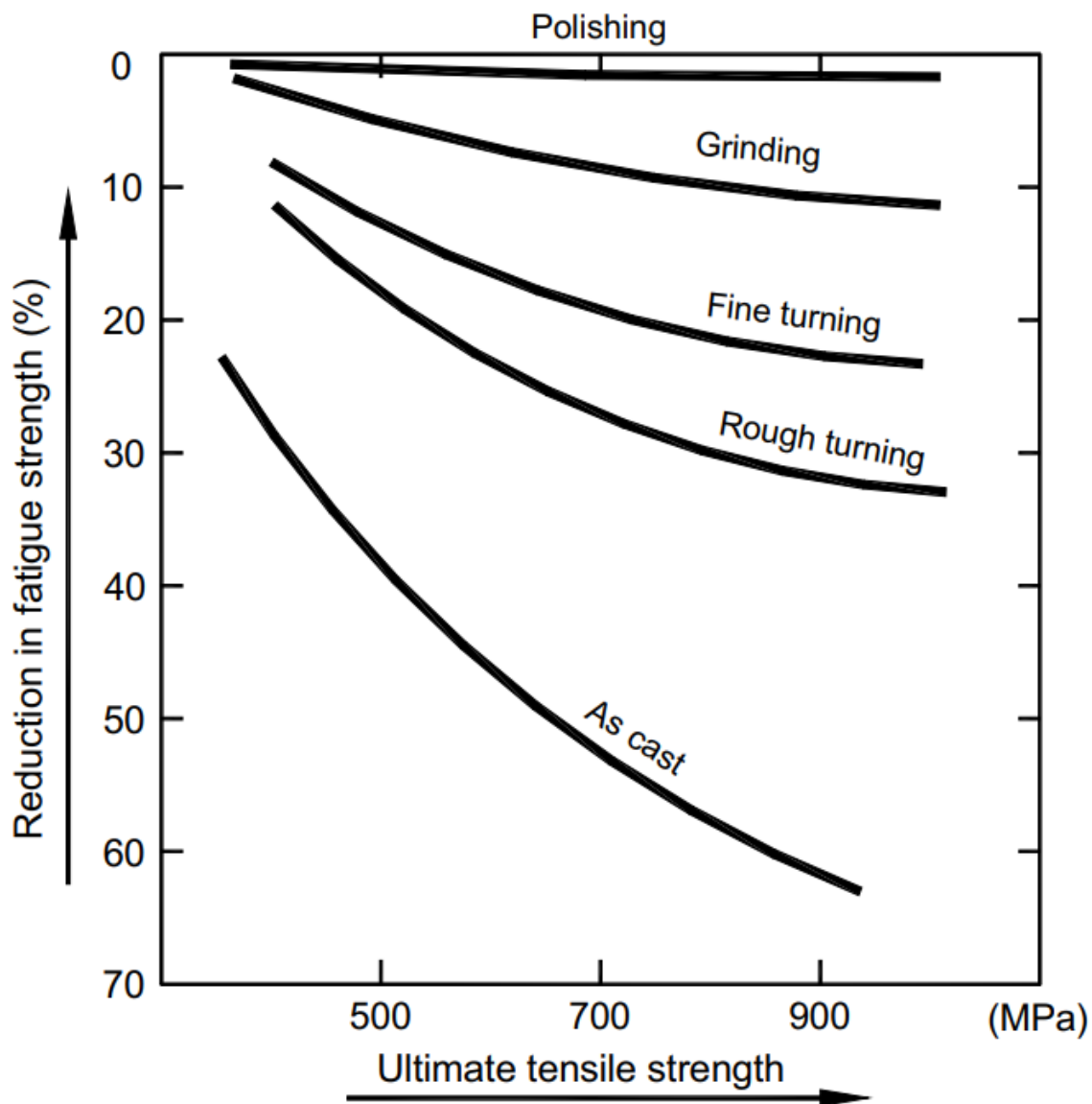


Figura 13 - Redução na resistência à fadiga do ferro fundido submetido à várias operações de acabamento superficial (Kalpakjian & Schmid, 2001)

Estas alterações nas propriedades mecânicas não dependem apenas do método selecionado para o acabamento superficial, mas também do regime de operação utilizado durante a operação. A Figura 14 mostra e.g. a redução da resistência à fadiga durante um processo de esmerilhamento quando um regime abusivo é utilizado (Kalpakjian & Schmid, 2001).

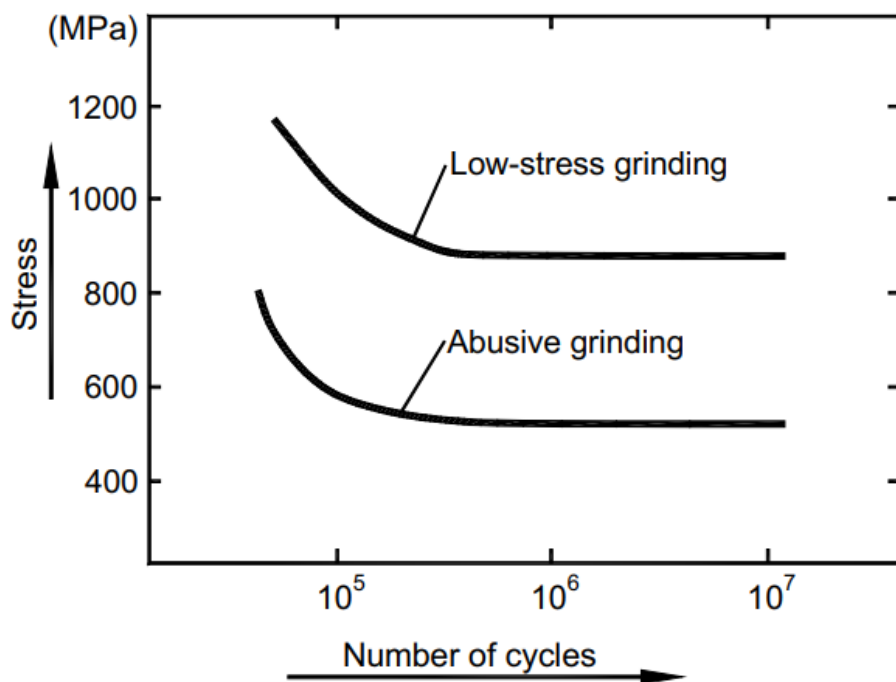


Figura 14 - Deslocamento da curva de fadiga de um aço ANSI 4340 devido a operações de esmerilhamento diferentes (Kalpakjian & Schmid, 2001)

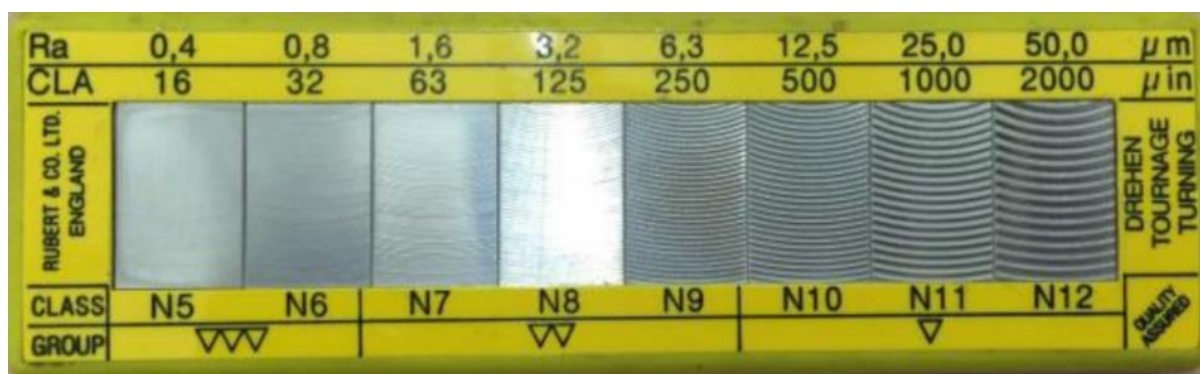






Figura 15 - Rugosidade superficial em superfícies metálicas (Somthong & Yang, 2016)

A Figura 15 ilustra as classes e grupos referentes a certos valores de rugosidade. A norma brasileira NBR6402, até 1984, indicava o acabamento superficial de uma peça através de uma simbologia que indicava o nível da rugosidade conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Simbologia de rugosidade (adaptado da NBR6402)

Símbolo	Significado
	Indica que a superfície deve permanecer bruta, sem acabamento, e as rebarbas devem ser eliminadas.
	Indica que a superfície deve ser desbastada. As estrias produzidas pela ferramenta podem ser percebidas pelo tato ou visão.
	Indica que a superfície deve ser alisada, apresentando dessa forma marcas pouco perceptíveis à visão.
	Indica que a superfície deve ser polida, e assim ficar lisa, brilhante, sem marcas visíveis.

Posteriormente, em 1984 e 1988, foram criadas novas normas que qualificam a rugosidade de forma quantitativa no Brasil, a NBR8404 e a NBR6405 respectivamente. A primeira define as classes de rugosidade de acordo com os valores de Ra conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Classes de rugosidade (adaptado da NBR8404)

Classe de rugosidade	Valores de Ra (μm)
N12	50
N11	25
N10	12.5
N9	6.3
N8	3.2
N7	1.6
N6	0.8
N5	0.4
N4	0.2
N3	0.1
N2	0.05
N1	0.025

3.3.2.2. Altura máxima (Rz)

Este parâmetro, também conhecido como altura de dez pontos, é mais sensível a picos altos e vales profundos do que o parâmetro Ra. O sistema internacional ISO define esse parâmetro como a diferença em altura entre a média dos cinco picos mais altos e dos cinco vales mais profundos ao longo do comprimento do perfil da amostra. O sistema alemão DIN define Rz como a média da soma dos cinco picos mais altos e dos cinco vales mais profundos ao longo do comprimento do perfil da amostra. A Figura 16 ilustra este parâmetro enquanto as Equação 12 e a Equação 13 mostram as definições matemáticas (Gadelmawla, 2002).

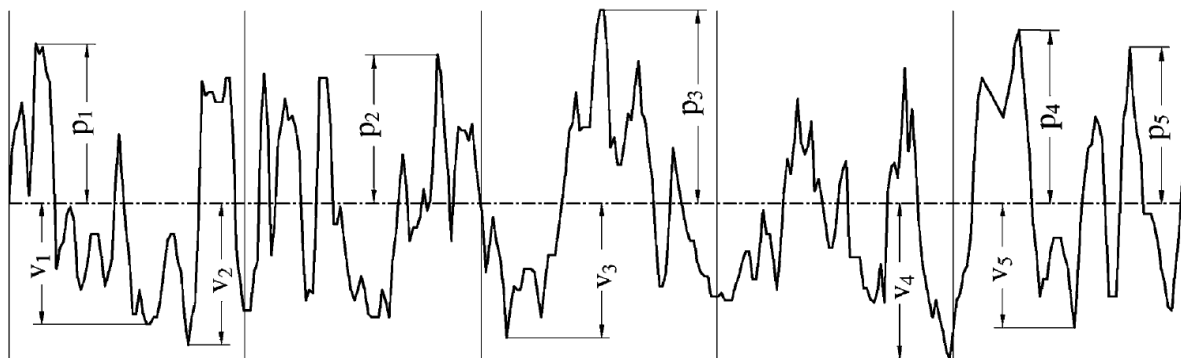


Figura 16 - Definição do parâmetro de rugosidade R_z (Gadelmawla, 2002)

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad \text{Equação 12}$$

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{2n} \left(\sum_{i=1}^n p_i + \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad \text{Equação 13}$$

Onde n é o número de amostras ao longo do comprimento do perfil analisado.

3.3.2.3. Altura média quadrática (R_q)

Este parâmetro, também conhecido como RMS, representa o desvio padrão da distribuição das alturas da superfície. Portanto, ele descreve a rugosidade da superfície através de métodos estatísticos, e é mais sensível do que a altura média aritmética (R_a) para grandes desvios da linha média. A definição matemática deste parâmetro encontra-se na Equação 14.

$$R_q = RMS = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \{y(x)\}^2 dx} \quad \text{Equação 14}$$

A linha média RMS é a linha que divide o perfil de forma que a soma dos quadrados dos desvios de altura do perfil seja igual a zero, conforme demonstrado na Figura 17.

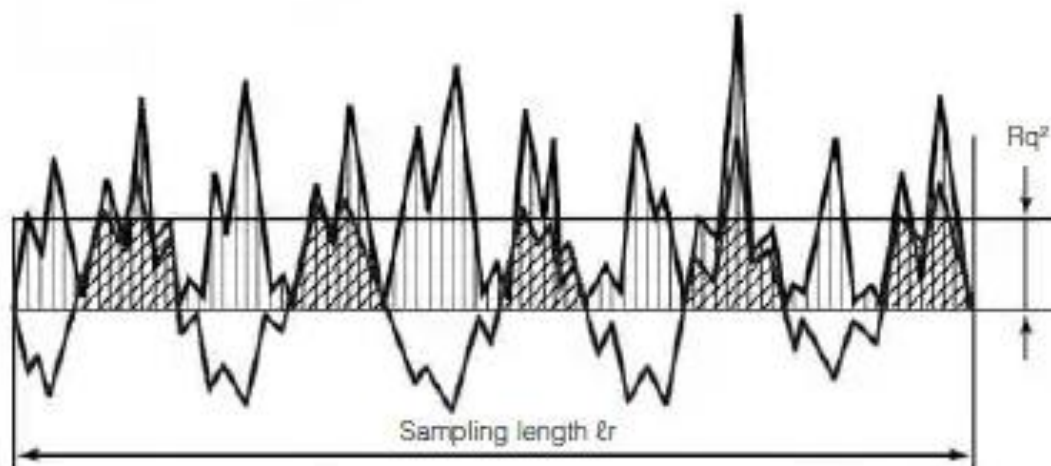


Figura 17 - Definição do parâmetro de rugosidade Rq (Nicolas-Silvente *et al.*, 2020)

3.3.2.4. Altura média (Rc)

Este parâmetro representa o valor médio das alturas dos elementos de perfil (Zt_i) ao longo do comprimento da amostragem conforme Figura 18. A definição matemática deste parâmetro encontra-se na Equação 15 (NBR ISO 4287, 2002).

$$R_c = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n Zt_i$$

Equação 15

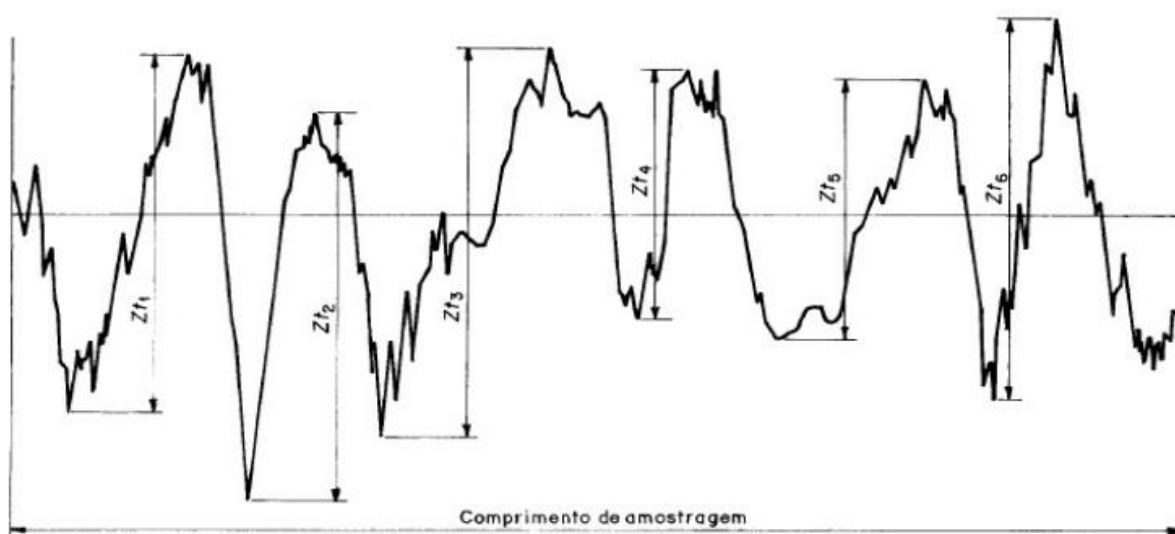


Figura 18 - Definição do parâmetro de rugosidade Rc (NBR ISO 4287, 2002)

3.3.3. Dureza

A dureza quantifica a resistência à penetração de uma superfície (Castro & Meggiolaro, 2009). Em 1824, um mineralogista chamado Friedrich Vilar Mohs criou a Escala de Mohs, que representa, qualitativamente, uma escala de dureza para minerais baseada na capacidade de um mineral duro arranhar um outro mais macio. Esta escala varia de 1 a 10 sendo cada número definido por um mineral conforme a Tabela 6 (West, 1986).

Tabela 6 - Escala de *Mohs* (West, 1986)

Dureza	Mineral
10	Diamante
9	Corindon
8	Topázio
7	Quartzo
6	Feldspato
5	Apatita
4	Fluorita
3	Calcita
2	Gipsita
1	Talco

A partir desta escala, Angus realizou em 1979 fez uma comparação (Figura 19) entre a Escala de Mohs com um dos tipos de unidade de dureza que no caso foi a *Vickers*, baseada no *Metal Industries Handbook* de 1939.

Escala de Mohs	Valor aproximado de HV equivalente	Mineral básico de Mohs
1	2 - 3	Talco
2	36 - 76	Gesso
3	109 - 172	Calcita
4	190 - 250	Fluorita
5	336 - 350	Apatita
6	714 - 795	Ortoclásio Feldspato
7	1.103 - 1.260	Quartzo
8	1.110 - 1.648	Topázio
9	2.060 - 2.720	Safira
10	10.000	Diamante

Figura 19 - Comparação entre a Escala de Mohs e a dureza Vickers (Angus, 1979)

Na medição da dureza de componentes estruturais um pequeno indentador é forçado contra a superfície do material sendo testado, e a profundidade ou tamanho da indentação resultante é medida e relacionada a um valor de dureza. Quanto mais macio o material, maior e mais profunda a sua indentação e conseqüentemente menor será o seu valor dureza (Callister & Rethwisch, 2009).

A dureza, representada por H de *Hardness*, pode ser medida de quatro maneiras (Castro & Meggiolaro, 2009):

- Pela razão entre a força F aplicada através de um penetrador, ou indentador, padronizado muito duro e a área A da moosa residual, ou indentação, por ele deixada na peça. No método *Brinell* (HB), o indentador utilizado é uma esfera de aço duro enquanto que, para os métodos denominados *Vickers* (HV) e *Knoop* (HK), são utilizadas pirâmides especiais de diamante;
- Pela profundidade da penetração residual de um cone de diamante ou esferas de aço duro no método *Rockwell* (HR);
- Pela altura do rebote de um êmbolo solto de uma altura de referência, ambos padronizados (dureza Shore);
- Pelo risco feito por um material mais duro em outro mais mole, conforme demonstrado acima pela Escala de *Mohs*.

Na área da mecânica, existe uma preferência em utilizar a dureza *Rockwell* (HR), a *Vickers* (HV) ou a *Brinell* (HB) e para medir microdureza, ou a dureza dos microconstituintes de uma liga, usa-se a dureza *Vickers* ou *Knoop* (Castro & Meggiolaro, 2009).

Para cada um dos métodos mencionados, existe uma norma técnica em que é especificada a metodologia da medição de dureza do material estudado, como descritas abaixo:

- Rockwell – ASTM E 18;
- Brinell – ASTM E 10;
- Vickers e Knoop – ASTM E 92 e ASTM E 384.

A Figura 20 ilustra estes métodos e suas diferenças. O item a seguir está apresenta os métodos de Vickers e Knoop.

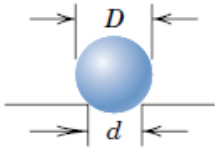
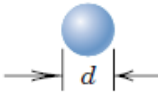
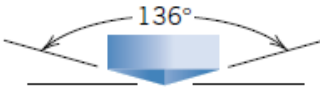
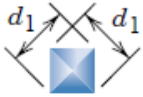
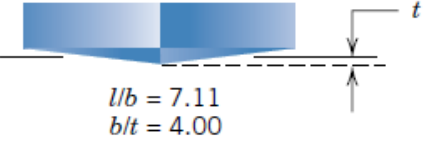
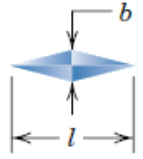
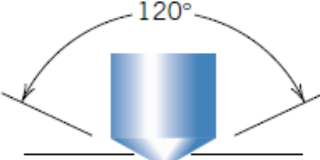
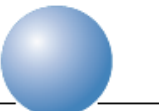


Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and superficial Rockwell	{ <div> Diamond cone; $\frac{1}{16}$-, $\frac{1}{8}$-, $\frac{1}{4}$-, $\frac{1}{2}$- in.-diameter steel spheres </div>	 	 	<div> 60 kg 100 kg 150 kg </div> } Rockwell <div> 15 kg 30 kg 45 kg </div> } Superficial Rockwell	

Figura 20 - Técnicas de testes de dureza (Callister & Rethwisch, 2009)

3.3.3.1. Vickers e Knoop

Nestes testes, um pequeno indentador piramidal de diamante é usado para a aplicação da carga na superfície do espécime. A carga utilizada no ensaio *Vickers* varia entre 1 gf e 120 kgf, e no ensaio *Knoop* entre 1 gf e 2 kgf (ASTM E92, 2017). O resultado da indentação é observado através de um microscópio e medido para conversão para um valor de dureza, conforme Figura 20. Uma preparação cuidadosa da superfície do corpo de prova é necessária para garantir uma indentação bem definida. Os valores de dureza de *Knoop* e *Vickers* são designados por HK e HV, respectivamente. As escalas de dureza para ambas as técnicas são aproximadamente equivalentes. Ambos os métodos são considerados ensaios de microindentação e são adequados para medir a dureza de regiões pequenas de corpos de prova; além disso o método *Knoop* também pode ser usado para testar materiais frágeis como cerâmicas (Callister & Rethwisch, 2009).

3.3.4. Impacto

Testes de impacto avaliam as características da fratura do material sob taxas altas de carregamento, quando metais dúcteis podem fraturar abruptamente com muita pouca deformação plástica. Esses testes são particularmente úteis para avaliar a fratura em temperaturas baixas, sob altas taxas de deformação num estado triaxial de tensão (devido ao entalhe do CP) (Callister & Rethwisch, 2009).

Existem dois testes padronizados pela norma ASTM E23 para medir a energia de impacto, o Charpy e o Izod. Para os dois métodos, a norma determina que os CP's devem ser pequena uma barra com seção quadrada. Para o ensaio Charpy, o entalhe no CP pode ser de três formas diferentes conforme ilustrado abaixo.

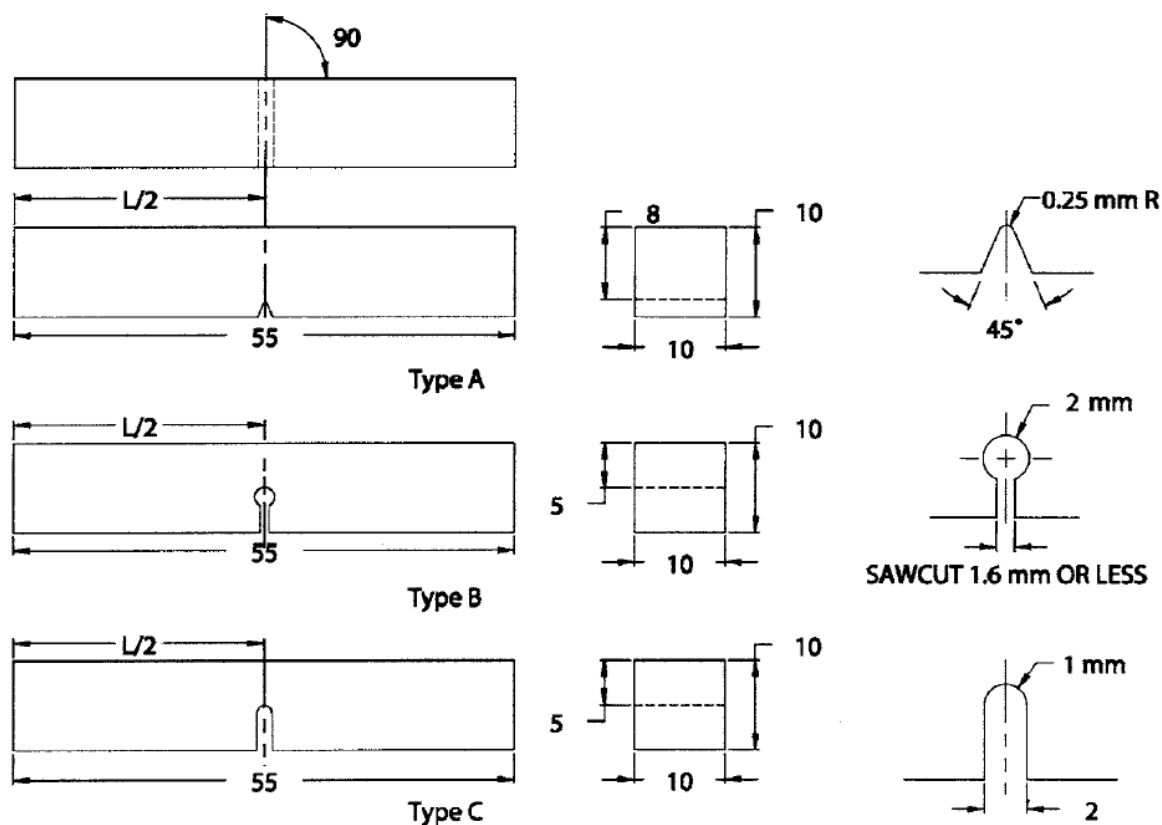


Figura 21 - Corpos de prova de impacto Charpy. Tipos A, B e C (ASTM E23, 2007)

A principal diferença entre os dois métodos se resume ao posicionamento do entalhe no corpo de prova e ao tipo de fixação. Conforme demonstrado por Rogers e Plumtree (1992), os resultados obtidos para a resistência ao impacto do material são os mesmos independentemente do método utilizado. Os autores realizaram ensaios utilizando as duas configurações (Izod e Charpy) e a Figura 22 uma curva típica de força em função do tempo obtida através destes dados para o mesmo material. O ponto máximo na curva indica a força necessária para que o crescimento da trinca se inicie. A área total abaixo da curva representa a soma de toda a energia requerida para que a fratura ocorra. Também é possível observar na Figura 22 que a curva referente ao teste Izod apresentou mais ruído que a curva do Charpy, o que foi determinado como típico dos ensaios de Izod.

