

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

LUÍS HENRIQUE GUARNIERI FONTANELLA

ANÁLISE DA LIGAÇÃO METALÚRGICA ENTRE PEÇA FABRICADA POR FUSÃO  
SELETIVA A LASER E METAL BASE

Joinville

2017

LUÍS HENRIQUE GUARNIERI FONTANELLA

ANÁLISE DA LIGAÇÃO METALÚRGICA ENTRE PEÇA FABRICADA POR FUSÃO  
SELETIVA A LASER E METAL BASE

Trabalho apresentado ao Curso de  
Graduação em Engenharia Naval da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de Engenheiro Naval.

Orientador: Dr. Adriano Fagali de Souza

Joinville  
2017

ANÁLISE DA LIGAÇÃO METALÚRGICA ENTRE PEÇA FABRICADA POR FUSÃO  
SELETIVA A LASER E METAL BASE

LUÍS HENRIQUE GUARNIERI FONTANELLA

Este trabalho foi julgado e aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Naval pela comissão examinadora e pelo curso de graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 01 de Dezembro de 2017

---

Dr. Luis Fernando Peres Calil  
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

---

Dr. Adriano Fagali de Souza  
Presidente/Orientador

---

Dr. Alexandre Mikowski  
Membro

---

Dr. Edson Costa Santos  
Membro

Dedico este trabalho aos meus pais que me deram todo suporte, apoio e educação para minha formação, e a minha namorada Dailiane C. de Azeredo que esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais José Luiz Fontanella e Joice Guarnieri Fontanella, que lutaram muito para me oferecer as melhores condições de estudo, sempre me incentivando, aconselhando e entendendo a minha ausência durante essa longa jornada.

A minha namorada e melhor amiga Dailiane C. de Azeredo pelas inúmeras palavras de apoio e incentivo, pelo companheirismo e fidelidade, pela paciência e compreensão nessa jornada.

Ao professor e orientador Dr. Adriano Fagali de Souza pela orientação, disponibilidade e constante incentivo. Por me apresentar ao processo SLM e pela confiança quando selecionado para participar do grupo de pesquisa GPCAM.

Ao grupo de pesquisa GPCAM e aos colegas do grupo, em especial ao Felipe Marin.

Ao Dr. Edson Costa Santos pela oportunidade dada de trabalhar com SLM, pela confiança e por todo conhecimento repassado.

Aos Institutos SENAI de Inovação em Processamento a Laser e Sistemas de Manufatura, pela oportunidade de conhecer e trabalhar com o processo SLM. Em especial ao diretor dos institutos André Marcon Zanatta, ao amigo Bruno Paulo Zluhan por todo conhecimento passado e apoio desde o primeiro momento, aos demais colegas e amigos da plataforma de fusão seletiva a laser: Henrique Rodrigues Oliveira, Victor Lira Chastinet e Gabriel Giovanetti pela ajuda em todas as fases deste trabalho. A todos os demais colegas dos institutos, em especial ao Alexsandro Rabelo, Ivonete Floriano Ostrovski, André Luís Schegoscheski, Alexsandro Brandenburg Marquardt e Fernando Kasten que sempre com muito companheirismo não mediram esforços para ajudar no que foi preciso.

A Universidade Federal de Santa Catarina pela estrutura e corpo docente de alta qualidade fornecida durante toda minha graduação.

“Na vida não importa o que esteja fazendo,  
faça sempre o seu melhor”

Ayrton Senna

## RESUMO

A fusão seletiva a laser (*Selective Laser Melting* - SLM) é um processo de manufatura aditiva onde a peça é construída camada por camada através da fusão do pó metálico por um feixe laser, permitindo a fabricação de peças complexas difíceis, inviáveis ou até mesmo impossíveis de serem obtidas por processos convencionais de usinagem. No entanto, o processo SLM tem um custo elevado, principalmente pelo valor da matéria prima e da hora máquina. Uma forma de reduzir os custos e o tempo de fabricação, é a utilização do processo apenas na região que se necessita uma otimização, sendo o restante da peça confeccionada por um processo de manufatura convencional. Assim, este trabalho avalia a interação metalúrgica entre um aço base usinado e a peça fabricada por SLM. Foram fabricados corpos de prova por SLM sobre o metal base com 5 níveis diferentes de velocidade de escaneamento, para análise da densidade relativa, profundidade de interação, microdureza e resistência à tração. Os resultados apresentam uma grande influência da velocidade de escaneamento na densidade das amostras, na profundidade de interação da peça com o metal base e na resistência à tração dos corpos de prova. Todos os corpos de prova de tração romperam na região da peça fabricada por SLM, indicando que os defeitos presentes nas regiões fabricadas por SLM são mais sensíveis ao esforço mecânico do que a ligação metalúrgica entre o material depositado e o metal base.

**Palavras-Chave:** Manufatura aditiva; Fusão Seletiva a Laser, Ligação metalúrgica, Profundidade de interação, Propriedades mecânicas

## ABSTRACT

Selective Laser Melting (SLM) is an additive manufacturing process where the part is fabricated layer by layer through melting of the metal powder by a laser beam, allowing the production of complex parts that are difficult, unfeasible or even impossible to be manufactured through conventional machining processes. However, the SLM process has a high cost, mainly because of the value of the feedstock and the machine hour rate. One of the strategies of reducing costs and manufacturing time is to process the region of the part that requires an optimization on a part made by conventional processes. Thus, this work evaluates the metallurgical interaction between a machined base steel and the part fabricated by SLM. SLM specimens were fabricated on the base metal with 5 different levels of scanning speed, for analysis of the relative density, interaction depth, microhardness and tensile strength. The results show a great influence of the scanning speed on the samples density, the depth of interaction of the part with the base metal and the tensile strength of the specimens. All tensile specimens ruptured in a section of the SLM manufactured part, indicating that the defects present in those regions are more sensitive to mechanical stress than the metallurgical bond between the deposited material and the base metal.

**Key words:** Additive Manufacturing; Selective Laser Melting; Metallurgical bonding; Interaction depth; Mechanical properties

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ciclo de fabricação do processo SLM.....	15
Figura 2 – Diferentes porcentagens de sobreposição de filetes.....	17
Figura 3 – Estratégia de fabricação Cross-Hatching.....	18
Figura 4 – Gráfico de porosidade por velocidade de escaneamento.....	22
Figura 5 – Dureza Vickers em função da velocidade de escaneamento.....	22
Figura 6 – Comparação da resistencia a tração entre diferentes velocidades.....	24
Figura 7 – Densidade obtida para as diferentes velocidades e valores de hatch.....	26
Figura 8 – Gráfico com a largura média das trilhas para diferentes velocidades.....	27
Figura 9 – Imagem dos corpos de prova no programa Magics e após fabricação.....	30
Figura 10 – Máquina de SLM Concept Laser M2 Cusing.....	30
Figura 11 – Pó metálico com aumento de 500 vezes.....	32
Figura 12 – Sentido de corte das amostras para análise.....	33
Figura 13 – Exemplo de relatório obtido através do programa Multiphase Grains Graphite.....	35
Figura 14 – Perfil de indentações analisadas.....	36
Figura 15 – Análise de interação realizada no estereoscópio Discovery.V8 Carl Zeiss.....	37
Figura 16 – Corpo de prova de tração de acordo com a norma ASTM – 370.....	38
Figura 17 – Corpos de prova de tração fabricados sobre o metal base e após a usinagem.....	38
Figura 18 – Porosidade encontrada em cada estudo, aumento 50 vezes.....	39
Figura 19 – Exemplo de poros irregulares e arredondados.....	40
Figura 20 – Densidade relativa em função da velocidade de escaneamento.....	41
Figura 21 – Distribuição da microdureza ao longo do perfil analisado.....	42
Figura 22 – Profundidade de interação Peça/Metal Base, aumento de 25 vezes.....	43
Figura 23 – Profundidade de interação em função da velocidade de escaneamento. .....	44
Figura 24 – Tensão máxima de tração por velocidade de escaneamento laser.....	44
Figura 25 – Corpos de prova após a ruptura.....	45
Figura 26 – Resistência a tração, densidade relativa e velocidade de escaneamento. .....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço 13-8. ....	20
Tabela 2 – Composição química do aço Corrax®. ....	20
Tabela 3 – Parâmetros de fabricação. ....	21
Tabela 4 – Parâmetros estudados. ....	24
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de tração para corpos de prova com diferentes potencias laser. ....	25
Tabela 6 – Parâmetros utilizados no estudo. ....	26
Tabela 7 – Parâmetros usados na fabricação dos estudos. ....	29
Tabela 8 – Principais especificações da Concept Laser M2 Cusing. ....	31
Tabela 9 – Comparação entre propriedades mecânicas e térmicas dos aços Corrax® e 13-8. ....	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>3D</b>	Tridimensional.
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
<b>AM</b>	Manufatura Aditiva ( <i>Additive Manufacturing</i> ).
<b>CAD</b>	Desenho Auxiliado por Computador ( <i>Computer Aided Design</i> ).
<b>DEV</b>	Densidade de Energia Volumétrica
<b>HP</b>	Compressão a Quente (Hot Pressing).
<b>HRC</b>	Dureza Rockwell C (Hardness Rockwell C).
<b>HV</b>	Dureza Vickers (Vickers Hardness).
<b>MPa</b>	Mega Pascal.
<b>PH</b>	Endurecido por Precipitação ( <i>Precipitation Hardenable</i> ).
<b>SLM</b>	Fusão Seletiva a Laser ( <i>Selective Laser Melting</i> ).
<b>SLS</b>	Sinterização Seletiva a Laser (Selective Laser Sintering).