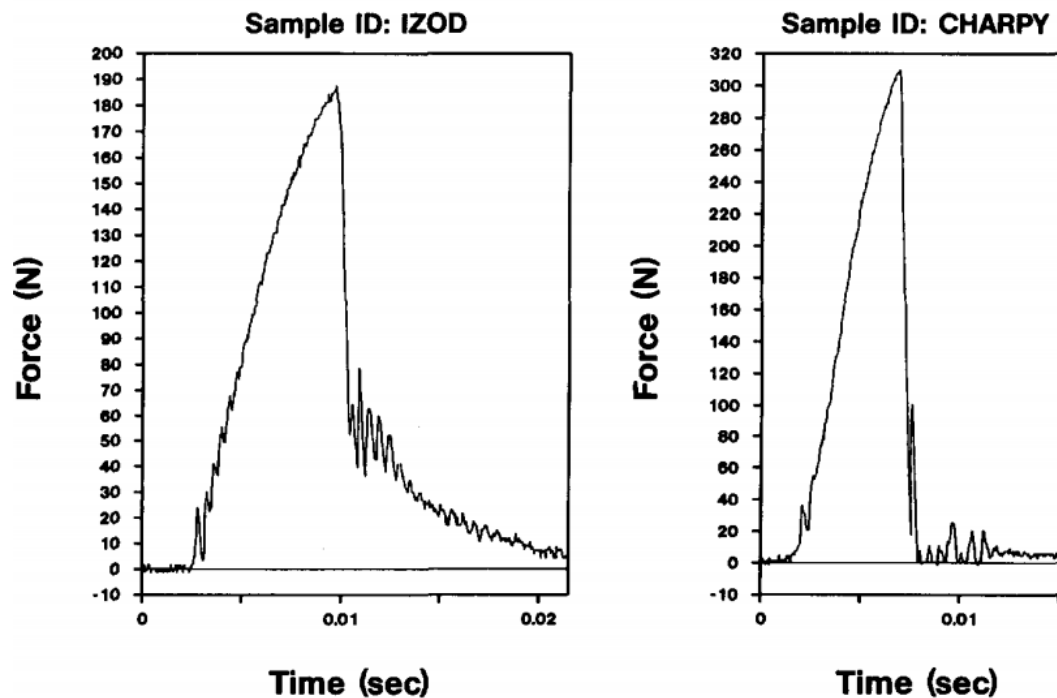


Figura 22 - Curvas de força por deslocamento para falhas em testes de Charpy e Izod (Rogers & Plumtree, 1992)

O principal objetivo desses testes é determinar se o material estudado possui transição dúctil – frágil, e se sim, em qual a faixa de temperatura esta ocorre. Esta transição discrimina a quantidade de energia que o material é capaz de absorver quando em determinada temperatura. Para aços, a curva de transição é similar a curva A da Figura 23 Conforme a temperatura aumenta, maior é a absorção de energia e a percentagem da fratura dúctil.

Outra forma de avaliação do tipo de fratura é analisando sua superfície. Na Figura 24, estão apresentados 6 corpos de prova, ensaiados em diferentes temperaturas.

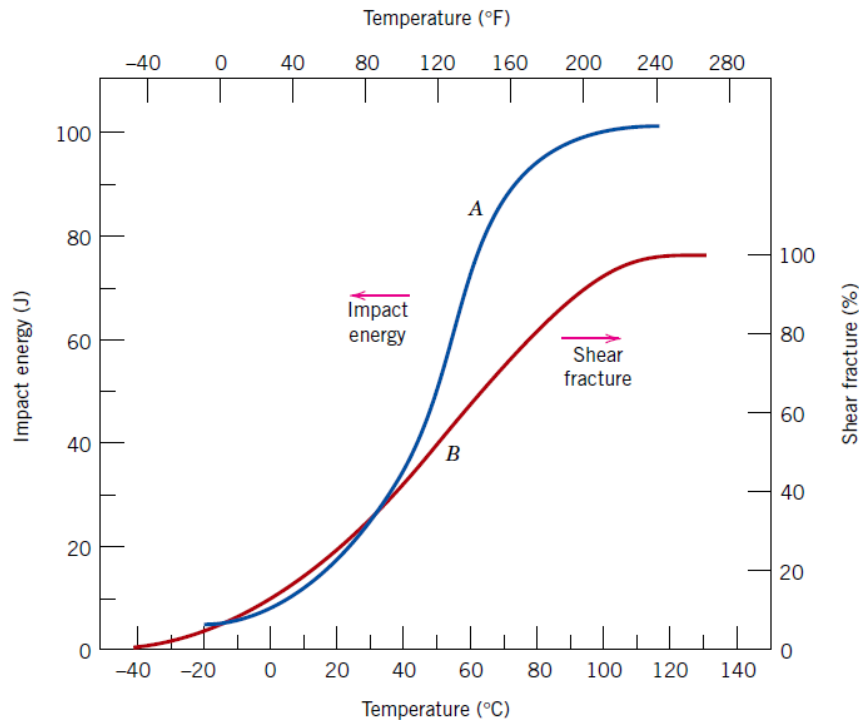


Figura 23 - Energia de absorção com dependência de temperatura (curva A) e porcentagem de fratura cisalhante (curva B) para um aço A283 (Callister & Rethwisch, 2009)

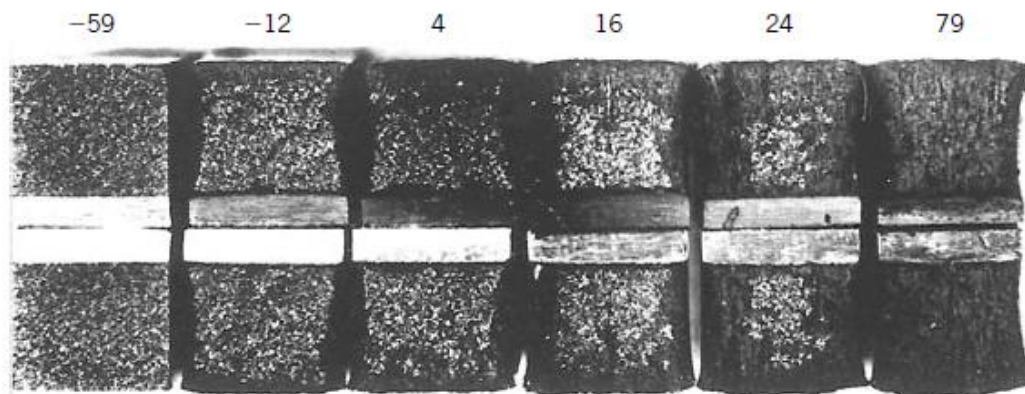


Figura 24 - Foto de diferentes superfícies de fratura do aço A36 (Callister & Rethwisch, 2009)

Nas fraturas dúcteis, a superfície é fibrosa, como visto no CP ensaiado em 79 °C. Nas fraturas frágeis, a superfície da fratura granular (ou de clivagem), como ilustrado pelo CP testado a -59 °C. Durante a transição dúctil/frágil a superfície da fratura tem partes fibrosas e granulares, vide os CP's testados a -12, 4, 16 e 24 °C (Callister & Rethwisch, 2009).

Chao *et al.* (2007), analisaram superfícies de fratura com diferença de apenas 10 °C entre cada uma, demonstrando que as pequenas diferenças que ocorrem na superfície permitem estimar com precisão a temperatura de transição do material.

Para os CP's da Figura 24, estima-se que o início da transição ocorre entre as temperaturas de -59 e -12°C , pois nota-se uma mudança de uma superfície de fratura completamente frágil (temperatura mais baixa) para uma que contém características tanto de fratura frágil quanto dútil.

A curva de transição dútil-frágil deste material, conforme Figura 25. O início da transição ocorre próximo à temperatura de -25°C . Contudo esta não é a única informação que se pode retirar ao analisar estas superfícies. Também é possível estimar a porcentagem de cada tipo de fratura, frágil ou dútil, vide a Figura 26 a parte da superfície de fratura composta por *shear lips* corresponde a deformação devido à fratura dútil (Hertzberg, 1995).

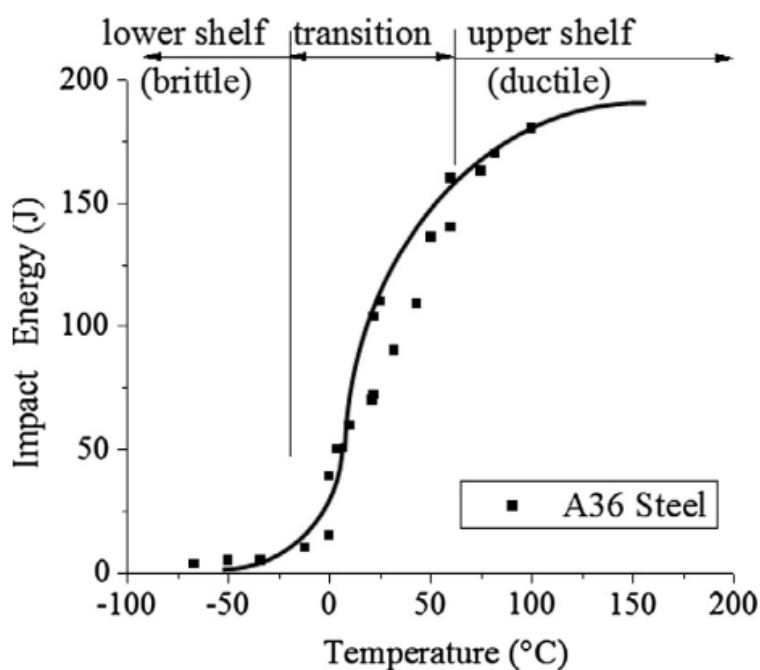


Figura 25 - Curva de transição dútil-frágil para o aço A36 (Terán *et al.*, 2016)



Figura 26 - Comparação padrão da porcentagem de *shear lip* (Hertzberg, 1995)

A Equação 16 permite estimar a porcentagem de fratura dútil, vide Figura 27, onde A e B são as dimensões da seção transversal do corpo de prova (sob seu entalhe) e x e y delimitam a área da superfície de clivagem.

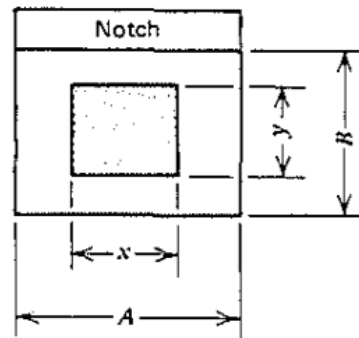


Figura 27 - Ilustração das variáveis para cálculo da porcentagem de *shear lip* (Hertzberg, 1995)

$$\% \text{ shear lip} = \frac{AB - xy}{AB} 100 \quad \text{Equação 16}$$

Os ensaios de impacto são ensaios destrutivos usados para determinar a energia requerida na deformação e ruptura do CP. Na maioria dos aços, a transição dútil-frágil ocorre numa faixa de temperatura, e é difícil definir apenas uma temperatura de transição. Assim, esta é normalmente definida como a temperatura em que o valor da energia CVN (*Charpy V-notch toughness*) assume um valor determinado, em geral 20 J, ou quando a superfície de fratura tem 50% de fratura fibrosa (Callister & Rethwisch, 2009).

3.3.5. Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) pode identificar as fases presentes, a sua distribuição, variações da composição química do material analisado, etc. Nessa técnica, um feixe de elétrons é emitido e colide com a amostra, gerando partículas que são usadas para formar uma imagem ampliada. A Figura 28 mostra as diversas estruturas encontradas no material testado (aço PH1), e seus defeitos macroscópicos como porosidade, vazios e trincas. A Figura 29 mostra as faixas de resolução de diferentes métodos de microscopia, sendo a do MEV de cerca de 10^{-9} até 10^{-3} m (Callister & Rethwisch, 2009).

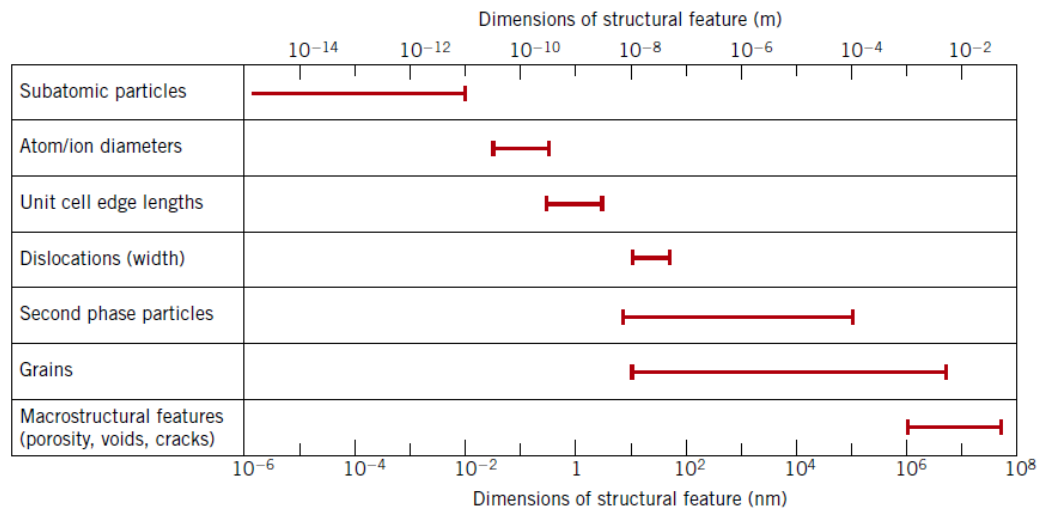


Figura 28 - Faixas de tamanhos para diversas microestruturas (Callister & Rethwisch, 2009)

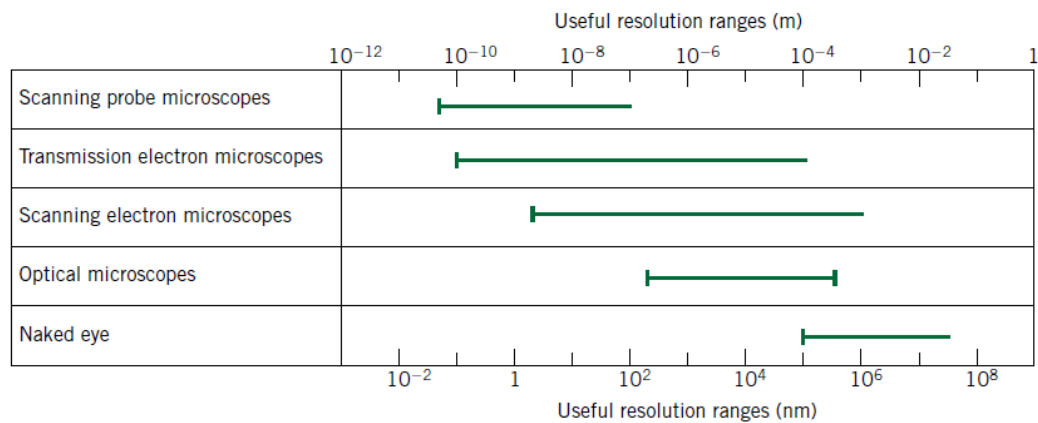


Figura 29 - Faixas de resolução de várias técnicas de microscopia (Callister & Rethwisch, 2009)

Os MEVs podem usar detectores de energia dispersiva (EDS), que permitem determinar a composição qualitativa do material analisado. EDS emitem um feixe de elétrons que ao interagir com o material emite raios X, cujo comprimento de onda permite determinar o elemento no qual o elétron se chocou, pois cada elemento possui um comprimento de onda de emissão próprio. Sendo assim, pela medida da intensidade e comprimento de onda emitido pela amostra, é possível determinar qualitativamente a composição da mesma (Lum *et al.*, 2017).

3.3.6. Fadiga

A fadiga é a forma de falha mecânica causada por cargas variáveis repetidas, as quais geram danos microscópicos que se acumulam ao longo do tempo até eventualmente causar a fratura do componente em questão. Mesmo sob cargas abaixo do limite de escoamento do material, estes danos microscópicos podem gerar e propagar uma trinca até a falha final da peça (Dowling, 2013).

Existem diversos tipos de falhas por fadiga, conforme mostrado na Figura 30. Neste fluxograma, encontram-se os principais fatores responsáveis pelas falhas como temperatura, corrosão, atrito e cargas. Este último fator é o responsável pela fadiga mecânica do material, que é o tópico avaliado neste estudo. Esta pode ser dividida de acordo com o número de ciclos necessários para a fratura: fadiga de vida curta (LCF) (gerada por deformações plásticas macroscópicas), fadiga de vida longa (HCF) ($\sim 10^5$ até 10^7 ciclos) e de vida muito longa (VHCF) (a partir de 10^7 ciclos) (Sharma *et al.*, 2020).

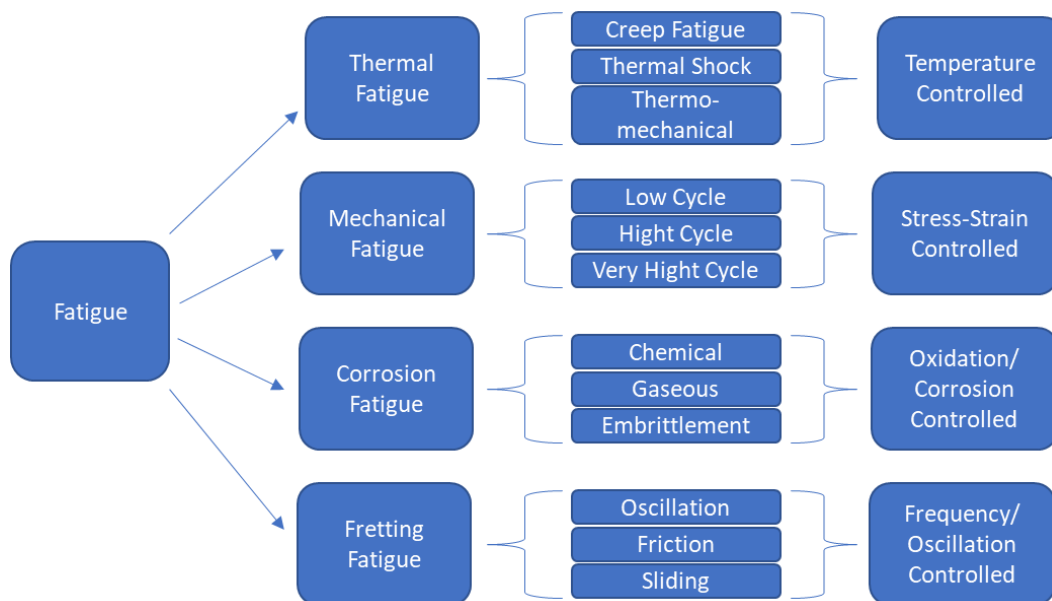


Figura 30 - Classificação de vários tipos de falha por fadiga em materiais de engenharia (Adaptado de Sharma *et al.*, 2020)

Os métodos tradicionais para avaliar fadiga podem ser divididos em três grupos. Primeiro, o método SN (ou de Wöhler), em que a vida por fadiga (número de ciclos N) é relacionado com a faixa de tensão aplicada ($\Delta\sigma$ ou S). O segundo é o método ϵN (ou de Coffin-Manson), que relaciona a vida do material com a gama das suas

deformações elastoplásticas $\Delta\varepsilon$. E o último é o método da/dN (ou de Paris), que relaciona a taxa do crescimento da trinca por fadiga com a gama do fator de intensidade da tensão (Cui, 2002).

4. Materiais e métodos

Este capítulo apresenta os parâmetros e condições de fabricação dos corpos de prova para os ensaios de tração, rugosidade, dureza, impacto e fadiga. Na sequência, são descritos os ensaios realizados, bem como as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4.1. Matéria prima

Conforme descrito no item 3.2.3, a matéria prima empregada para a fabricação dos corpos de prova foi o pó metálico da liga PH1, adquirido da empresa EOS. A composição está descrita na Tabela 2 e é informada no catálogo do fornecedor. As amostras foram fabricadas no equipamento descrito no 3.2. A estratégia de impressão consistiu em manter os parâmetros operacionais do equipamento, e seguir as especificações das normas e procedimentos indicados para cada tipo de corpo de prova para a realização dos ensaios.

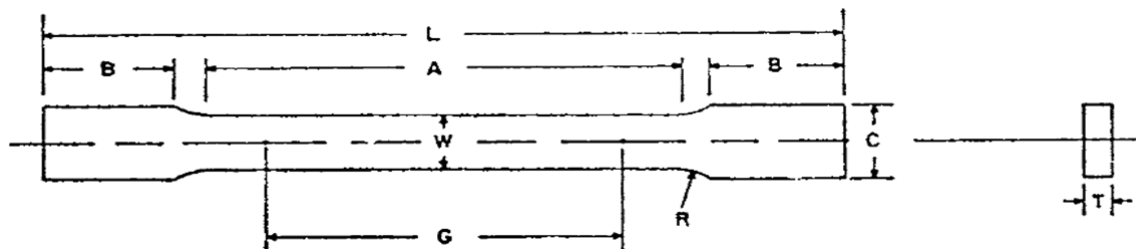
4.2. Estratégia de fabricação

Neste estudo, diversos corpos de prova foram fabricados por MA em diferentes direções, para avaliar a possível anisotropia das propriedades mecânicas, a saber:

- Tração: Foram fabricados 4 corpos de prova em 3 orientações diferentes, totalizando 12 corpos de prova;
- Impacto: Foram fabricados 12 corpos de prova em 2 orientações diferentes, totalizando 24 corpos de prova;
- Dureza e rugosidade: Foram fabricados 25 corpos de prova distribuídos igualmente em toda a extensão da mesa de impressão;
- Fadiga: Foram fabricados 8 corpos de prova em uma única orientação.

4.3. Tração

O ensaio de tração visa medir as resistências e a ductilidade do material sob esforços trativos uniaxiais. Essas medidas podem ser usadas para comparar materiais, desenvolver ligas, controlar qualidade e projetar componentes. Na Figura 31 mostra o perfil dos corpos de prova de tração, padronizado pela norma ASTM E8. A variável T é descrita nas notas, por isso não consta da figura. A espessura máxima para os CP's de 40 mm de largura é de 5 mm, e para os CP's com larguras de 12.5 mm e 6 mm é 19 mm e 6 mm, respectivamente.



Dimensões

	Corpo de Prova Padrão		Corpo de Prova Subdimensionado
	Tipo Placa Largura de 40 mm [1,500 in.]	Tipo Folha Largura de 12,5 mm [0,500 in.]	Largura de 6 mm [0,250 in.]
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G - Comprimento da seção	200,0 ± 0,2 [8,00 ± 0,01]	50,0 ± 0,1 [2,000 ± 0,005]	25,0 ± 0,1 [1,000 ± 0,003]
W - Largura	40,0 ± 2,0 [1,500 ± 0,125, - 0,250]	12,5 ± 0,2 [0,500 ± 0,010]	6,0 ± 0,1 [0,250 ± 0,005]
T - Espessura	Espessura do material		
R - Raio do filete, min	25 [1]	12,5 [0,500]	6 [0,250]
L - Comprimento total, min	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A - Comprimento da seção reduzida, min	225 [9]	57 [2,25]	32 [1,25]
B - Comprimento da seção de garra, min	75 [3]	50 [2]	30 [1,25]
C - Largura da seção de garra, aproximada	50 [2]	20 [0,750]	10 [0,375]

Figura 31 - Dimensões possíveis para o corpo de prova para o ensaio de tração (ASTM E8, 2013)

Neste ensaio foi usada uma máquina Instron modelo 5500R, para a realização dos testes de tração. Todos os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica da PUC-Rio (LEM). Foram fabricados 4 corpos de prova,

seguindo as especificações de *Subsize Specimen* descrita na norma ASTM E8 (Figura 31), em 3 orientações diferentes, totalizando 12 corpos de prova. As orientações utilizadas foram X ou *flat*, Y ou *on-edge* e Z ou *upright*. Esta análise é necessária pois tanto na manufatura tradicional quanto na manufatura aditiva, estas modificações resultam em diferentes propriedades mecânicas. Os dados do ensaio são armazenados no computador e usados para plotar um gráfico da tensão ou a carga aplicada versus a deformação resultante.

4.4. Rugosidade

Neste trabalho, foram avaliadas tanto a rugosidade do material quanto a sua variação com a posição em que a peça é fabricada. A mesa de impressão possui uma área de 250 mm por 250 mm, e foram impressas vinte e cinco unidades de cubos igualmente espaçados conforme Figura 32. Cada cubo foi devidamente numerado. Todos os ensaios de rugosidade foram realizados no Laboratório de Metrologia Dimensional da PUC-Rio (LMD). O equipamento usado nos ensaios de rugosidade foi o *Taylor-Hobson* modelo *Form Talysurf 50* conforme demonstrado na Figura 33. Os corpos de prova analisados neste ensaio foram os mesmos utilizados no ensaio de dureza. A rugosidade foi medida antes dos cubos serem soltos da mesa de impressão, e sem a realização do tratamento térmico. Além disso, este procedimento foi realizado em dois momentos: antes e depois do jateamento com esferas de vidro.

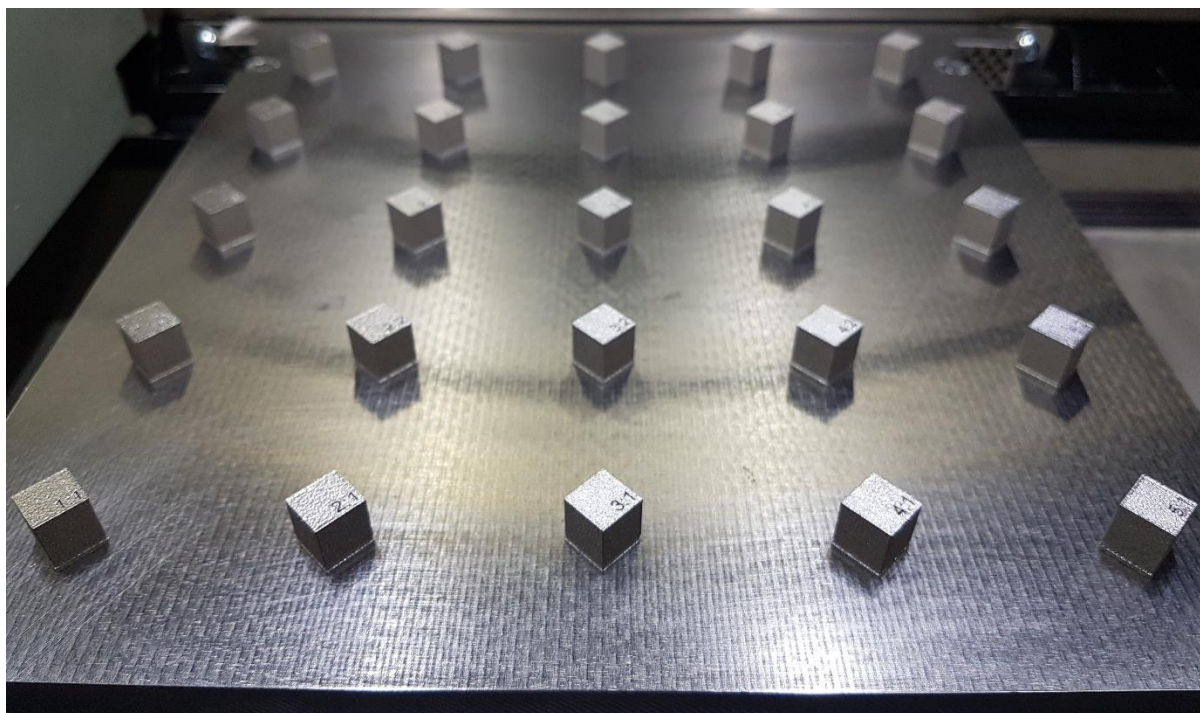


Figura 32 - Impressão dos corpos de prova para avaliação de rugosidade e dureza



Figura 33 - Equipamento utilizado no ensaio de rugosidade

4.5. Dureza

Os CP's usados no ensaio de dureza foram os mesmos usados anteriormente nos ensaios de rugosidade. Entretanto, nos ensaios de dureza os CP's já haviam sido jateados com as esferas de vidro. Com os 25 CP's ensaiados, não somente a dureza do material foi avaliada, mas também a sua variação em função do seu posicionamento na mesa da impressora 3D. Todos os ensaios de dureza foram realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica da PUC-Rio (LEM) A máquina usada nestes ensaios foi a Wolpert DiaTronic (Figura 34). O método utilizado foi o Vickers na escala HV10, com a aplicação de 10 kgf de carga. As medias foram realizadas em duas faces (superior e lateral) de cada CP, conforme descrito nos resultados, item 5.1.3.



Figura 34 - Equipamento utilizado no ensaio de dureza

4.6. Impacto

Nos ensaios deste trabalho, foram impressos vinte e quatro espécimes, seguindo as especificações da norma ASTM E23, sendo doze fabricados na posição *flat* e doze na posição *on-edge*. Os CP's foram submetidos ao tratamento térmico padrão após a impressão e as superfícies foram retificadas, com exceção do entalhe, que permaneceu *as built*. Todos os ensaios de impacto foram realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica da PUC-Rio (LEM). O equipamento utilizado foi o Instron modelo SI – 1K3, conforme a Figura 35.



Figura 35 – Equipamento utilizado durante o ensaio de impacto

O equipamento fornece as medidas de energia absorvida em duas unidades diferentes (Figura 36): joules (J), com precisão de 2 J, e *foot-pound* (ft.lb), com precisão de 1 ft.lb.

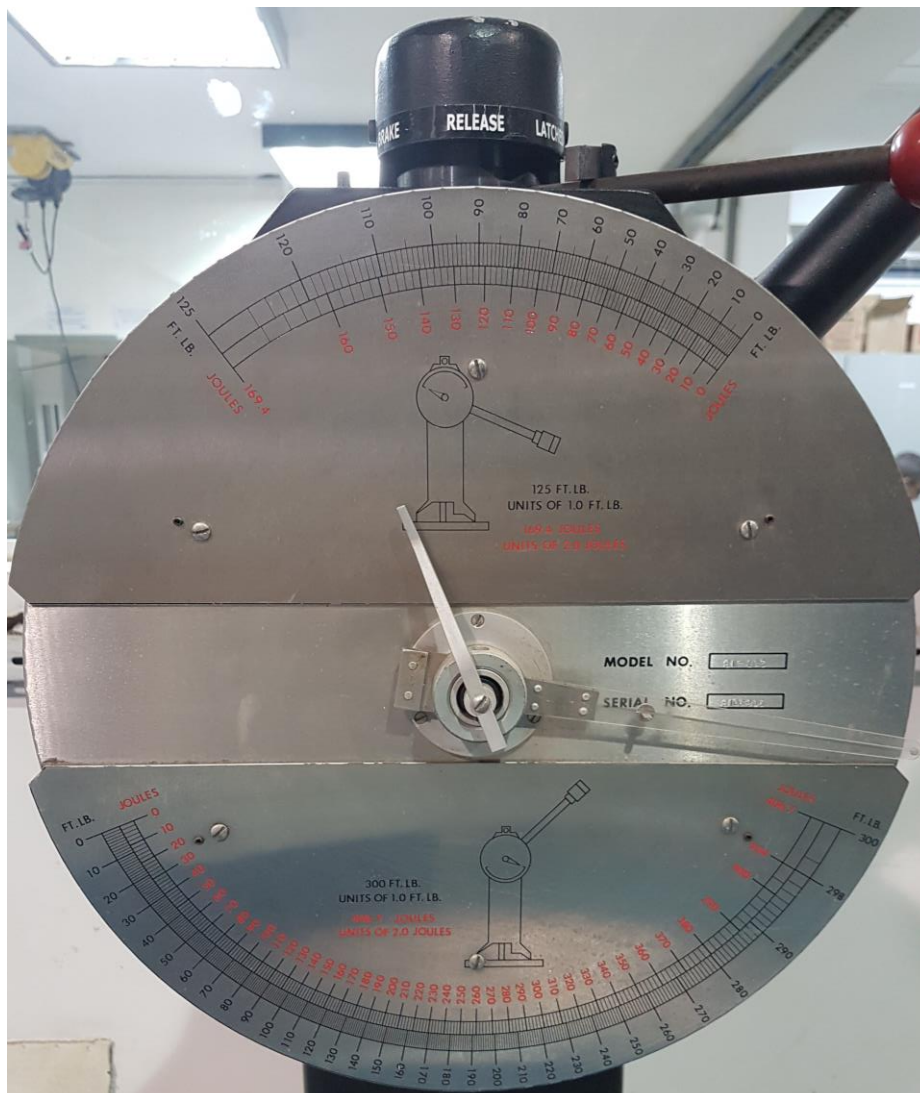


Figura 36 – Unidades de medida do equipamento

Tanto para os corpos de prova *flat* quanto para os corpos de prova *on-edge* foram usados seis valores de temperatura para realizar as medições: -40, -20, temperatura ambiente, 100, 240 e 350 °C. Dois CP's foram testados em cada uma delas.

4.7.

Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas no equipamento Hitachi TM3000 Tabletop Microscope, localizado no laboratório do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio.

Foram obtidas imagens por MEV do pó metálico com diferentes ampliações, para observar a morfologia e distribuição de tamanhos das partículas. A superfície de fratura dos CP's de impacto ensaiados em diferentes temperaturas também foram observadas, para caracterizar o micromecanismo de fratura atuante em cada uma das condições estudadas.

4.8.

Fadiga

Neste estudo, foram feitos alguns ensaios ϵN usando CP's especificados na norma ASTM E606. A Figura 37 mostra que as dimensões do CP dependem do seu diâmetro d . De acordo com recomendações da própria norma, o diâmetro usado nos testes foi 6,35 mm. A quantidade de CP's fabricados para o ensaio foram 8 e o equipamento utilizado foi a Instron servohidráulica modelo 8501. Todos os ensaios de fadiga foram realizados no Laboratório de Fadiga e Mecânica da Fratura da PUC-Rio (LEM).

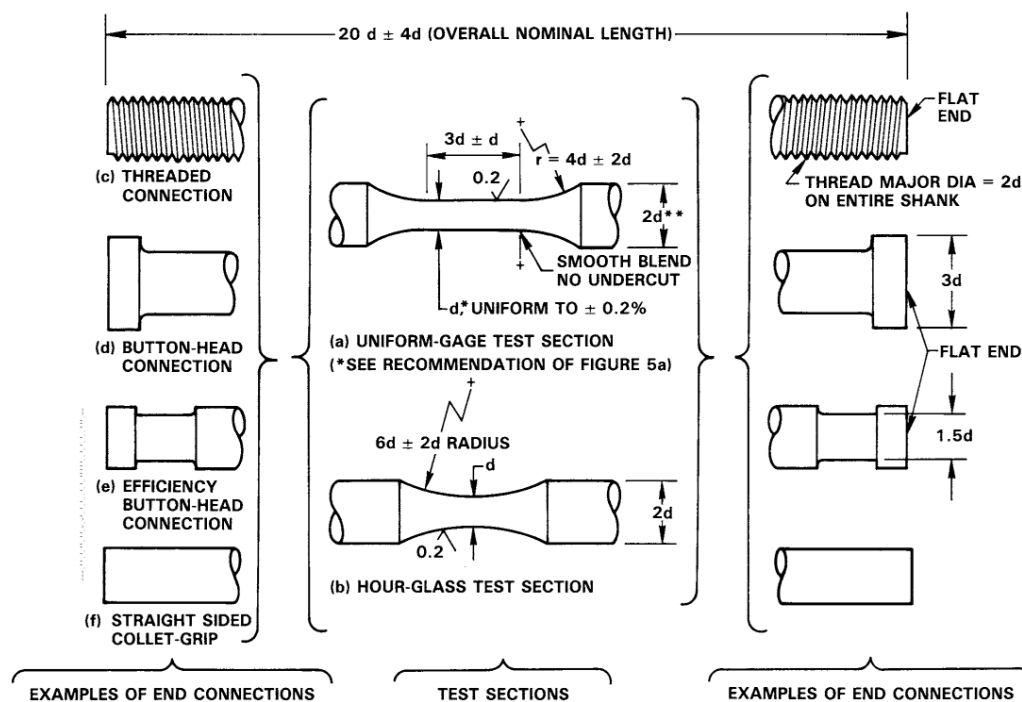


Figura 37 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de fadiga (ASTM E 606)

5. Resultados e Discussão

5.1. Caracterização

5.1.1. Tração

A Figura 38 ilustra o resultado da impressão dos CP's de tração impressos na orientação *flat* ainda fixos na mesa da impressora 3D.



Figura 38 - Corpos de prova de tração impressos na direção *flat*

O processo DMLS gera tensões residuais nas peças impressas, e para reduzi-las usa-se um tratamento térmico após sua fabricação. As peças impressas precisam de um suporte, e no caso dos CP's de tração a tensão residual foi capaz de separar a peça do próprio suporte devido ao seu comprimento, vide Figura 39 e Figura 40.

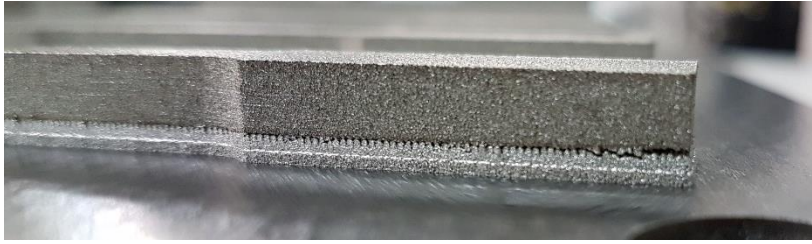


Figura 39 - Corpo de prova *flat* separado do suporte devido à tensão residual

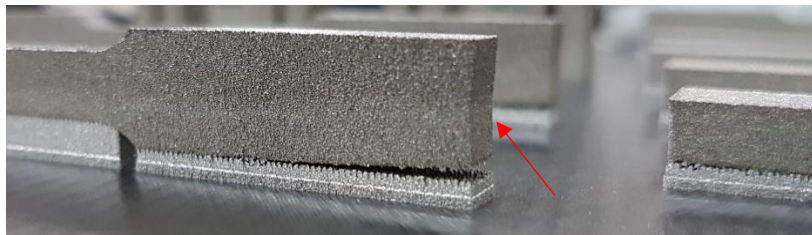


Figura 40 - Corpo de prova *on-edge* separado do suporte devido à tensão residual

Na Figura 40, está mais visível o resultado desta falha do suporte devido às tensões residuais. Como isto ocorre no meio do processo de fabricação, nota-se que a face próxima à falha (destacada na imagem pela seta vermelha) não se mantém reta pois durante o processo ocorre uma mudança na direção das camadas de sinterização. Caso o volume das peças seja muito grande, a tensão residual resultante é capaz de até mesmo deformar a placa da mesa construção conforme identificado por Prabhakar *et al.* (2015) na Figura 41. Por isso, foram feitas alterações no modelo 3D para reforçar as extremidades destes CP's e evitar que esta falha ocorra, vide Figura 42 e Figura 43.

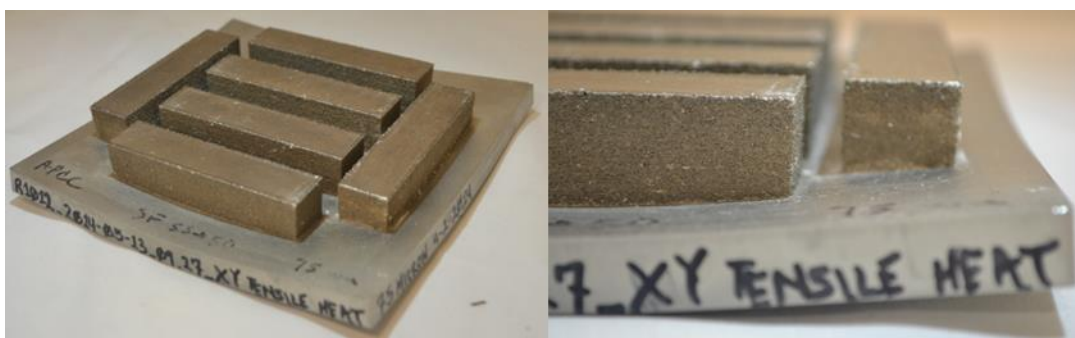


Figura 41 - Deformação da placa de impressão devido às tensões residuais (Prabhakar *et al.*, 2015)

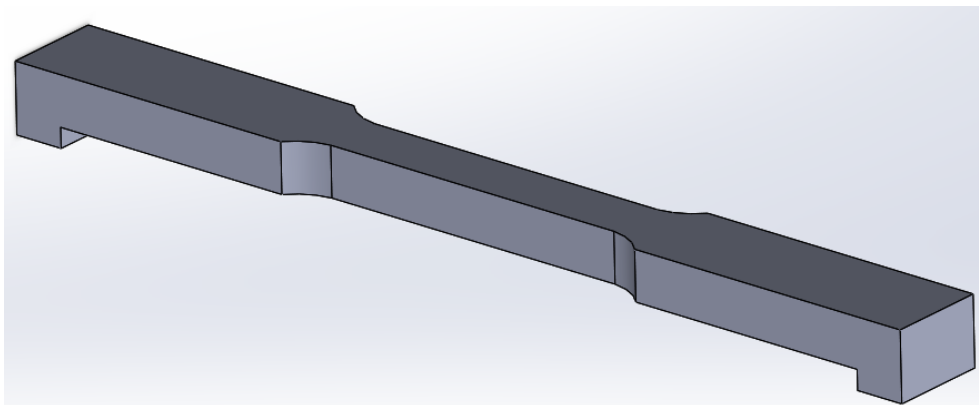


Figura 42 - Modelo tridimensional modificado do corpo de prova *flat*

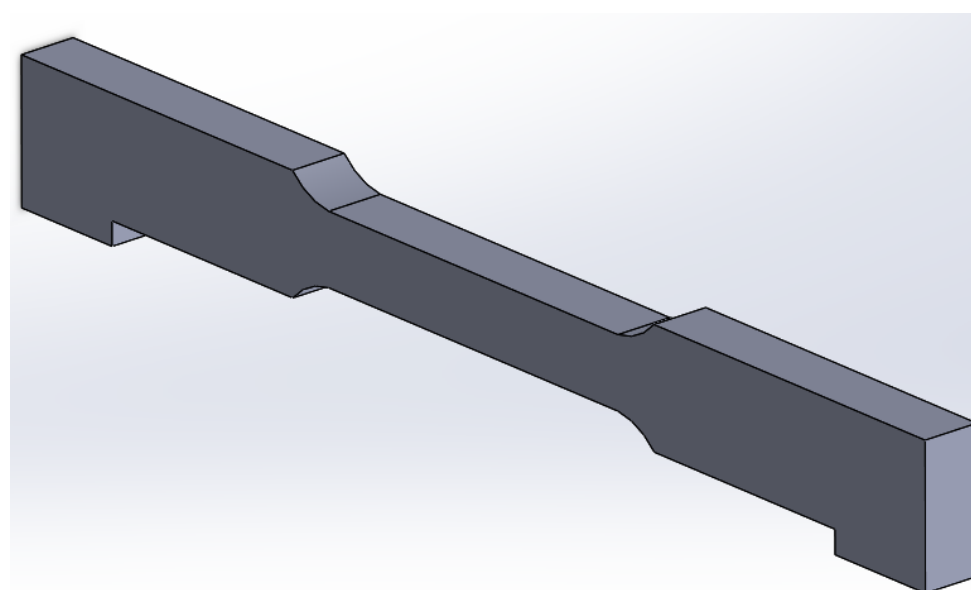


Figura 43 - Modelo tridimensional modificado do corpo de prova *on-edge*

Após realizar estas modificações, os CP's foram fabricados nas três orientações desejadas com estas modificações. Eles foram então ensaiados após serem tratados termicamente. Também foram ensaiados quatro CP's impressos na posição *flat* sem tratamento térmico. Os resultados obtidos foram então comparados com os CP's tratados termicamente (impressos na mesma posição), vide Figura 44.

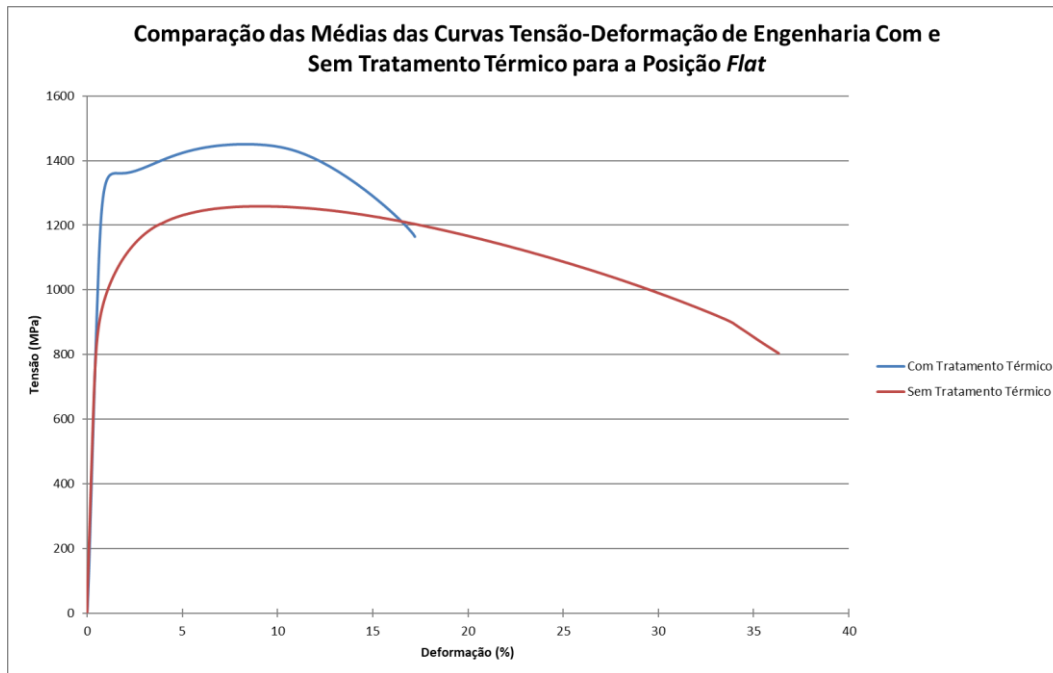


Figura 44 - Comparação entre os corpos de prova com e sem tratamento térmico

A Figura 44 mostra que os CP's não tratados não têm um limite de escoamento bem definido e que sua deformação total é maior, logo eles são mais dúcteis. Os CP's tratados termicamente têm resistências ao escoamento e ruptura maiores, mas uma deformação total menor, logo eles são menos dúcteis. Esta diferença não necessariamente deve-se apenas ao tratamento térmico, mas também às tensões residuais que não foram aliviadas nos CP's sem tratamento térmico. Para cada orientação restante, foram testados quatro CP's, e a média das suas curvas tensão-deformação de engenharia estão mostrados na Figura 45.

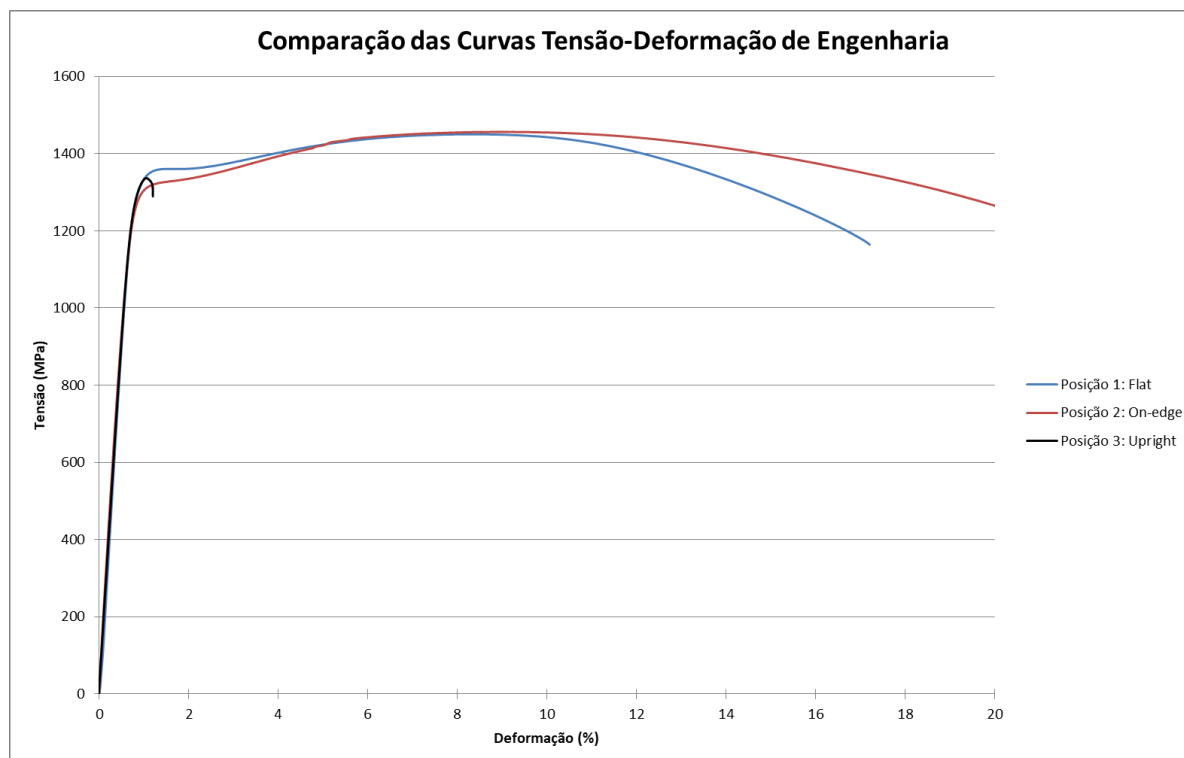


Figura 45 - Comparação das curvas de tensão-deformação de engenharia

Nota-se na Figura 45 que para a Posição 1 e a Posição 2 os gráficos $\sigma \times \varepsilon$ são bem similares, com valores de tensão máxima muito próximos e pequena diferença na deformação na ruptura. Contudo, os corpos de prova impressos na Posição 3 praticamente não sofreram deformação plástica, ocorrendo a ruptura próximo ao limite de escoamento. Isso certamente justifica uma análise mais aprofundada do seu comportamento sob tração.

Analisando os corpos de prova da Posição 3 após o ensaio, verificou-se que a ruptura de todos ocorreu bem próximo ao filete (variável R da Figura 31), diferente do que ocorreu durante os ensaios dos outros CPs. Como os CPs impressos na direção vertical não são dúcteis, acredita-se que isto pode ser devido à uma concentração de tensão maior em uma de suas extremidades do que na outra. Por este motivo, analisou-se os CPs testados com um auxílio de um microscópio óptico, conforme mostra a Figura 46 e Figura 47.