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
2.1. FUSÃO SELETIVA A LASER (SLM) .....	14
2.1.1. <b>Parâmetros do processo SLM</b> .....	15
2.1.2. <b>Materiais utilizados no processo SLM</b> .....	19
2.2. AÇOS INOXIDÁVEIS POR PRECIPITAÇÃO (PH) .....	19
2.2.1. <b>Aço PH 13-8 Mo</b> .....	19
2.2.2. <b>Aço Corrax®</b> .....	20
2.3. ESTUDOS REALIZADOS NA ÁREA DE SLM .....	21
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
3.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	29
3.2. MÁQUINA DE FUSÃO SELETIVA A LASER .....	30
3.3. MORFOLOGIA E TAMANHO DE PARTÍCULAS DO PÓ METÁLICO .....	31
3.4. ESCOLHA DO METAL BASE .....	32
3.5. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISES .....	33
3.5.1. <b>Preparação metalográfica das amostras</b> .....	33
3.5.2. <b>Análise da densidade</b> .....	34
3.5.3. <b>Análise da dureza Vickers</b> .....	35
3.5.4. <b>Análise da profundidade de interação peça/metal base</b> .....	36
3.5.5. <b>Ensaio de Tração</b> .....	37
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>39</b>
4.1. ANÁLISE DA DENSIDADE RELATIVA DAS AMOSTRAS FABRICADAS POR SLM .....	39
4.2. ANÁLISE DO PERFIL DE DUREZA VICKERS .....	42
4.3. ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DE INTERAÇÃO PEÇA/METAL BASE .....	43
4.4. ENSAIO DE TRAÇÃO .....	44
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>47</b>
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	48
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>49</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à alta competitividade do mercado atual, as indústrias estão buscando aperfeiçoar seus métodos de produções, buscando processos de fabricação mais rápidos, capazes de fabricar peças com geometrias complexas e que tenham uma melhor eficiência energética. Tendo em vista estes requisitos uma técnica de fabricação que vem chamando a atenção da indústria moderna é a Manufatura Aditiva, do inglês *Additive Manufacturing* (AM). Ao contrário dos métodos tradicionais, essa técnica adiciona material ao invés de retirá-lo, além disso, possibilita a fabricação de peças com geometrias complexas com relativa facilidade comparado aos processos convencionais como a usinagem.

Dentre os processos de AM, a fusão seletiva a laser (do inglês, *Selective Laser Melting* – SLM) se destaca pela capacidade de fabricar peças próximas da densidade total, com propriedades mecânicas similares às peças fabricadas com aços forjados e laminados e a utilização de uma vasta gama de materiais metálicos (BADROSSAMAY; CHILDS, 2007; YADROITSEV; BERTRAND, 2010). O processo de fabricação por SLM inicia com a criação de um modelo CAD 3D da peça a ser fabricada, com auxílio de um programa específico de manufatura aditiva, o modelo é dividido em seções transversais com espessura pré-definida, doravante chamadas de camadas. A cada ciclo uma camada de pó metálico é depositada sobre o substrato. Um feixe de laser funde o pó conforme a geometria da camada específica, a poça fundida solidifica e um novo ciclo é iniciado, esse ciclo ocorre camada por camada até a conclusão da peça (MARQUES, 2014; ZLUHAN, 2015).

A liberdade geométrica e projetual que o processo SLM proporciona, possibilita a fabricação de produtos customizados para a área médica e odontológica, peças monolíticas principalmente para a indústria aeronáutica e aeroespacial e na indústria de moldes para injeção de polímeros apresenta um grande diferencial que são os canais de refrigeração complexos (*Conformal Cooling*), sendo que todas estas peças seriam impossíveis, inviáveis ou de difícil fabricação pelos métodos convencionais (MARQUES, 2014). Na indústria naval, o processo de SLM pode ser

empregado, por exemplo, para a fabricação de peças com otimização topológica, principalmente em embarcações de competições onde se busca diminuir a massa a fim de melhorar a eficiência.

Devido principalmente ao alto custo do pó metálico e o preço da hora máquina, as peças fabricadas por SLM tendem a ter um custo mais elevado comparado com peças fabricadas por métodos convencionais, principalmente para peças maciças e de maiores proporções, peças com geometria simples e sem nenhuma otimização se tornam inviável. Em alguns casos, no entanto, a otimização da peça se faz necessária em uma pequena região, sendo oportuno a utilização de métodos convencionais para fabricação de grande parte da peça e do processo SLM apenas na região com a otimização pretendida.

Este trabalho tem por objetivo, estudar a fabricação de peças empregando o processo SLM com uso de um metal base usinado, resultando em economia de tempo e redução de custos da fabricação. Será avaliado a interação entre a amostra fabricada pelo processo de fusão seletiva a laser com o metal base feito de aço inoxidável laminado.

Dentre os objetivos específicos, pode-se citar:

- Identificar material base com características próximas ao aço usado na fabricação dos corpos de prova por SLM;
- Fabricar corpos de prova por SLM sobre o metal base;
- Atribuir como variável de entrada 5 níveis de velocidade;
- Avaliar propriedades dos corpos de prova fabricados por SLM e da ligação entre os corpos de prova e o metal base.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do estudo realizado nesse trabalho, apresentando os principais parâmetros do processo, informações sobre a matéria prima utilizada na fabricação e alguns estudos já realizados na área.

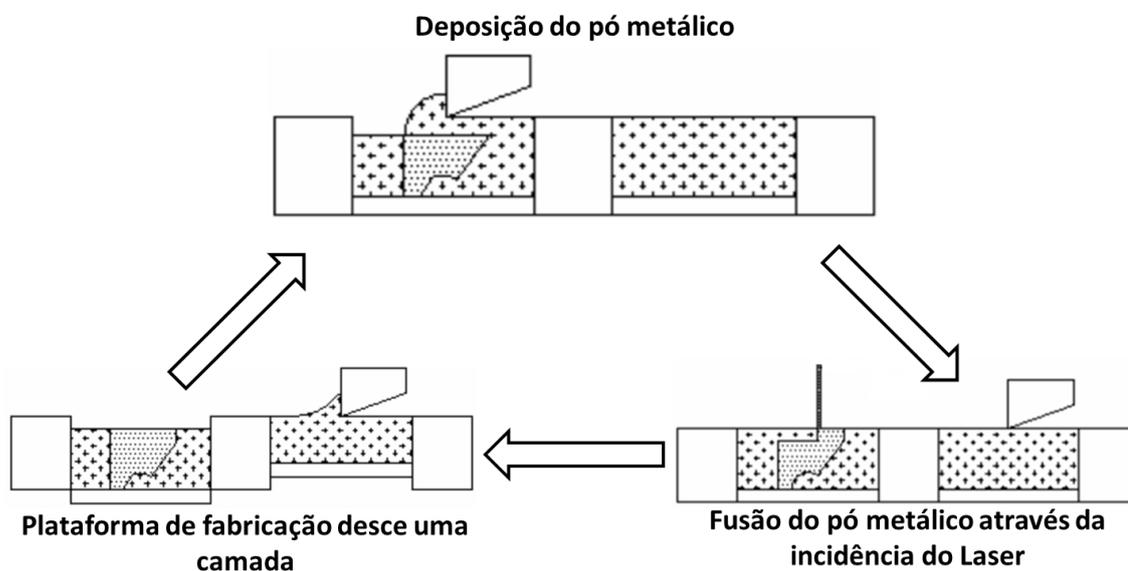
### 2.1. FUSÃO SELETIVA A LASER (SLM)

O processo de Fusão Seletiva a Laser (SLM) do inglês *Selective Laser Melting*, é uma técnica que se diferencia por fabricar peças com geometrias complexas, com densidade teórica próxima dos 100% e com propriedades mecânicas semelhantes aos componentes fabricados com aços forjados ou laminados (BADROSSAMAY; CHILDS, 2007; KRUTH et al., 2005; YADROITSEV; BERTRAND, 2010). A tecnologia SLM é uma evolução do processo de Sinterização Seletiva a Laser (SLS), onde o material é apenas sinterizado, resultando em peças com 45% a 85% da densidade teórica (SANTOS et al., 2006).

O processo de fabricação por SLM inicia com a criação de um modelo CAD 3D, um programa específico de manufatura aditiva divide o componente em camadas pré-definidas, cada camada possui uma informação específica da geometria relacionada, parâmetros, suporte físico e a trajetória de varredura, esse arquivo é enviado para a máquina SLM onde se inicia o ciclo de fabricação: deposição de uma camada do pó metálico, fusão da camada pela incidência do laser seguida da re-solidificação pelo resfriamento da poça fundida, plataforma de fabricação se move uma espessura de camada, e uma nova camada de pó é depositada, criando ligação metalúrgica entre as camadas, até o componente ser concluído (AHMADI et al., 2016;

ZLUHAN, 2015). A Figura 1 exemplifica o ciclo do processo de fabricação de peças pelo processo SLM.

Figura 1 – Ciclo de fabricação do processo SLM.



Fonte: Campanelliet. al. (2010)

### 2.1.1. Parâmetros do processo SLM

Segundo Rashid et al., (2017), o processo SLM é um processo complexo de fabricação que envolve a compreensão da interação entre vários parâmetros relacionados a máquina, matéria prima e aspectos de fabricação. As características do pó metálico são dependentes do fornecedor sendo geralmente atomizado a gás, com partículas de formato esférico e com uma faixa de tamanho entre 15-45  $\mu\text{m}$ . Além disso, alguns parâmetros da máquina SLM, como o tipo do laser e o comprimento de onda do laser, são em geral parâmetros fixos do equipamento. Assim, a possibilidade de melhorar o desempenho dos produtos construídos por SLM se dá pela otimização dos parâmetros do processo como potência do laser, velocidade de escaneamento, espessura de camada, sobreposição de filetes (*overlap*), distância entre filetes (*hatch*), estratégia de escaneamento, entre outros.

Segundo Aboulkhair et al. (2014), dentre os vários parâmetros do processo de fusão seletiva a laser, a velocidade de escaneamento, o espaçamento e estratégia de escaneamento, a potência do laser e a espessura da camada são os principais deles.

A maior parte das pesquisas realizadas em SLM, observam estas variações de parâmetros e suas influências, o que evidencia a importância da correta seleção dos mesmos. A janela de parâmetros e suas combinações impactam diretamente na qualidade final das peças, como por exemplo, na morfologia e quantidade de poros (densidade relativa) e nas propriedades mecânicas (YAP et al., 2016). Os parâmetros principais do processo SLM são apresentados a seguir.

#### 2.1.1.1. Potência Laser

A potência do laser está relacionada ao fluxo de energia que o laser fornece. Esta energia luminosa é concentrada em uma área (diâmetro do feixe laser) e se converte em calor que funde o material, ou seja, a potência laser é a quantidade de energia por tempo fornecida pelo sistema de geração do laser (ZLUHAN, 2015).

#### 2.1.1.2. Velocidade de escaneamento laser

Com o aumento da velocidade de movimentação do laser, a largura do filete e a área re-fundida da camada anterior são reduzidas, reduzindo também, em velocidades mais extremas, a qualidade de fusão do filete criado. Logo, é necessário encontrar uma relação ideal entre a velocidade de escaneamento do laser e os outros parâmetros (MARQUES, 2014).

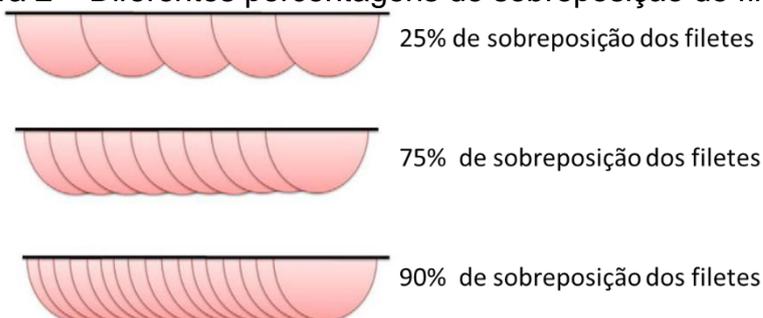
#### 2.1.1.3. Espessura de camada

A espessura de camada quando muito espessa não permite uma boa ligação metalúrgica entre camadas podendo ocasionar o surgimento de poros devido à falta de fusão do pó metálico. Contudo, quando a espessura é muito fina, propicia a refusão de múltiplas camadas prejudicando as propriedades da peça, além de aumentar o tempo de fabricação (YASA; KRUTH, 2011). Desta forma, um processo eficiente deve conciliar ambas as implicações e levar em consideração os tamanhos das partículas do pó utilizado (MARQUES, 2014).

#### 2.1.1.4. Sobreposição e distância de filetes

A sobreposição de filetes (*overlap*), favorece a fabricação de peças mais densas, com menor rugosidade e tensões residuais. Cada filete sobrepõe o filete anterior em termos de porcentagem, refundindo parte do filete anterior. A Figura 2 apresenta um exemplo de *overlap* de 25%, 75% e 90% (YASA; KRUTH, 2011).

Figura 2 – Diferentes porcentagens de sobreposição de filetes.



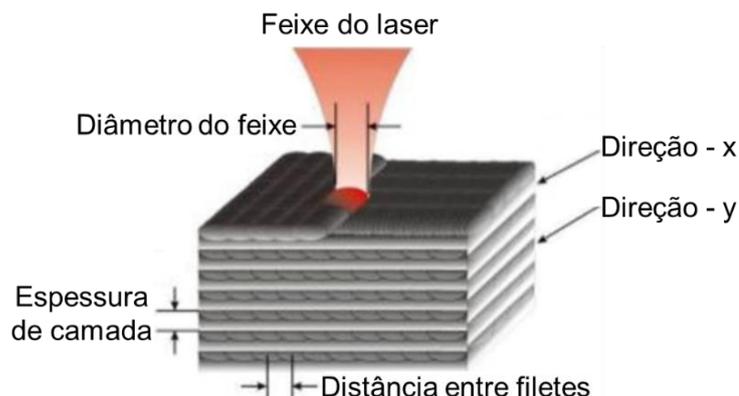
Fonte: Yasa; Kruth, (2011)

A distância entre o centro de um filete ao centro do filete vizinho é chamada de *hatch*. Diferentes parâmetros influenciam nas distâncias, bem como, espessura da camada de pó, diâmetro do feixe do laser, velocidade de varredura do laser e o material utilizado. Conhecer esta distância é de extrema importância, pois espaços entre filetes geram poros (vazios) que afetam as propriedades mecânicas da peça final (MARQUES, 2014).

#### 2.1.1.5. Estratégia de escaneamento

Segundo Zeng (2015) as estratégias de varredura influenciam a evolução térmica e resultam em comportamento de deformação diferente em peças fabricadas por SLM, estratégias de varredura podem ajudar a reduzir gradientes térmicos, deformação e melhorar a densidade da peça. A Figura 3 apresenta um exemplo de estratégia de escaneamento denominada *Cross-Hatching*, onde a camada a ser fundida é perpendicular à camada anterior (YADROITSEV, 2009).

Figura 3 – Estratégia de fabricação *Cross-Hatching*.



Fonte: Meiners (2012)

#### 2.1.1.6. Densidade de Energia Volumétrica

A Densidade de Energia Volumétrica (DEV), é uma relação constantemente usada nos estudos do processo SLM pois permite a avaliação de um conjunto de parâmetros combinados, melhorando o controle do processo. (GU ET AL. 2012; SALLICA-LEVA, JARDINI; FOGAGNOLO, 2013; THIJS et al., 2010). A DEV pode ser calculada através da Equação 1 apresentada a seguir.

$$DEV = \frac{P}{vht} \left[ \frac{J}{mm^3} \right] \quad (1)$$

Onde P é a potência do laser (W), v a velocidade de escaneamento do laser (mm/s), h a distância entre filetes (mm) e t a espessura de camada (mm). (CIURANA, HERNANDEZ; DELGADO, 2013; GONG et al., 2015; LEARY et al., 2016; MAZUR et al., 2017; PARK; NGUYEN, 2017; RAO et al., 2016; SANDER et al., 2016).

Como é possível observar na Equação 1, o aumento da DEV é diretamente proporcional ao aumento da potência do laser e inversamente proporcional a diminuição da velocidade de escaneamento e/ou diminuição do espaçamento entre filetes e/ou diminuição da espessura de camada. (SALLICA-LEVA, JARDINI; FOGAGNOLO, 2013; THIJS et al., 2010).