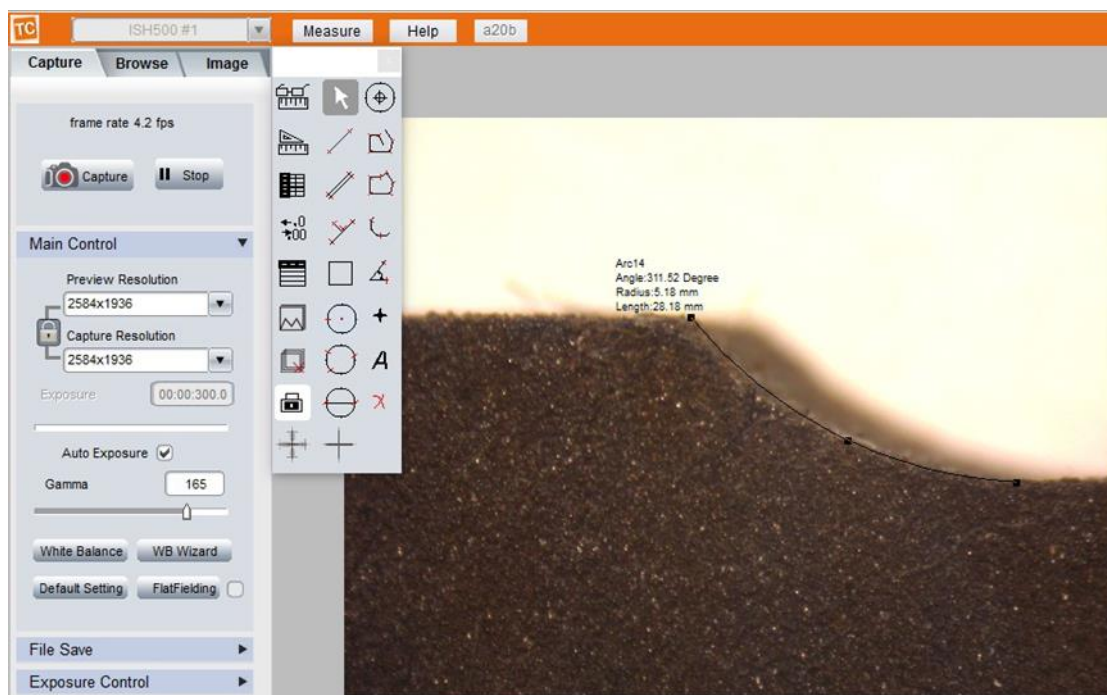


Figura 46 - Verificação do raio do filete na extremidade superior do corpo de prova

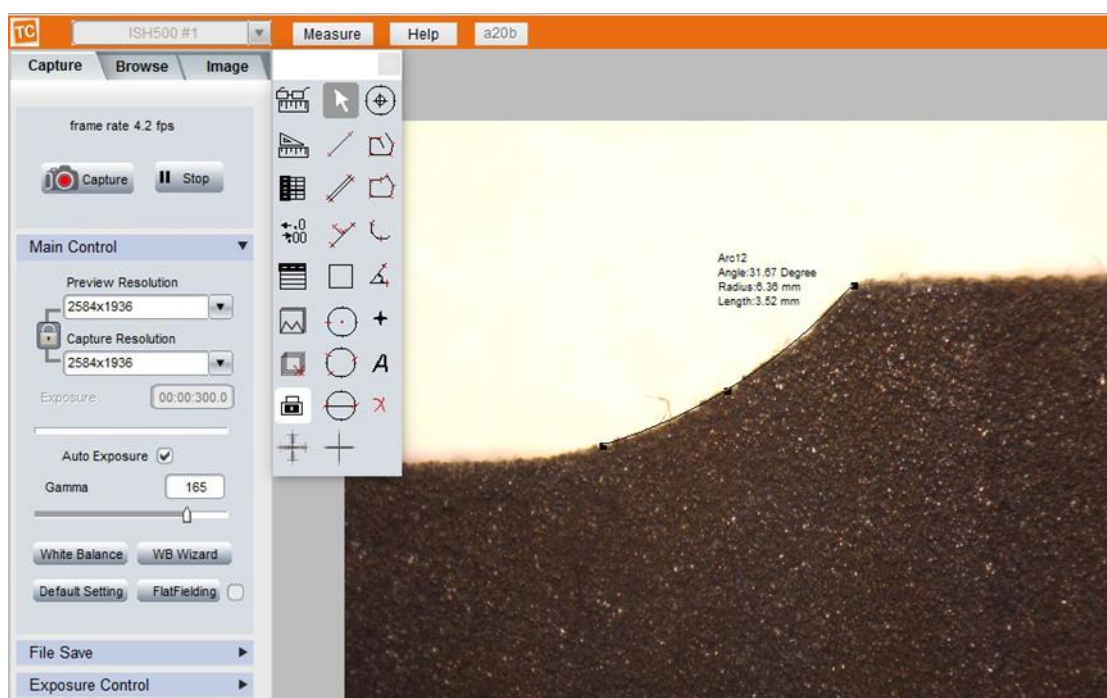


Figura 47 - Verificação do raio do filete na extremidade inferior do corpo de prova

Esta análise confirmou que os raios dos filetes dos CPs impressos na direção 3 (vertical) eram diferentes, em uma extremidade o raio resultante da impressão era de 5,18 mm enquanto que na outra o raio era de 6,36 mm. Acredita-se que esta diferença resultou em uma concentração de tensões diferente em cada extremo, e que por isso ocorreu a ruptura fora da seção central, onde normalmente esta é

observada nos CPs mais dúcteis. Esta situação demonstra que peças fabricadas com concavidades opostas provavelmente não manterão a mesma medida e dependendo do uso final será necessário a realização de uma usinagem para garantir simetria. Apesar disso, os resultados obtidos para as outras duas posições na Figura 45 superam os valores encontrados para o material similar obtido através da manufatura tradicional, vide Figura 5.

A Figura 48 compara as curvas real e de engenharia dos CP's impressos na posição *flat*. Como esperado, elas diferem apenas após o limite de escoamento. A partir deste ponto a tensão real aumenta monotonamente, diferente da curva de engenharia, pois a curva real é baseada na área de seção transversal instantânea e durante a deformação ocorre um endurecimento do material que consequentemente requisita uma tensão maior para continuar a deformação. Com isso a tensão de ruptura da curva real é bem maior que a da curva de engenharia, além de resultar em uma deformação maior.

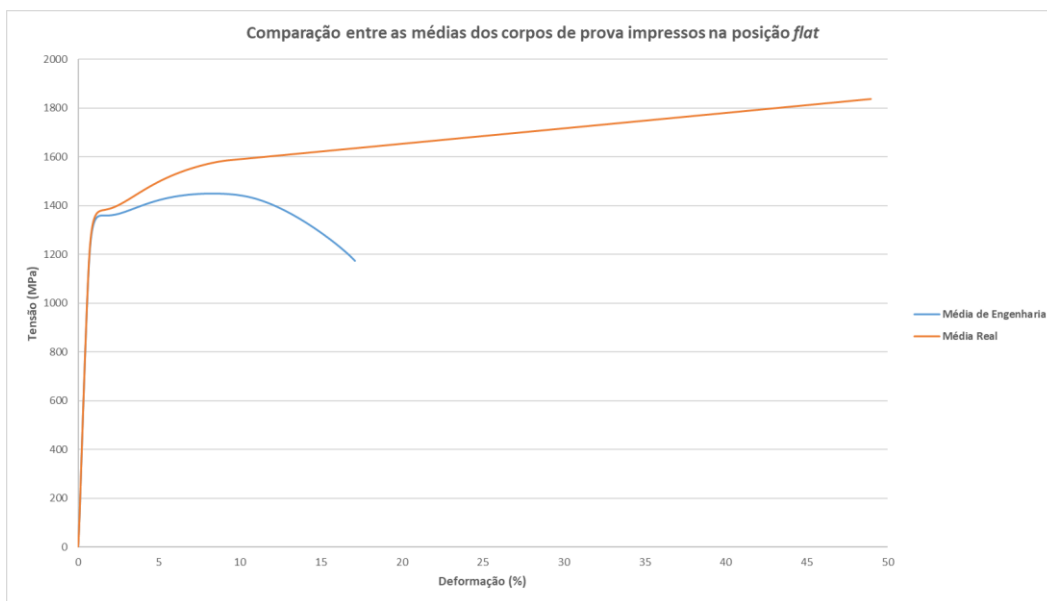


Figura 48 - Comparação entre as curvas de tensão-deformação de engenharia e real

5.1.2. Rugosidade

Os CPs analisados neste ensaio foram os mesmos usados posteriormente nos ensaios de dureza. A análise da rugosidade foi realizada antes dos cubos serem soltos da mesa de impressão, e do seu tratamento térmico, vide Figura 49.



Figura 49 - Ensaio de rugosidade

Para cada medida realizada, foi gerado um gráfico da rugosidade superficial e obtidos valores para os parâmetros de rugosidade R_a , R_z , R_q e R_c . Os gráficos de alguns dos corpos de prova (com o objetivo de exemplificar a análise) encontram-se a seguir, enquanto os valores obtidos para os parâmetros estão listados na Tabela 7. Em todas as medições feitas o comprimento da amostragem foi de aproximadamente 1 mm. Na Figura 50 e Figura 51, encontram-se os perfis medidos nos ensaios com o maior e o menor valor de R_a encontrado. A Tabela 8 resume as rugosidades medidas. As peças encontram-se entre as classes N7 e N9 como listado na Tabela 5.

Tabela 7 - Valores de rugosidade obtidos após os ensaios

Corpo de prova	Valores de rugosidade (μm)			
	Ra	Rz	Rq	Rc
1.1	44,378	19,198	55,903	126,383
1.2	3,69	185,302	47,705	175,909
1.3	33,056	167,241	43,814	110,437
1.4	28,065	118,978	33,069	104,369
1.5	1,497	80,543	18,384	54,824
2.1	32,589	16,371	40,312	120,784
2.2	29,236	158,775	37,013	85,022
2.3	30,407	147,292	40,997	102,226
2.4	34,186	156,459	41,191	129,812
2.5	27,573	154,263	34,449	98,208
3.1	33,083	160,087	40,949	108,812
3.2	30,174	150,846	39,147	86,064
3.3	30,096	143,863	38,078	106,339
3.4	2,796	126,484	36,388	87,276
3.5	40,636	186,626	53,571	167,947
4.1	38,276	146,289	44,904	139,695
4.2	23,489	115,207	29,773	85,385
4.3	21,929	113,187	28,775	81,584
4.4	28,137	150,695	39,458	10,175
4.5	27,028	129,401	33,491	96,018
5.1	24,064	121,864	30,744	81,328
5.2	20,279	113,995	25,639	82,049
5.3	17,769	92,762	25,137	89,675
5.4	28,165	129,967	34,906	95,945
5.5	19,719	78,147	2,266	7,137

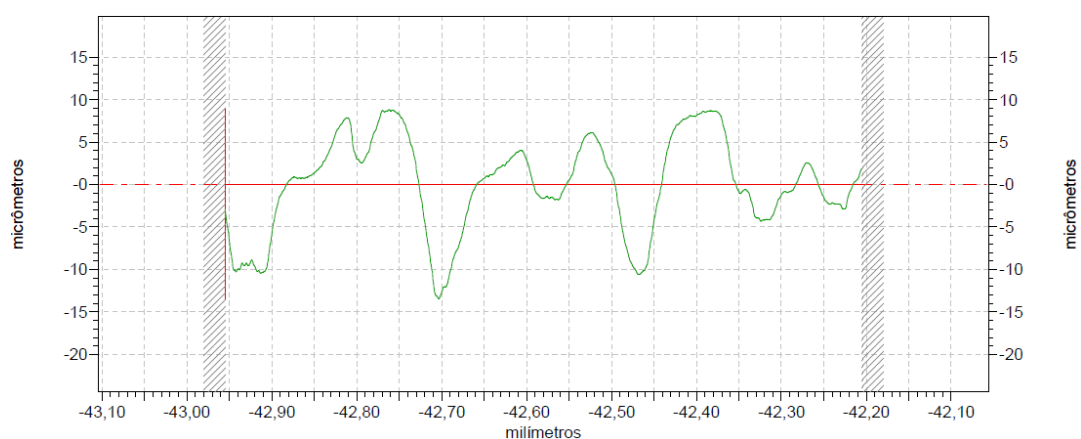


Figura 50 - Perfil de rugosidade do corpo de prova 1.1

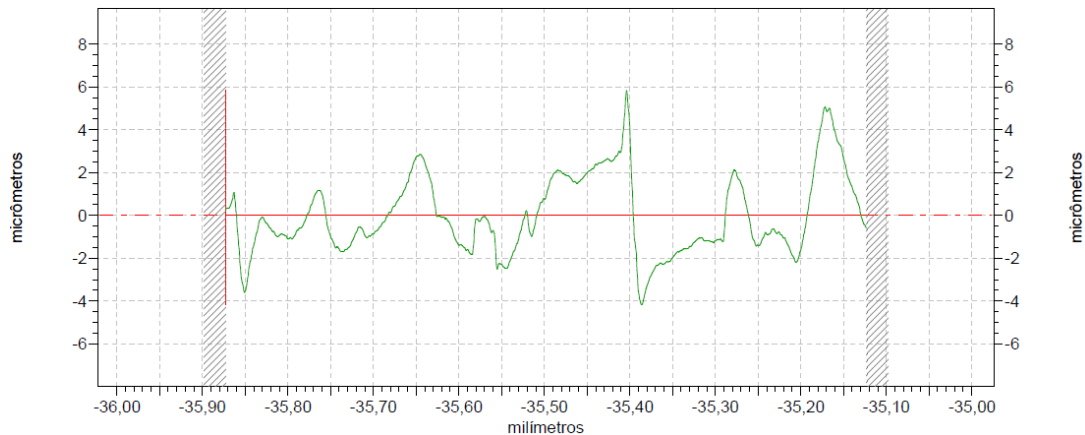


Figura 51 - Perfil de rugosidade do corpo de prova 1.5

Tabela 8 - Comparação entre os parâmetros de rugosidade dos cubos

Item	Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)	Rc (μm)
Menor valor medido	1,4970	7,8147	1,8384	5,4824
Maior valor medido	4,4378	19,1980	5,5903	17,5909
Média final	2,8165	14,6289	3,7013	9,8208
Desvio padrão:	0,7061	3,0660	0,9001	2,7924
Erro padrão	0,1414	0,6132	0,1800	0,5585

Pal *et al.* (2016) analisaram a rugosidade superficial de amostras impressas no mesmo material aqui estudado, o aço PH1, obtendo uma faixa de valores para Ra entre 9,39 e 10,90 μm . Os valores apresentados na Tabela 8 têm uma faixa de variação grande, maior do que a obtida pelos autores do artigo mencionado. Contudo, o maior valor obtido para Ra ainda é cerca da metade do menor valor obtido pelos autores. Apesar de ser o mesmo material, esta diferença pode ser devida a uma máquina de impressão diferente, resultando em uma qualidade superficial diferente. Mas é necessário aprofundar um pouco mais a análise para tentar identificar se existe algum outro motivo para a variação observada.

A Tabela 9 lista os valores de acordo com as colunas de fabricação dos cubos. Com esta divisão observa-se que os valores de rugosidade diminuem conforme o valor da coluna aumenta, ou seja, conforme a distância para a direita da máquina (onde encontra-se o ponto inicial do *recoater*) diminui também.

Tabela 9 - Médias das colunas

Coluna	Ra	Rz	Rq	Rc
1.X	3,3056	16,7241	4,3814	11,0437
2.X	3,0407	15,6459	4,0312	10,2226
3.X	3,0174	15,0846	3,9147	10,6339
4.X	2,7028	12,9401	3,3491	9,6018
5.X	2,0279	11,3995	2,5639	8,2049

Paralelamente, analisando a divisão das linhas na Tabela 10, vê-se que o que foi observado na Tabela 9 não ocorre nesta análise. A variação dos valores é bem menor, pois nas colunas a variação foi de até cerca de 1,3 μm , enquanto que para as linhas esta variação não passou de, aproximadamente, 0,6 μm .

Tabela 10 - Média das linhas

Linha	Ra	Rz	Rq	Rc
X.1	3,3083	16,0087	4,0949	12,0784
X.2	2,9236	15,0846	3,7013	8,5385
X.3	3,0096	14,3863	3,8078	10,2226
X.4	2,8137	12,9967	3,6388	10,1750
X.5	2,7028	12,9401	3,3491	9,6018

Na análise comparativa dos cubos impressos, foi feita uma relação da rugosidade superficial com o posicionamento de cada cubo na mesa de impressão para cara parâmetro analisado, vide Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14. Há um aumento gradativo da rugosidade superficial na direção diagonal do canto direito superior (Linha 1, Coluna 5) para o canto esquerdo inferior (Linha 5, Coluna 1). A rugosidade do CP L1C5 é sempre a menor ou a segundo menor, sendo neste caso maior apenas que a do elemento L1C1. A rugosidade do CP L1C3 é sempre a segunda maior, se diferenciando de todos os outros elementos ao seu redor. Com base nesta informação e no processo de impressão mostrado na Figura 57, este fato indica que o fluxo naquela região não esteja completamente operacional, de modo que gera um maior acúmulo de partículas durante o processo e consequentemente aumenta sua rugosidade superficial.

Tabela 11 - Valores de Ra obtidos dos CP's, de acordo com sua posição na mesa de impressão

1,50	2,76	4,06	2,70	1,97
2,81	3,42	2,80	2,81	2,82
3,31	3,04	3,01	2,19	1,78
3,69	2,92	3,02	2,35	2,03
4,44	3,26	3,31	3,83	2,41

Tabela 12 - Valores de Rz obtidos dos CP's, de acordo com sua posição na mesa de impressão

8,05	15,43	18,66	12,94	7,81
11,90	15,65	12,65	15,07	13,00
16,72	14,73	14,39	11,32	9,28
18,53	15,88	15,08	11,52	11,40
19,20	16,37	16,01	14,63	12,19

Tabela 13 - Valores de Rq obtidos dos CP's, de acordo com sua posição na mesa de impressão

1,84	3,44	5,36	3,35	2,27
3,31	4,12	3,64	3,95	3,49
4,38	4,10	3,81	2,88	2,51
4,77	3,70	3,91	2,98	2,56
5,59	4,03	4,09	4,49	3,07

Tabela 14 - Valores de Rc obtidos dos CP's, de acordo com sua posição na mesa de impressão

5,48	9,82	16,79	9,60	7,14
10,44	12,98	8,73	10,18	9,59
11,04	10,22	10,63	8,16	8,97
17,59	8,50	8,61	8,54	8,20
12,64	12,08	10,88	13,97	8,13

Usando um dos periféricos da máquina de impressão 3D (EOS M280), foi feito um pós-tratamento nas peças impressas, através de um jateamento de esferas de vidro, cujas velocidades e temperaturas de jateamento podem ser controladas. A Figura 52 mostra a mesa de impressão com os cubos e o periférico usado para o jateamento das esferas de vidro.

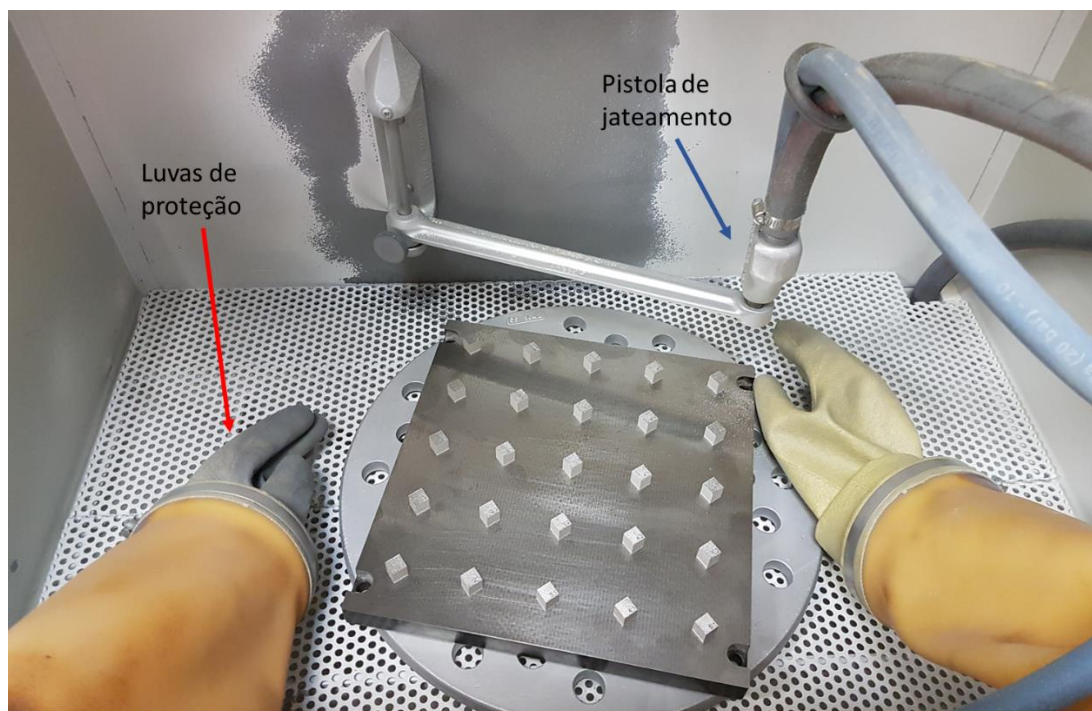


Figura 52 - Cubos sendo jateados com esferas de vidro

Ao final deste processo, novas medições de rugosidade foram feitas em alguns dos cubos para compará-las com os valores medidos nos cubos *as built*. Estes valores estão listados na Tabela 15. Pode-se comparar visualmente o antes e depois do jateamento, na Figura 50 e na Figura 53 para o corpo de prova 1.1.

Tabela 15 - Valores de rugosidade obtidos antes e após o jateamento de esferas de vidro

Corpo de prova	Valores de rugosidade (μm)							
	Ra		Rz		Rq		Rc	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
1.1	4.4378	1.5273	19.1980	7.7922	5.5903	1.9198	12.6383	4.7096
1.3	3.3056	1.0318	16.7241	5.1847	4.3814	1.2676	11.0437	3.4242
2.4	3.4186	1.9395	15.6459	7.6130	4.1191	2.3396	12.9812	5.9640
2.5	2.7573	1.5787	15.4263	7.6575	3.4449	1.9274	9.8208	5.1881
3.2	3,0174	1.9034	15,0846	8.8410	3,9147	2.3934	8,6064	7.7069
3.3	3.0096	1.2916	14.3863	6.6892	3.8078	1.7671	10.6339	4.4221
4.1	3.8276	1.1734	14.6289	5.3898	4.4904	1.4376	13.9695	3.8384
4.3	2.1929	1.3093	11.3187	6.0505	2.8775	1.5903	8.1584	4.1300
5.1	2.4064	1.9511	12.1864	7.5326	3.0744	2.3379	8.1328	5.4328
5.5	1.9719	1.0876	7.8147	5.8109	2.2660	1.3876	7.1370	3.8265

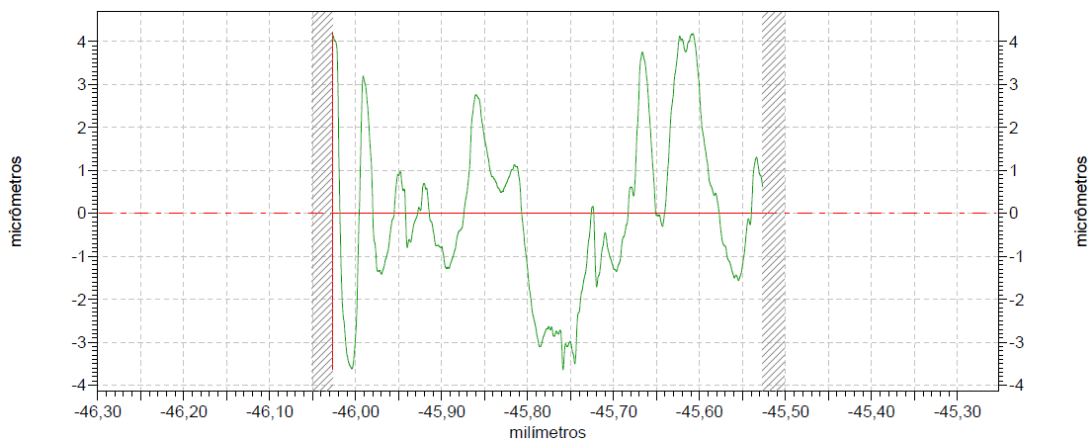


Figura 53 - Perfil de rugosidade do corpo de prova 1.1 após jateamento com esferas de vidro

Após o jateamento, houve uma redução de até cerca de 70% da rugosidade medida previamente, obtendo-se até mesmo valores de R_a próximos de $1\text{ }\mu\text{m}$. Contudo, há um outro método recente para o pós-tratamento destas peças, que é o polimento por laser, usado por Ma *et al.* (2017) nas superfícies de dois blocos de ligas de Ti diferentes (Ti-6Al-4V e Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si), obtidas através de manufatura aditiva. Inicialmente, as rugosidades medidas nestes blocos foram $5,226\text{ }\mu\text{m}$ e $7,210\text{ }\mu\text{m}$. Após o polimento por laser estes valores reduziram para $0,375\text{ }\mu\text{m}$ e $0,730\text{ }\mu\text{m}$, uma redução de mais de 90%. Zhihao *et al.* (2018) também estudaram o polimento por laser em IN718 e obtiveram resultados bem similares aos encontrados por Ma *et al.* (2017). O valor de R_a medido pelos autores foi de $7,5 \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$ antes e menor que $0,1\text{ }\mu\text{m}$ após o polimento. Na Figura 54, observa-se imagens da metalografia óptica realizada na amostra após o polimento por laser. A profundidade resultante do polimento é de aproximadamente $120\text{ }\mu\text{m}$.

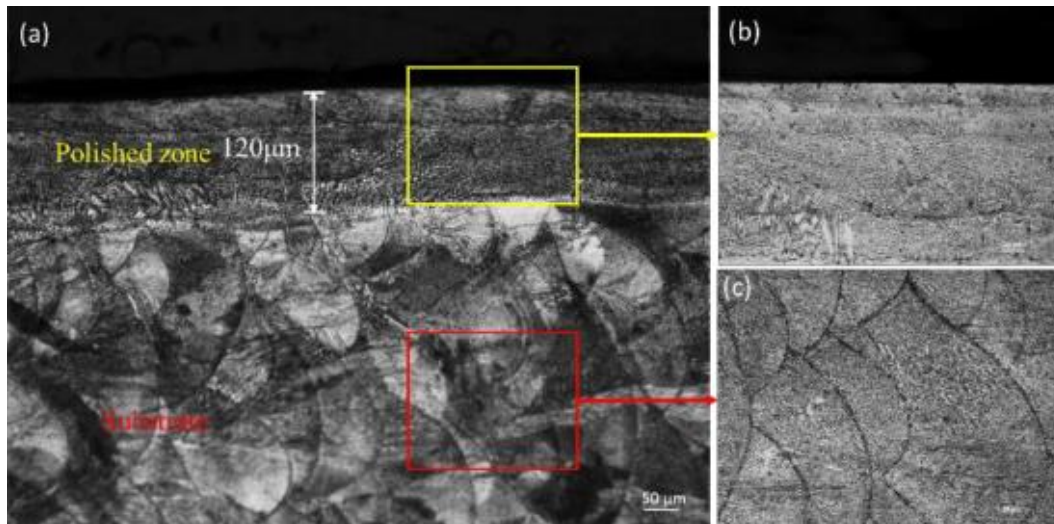


Figura 54 - Imagens da metalografia óptica realizada nas amostras após o polimento por laser (Zhihao *et al.*, 2018)

Xu *et al.* (2021) também realizaram análises similares sobre este método de polimento em amostras feitas de TiAl. Contudo, estes analisaram diferentes tipos de aplicação do laser para o polimento e observaram mudanças da microdureza da peça dependendo do método utilizado, vide Figura 55.