### 2.1.2. Materiais utilizados no processo SLM

Na literatura é encontrado um grande número de estudos realizados na área de SLM utilizando diversos materiais, estes incluem: aços e ligas a base de ferro, titânio e suas ligas, Inconel e ligas a base de níquel, alumínio, cobre, magnésio, cobalto-cromo, tungstênio e ouro (YAP et al., 2015). Todos devem ser transformados em pó com formato esférico, com distribuição Gaussiana do tamanho das partículas entre 15-60  $\mu\text{m}$  e devem exibir certas características de escoamento (FISCHER et al., 2003; KEMPEN et al., 2011). Ligas com elevados teores de carbono quando aquecidas e resfriadas rapidamente, como ocorre no processo SLM, sofrem um fenômeno de pré-têmpera conforme as camadas são fabricadas, gerando tensões internas muito elevadas que resultam em trincas. Neste contexto, procura-se substituir estes materiais por ligas com baixos teores de carbono (MARQUES, 2014).

Segundo Marques (2014), na fabricação de insertos para moldes de injeção é comum a utilização do aço AISI 420, no entanto este material possui teor de carbono relativamente alto para o processo SLM, próximo dos 0,40%. Neste caso o aço AISI 420 pode ser substituído pelo aço Corrax® que possui teor de carbono menor que 0,03%, e atende as principais características e propriedades necessárias para o processamento por SLM.

## 2.2. AÇOS INOXIDÁVEIS POR PRECIPITAÇÃO (PH)

Os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação (*Precipitation Hardenable - PH*) são aços nos quais o mecanismo de endurecimento não se dá através do carbono, mas pela precipitação de compostos intermetálicos, estes restringem ou dificultam o movimento das discordâncias na matriz metálica (METAL HANDBOOK, 1998).

### 2.2.1. Aço PH 13-8 Mo

O aço PH13-8Mo (13-8) é um aço de elevada resistência mecânica e alta resistência a corrosão. Este aço possui ductilidade e tenacidade relativamente altas para o nível de resistência atingido. O aço 13-8 é utilizado nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, de extração de petróleo, química e petroquímica, papel e celulose e

na de alimentos (MORENO, 2013). A Tabela 1 apresenta a composição química do aço inoxidável PH13-8Mo.

Tabela 1 – Composição química do aço 13-8.

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	Fe
0,05	0,20	0,10	12,25-13,25	7,5-8,5	2,0-2,5	0,90-1,35	Bal.

Fonte: Metal Handbook (1998)

O carbono é mantido em teores baixos para favorecer a resistência a corrosão e a tenacidade, buscando evitar a formação de carbonetos de cromo nos contornos de grão. O cromo confere resistência a corrosão, através da formação de uma camada superficial de óxido de cromo coerente com a matriz metálica, que impede a contínua penetração de oxigênio no aço, protegendo-o contra o ataque corrosivo. O molibdênio confere resistência a corrosão e endurecimento por solução sólida. O nitrogênio e o alumínio participam diretamente do mecanismo de endurecimento da liga através da formação e precipitação do composto intermetálico NiAl no tratamento térmico de envelhecimento. Por este aço possuir em torno de 1% de alumínio, a presença de nitrogênio requer atenção, devido à forte tendência para formação de nitreto de Al, que reduz a tenacidade (PECKNER; BERNSTEIN, 1977; KLOPP 1988).

### 2.2.2. Aço Corrax®

O aço Corrax® é um aço inoxidável para moldes plásticos, com baixíssimo teor de carbono, e uma boa combinação de propriedades mecânicas. Segundo o fornecedor, foi desenvolvido para moldes de peças complexas e extrusão de plásticos corrosíveis, ideal para moldes de paredes finas por ter alta tenacidade e ser praticamente imune aos efeitos nocivos da eletro-erosão (UDDEHOLM, 2017).

Por possuir excelente resistência mecânica, alta dureza e excelente resistência à corrosão, o aço Corrax® pode ser considerado como a primeira escolha para várias aplicações industriais, como: construção naval, óleo e gás, oceanografia, tecnologias offshore e para a fabricação de moldes de injeção (ASGARI; MOHAMMADI, 2018). A Tabela 2 apresenta a composição química do aço Corrax®.

Tabela 2 – Composição química do aço Corrax®.

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	Fe
0,03	0,30	0,30	12,00	9,20	1,40	1,60	Bal.

Fonte: Concept Laser

Não foram encontrados na literatura estudos sobre a aplicação do aço Corrax® ou do aço 13-8 no processo SLM.

### 2.3. ESTUDOS REALIZADOS NA ÁREA DE SLM

Choi et al., (2017) estudaram a influência da velocidade de escaneamento laser na densidade e microdureza das peças em aço Inconel 718 fabricadas por SLM. A potência laser, a espessura de camada e o *hatch* foram mantidos constantes. A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados no estudo.

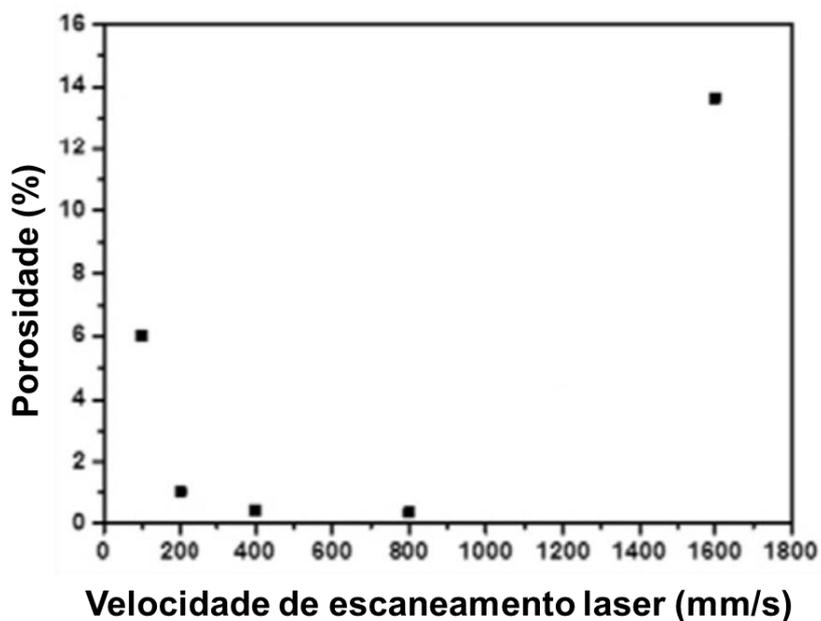
Tabela 3 – Parâmetros de fabricação.

<b>Parâmetros de fabricação</b>	<b>Valores</b>
Potência laser	90 W
Espessura de camada	25 µm
Distância entre filetes ( <i>hatch</i> )	80 µm
Velocidade de escaneamento	100, 200, 400, 800 e 1600 (mm/s)

Fonte: Choi et al., (2017)

Os autores concluíram que a velocidade de escaneamento tem influência significativa na densidade das amostras fabricadas por SLM, em geral, uma maior densidade de energia incidente induzida por uma velocidade de varredura baixa leva a uma melhor fusão do pó metálico. No entanto, para velocidades muito baixas o excesso de energia resulta em uma fusão excessiva no leito do pó, o que pode causar a vaporização de materiais e criar o aprisionamento de gases dentro da poça fundida, resultando em defeitos quase esféricos durante a solidificação. Quando a velocidade de escaneamento foi demasiadamente elevada observaram-se filetes descontínuos em toda a seção transversal juntamente com uma grande quantidade de poros de forma irregular e partículas de pó não fundidas ou parcialmente fundidas. A baixa DEV causada pela alta velocidade de varredura faz com que a poça de fusão diminua de tamanho causando uma solidificação mais rápida não permitindo o preenchimento completo de lacunas com o metal fundido e a ligação entre filetes ou camadas vizinhas. A Figura 4 apresenta o gráfico com as porosidades encontradas nas amostras fabricadas com cada velocidade de escaneamento estudada.