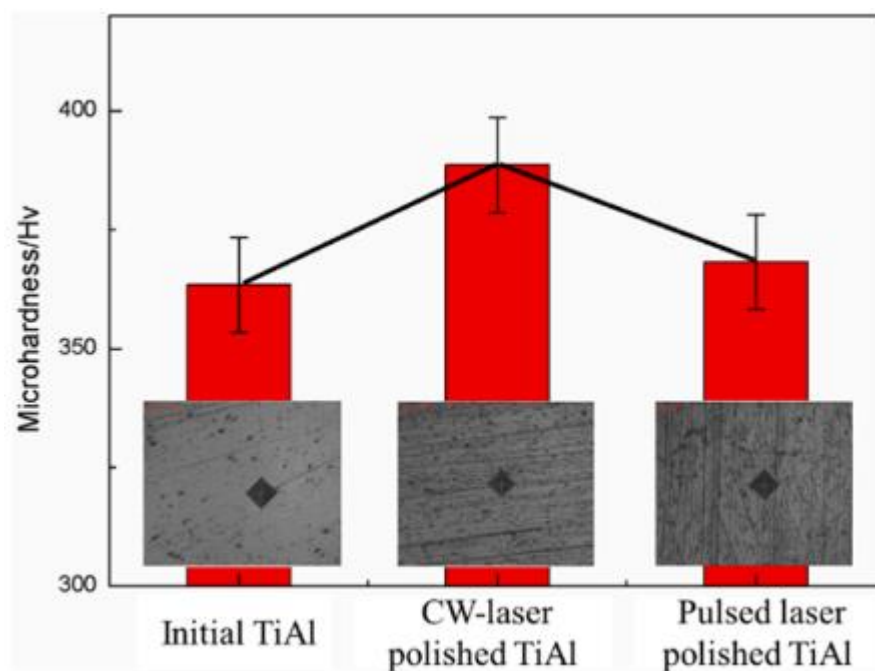


Figura 55 - Diferença na microdureza de peças polidas por laser utilizando diferentes métodos (Xu *et al.*, 2021)

5.1.3. Dureza

Os resultados dos ensaios de dureza em CPs de aço inoxidável (PH1) fabricados por MA na impressora EOS M280 são mostrados a seguir. Para avaliar a possível anisotropia do processo de fabricação, a dureza foi medida em duas faces de cada cubo, a face superior (em vermelho) e a face lateral (em azul), vide Figura 56. Em cada face, foram feitas três medidas e a média delas foi considerada como o valor de dureza daquele cubo na face em questão, vide Tabela 16.

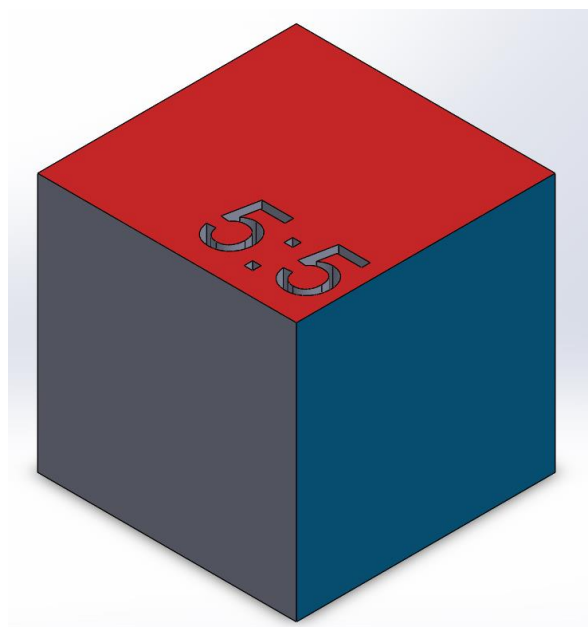


Figura 56 - Faces do cubo que foram analisadas no ensaio

Tabela 16 - Valores de dureza obtidos após os ensaios

Corpo de prova	Dureza (HV10)							
	Face 1 (superior)				Face 2 (lateral)			
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média
1.1	386	381	394	387	380	389	386	385
1.2	387	380	379	382	381	392	387	387
1.3	397	391	384	391	384	387	390	387
1.4	388	383	375	382	376	392	387	385
1.5	385	382	390	386	388	391	385	388
2.1	393	389	388	390	385	389	391	388
2.2	397	374	380	384	395	407	386	396
2.3	392	382	415	396	391	390	392	391
2.4	382	382	393	386	388	410	396	398
2.5	416	391	395	401	403	398	382	394
3.1	389	399	411	400	405	396	395	399
3.2	394	397	404	398	395	390	403	396
3.3	417	401	397	405	409	401	393	401
3.4	398	399	408	402	400	417	402	406
3.5	405	401	403	403	400	395	411	402
4.1	383	392	409	395	381	406	407	398
4.2	393	408	399	400	396	403	395	398
4.3	401	407	411	406	403	406	419	409
4.4	389	418	421	409	401	415	409	408
4.5	407	387	410	401	410	410	406	409
5.1	411	414	420	415	416	414	418	416
5.2	420	410	419	416	415	409	418	414
5.3	421	421	410	417	414	411	420	415
5.4	404	418	424	415	408	428	419	418
5.5	413	411	419	414	419	424	408	417

Os valores medidos em cada face são analisados na Tabela 17.

Tabela 17 - Comparação entre as faces dos cubos

Item	Face 1	Face 2
Menor valor medido	382	385
Maior valor medido	417	418
Média final	400	398
Desvio padrão	11,386	10,827
Erro padrão	2,2773	2,1653

Os dados desta tabela mostram que existe que as peças são quase isotrópicas, pois tanto as médias totais quanto a faixa de valores medidos para as duas faces é bem semelhante. De acordo com o *datasheet* da empresa sobre este material, o valor mínimo de dureza obtido deve ser de 40 HRC, o que é equivalente cerca de 388 HV, o que condiz com essas medidas (EOS GMBH, 2019). A comparação entre as médias dos valores de dureza das linhas e das colunas da matriz formada

pela disposição dos cubos na mesa de impressão estão na Tabela 18 e na Tabela 19.

Tabela 18 - Médias das colunas

Coluna	Face 1	Face 2
1.X	385	387
2.X	391	391
3.X	401	400
4.X	407	406
5.X	418	416

Tabela 19 - Média das linhas

Linha	Face 1	Face 2
X.1	393	395
X.2	397	395
X.3	401	401
X.4	398	402
X.5	403	403

Na Tabela 18, nota-se um pequeno aumento na dureza das colunas de numeração maior, próximas ao ponto de partida do *recoater* (lâmina que distribui o material em pó em cada camada). Na Tabela 19, observa-se que não existe praticamente diferença entre as linhas. Nas duas tabelas, pode-se observar que as duas faces possuem durezas semelhantes, novamente comprovando a isotropia do processo de fabricação.

Para analisar melhor esta diferença notada nas colunas, criou-se uma tabela representando todos os corpos de prova em suas respectivas posições na mesa de impressão, tanto com os valores da face 1, Tabela 20, quanto os da face 2, Tabela 21.

Tabela 20 - Valores médios de dureza obtidos na face superior dos CP's, de acordo com sua posição na mesa de impressão

386	401	403	401	414
382	386	402	409	415
391	396	405	406	417
382	384	398	400	416
387	390	400	395	415

Tabela 21 - Valores médios de dureza obtidos na face lateral dos CP's, de acordo com sua posição na mesa de impressão

388	394	402	409	417
385	398	406	408	418
387	391	401	409	415
387	396	396	398	414
385	388	399	398	416

Desta forma, fica muito mais prático avaliar as diferenças nos valores de dureza obtidos e determinar a possível causa deste efeito. Conforme visto na Tabela 18, realmente existe um aumento nos valores dos corpos de prova próximos ao ponto de partida de distribuição do *recoater*. Contudo, também existe um aumento na diagonal da mesa, concentrando os maiores valores no canto superior direito. Isto pode ser observado novamente nas duas faces. Esse acontecimento pode ocorrer graças a dois fatores principais, conforme explicado abaixo.

Primeiro, durante o processo de impressão a máquina possui um sistema de fluxo constante do gás inerte, onde de um lado o gás é soprado e do outro é aspirado, conforme o sentido mostrado na Figura 57. Durante o processo de sinterização do material, indicado na Figura 58, resquícios do material podem se espalhar pelo restante da área de impressão na mesa. Este fluxo constante de gás inerte ocorre para que estes resquícios do material sigam o fluxo de gás, e não se depositem na superfície de alguma outra peça presente na impressão. Assim, evita-se que estes resquícios fiquem presos entre as camadas, possivelmente criando vazios ou outros defeitos nas outras peças. Contudo, as peças mais próximas da saída do fluxo podem ser mais beneficiadas do que as que se encontram mais distantes. Este fator pode influenciar a dureza observada na primeira linha da Tabela 20 e da Tabela 21, a qual é um pouco maior do que os valores encontrados na última linha.

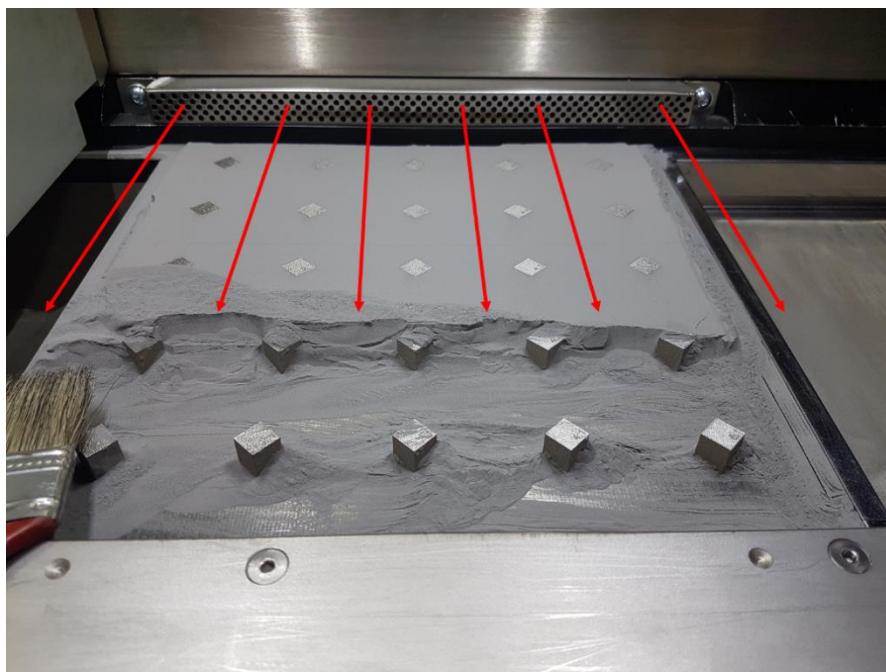


Figura 57 - Sentido do fluxo de gás de inerte

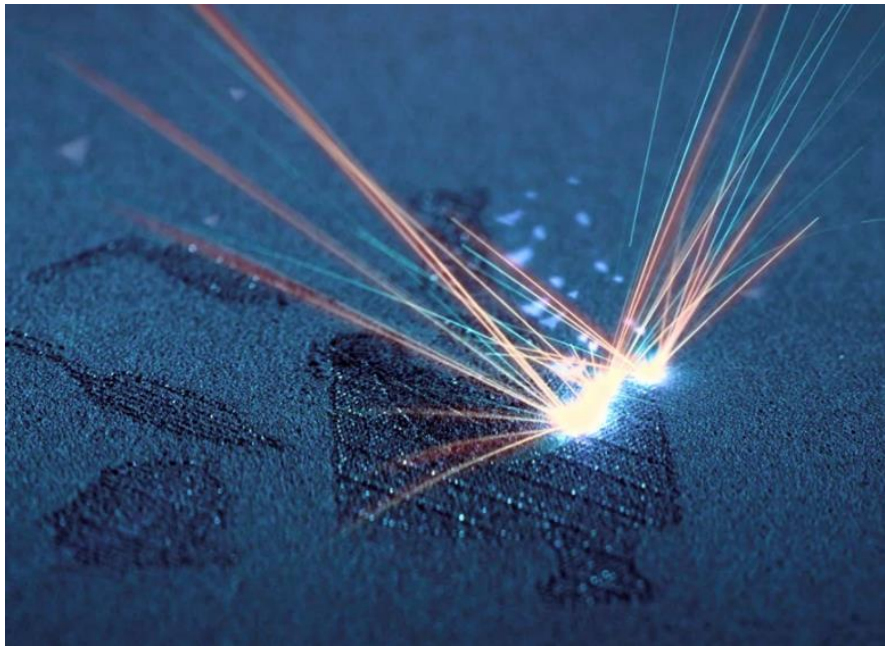


Figura 58 - Sinterização do material (EOS GMBH, 2022)

O segundo fator é relacionado ao *recoater*. A cada camada de impressão, a bandeja de material localizada do lado direito da máquina sobe a altura da camada definida no software previamente, neste caso 20 μm . A lâmina então se movimenta da direita para a esquerda, para distribuir este material da bandeja por toda a mesa de impressão igualmente, vide Figura 59. Contudo, acredita-se que durante o movimento do *recoater* a primeira parte da mesa (lado direito) recebe o material da nova camada de forma mais uniforme, enquanto a parte final da mesa pode recebe-lo de forma desigual ou até mesmo ter espaços que não recebem quase nenhum material. Com isso, as chances de criação de vazios ou outros defeitos seria grande. Portanto, entende-se que essa distribuição de material desigual é a causa dos resultados observados nos corpos de prova, onde as colunas da direita da Tabela 20 e da Tabela 21 possuem valores maiores que as da esquerda.

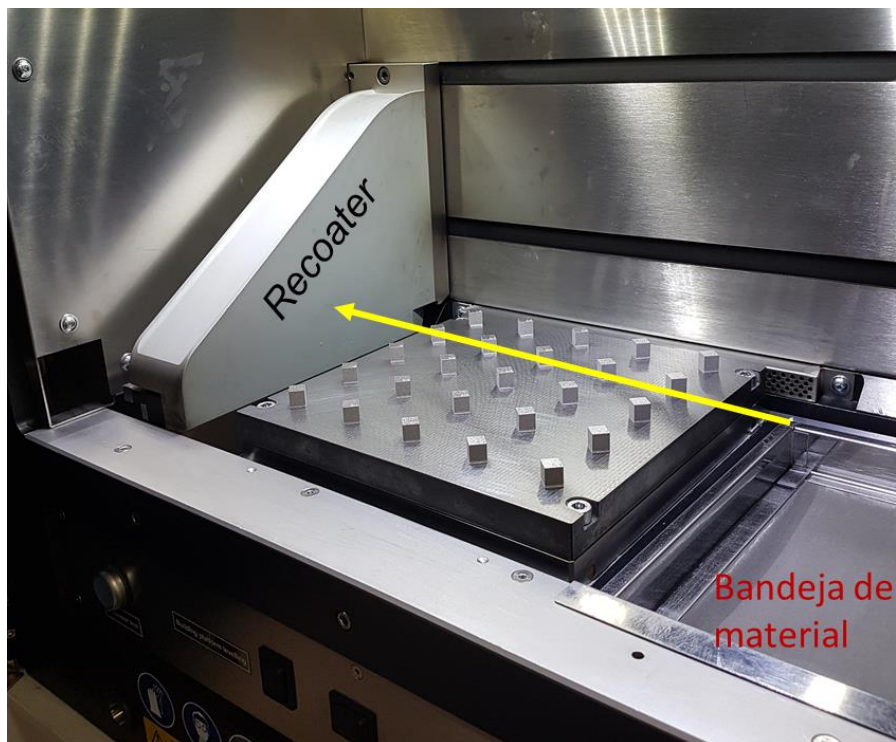


Figura 59 - Sentido de distribuição de material com o recoater

Acredita-se que a combinação destes dois fatores resulte no que foi visto na Tabela 20 e na Tabela 21. Mas apesar disso, as diferenças encontradas nos valores são pequenas, conforme demonstrado na Tabela 17.

5.1.4. Impacto

Este item apresenta os resultados dos ensaios Charpy realizados nos CPs do aço inoxidável PH1 fabricados por MA na impressora 3D EOS M280. A Tabela 22 lista os valores de temperatura dos ensaios e a energia absorvida em cada um deles.

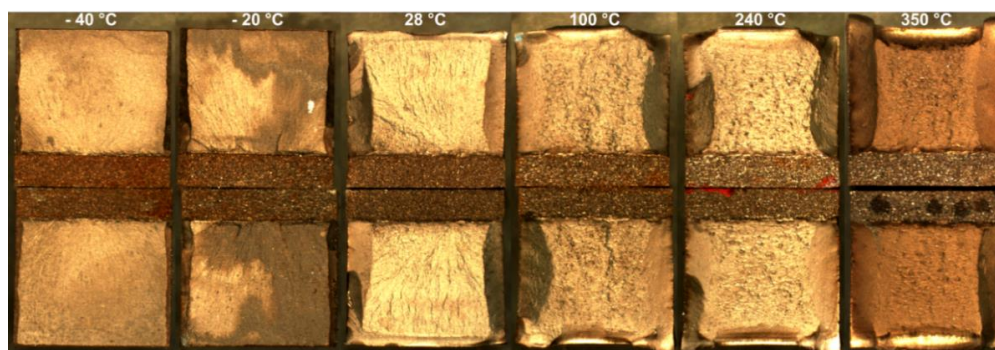
Tabela 22 – Valores de temperatura avaliados e energia absorvida obtidos

Flat		On-edge	
Temperatura (°C)	Energia absorvida (J)	Temperatura (°C)	Energia absorvida (J)
- 49	0	- 39	18
- 45	0	- 38	20
- 19	0	- 19	26
- 20	0	- 20	26
28	12	28	38
28	8	28	34
100	48	100	42
98	44	102	44
238	46	243	48
239	34	240	50
350	34	320	42
349	40	325	42

Há uma grande diferença entre a Tabela 22 e os resultados obtidos para o material laminado similar existente no mercado, o aço UNS S15500. O valor de CVN, à temperatura ambiente, do material UNS S15500 na condição H900 é de 50 J/cm² (AK Steel Holdings Corporation, 2021), enquanto o valor médio obtido para os CPs *flat* é de 12,5 J/cm², valor dentro da faixa (10,85±1,20 J/cm²) descrita por Sagar *et al.* (2017). Para os CPs *on-edge* a média foi de 45 J/cm².

Ambos os resultados se encontram abaixo do valor padrão de mercado, sendo que a diferença para um dos tipos de corpos de prova foi de apenas 10%. Com isso pode-se concluir inicialmente que o posicionamento utilizado durante a fabricação de qualquer peça por *DMLS* possui maior influência do que a diferença do método de fabricação (manufatura tradicional ou aditiva).

Após esta análise preliminar dos valores de CVN, foram feitas imagens das superfícies de fratura dos espécimes para cada temperatura estudada, vide Figura 60, para compará-las com as superfícies mostradas na Figura 24.

Figura 60 – Foto das superfícies de fratura dos corpos de prova *on-edge*

Pode-se avaliar na Figura 60 tanto o início da transição dúctil-frágil, quanto a porcentagem de *shear lip* (PSF) presente nas superfícies. Contudo, não foi possível identificar a faixa de temperaturas onde a transição se inicia, pois, o corpo de prova testado a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ já possui uma pequena porcentagem de fratura dúctil, indicando que a transição nesta temperatura já se iniciou. Assim, o que se pode afirmar é que a transição ocorre em uma temperatura abaixo de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Também se pode observar a deformação dos CP's. A maior temperatura das superfícies da Figura 24 é $79\text{ }^{\circ}\text{C}$, e nela já se nota uma grande porcentagem de fratura dúctil, enquanto na temperatura de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a porcentagem de fratura frágil ainda é maior que a dúctil nas superfícies da Figura 60. Assim, conclui-se que o aço A36 é mais tenaz, pois absorve mais energia do que o PH1 analisado.

Para confirmar esta análise, é necessário obter a curva de transição dúctil-frágil destes CP's do tipo *on-edge*. Usando os resultados da Tabela 22 e a Equação 17, definida por Oldfield, pode-se obter a curva deste material.

$$Y = A + B \tanh [(T - T_0)/C] \quad \text{Equação 17}$$

Onde Y é a energia CVN (absorvida durante o ensaio Charpy), T é a temperatura, e A, B, T_0 e C são parâmetros ajustáveis da curva que melhor se adapta aos pontos avaliados, vide Figura 61, que mostra o significado físico destes coeficientes. A posição A, T_0 é o ponto médio da transição e B/C é a inclinação da transição neste ponto. A faixa de temperatura da transição é proporcional a C, enquanto que a faixa de CVN no ponto médio A é $\pm B$. Ou seja, o patamar superior é A + B enquanto que o patamar inferior é A – B (Oldfield, 1979).

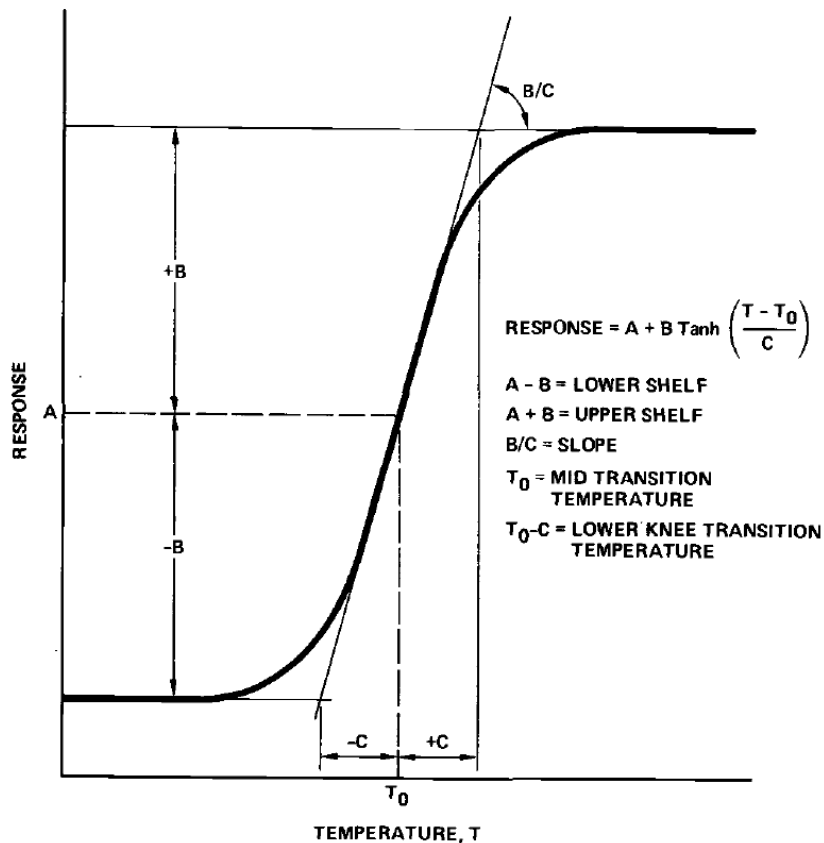


Figura 61 – Interpretação dos coeficientes da equação da tangente hiperbólica (Oldfield, 1979)

Contudo, para obter a melhor curva que ajusta os pontos medidos durante o ensaio, utilizou-se no software *MATLAB* vetores de energia e de temperatura contendo todos os valores listados na Tabela 22. Com estes dados e a Equação 17, foi utilizado o comando *optimoptions* definindo como solucionador o método *lsqcurvefit* através do algoritmo de Levenberg–Marquardt.

Este método é um ajustador não linear de curvas com base nos mínimos quadrados. Neste comando, o usuário define o ponto inicial, os limites superior e inferior (neste caso foi usado a faixa de $-\infty$ até $+\infty$), a função objetiva (Equação 17), os dados (Tabela 22) e o método (algoritmo de Levenberg–Marquardt) (The MathWorks, Inc, 2021).

Entretanto, o resultado obtido depende do ponto inicial definido pelo usuário, pois este método encontra apenas os mínimos locais e não o mínimo global. Assim, foi utilizado um comando *for* para criar um loop com mais de mil diferentes pontos iniciais de forma a obter o melhor resultado. Para avaliar cada resultado obtido após cada iteração, analisa-se o valor de R^2 encontrado no determinado loop. Com isso tem-se um vetor com todos os mil valores de R^2 encontrados.

Através de um simples comando de busca vetorial, obtêm-se o maior valor e consequentemente o valor de cada variável da Equação 17 que representa esta melhor curva encontrada. Os valores de cada variável, assim como seus respectivos R^2 , estão listados na Tabela 23.

Tabela 23 – Valores encontrados para as variáveis da Equação 17 e seus respectivos R^2

Flat				
Variáveis				R^2
A	B	T	C	
20,5000	- 20,5000	29,8447	3,2610	0,9585
On-edge				
Variáveis				R^2
A	B	T	C	
22,5661	- 22,5674	- 28,0042	76,8568	0,9482

A partir destas variáveis é possível obter a curva para cada tipo de CP, conforme demonstrado na Figura 62, para os corpos de provas do tipo *flat*.