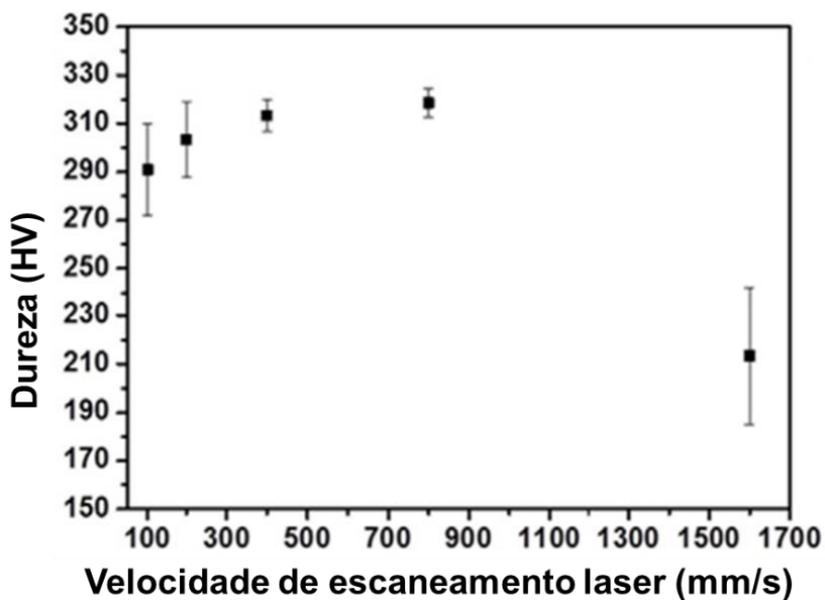
Figura 4 – Gráfico de porosidade por velocidade de escaneamento.



Fonte: Choi et al., (2017)

Os resultados de dureza Vickers também apresentaram influência da velocidade. A Figura 5 apresenta o gráfico de dureza Vickers para cada velocidade de escaneamento estudada (CHOI et al., 2017).

Figura 5 – Dureza Vickers em função da velocidade de escaneamento.



Fonte: Choi et al., (2017)

As amostras com mais poros, principalmente com formato irregular e de maior tamanho, colapsaram facilmente sob a carga durante o teste apresentando dureza

abaixo dos 250 HV<sub>0,5</sub>, já as amostras mais densas apresentaram em média 311,7 HV<sub>0,5</sub>.

Bartolomeu et al., (2017), compararam as propriedades mecânicas e tribológicas de peças fabricadas com o aço 316L pelos métodos de compressão a quente (HP), fusão seletiva a laser (SLM) e fundição convencional. Os corpos de prova provindos do processo SLM foram fabricados com uma potência de 70 W, velocidade de escaneamento de 417 mm/s e espessura de camada de 30  $\mu\text{m}$ .

A microestrutura das amostras revelou grãos retangulares com  $91 \pm 17 \mu\text{m}$  de comprimento para as amostras fabricadas por fundição, as amostras fabricadas por HP apresentaram tamanhos de grãos de aproximadamente  $25 \pm 4 \mu\text{m}$  e as amostras fabricadas por SLM apresentaram um tamanho médio de grãos de  $13 \pm 4 \mu\text{m}$ . Segundo os autores essa diferença ocorre devido a taxa de resfriamento presente em cada processo. As amostras fabricadas por fundição foram submetidas a um resfriamento de 0,5 K/s, para o processo de HP a taxa de resfriamento é de 3 K/s, já nas amostras fabricadas por SLM a taxa de resfriamento varia entre  $10^3$  a  $10^8$  K/s. Esta taxa alta provoca um refinamento considerável dos grãos comparado aos demais processos (BARTOLOMEU et al., 2017).

No ensaio de microdureza os corpos de prova fabricados por SLM apresentaram em média dureza de 229 HV, 40% maior que os corpos de prova fabricados por fundição e 30% maior que os fabricados por HP. O ensaio de tração revelou que os corpos de prova fabricados por SLM apresentaram maior limite de escoamento (41%) e maior resistência a tração (144%) que corpos de prova fabricados por fundição. Segundo os autores a equação de Hall-Petch explica os resultados dos ensaios de tração e dureza. De acordo com este fenômeno, ao diminuir o tamanho do grão do material, é necessária uma maior energia para mudança da direção até o grão adjacente, com isso obtém-se um valor maior de tensão de escoamento, e dureza do material (BARTOLOMEU et al., 2017).

Ahmadi et al., (2016) estudou a influência da velocidade de escaneamento e da potência laser nas propriedades mecânicas de componentes fabricados com aço 316L pelo processo de fusão seletiva a Laser. Foi usado um sistema de laser de itérbio com comprimento de onda de 1070 nm e potência máxima de 300 W, com diâmetro do feixe laser de 80  $\mu\text{m}$ . Os parâmetros alterados são apresentados na Tabela 4, sendo que a distância entre filetes e espessura de camada foram mantidos constantes, sendo respectivamente 50  $\mu\text{m}$  e 30  $\mu\text{m}$ .

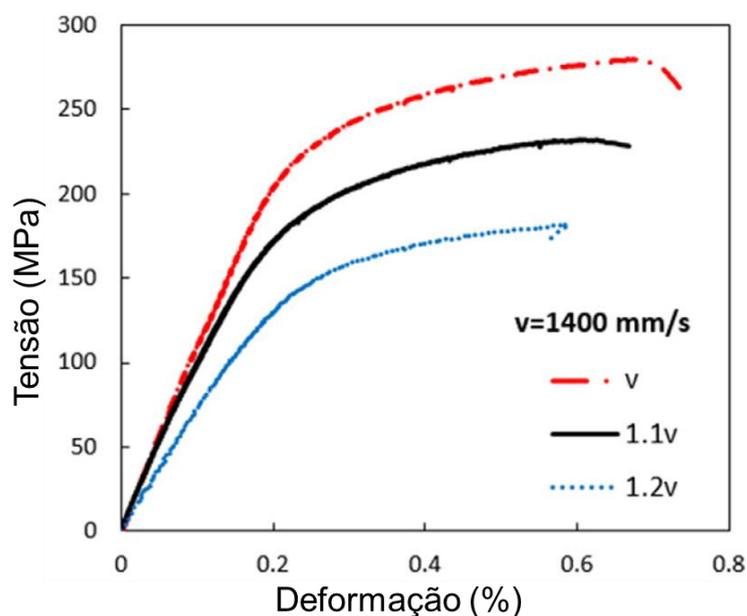
Tabela 4 – Parâmetros estudados.

Ensaio	Potência (W)	Velocidade (mm/s)
A1	129	1400
A2	129	1540
A3	129	1680
B1	129	1400
B2	144	1400
B3	159	1400
B4	189	1400

Fonte: Ahmadi et al., (2016)

Os ensaios A1, A2 e A3 mantiveram a potência constante e variam a velocidade em 1x, 1,1x e 1,2x respectivamente. Ao aumentar a velocidade foi possível observar uma queda na resistência a tração, segundo os autores este fato está ligado à diminuição da densidade de energia volumétrica. A Figura 6 apresenta o gráfico tensão em função da deformação das diferentes velocidades analisadas, indicando o comportamento relatado.

Figura 6 – Comparação da resistência a tração entre diferentes velocidades.



Fonte: Ahmadi et al., (2016)

Para verificar a influência da potência na resistência a tração, foi mantido constante o valor de velocidade de escaneamento e variou-se a potência (B1, B2, B3, B4). Com o aumento da potência verificou-se um aumento nas propriedades mecânicas dos corpos de prova, novamente os autores atribuem este fato ao aumento

da densidade de energia volumétrica. A Tabela 5 apresenta os resultados do ensaio de tração para os corpos de prova com diferentes valores de potência.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de tração para corpos de prova com diferentes potencias laser.

<b>Potência Laser (W)</b>	<b>Velocidade de escaneamento (mm/s)</b>	<b>Tensão de escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistencia à Tração (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
129	1400	265	280	0,68
144	1400	373	405	1,03
159	1400	462	555	6,44
189	1400	524	647	15,74

Fonte: Ahmadi et al., (2016)

Segundo os autores, ao aumentar a velocidade ou diminuir a potência o efeito *balling* é potencializado. Este fenômeno ocorre quando a camada subjacente não é “molhada” pelo material fundido devido à tensão superficial, fazendo com que o líquido seja esferoidizado. O uso de uma baixa potência do laser colabora para a formação do efeito *balling* devido a uma menor quantidade de formação de metal líquido. A aplicação de alta velocidade de escaneamento causa instabilidade na fusão e causa respingos na superfície. Este efeito prejudica a rugosidade, densidade e as propriedades mecânicas da peça, explicando a diminuição das propriedades com o aumento da velocidade de escaneamento e diminuição da potência laser.

Hu et al., (2017) estudaram a influência da velocidade de escaneamento e distância entre filetes (*hatch*) na densidade de peças em aço inoxidável 17-4PH fabricadas por SLM. A Tabela 6 apresenta os parâmetros utilizados no estudo, a potência usada foi a máxima fornecida pelo equipamento SLM com o objetivo de maximizar o processo.