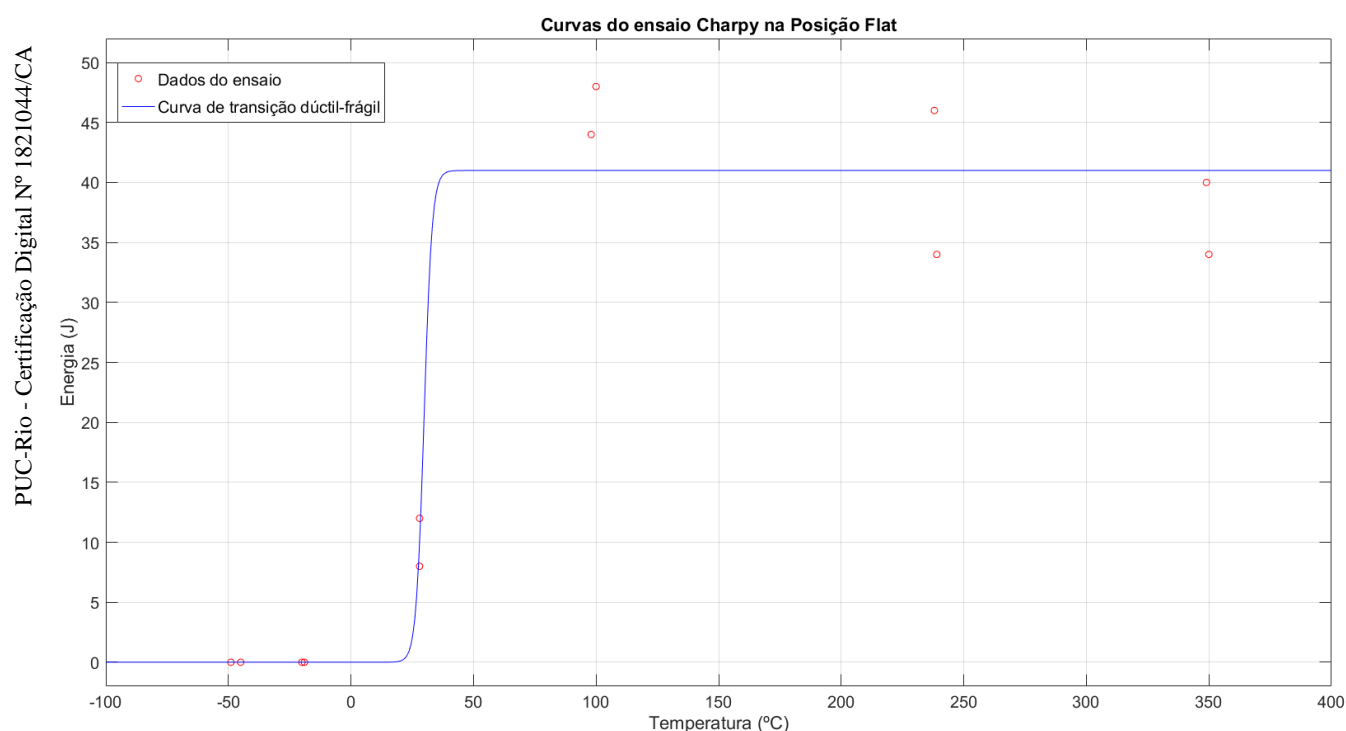


Figura 62 – Curva de transição dúctil-frágil para os corpos de prova *flat*

Analisando a curva, tem-se que o patamar superior é de 41 J enquanto que a temperatura média de transição (T_0) está entre 20 e 30 °C. Para obter T_0 existem diversos métodos, como por exemplo obter a curva de percentual de *shear lip* (PSF) em função da temperatura e encontrar o ponto onde PSF é igual a 50%, conforme demonstrado por Böhme (2002). Contudo, um dos métodos

considerados é a obtenção do valor médio entre os patamares de energia, que neste caso seria aproximadamente 30 °C. Com isso, observa-se que ainda em temperaturas positivas podem ocorrer fraturas completamente frágeis.

Da mesma forma, pode-se obter a curva para os corpos de prova *on-edge* e analisá-los, como mostrado na Figura 63.

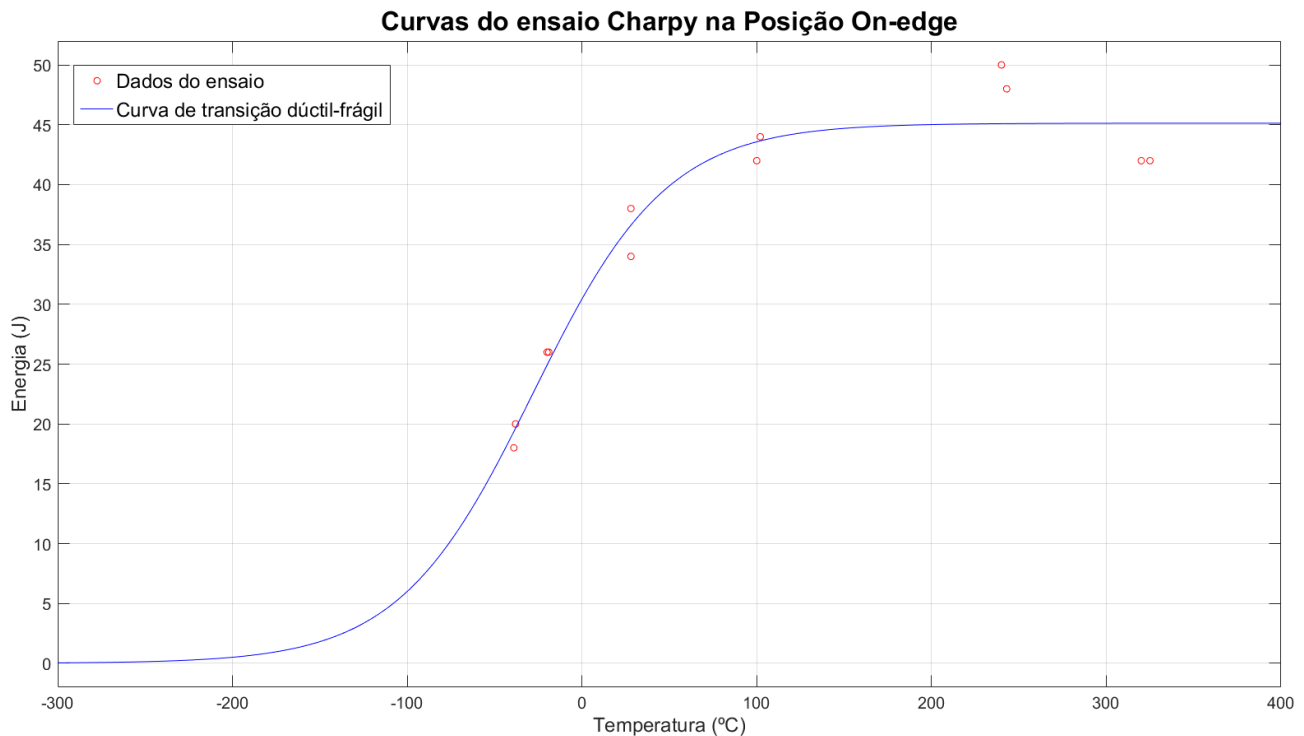


Figura 63 – Curva de transição dúctil-frágil para os corpos de prova On-edge

Através do gráfico da Figura 63 e do método descrito anteriormente, tem-se que o patamar superior de energia é de 45 J enquanto que para estes corpos de prova, T_0 é aproximadamente igual a -28 °C. Com isso, nota-se uma grande diferença entre os diferentes corpos de prova, pois apenas em temperaturas negativas que ocorrerão fraturas completamente frágeis nos CP's *on-edge*.

Como as curvas da Figura 62 e Figura 63 são bem diferentes elas foram plotadas juntas na Figura 64. Nesta figura, a diferença entre os patamares superiores não é tão grande (4 J), portanto em altas temperaturas o comportamento dos dois tipos de CP's é parecido. Contudo, o que mais difere uma curva da outra é a faixa de transição. Para os corpos de prova *Flat*, esta faixa é muito curta, por isso caso as superfícies de fratura analisadas na Figura 60 fossem deste ensaio, se observaria um salto na porcentagem de *shear lip*. Enquanto que para os corpos de prova *on-edge*, devido à grande faixa de transição, pode-se observar a porcentagem

aumentando gradativamente conforme o aumento de temperatura. Desta forma, estimar o início da faixa de transição através da análise das superfícies de fratura também se torna mais fácil.

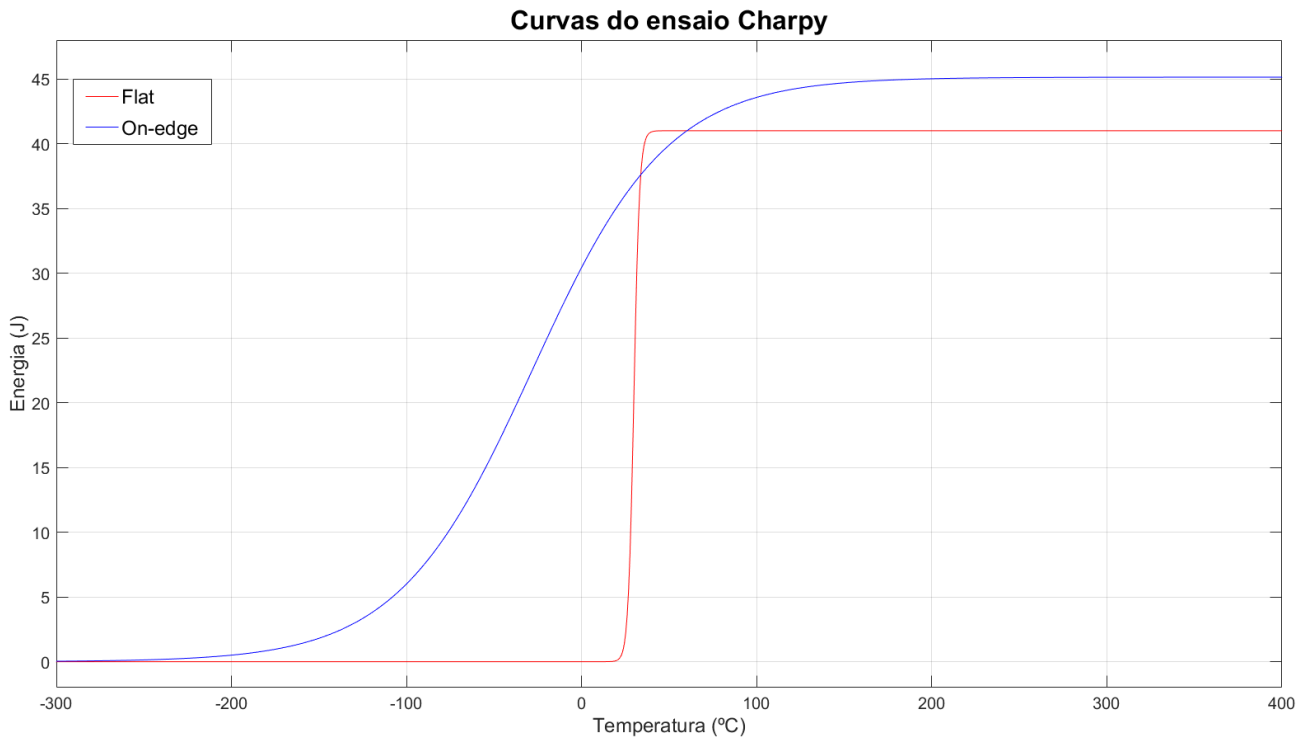


Figura 64 – Análise comparativa entre as duas curvas de transição dúctil-frágil

5.1.5. Microscopia Eletrônica de Varredura

Para identificar as características da matéria-prima, foram realizadas imagens de MEV e caracterização qualitativa por EDS, conforme apresentado a seguir na Figura 65, Figura 66, Figura 67 e Tabela 24.

Na Figura 65, pode-se observar que o pó do PH1 possui formato esférico, rugoso e de diferentes tamanhos. Pal *et al.* (2016) também realizou análises de MEV do PH1, identificando características semelhantes, incluindo a especificação da faixa de diâmetro das partículas do pó, 5-30 μm .

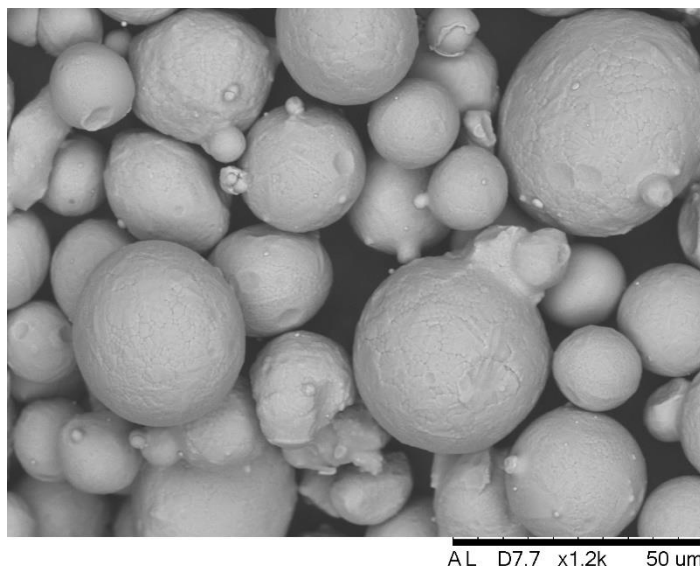


Figura 65 - Imagem de MEV do PH1 com aproximação de 1,2k x

Para avaliar a composição química do PH1, de forma qualitativa, foram analisadas por EDS algumas das partículas indicadas nas imagens, como mostrado na Figura 66. Os espectros identificados, com os respectivos elementos, estão listados na Figura 67. Não foram observados outros elementos que não os descritos na Tabela 24 nos espectros obtidos.

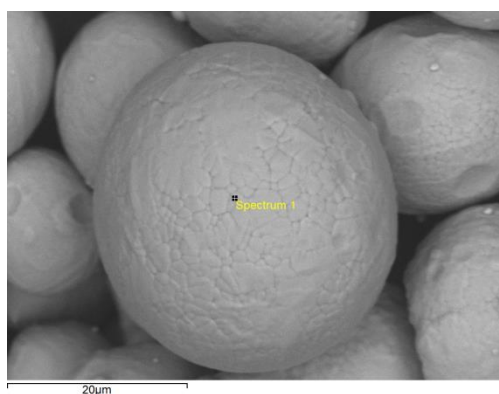


Figura 66 - Imagem de MEV do PH1 analisada no EDS

Os espectros identificados, com os respectivos elementos, no PH1 estão representados na Figura 67.

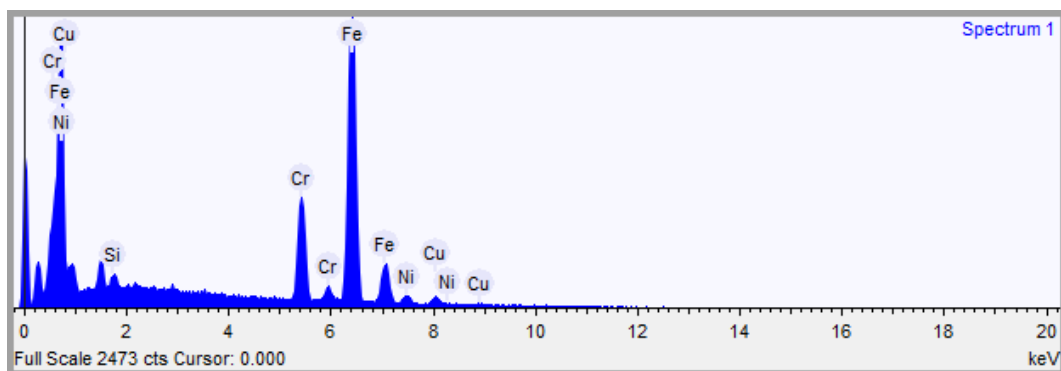


Figura 67 - Espectros identificados pelo EDS no PH1

A partir dos espectros, o equipamento fornece de forma qualitativa a composição do material, conforme identificado na Tabela 24.

Tabela 24 - Composição qualitativa identificada por EDS do PH1

Elemento	Peso %	Atômico %
Silício	1,017	2,009
Cromo	14,709	15,692
Ferro	70,077	69,608
Níquel	4,117	3,890
Cobre	10,081	8,801

A composição identificada na Tabela 24 desconsidera a quantidade identificada de carbono, devido a influência da fita de carbono utilizada para fixar a amostra durante a realização do ensaio.

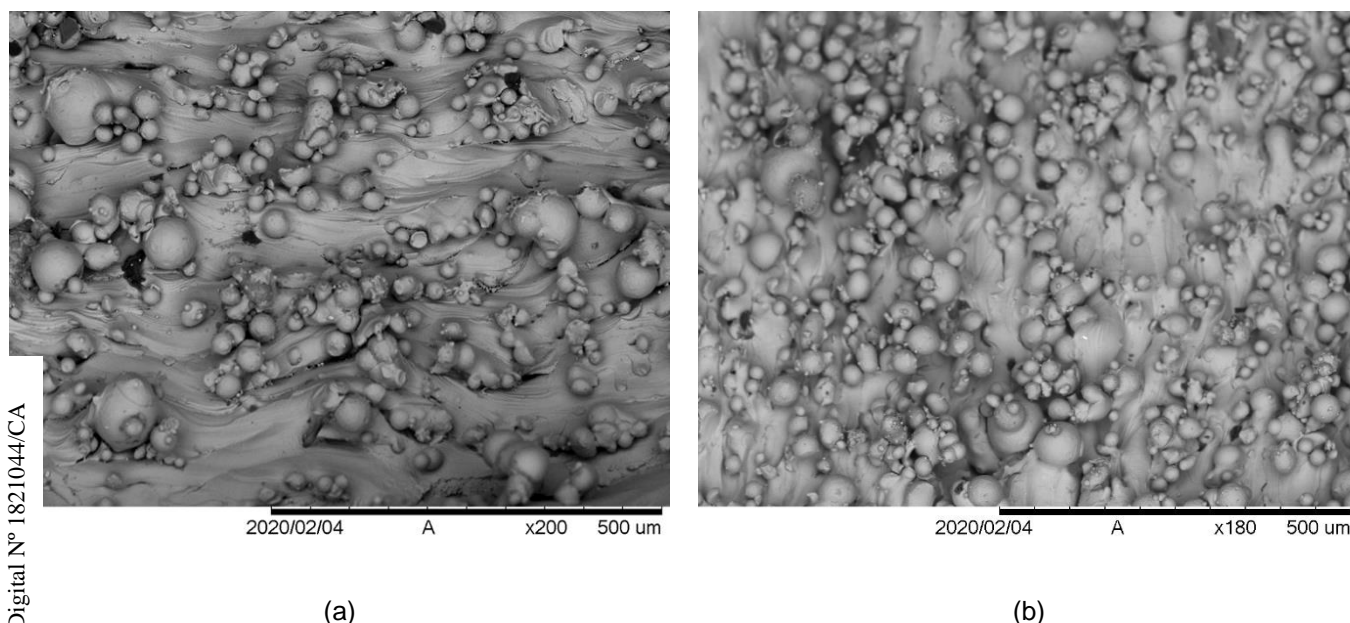
Os elementos identificados no espectro medido estão listados pelo fabricante em proporções semelhantes, conforme a Tabela 2. Não tendo sido identificadas impurezas com elementos não previstos pelo fabricante.

As imagens a seguir foram feitas a partir das superfícies de fratura dos corpos de prova do ensaio de impacto. Portanto, foram analisadas superfícies de fratura em diferentes temperaturas, além da avaliação das duas orientações utilizadas para a fabricação dos CP's destes: *flat* e *on-edge*.

As imagens de superfície de fratura são uma excelente ferramenta para auxiliar a determinação da temperatura de transição dúctil-frágil do material e correlacionar os valores de energia com os micromecanismos de fratura atuantes.

Inicialmente foi feita uma imagem da superfície do entalhe do corpo de prova, vide Figura 68. A superfície é relativamente plana, com vazios de formatos irregulares, e aparentes camadas e ondulações por toda a extensão da superfície, com a presença de partículas de diferentes tamanhos e aparência majoritariamente esférica. Há uma maior quantidade de partículas na região do entalhe nos CP's

impressos na posição *on-edge* (Figura 68 (b)) em comparação à posição *flat* (Figura 68 (a)). Essas partículas, possivelmente, são o pó metálico que não foi fundido durante o processo de sinterização a laser, conforme também identificado por Ladani & Sadeghilaridjani (2021), Zitell *et al.* (2019) e Liverani *et al.* (2017). As camadas e ondulações são semelhantes às encontradas por Liverani *et al.* (2017), em aço 316L fabricado por DMLS, onde este identifica como regiões de metal fundido.



(a) (b)
Figura 68 - Imagens de MEV da superfície do entalhe do corpo de prova impresso na posição (a) *flat* e (b) *on-edge* após ensaio de impacto

A Figura 69 mostra imagens de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição *flat* após ensaio de impacto à -40 °C. É possível observar que a superfície é bastante porosa, com a presença de alguns elementos de formato esférico, como identificado em outras imagens de MEV, além da presença de vazios. Liverani *et al.* (2017) identificaram vazios em amostras de 316L fabricado por DMLS como poros de gases. Não foi possível observar nenhum micromecanismo característico na amostra, mas o aspecto geral da superfície indica a presença de facetas de fratura frágil caracterizadas por superfícies lisas.

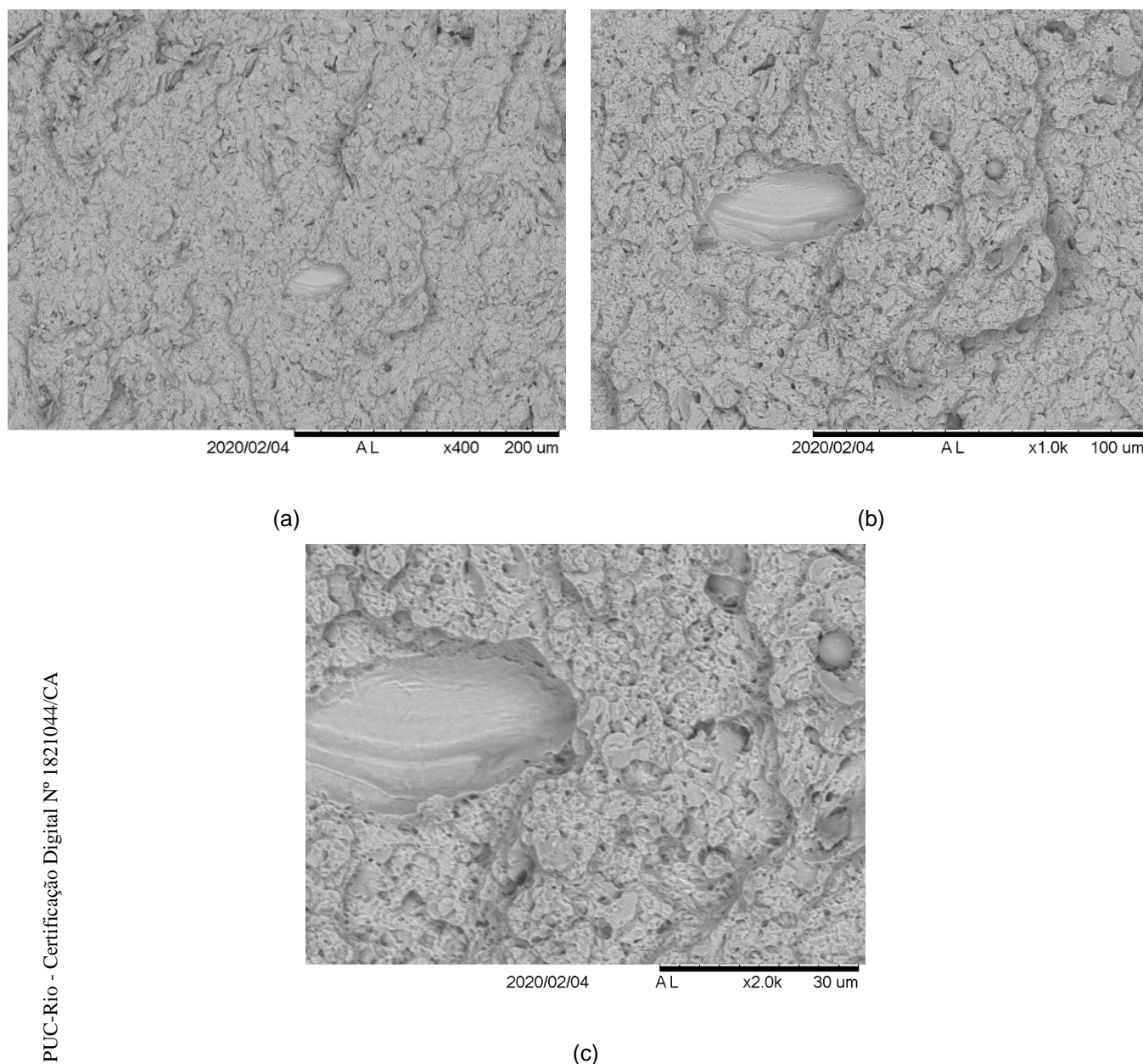


Figura 69 - Imagens de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição *flat* após ensaio de impacto à -40 °C: (a) com aproximação de 400 x, (b) com aproximação de 1.0k x e (c) com aproximação de 2.0k x

A Figura 70 apresenta imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição *flat* após ensaio de impacto à 28°C. É possível observar facetas de fratura frágil, com superfícies lisas caracterizando uma baixa absorção de energia na durante o processo de fratura.

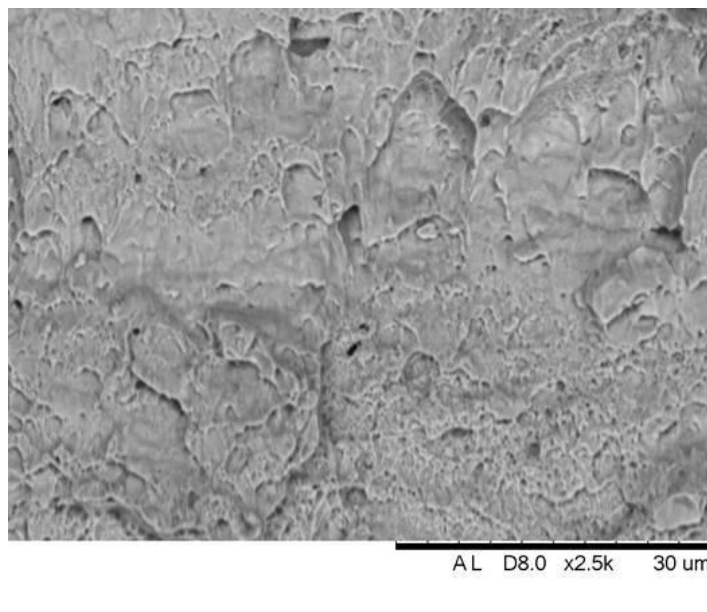


Figura 70 - Imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição *flat* após ensaio de impacto à 28 °C

A Figura 71 mostra a superfície de fratura dos CPs *flat* após o teste de impacto a 350°C, representando a área de ligamento do corpo de prova logo após o entalhe. O padrão de fratura observado na região próxima ao entalhe é tipicamente frágil, ilustrando o possível ponto de início de propagação e as superfícies lisas. É também possível observar que em regiões mais afastadas do entalhe a presença de microcavidades de pequenas dimensões caracterizando uma propagação com maior absorção de energia, compatível assim com a temperatura de transição dúctil-frágil desse material, nessa condição de impressão.