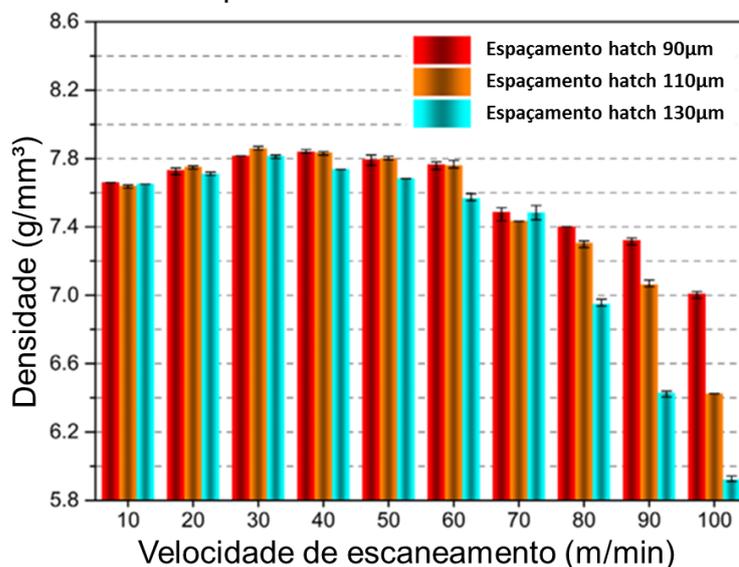
Tabela 6 – Parâmetros utilizados no estudo.

Parâmetros do processo (unidade)	Valor
Potência do laser (W)	200
Velocidade de escaneamento (m/min)	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
Distância entre filetes ( $\mu\text{m}$ )	90, 110, 130
Espessura de camada ( $\mu\text{m}$ )	20

Fonte: Hu et al., (2017)

Com a diminuição da velocidade, os autores identificaram um aumento da densidade e posteriormente uma pequena queda. Para velocidades acima de 30 m/min é possível notar uma influência significativa da distância entre filetes na densidade das amostras, no entanto, para velocidades menores a diferença é desprezível. A Figura 7 apresenta um gráfico comparativo das densidades obtidas para as diferentes velocidades e *hatch*.

Figura 7 – Densidade obtida para as diferentes velocidades e valores de hatch.



Fonte: Hu et al., (2017)

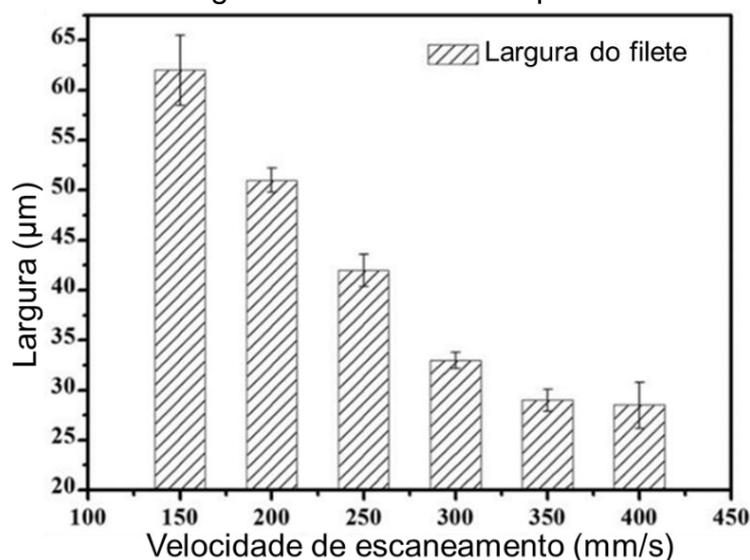
De acordo com os autores, quando a velocidade de escaneamento é baixa, a entrega de energia pelo laser é tão alta que provoca a evaporação de alguns elementos do pó metálico, consequentemente algumas bolhas de gás ficam presas na poça fundida durante a rápida fusão e solidificação formando poros esféricos. A medida que se aumenta a velocidade de escaneamento a evaporação do material

diminui, reduzindo a presença de bolhas na poça de fusão, tornando a peça praticamente densa. Aumentando ainda mais a velocidade de escaneamento, a densidade de energia entregue ao leito do pó se torna insuficiente, de modo que o pó não pode ser totalmente fundido, formando poros grandes e de formato irregular (HU et al., 2017).

Yu et al., (2016) investigou a influência da velocidade de escaneamento na profundidade de penetração do feixe laser no pó metálico e no comportamento da poça de fusão. Os parâmetros utilizados para fabricação das amostras por fusão seletiva a laser foram: potência do laser 100 W, espessura de camada 60  $\mu\text{m}$ , *hatch* 50  $\mu\text{m}$  e velocidade de escaneamento 150 – 400 mm/s. Foram fabricados 6 cubos de 5 x 5 x 5 mm<sup>3</sup> com um filete único na última camada.

Através da análise metalográfica dos filetes fabricados na última camada das amostras, os autores identificaram que quando fabricado as amostras com velocidade de 400 mm/s, a trilha de fusão (filete) apresenta descontinuidade e uma largura média de 27  $\mu\text{m}$ . Nesta situação a entrada insuficiente de energia do laser levou a uma fusão incompleta das partículas e resultou em trilhas instáveis. Quando a velocidade de escaneamento diminui para 300 e 150 mm/s, a largura média aumentou gradualmente para 34 e 62  $\mu\text{m}$  respectivamente (YU et al., 2016). A Figura 8 apresenta o gráfico com a distribuição da largura das amostras fabricadas com diferentes velocidades de escaneamento.

Figura 8 – Gráfico com a largura média das trilhas para diferentes velocidades.



Fonte: Yu et al., (2016)

Para uma alta velocidade de escaneamento, a formação de uma massa fundida foi bastante instável devido ao líquido de fusão ser limitado. Em geral, as partículas de pó foram ligadas pelo metal líquido, levando à formação da trilha de derretimento. O “empescoçamento” de partículas de pó foi observado nesta situação, e em algumas áreas a trilha de fusão se rompeu devido à tensão superficial. A profundidade de penetração foi relativamente pequena e o feixe laser não conseguiu refundir a camada anterior. Isso causou a ligação fraca entre a camada atual e a camada anterior. Ao diminuir a velocidade para 250 mm/s foi possível observar a fusão total do pó metálico e a porosidade diminuiu consideravelmente. No entanto, alguns poros ainda permanecem no material solidificado devido ao aprisionamento de gás (YU et al., 2016).

Os autores concluíram que a influência da velocidade de varredura na largura e topografia de superfície de um filete é mais sensível a variação da velocidade de escaneamento do que a potência laser aplicada. Devido à limitação da energia irradiada em altas velocidades de escaneamento, as partículas de pó foram insuficientemente fundidas e o mecanismo de ligação resultante se assemelha ao processo de sinterização. Consequentemente, um número considerável de poros irregulares e de grande porte foi observado nas amostras. Além disso, à medida que a velocidade de varredura diminuiu de 400 para 150 mm / s, as profundidades de penetração aumentaram e os poros transitaram de irregular (falta de fusão) para esféricos (aprisionamento de gás) devido a uma densidade de energia laser relativamente alta (YU et al., 2016). Os autores não revelaram o valor da profundidade da poça fundida para cada velocidade estudada.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de analisar a influência da velocidade na ligação metalúrgica entre metal base e amostra fabricadas por fusão seletiva a laser, foram analisadas 5 diferentes velocidades de escaneamento. A seguir é apresentada a descrição dos equipamentos e métodos utilizados para a caracterização desta pesquisa.

#### 3.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com base nos dados informados pelo fornecedor do pó e um estudo preliminar, foram identificados os parâmetros usados como referência neste trabalho. Os parâmetros de referência foram mantidos constantes para todos os experimentos, sendo eles: potência laser 400 W, espessura de camada 45  $\mu\text{m}$ , *overlap* 30% e *hatch* de 105  $\mu\text{m}$ . As velocidades foram variadas de 1240 mm/s a 2300 mm/s com o incremento de 265 mm/s (15% da velocidade de referência), a Tabela 7 apresenta as velocidades utilizadas no estudo e a densidade de energia volumétrica equivalente.

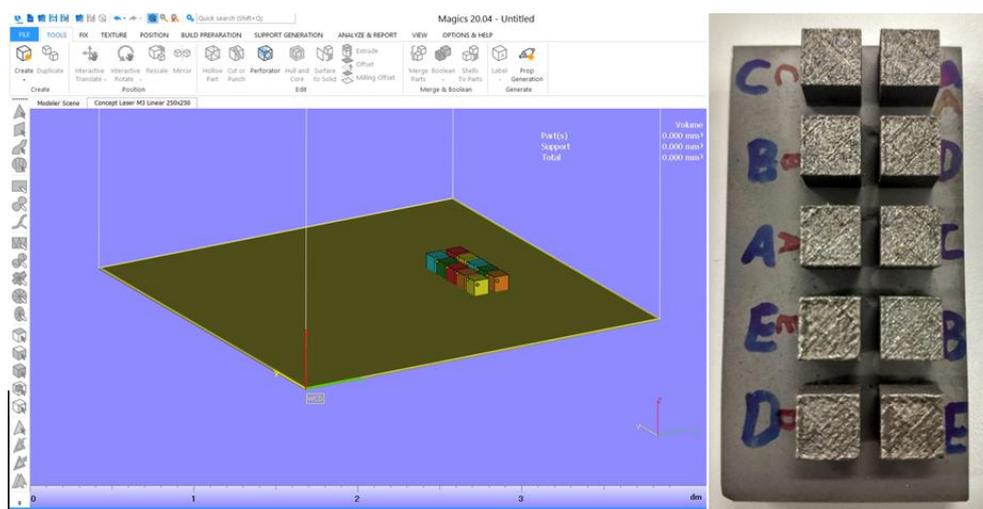
Tabela 7 – Parâmetros usados na fabricação dos estudos.

Estudo	Velocidade (mm/s)	Varição Velocidade	DEV (J/mm <sup>3</sup> )
A	1770	Ref.	47,83
B	2035	+15%	41,60
C	2300	+30%	36,81
D	1505	-15%	56,25
E	1240	-30%	68,27

Fonte: O autor (2017)

Para as análises de densidade, microdureza e profundidade de interação peça/metal base, foram fabricados dez corpos de prova com dimensões de 10mm x 10mm x 10mm, um para cada estudo apresentado na Tabela 7 e uma réplica de cada estudo. A Figura 9 apresenta os corpos de prova posicionados no programa Magics e após a fabricação.

Figura 9 – Imagem dos corpos de prova no programa *Magics* e após fabricação.



Fonte: O Autor (2017)

Buscou-se distribuir os estudos de forma que as réplicas ficassem distantes dos respectivos estudos a fim de evitar problemas ligados ao posicionamento que podem ocorrer durante a fabricação, como por exemplo, uma danificação na régua de deposição do pó.

### 3.2. MÁQUINA DE FUSÃO SELETIVA A LASER

A máquina utilizada na fabricação dos corpos de prova foi o modelo M2 Cusing fabricada pela empresa Concept Laser GmbH, a Figura 10 apresenta uma imagem do modelo utilizado.

Figura 10 – Máquina de SLM Concept Laser M2 Cusing.



Fonte: Concept Laser (2011)

O modelo M2 Cusing conta com dois ambientes distintos. O primeiro denominado câmara de preparação, destinado para realização do Setup da máquina como alinhamento da plataforma de fabricação, nivelamento da régua de deposição e reposição do pó metálico na plataforma de alimentação. O segundo ambiente chamado de câmara de fabricação, é destinado a fabricação dos componentes, é isolada e mantém a concentração de oxigênio controlada. O modelo M2 Cusing possibilita a alteração de vários parâmetros, estratégias de fabricação e o uso de diferentes materiais metálicos, sendo possível trabalhar com ligas de titânio, alumínio, cobre, aços inoxidáveis, entre outros. A Tabela 8 apresenta as principais características da máquina SLM.

Tabela 8 – Principais especificações da Concept Laser M2 Cusing.

<b>Especificações</b>	<b>Unidade</b>	<b>M2 Cusing</b>
Tipo de Laser	-	Fibra
Potência máxima do laser	W	400
Velocidade máxima de escaneamento	mm/s	7000
Comprimento de Onda Laser	nm	1060-1100
Diâmetro do feixe laser	µm	150
Dimensões do substrato de fabricação (x,y,z)	mm	250 x 250 x 280
Espessura de camada	µm	20 – 80
Velocidade de produção	cm <sup>3</sup> /h	2 – 20
Dimensões da Máquina (L x C x A)	m	2,44 x 1,63 x 2,35
Peso da máquina	kg	2000
Atmosfera protetora	-	Nitrogênio e Argônio

Fonte: Concept Laser

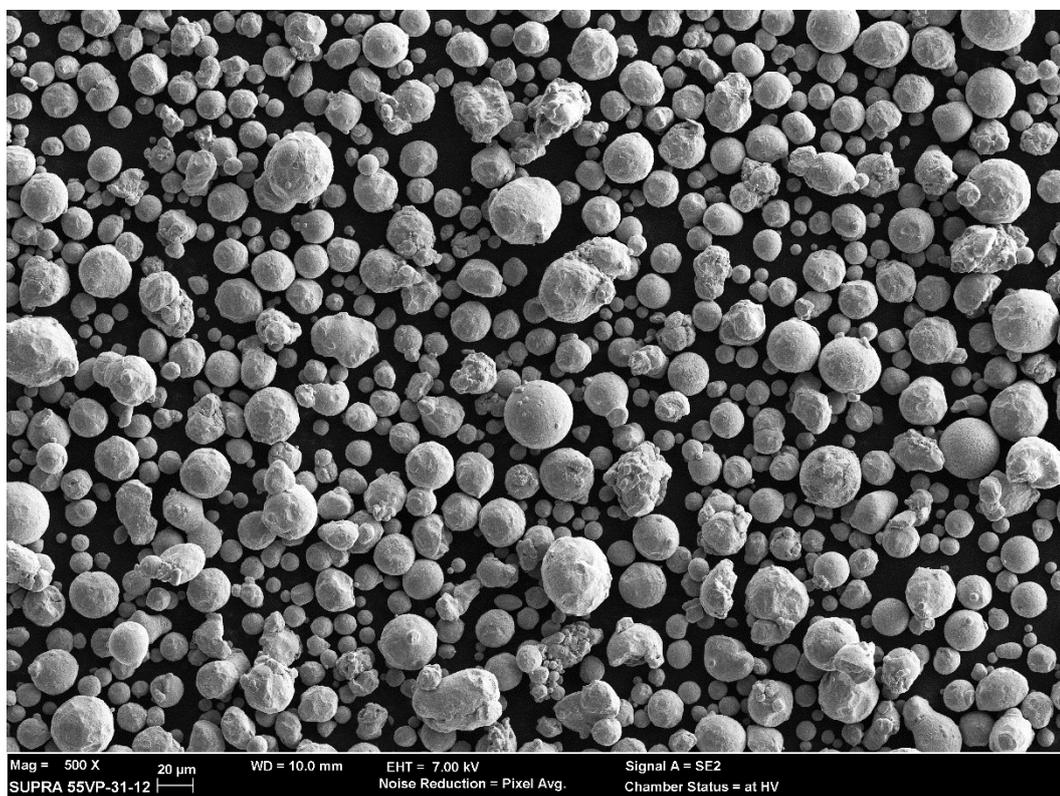
A câmara de fabricação utiliza atmosfera protetora, argônio no caso de materiais reativos como alumínio e titânio, e nitrogênio para os materiais não reativos, como no caso do aço Corrax®. Durante o processo de fabricação a concentração de oxigênio deve ser mantida abaixo de 0,5% para evitar a oxidação do material.

### 3.3. MORFOLOGIA E TAMANHO DE PARTÍCULAS DO PÓ METÁLICO

A morfologia do pó metálico utilizado no processo de fusão seletiva a laser foi analisada a fim de verificar se as condições do pó estavam adequadas para garantir uma boa fluidez durante a deposição, bem como a distribuição do tamanho de partículas do pó foi analisada para verificar se esta não ultrapassa a espessura de

camada utilizada no processo. A Figura 11 apresenta a imagem do pó metálico obtido através do microscópio eletrônico FEG ZEISS SUPRA V55.

Figura 11 – Pó metálico com aumento de 500 vezes.



Fonte: O autor (2017)

A morfologia do pó metálico em geral apresentou partículas esféricas e algumas partículas sinterizadas entre si, devido ao grande aporte térmico submetidas durante fabricações anteriores. As maiores partículas encontradas possuem diâmetro de 50 µm e as menores partículas um diâmetro de 5 µm.

#### 3.4. ESCOLHA DO METAL BASE

A escolha do metal base foi feita com informações levantadas na literatura, procurou-se um material que possui composição química e propriedades mecânicas e térmicas próximas do aço Corrax®, a fim de evitar problemas na interação metalúrgica entre os dois aços. Com base nesses requisitos foi selecionado o aço PH13-8Mo. A composição química dos dois materiais pode ser consultada nas Tabela 1 e 2 do capítulo 2 e um comparativo das propriedades mecânicas e térmicas dos dois materiais é apresentada na Tabela 9, a seguir.

Tabela 9 – Comparação entre propriedades mecânicas e térmicas dos aços Corrax® e 13-8.