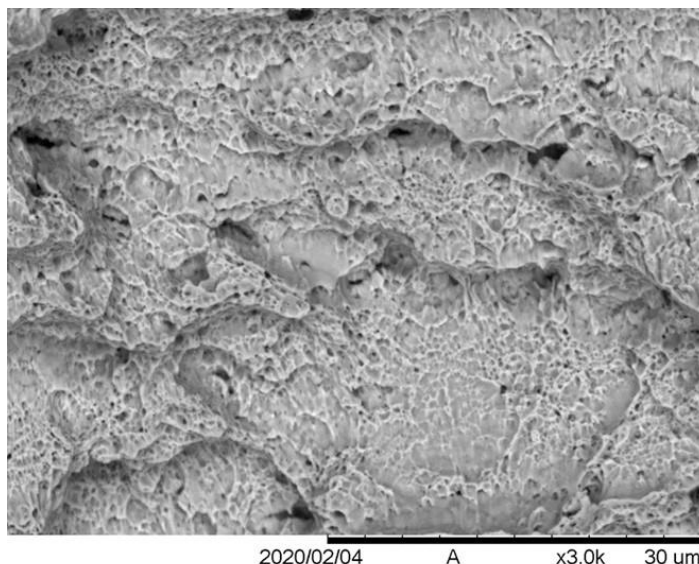


Figura 71 - Imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição *flat* após ensaio de impacto à 350 °C

A Figura 72 mostra um CP *on-edge* ensaiado a -40 °C, apresentando facetas de fratura frágil caracterizadas por superfícies lisas com aspecto de clivagem na região próxima ao entalhe. Os micromecanismos observados na amostra ensaiada a 28 °C, Figura 73, indicam a predominância de regiões de fratura dúctil, mas de baixa energia na região central do corpo de prova. A Figura 74 e Figura 75 mostram superfícies de fratura de CPs *on-edge* ensaiados a 100 e 240 °C, respectivamente. Ambas as superfícies de fratura indicaram a presença de microcavidades de baixa energia nas regiões mais centrais do corpo de prova. Tais resultados são compatíveis com os resultados de energia obtidos no ensaio Charpy.

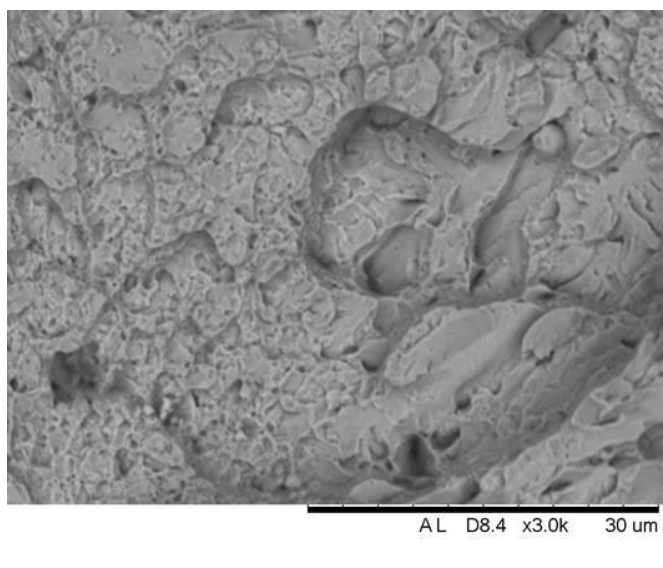


Figura 72 - Imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição *on-edge* após ensaio de impacto à -40 °C

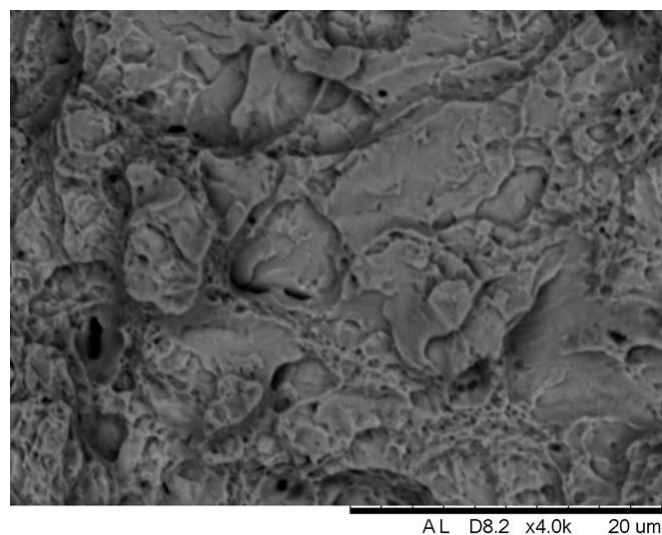


Figura 73 - Imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição *on-edge* após ensaio de impacto à 28 °C

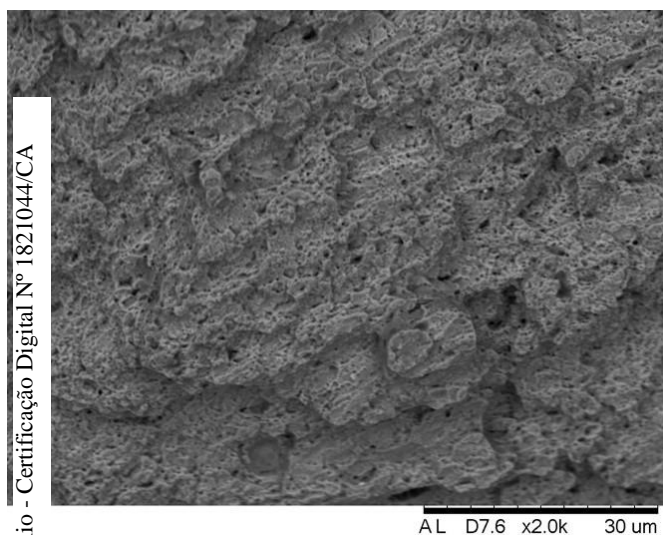


Figura 74 - Imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição *on-edge* após ensaio de impacto à 100 °C

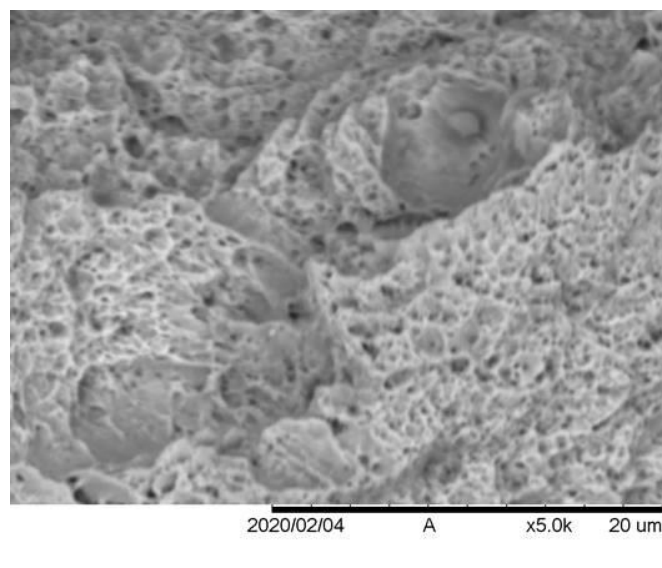


Figura 75 - Imagem de MEV da superfície do corpo de prova impresso na posição *on-edge* após ensaio de impacto à 240 °C

5.1.6. Fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados conforme a norma ASTM E606, e os resultados dos 8 ensaios estão resumidos na Tabela 25. Com as deformações usadas como parâmetros nos ensaios e o número de ciclos obtidos para cada um.

Tabela 25 - Resumo dos ensaios de fadiga

Corpo de prova	Deformação (%)	Número de ciclos (N)
1	-	-
2	0,30	108.439
3	0,40	28.259
4	0,45	1.578
5	0,45	19.468
6	-	-
7	0,50	1.177
8	0,50	10.972

Dos oito corpos de prova testados, dois foram desconsiderados devido a imprevistos com o maquinário que ocorreram durante os ensaios. Duas deformações usadas nos ensaios foram repetidas, pois os ciclos obtidos para cada uma foi inicialmente muito abaixo do esperado (CP 4 e CP 7). Ao refazer estes ensaios (CP 5 e CP 8) encontrou-se um número de ciclos mais coerente com o que é esperado para o material similar da manufatura tradicional. Portanto, considera-se que para realizar a análise do ensaio, os corpos de prova que podem ser utilizados são: CP 2, CP 3, CP 5 e CP 8. Na Figura 76, Figura 77 e Figura 78 estão apresentados alguns dos laços de histerese obtidos no ensaio.

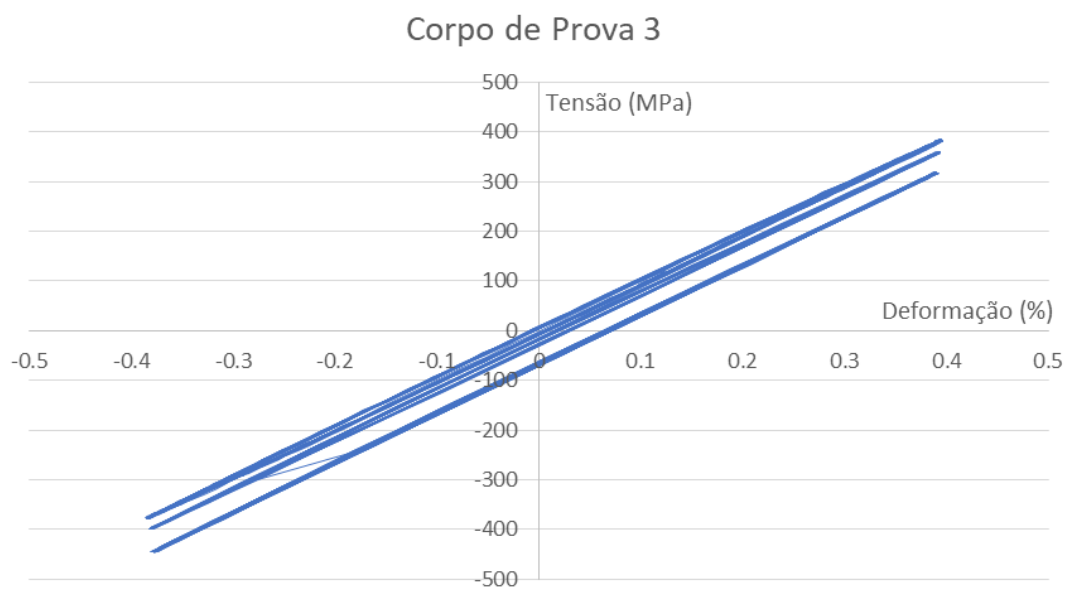


Figura 76 - Laços obtidos para o corpo de prova 3 com deformação de 0,40%

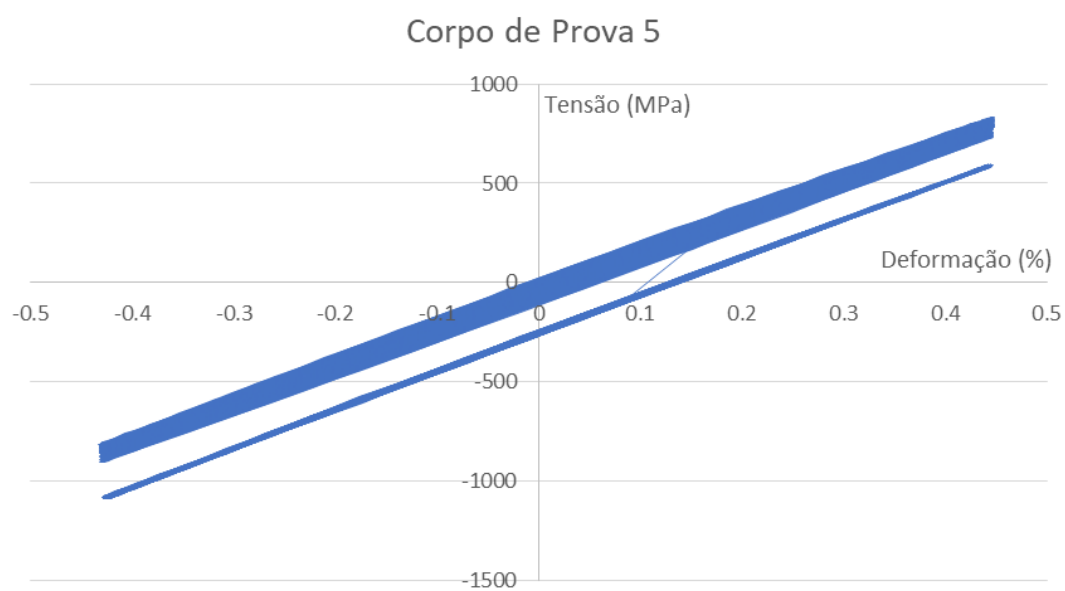


Figura 77 - Laços obtidos para o corpo de prova 5 com deformação de 0,45%

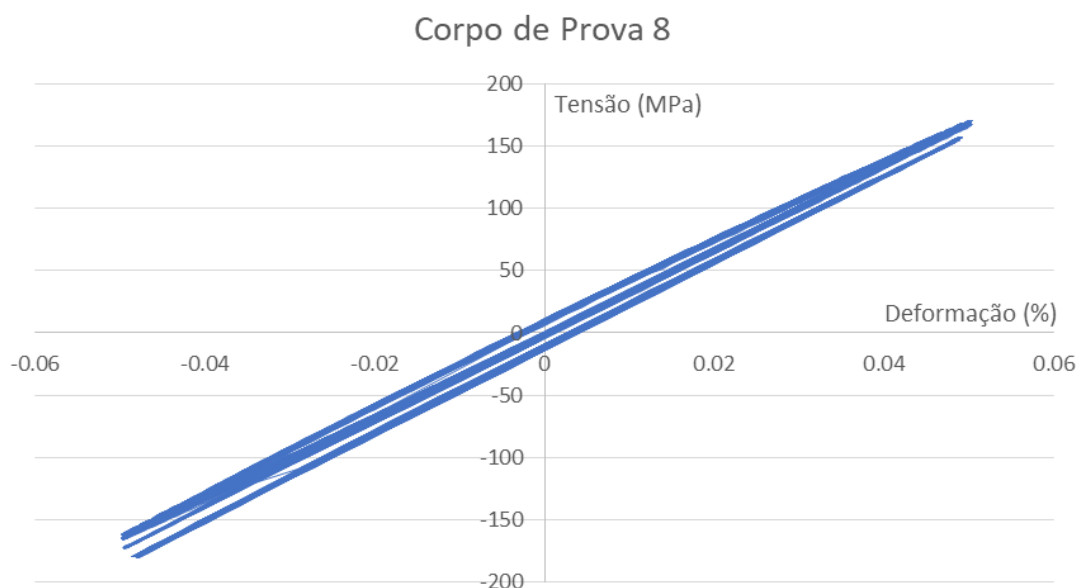


Figura 78 - Laços obtidos para o corpo de prova 8 com deformação de 0,50%

Mesmo os corpos de prova sendo ensaiados com deformações próximas, a variação de vida encontrada foi elevada (10.972 a 108.439). Este fato tende a ser um indicativo de que o CP obtido através de manufatura aditiva possua defeitos iniciais que afetam demasiadamente a vida à fadiga. Adicionalmente, foi feita uma análise na superfície de fratura dos corpos de prova. Contudo, estes apresentaram superfícies e comprimentos de trinca praticamente idênticos. De forma ilustrativa, a superfície do CP 2 está apresentada na Figura 79. Nesta observa-se a área de propagação lenta da trinca (indicada pela seta vermelha) e consequentemente a região onde a trinca propaga rapidamente no momento da falha (indicada pela seta azul). Esta superfície indica um material que sofreu fratura tipicamente frágil, conforme também foi observado durante o ensaio de impacto.

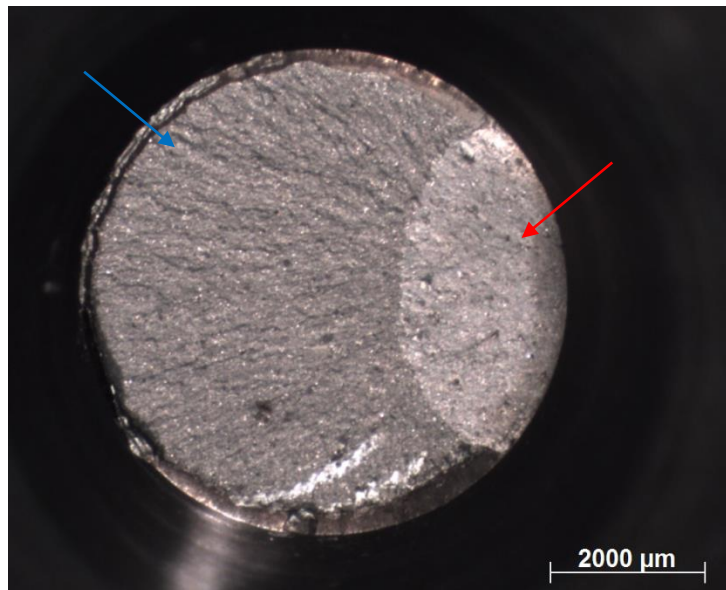


Figura 79 - Superfície de fratura do corpo de prova 2, ensaiado com 0,3% de deformação

5.2.

Roteiro de fabricação digital de *spare parts* 3D

5.2.1.

Introdução

Há uma demanda cada vez maior por tecnologias inovadoras para a construção de peças de reposição, tais como impressão 3D, escaneamento, sinterização e outras. O roteiro a seguir descreve os processos de fabricação de *spare parts* 3D.

5.2.2.

Etapa I – Envio/Recebimento das Demandas

O processo de fabricação de *spare parts* 3D pode envolver itens que ou não são fabricado no país, ou têm fabricação convencional custosa e demorada. Cabe ao cliente passar ou amostras das peças desejadas ou informações que permitam sua fabricação, tais como desenhos, materiais, esforços sofridos etc. Deste modo, a demanda pode vir das seguintes formas:

1. Exemplo de peça danificada, para a execução de medições;

2. Desenhos técnicos completos, para a execução de modelagem tridimensional;
3. Modelagem tridimensional completa e datasheet da peça;
4. Exemplo de peça sem nenhum dano, para a execução de medições.

De acordo com a forma que foi enviada a demanda, a equipe deve buscar/solicitar as devidas informações técnicas para que a *spare part* 3D possa ser fabricada.

5.2.3.

Etapas II – Análise das Demandas

Recebidas as demandas, a equipe deve seguir o seguinte protocolo de análise:

1. Avaliar o material de fabricação (caso não tenha vindo com a demanda ou necessite de alteração);
2. Avaliar todo o dimensional da peça (caso não tenha vindo desenho ou informação sobre ou necessite alteração);
3. Avaliar, quando possível, as informações das peças acopladas à demanda, de modo a verificar compatibilidade e possíveis melhorias (caso não tenham sido propostas);
4. Avaliar a resistência mecânica, térmica e demais propriedades relevantes para a utilização da mesma (caso não tenha vindo no desenho ou necessite alteração);
5. Avaliar qual processo de fabricação ou qual a máquina que será utilizado para reproduzir/atender à demanda.

Cada etapa acima descrita é relacionada e inserida na ficha técnica e memorial descritivo de cada demanda, de modo a ter um catálogo/histórico da demanda.

5.2.4.

Etapas III – Execução das Demandas

Subsequentemente à análise inicial, toda demanda deve passar por alguns processos antes da sua execução, de acordo com a forma de recebimento e com o tipo de demanda. Entretanto, todas as demandas podem ser alocadas em quatro grandes etapas:

- Virtualização da demanda;

- Validação dimensional;
- Avaliação de construção;
- Construção efetiva da demanda.

As quatro serão descritas a seguir.

Virtualização da demanda

Esta etapa consiste em transferir a demanda do ambiente “real” para o ambiente “virtual”. Ela pode ser realizada das seguintes formas:

- Digitalização da peça através de scanner 3D de precisão;
- Medição das peças e construção em software de CAD;
- Modelagem 3D através de desenhos técnicos fornecidos pelo demandante.

Em todas as formas de virtualização, há uma conferência dimensional feita de alguma forma (medidores de precisão, comparação com peça-base etc.) para o levantamento preciso de todas as medidas do item. Após esta virtualização, o arquivo tridimensional é enviado ao cliente para que o mesmo possa validar para que a execução siga para a próxima etapa.

Assim como nas etapas de análise de demandas, após feita esta virtualização, todo o descritivo é inserido na ficha técnica, de modo a ter um catálogo/histórico do item de estudo.

Validação dimensional

Esta etapa consiste na reconstrução da demanda, não necessariamente sendo fabricado no material final, com a objetivo de verificar e validar construtivamente a virtualização da demanda. Ela pode ser realizada das seguintes formas:

- Impressão em material polimérico através de impressoras 3D;
- Usinagem em material pouco custoso, tal como PVC, Uriol ou outros;
- Mescla de tecnologias, tais como impressão 3D, CNC laser e/ou usinagem.

Em todas as formas de construção para validar a etapa, há uma conferência dimensional a ser feita de alguma forma (medidores de precisão, comparação com peça-base etc.). Após esta construção e conferência, a demanda reconstruída é enviada ao cliente para que o mesmo possa validar para que a execução siga para a próxima etapa.

Assim como na etapa anterior, após feita esta virtualização, todo o descritivo é inserido na ficha técnica, de modo a ter um catálogo/histórico do item de estudo.

Avaliação de construção

Esta etapa consiste na avaliação da reconstrução feita em materiais considerados para serem utilizados na fabricação da peça final, de modo a ter uma gama de parâmetros (além dos dimensionais) a serem validados, tais como:

- Ensaios mecânicos não destrutivos;
- Ensaios metrológicos;
- Testes de resistência e esforços;
- Testes de desempenho;
- Análise de vida útil da *spare part*.

Ensaios não destrutivos não geram dano na peça ao serem realizados. Os mais comuns são o de ultrassom e o de líquido penetrante.

Ensaios metrológicos avaliam a peça para validá-la dimensionalmente. Hoje em dia, pode-se usar instrumentos precisos de medição, tais como interferômetros laser, mesas de coordenadas e outros, de modo a corroborar a medição feita anteriormente.

Testes de resistência e esforços, diferente dos ensaios não destrutivos, requerem muitas vezes que a peça ou corpo de prova sejam danificados para mensurar os limites de resistência do objeto avaliado. No caso específico do projeto, deve-se ponderar quando usar a própria peça ou um CP padrão. Esta escolha é determinada pela geometria da peça (tamanho e formato) e pelo método escolhido de fabricação, uma vez que cada método possui sua limitação e eficiência.

Testes de desempenho podem ser executados de maneira simulada em um ambiente controlado ou até mesmo no ambiente real da peça original. Estes ensaios têm por objetivo validar a confecção feita no item anterior, de modo a verificar encaixes, vazamentos, vedações e o comportamento mecânico geral da peça de reposição.

A análise de vida útil da *spare part* tem por objetivo testar os limites da peça de reposição construída, de modo a verificar se alguma das melhorias sugeridas (se pertinente) realmente aumentam o tempo de vida da peça, bem como validar (ou refutar) as previsões feitas nos itens anteriores.

Todos esses ensaios e análises servem para aumentar a confiabilidade da peça fabricada, de modo a rastrear possíveis anomalias, como por exemplo, algum lote de peças não ter a vida útil estipulada. Após esta construção e conferência, a demanda segue para a próxima etapa.

Assim como na etapa anterior, depois de feita esta reconstrução, todo o descritivo é inserido na ficha técnica, de modo a ter um catálogo/histórico do item de estudo.

Construção efetiva da demanda

Nesta etapa, todos os processos avaliados e aprovados formam uma sequência de construção, de modo a garantir que toda e qualquer demanda similar seja feita de forma idêntica e com a tecnologia descrita nos itens anteriores.

É feita uma peça/amostra e a mesma é enviada ao cliente de forma definitiva, não tendo mais nenhum ensaio ou modificação a ser feita. É uma etapa de finalização propriamente dita, na qual a ficha técnica é arquivada e catalogada para posteriores requisições.

Dependendo da solicitação do cliente, esta etapa pode consistir em produzir mais de uma peça, garantindo que a produção do cliente não seja interrompida futuramente e ganhando um “mini estoque” na produção.

Para fins de exemplificação e resumo de cada etapa pode-se construir os seguintes fluxogramas de decisões e construtividade, alocado nas próximas página, onde as etapas serão:

- D. Recebimento da demanda;
- II. Análise da demanda;
- III. Execução da demanda;

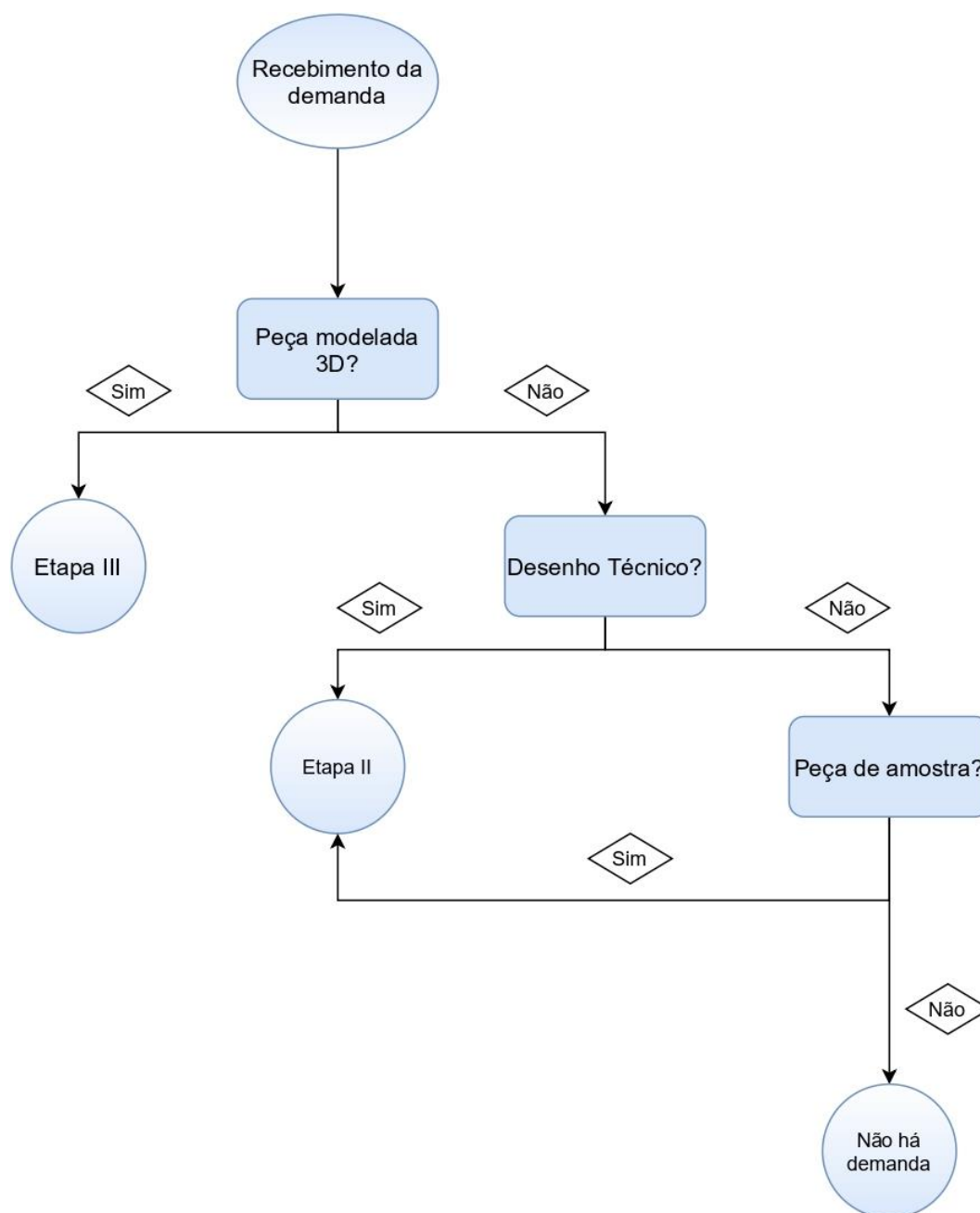


Figura 80 - Fluxograma da Etapa I – Recebimento das demandas

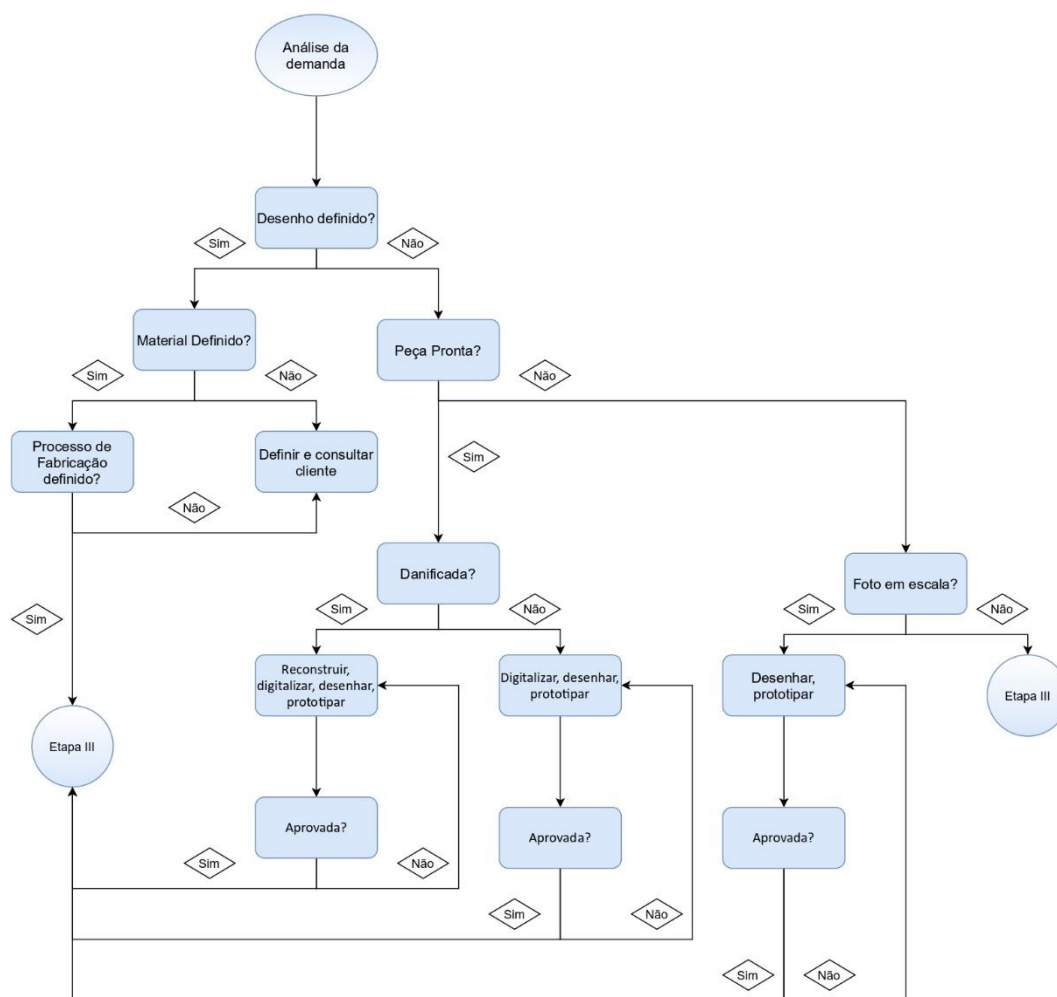


Figura 22 – Fluxograma da Etapa II – Análise das demandas

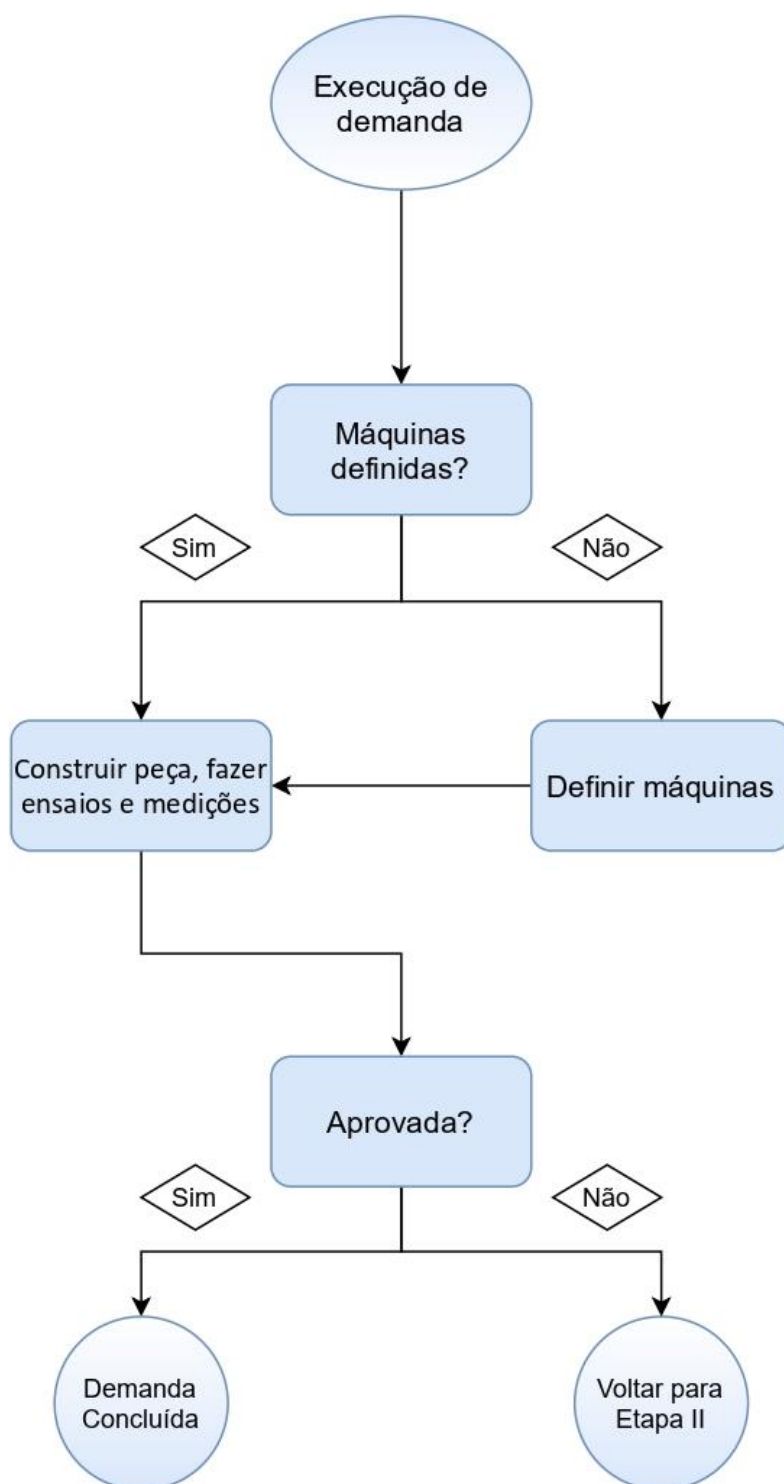


Figura 23 – Fluxograma da Etapa III – Execução das demandas

5.2.5. Processos de Produção Utilizados.

Conforme mencionado nos itens anteriores, os processos de fabricação utilizados são variados, podendo ser utilizados processos de manufatura aditiva, de manufatura subtrativa ou convencional ou um combinado de ambas.

O procedimento para a escolha do processo de fabricação a ser utilizado está descrito no item 4.3.4, entretanto, pode-se citar um conjunto “base” de processos de fabricação utilizados de maneira geral os quais serão listados a seguir.

D. Processos de manufatura subtrativa ou convencional:

Estes tipos de processo são bastante utilizados em todas as fases do processo de fabricação de *spare parts*, todavia foi frequentemente utilizado para peças mais simples e de confecção única, tais como eixos, alavancas e outras peças. O processo de manufatura subtrativa ou convencional é composto de fresamento, torneamento, retífica e plainagem e tem como principal característica a retirada mecânica de material de um bloco bruto com a finalidade de fabricar a peça definida.

Os processos de fabricação convencional podem ser feitos em máquinas de comando numérico ou em máquinas manuais, dependendo da demanda específica.

B. Processos de manufatura aditiva:

O processo de manufatura aditiva, conhecido também como impressão 3D, possui diferentes tecnologias para a fabricação das peças. No caso dos processos utilizados, foram utilizadas a tecnologia FDM, a tecnologia SLA, a tecnologia SLS e a tecnologia DMLS para diversas fases da confecção das *spare parts*.

Segundo a empresa 3dlab: “Essa tecnologia utiliza um polímero em forma de filamento sólido que é aquecido e depositado na superfície de impressão. Camada após camada a peça é construída.”

Estes tipos de impressoras variam grandemente de tamanhos, formas e preços, sendo que cada modelo possui sua devida limitação e vantagem. A descrição das impressoras FDM utilizadas no projeto estará na seção VI do presente relatório.

Segundo a empresa EngiPrinters: “o SLA é um método aditivo: os modelos são construídos camada por camada. O SLA, no entanto, usa um foto-polímero

curável – tipicamente uma resina líquida – que é endurecido pela aplicação de luz focalizada ou luz UV (esse processo é chamado de cura)”.

Este tipo de impressora é comumente utilizado para peças com riqueza de detalhes e superfícies complexas. Outro ponto interessante é que as resinas utilizadas podem ter diferentes características mecânicas.

Segundo a empresa 3dlab: “É um dos tipos de impressão 3D em que uma fonte de energia térmica induz seletivamente a fusão entre partículas de pó dentro de uma área de construção para criar um objeto sólido. Muitos dispositivos de Fusão em Cama de Pó também empregam um mecanismo para aplicação e alisamento de pó simultâneo a um objeto que está sendo fabricado, então o item final é envolto e suportado em pó não utilizado.”

Este tipo de impressora é comumente utilizado para peças com riqueza de detalhes e superfícies complexas utilizando materiais poliméricos, tais como o Nylon.

Segundo a empresa 3dlab: “São processos de impressão 3D que produzem objetos sólidos, usando uma fonte térmica para induzir a fusão entre partículas de pó metálico uma camada de cada vez. A maioria dessas tecnologias empregam mecanismos para adicionar pó à medida que o objeto é construído, resultando no componente final envolvido no pó de metal. No entanto, as principais variações nessas tecnologias vêm da utilização de diferentes fontes de energia: lasers ou feixes de elétrons.”

Este tipo de impressora é comumente utilizado para peças que necessitam de propriedades mecânicas mais resistentes ou metálicas e que possuem superfícies complexas utilizando materiais metálicos diversos, tais como o aço inox, titânio e outros.

C. Processos de Resinagem, fundição e Injeção de plástico:

Algumas peças podem necessitar de processos de produção seriada e simples, o que faz com que processos convencionais de construção sejam empregados. Nestes processos, se enquadram o processo de fundição em metais e de injeção em plástico.

D. Processo de fabricação especial:

Similarmente aos processos de usinagem convencional, existem outros dois tipos de máquinas que são consideradas como máquinas especiais. No caso específico do projeto, tem-se a eletro erosão à fio e uma retífica cilíndrica de interiores.

A máquina de eletro erosão é classificada como máquina especial visto que a mesma retira material de um bloco bruto utilizando a diferença de potencial elétrico entre o fio e o bloco, não tendo um contato mecânico entre a peça e o fio.

Em relação a retífica cilíndrica de interiores, o processo é similar ao de uma retífica comum, porém o acabamento é dado dentro de superfícies internas e interiores, tais como cavidades cilíndricas ou elípticas.

6. Conclusões

Após a análise do conjunto de ensaios realizados, concluiu-se que é possível utilizar peças fabricadas através de DMLS para substituir peças obtidas através da manufatura tradicional. Entretanto, para isso são necessárias certas ressalvas pois a orientação de impressão influencia diretamente nas propriedades intrínsecas ao material. Conforme descrito anteriormente, há uma grande diferença do comportamento mecânico das peças quando estas passam, ou não, pelo processo de tratamento térmico. Além disso, a análise com diferentes orientações indicou que peças impressas na posição *upright* são frágeis e que, neste caso, peças impressas nas posições *flat* e *on-edge* possuem comportamentos semelhantes e melhores que o encontrado para o material similar obtido tradicionalmente.

Contudo isto não ocorre no ensaio de impacto, conforme descrito no item 5.1.4, onde os resultados para as duas orientações (*flat* e *on-edge*) foram distintos. Em uma das orientações (*on-edge*), os valores encontrados foram semelhantes ao que é encontrado tradicionalmente, enquanto que os corpos de prova da outra orientação (*flat*) foram bem abaixo, comparativamente. As imagens feitas destes corpos de prova no MEV indicam que existem elementos que muito provavelmente são grãos que não foram devidamente sinterizados durante a produção e isto pode ser um dos motivos para a fragilidade do material. De certa forma, isto também foi observado no ensaio de fadiga.

Adicionalmente, com os ensaios de dureza e rugosidade, observou-se que existe uma diferença no resultado final de produção de uma peça dependendo de seu posicionamento na mesa de impressão. Isto pode ser uma característica do processo ou do equipamento da empresa EOS.

Conclui-se que é necessário considerar que ainda existem limitações nesta tecnologia, como por exemplo o que ocorreu com os corpos de prova do ensaio de tração que foram impressos na vertical. Observou-se que a máquina não foi capaz de manter o raio previsto pelo arquivo tridimensional e desta forma falhou de forma inesperada.

Apesar destas considerações, a peça final obtida possui boas propriedades mecânicas, em alguns momentos até mesmo superando as propriedades do material original (UNS S15500) como nos ensaios de tração.

7. Recomendações

Os resultados obtidos neste trabalho permitem destacar pistas de continuação do estudo que poderiam ser implementados em trabalhos futuros, a saber:

- Execução de mais ensaios de fadiga com uma maior variedade de deformações e variação de orientação.
- Estudo comparativo com outros tipos de matérias primas de impressão 3D por tecnologia DMLS;
- Avaliação do impacto de variação das condições operacionais do equipamento durante a fabricação;
- Análise de outras orientações pra comparação e possível obtenção de uma orientação otimizada de fabricação.

8. Referência Bibliográfica

3D HUBS. How does part orientation affect a 3D Print?. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print/#introduction>> Acessado em: dezembro de 2021.

AK STEEL HOLDINGS CORPORATION. Disponível em: <<https://www.aksteel.com/sites/default/files/2018-12/15-5-ph-stainless.pdf>> Acessado em: abril de 2021.

ALLWOOD, J. *et al.* Material efficiency: a white paper. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, p. 362–381. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. **E 10**. Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. **E 18**. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. **E 23**. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. **E 606**. Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. **E 8**. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. **E 92**. Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. 2017.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – ASME. **B46.1**. Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay). 2002.

ANGUS, H. The Significance of Hardness. **Wear**. Elsevier, v.54, p. 33-78. 1979

ASM INTERNATIONAL. **Atlas of Stress-Strain Curves**. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6402**. Execução de desenhos técnicos de máquinas e estruturas metálicas. 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8404**. Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 4287**. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. 2002.

BAUER, F.; SCHRAPP, M.; SZIJARTO, J. Accuracy analysis of a piece-to-piece reverse engineering workflow for a turbine foil based on multi-modal computed

tomography and additive manufacturing. **Precision Engineering**, v. 60(August), p. 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.07.008>. 2019.

BÖHME, W. Results of a DVM Round Robin on Instrumented Charpy Testing. **European Structural Integrity Society**, p. 189–196. 2002.

BONNARD, R. *et al.* Hierarchical object-oriented model (HOOM) for additive manufacturing digital thread. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 50, Issue January. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.11.003>. 2017.

BONNARD, R. *et al.* STEP-NC digital thread for additive manufacturing: data model, implementation and validation. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 31(11), p. 1141–1160. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1509130>. 2018.

BOSH. Indústria 4.0: muito além da automação. Disponível em: <<https://www.bosch.com.br/industria-4-0>>. Acessado em: julho de 2021.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering - An Introduction**. 8ª ed. John Wiley & Sons, Inc. 2009.

CASTRO, J. T. P.; MEGGIOLARO, M. A. **FADIGA - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço**, Volume I. Lexington, Kentucky, Estados Unidos: CreateSpace. 2009.

CHAKRABARTI, A.; ARORA, M. **Industry 4.0 and Advanced Manufacturing**, 1st ed. Springer Singapore. 2019.

CHAO, Y.; JR., J. W.; SANDS, R. Charpy impact energy, fracture toughness and ductile–brittle transition temperature of dual-phase 590 Steel. **Materials & Design**, v. 28, p. 551–557. 2007.

CUI, W. A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 7, p. 43–56. 2002.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. McGraw-Hill. 1988.

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials 4th Edition**. Pearson. 2013.

EOS GMBH. Disponível em: <<https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/dmls-metal-materials>> Acessado em: fevereiro de 2022.

EOS GMBH. Open and Flexible: EOS Part Property Management Provides both Individualization and Standardization. Disponível em: <https://cdn0.scrvt.com/eos/7e99ba072eca9ad8/305801d70a4a/EOS-Whitepaper_EN_V2_Web.pdf> Acessado em: janeiro de 2020.

EOS GMBH. PH1 datasheet. Disponível em: <<https://gpiprototype.com/pdf/EOS-StainlessSteel-PH1.pdf>> Acessado em: dezembro de 2019.

GADELMAWLA, M. M. E. S. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 123, p. 133-145. 2002.

GERE, J. M.; GOODNO, B. J. **Mechanics of Materials**. 9th Edition. 2018.

HANON, M. M.; MARCZIS, R.; ZSIDAI, L. Anisotropy Evaluation of Different Raster Directions, Spatial Orientations, and Fill Percentage of 3D Printed PETG Tensile Test Specimens. **Key Engineering Materials**, v. 821, p. 167-173. 2019.

HERTZBERG, R. W. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. 4ª ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1995.

INOVAÇÃO INDUSTRIAL. Indústria de óleo e gás 4.0: o que muda no setor?. Disponível em: <<https://inovacaoindustrial.com.br/industria-de-oleo-e-gas/>>. Acessado em: dezembro de 2021.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. **Manufacturing Engineering and Technology**. 4th Edition. Prentice-Hall. 2001.

KRAHMER, D. M., *et al.* Alternatives for Specimen Manufacturing in Tensile Testing of Steel Plates. **Experimental Techniques**, v. 40, p. 1555-1565. 2016.

KREIGER, M. A. *et al.* Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. **Journal of Cleaner Production**, v. 70, p. 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.009>. 2014.

LADANI, L.; SADEGHILARIDJANI, M. Review of Powder Bed Fusion Additive Manufacturing for Metals. **Metals**, v. 11, p. 1391. Doi: 10.3390/met11091391. 2021.

LIVERANI, E. *et al.* Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 249, p. 255–263. 2017.

LUM, E. *et al.* Analysis of the Effects of Additive Manufacturing on the Material Properties of 15-5PH Stainless Steel. **58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference**. Grapevine. doi:10.2514/6.2017-1142. 2017.

MA, C.P.; GUAN, Y.C.; ZHOU, W. Laser polishing of additive manufactured Ti alloys. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 93, p. 171–177. 2017.

MANUFATURA DIGITAL. Desenvolvimentos da Impressão 3D na Petrobras. Disponível em: <<https://www.manufaturadigital.com/desenvolvimento-impressao-3d-petrobras/>>. Acessado em: dezembro de 2021.

MATILAINEN, V. *et al.* Characterization of Process Efficiency Improvement in Laser Additive Manufacturing. 8th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014. **Physics Procedia**, p. 317-326. 2014.

NICOLAS-SILVENTE, A. I. *et al.* Influence of the Titanium Implant Surface Treatment on the Surface Roughness and Chemical Composition. **Materials**, v. 13. 2020.

OLDFIELD, W. Fitting Curves to Toughness Data. **Journal of Testing and Evaluation**, p. 326-333. 1979.

PAL, S. *et al.* The Effect of Post-processing and Machining Process Parameters on Properties of Stainless Steel PH1 Product Produced by Direct Metal Laser Sintering. **Procedia Engineering**, v. 149, p. 359-365. 10.1016/j.proeng.2016.06.679. 2016.

PARIS, H. *et al.* Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65(1), p. 29–32. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.036>. 2016.

PAULIC, M. *et al.* Reverse engineering of parts with optical scanning and additive manufacturing. **Procedia Engineering**, v. 69, p. 795–803. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.056>. 2014.

PRABHAKAR, P. *et al.* Computational Modeling of Residual Stress Formation during the Electron Beam Melting Process for Inconel 718. **Additive Manufacturing**, v. 7, p. 83-91. 2015.

REEVES, P. **Additive Manufacturing—A supply chain wide response to economic uncertainty and environmental sustainability**. Economist Limited, The Silversmiths, Crown Yard, Wirksworth, Derbyshire, DE4 4ET, UK. 2009.

ROGERS, M. G.; PLUMTREE, A. A Comparison of Charpy and Izod Test Modes for Polystyrene. **Polymer Testing**, v. 11, p. 13-21. 1992.

SAGAR, S., *et al.* Room-Temperature Charpy Impact Property of 3D-Printed 15-5 Stainless Steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 27, p. 52–56. 2017.

SHARMA, A.; OH, M. C.; AHN, B. Recent Advances in Very High Cycle Fatigue Behavior of Metals and Alloys—A Review. **Metals**, v. 10. 2020.

SOMTHONG, T.; YANG, Q. Average surface roughness evaluation using 3-source photometric stereo technique. **International Journal of Metrology and Quality Engineering**. 2016.

Stratasys Ltd. Stratasys web site. Disponível em: <<https://www.stratasys.com/www.stratasys.com>> mss_fdm_nylon6_1117a> Acessado em: janeiro de 2021.

TERÁN, G. *et al.* Estimation of fracture toughness K_{IC} from Charpy impact test data in T-welded connections repaired by grinding and wet welding. **Engineering Fracture Mechanics**, p. 351-359. 2016.

THE MATHWORKS, INC. 2021. Retrieved from MathWorks: Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/lsqcurvefit.html#buuhcjo-options>>. Acesso em: abril de 2022.

WATSON, J. K.; TAMINGER, K. M. B. A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 1316–1322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.009>. 2018.

WEST, G. An observation on Mohs' Scale of Hardness. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, 19, pp. 203-205. 1986.

XOMETRY. Design Guide: Selective Laser Sintering (SLS). Disponível em: <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/340051/Design_Guides/Xometry_DesignGuide_SLS.pdf> Acessado em: dezembro de 2019.

XU, Z. *et al.* Effects of laser polishing on surface morphology and mechanical properties of additive manufactured TiAl components. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 65, p. 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.014>. 2021.

ZELTMANN, S. E. *et al.* Manufacturing and Security Challenges in 3D Printing. **The Minerals, Metals & Materials Society**, p. 1872-1881. doi:10.1007/s11837-016-1937-7. 2016).

ZHILAO, F. *et al.* Laser Polishing of Additive Manufactured Superalloy. **Procedia CIRP**, v. 71, p. 150–154. doi:10.1016/j.procir.2018.05.088. 2018.

ZITELLI, C., FOLGARAIT, P., SCHINO, A. Laser Powder Bed Fusion of Stainless Steel Grades: A Review. **Metals**. 9. 731. 10.3390/met9070731. 2019.