Aço	Limite de Resistência a tração (MPa)	Modulo de elasticidade (GPa)	Condutividade térmica (W/m-°C)	Coefficiente de expansão térmica (µm/ m-°C)
Corrax®	1100	200	18	11,7
13-8	1105	197	14	10,6

Fonte: Metals Handbook (1990) e Uddeholm (2017)

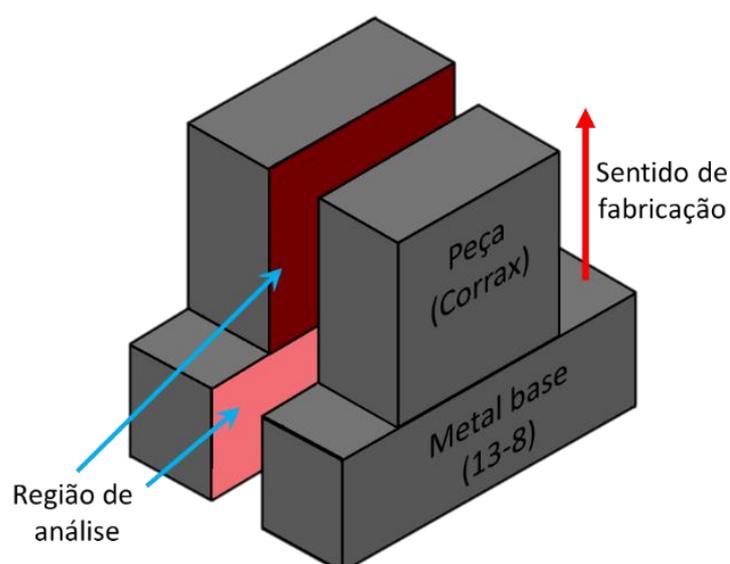
### 3.5. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISES

A seguir são apresentados os procedimentos para a análise metalográfica realizada neste trabalho.

#### 3.5.1. Preparação metalográfica das amostras

As amostras foram separadas por eletroerosão a fio e posteriormente cortadas ao meio utilizando a máquina de corte (*cut-off*), a Figura 12 exemplifica o corte feito nas amostras.

Figura 12 – Sentido de corte das amostras para análise.



Fonte: O Autor (2017)

Para facilitar a preparação metalográfica e futuras análises, as amostras foram embutidas a quente através da prensa de embutimento automático, cada estudo e sua réplica foram embutidos juntos.

Em seguida, as amostras passaram pelo processo de lixamento a fim de proporcionar uma superfície plana, a sequência da granulometria das lixas adotada foi respectivamente: 320, 400, 600, 800, 1200, 2400 e 4000. O lixamento foi feito por meio de um prato rotativo horizontal utilizando água como lubrificante. A cada troca de lixa girou-se a amostra em 90° para garantir que o lixamento seguinte eliminasse completamente o anterior. No processo de polimento, utilizou-se a pasta de diamante de 1 µm e 0,5 µm em pano de pelo médio, para lubrificar o processo foi utilizado álcool absoluto. Para finalizar a preparação, as amostras foram limpas com álcool absoluto e secadas com auxílio de algodão e soprador térmico.

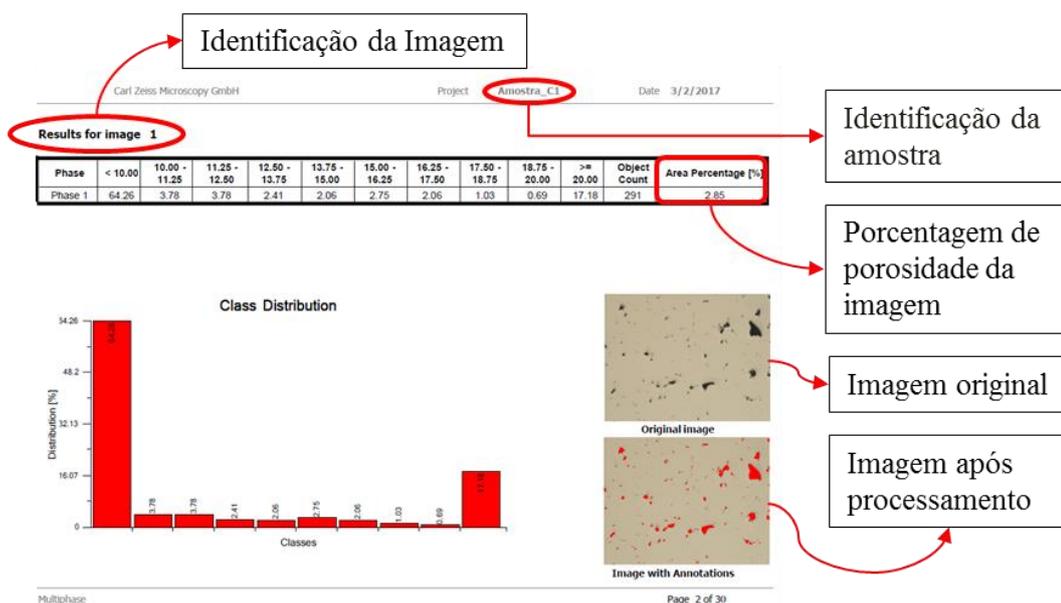
### **3.5.2. Análise da densidade**

Para medição de densidade das amostras fabricadas por SLM foi utilizado o método de processamento digital de imagens, o qual consiste na obtenção de imagens da superfície do corpo de prova por meio de um microscópio óptico e com auxílio de um programa editor de imagens com histograma de cores é possível quantificar a presença da cor preta (poros), esse método de quantificação também foi utilizado por Choi et al. (2017), Marques (2014); Yadroitsev et al. (2007).

Para obtenção das imagens foi utilizado o microscópio óptico Zeiss Imager.M2m, para quantificar a presença de poros foi utilizado o programa Multiphase Grains Graphite que acompanha o programa do microscópio.

Foram realizadas 28 imagens com aumento de 50 vezes para cada corpo de prova, cobrindo toda a superfície da amostra fabricada por SLM, com exceção do contorno (uma faixa de cerca de 50 µm nas laterais e no topo). Estas imagens foram processadas e analisadas pelo programa Multiphase Grains Graphite que gerou um relatório para cada imagem capturada com a porcentagem de porosidade e um relatório com a porosidade total do corpo de prova. A Figura 13 apresenta um exemplo do relatório gerado pelo programa para uma das imagens do Estudo C-1.

Figura 13 – Exemplo de relatório obtido através do programa Multiphase Grains Graphite.



Fonte: O Autor (2017)

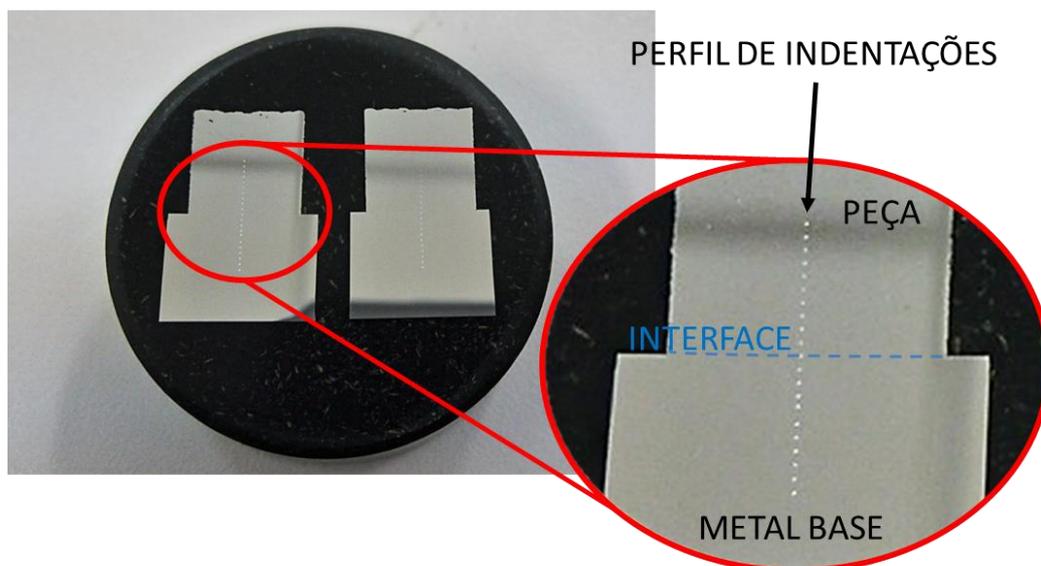
A porosidade total é o resultado da média de porosidade das 28 imagens obtidas para cada corpo de prova.

### 3.5.3. Análise da dureza Vickers

Os ensaios de microdureza foram realizados no Microdurômetro Vickers modelo 402MVD fabricado pela empresa Wilson Instruments com indentador piramidal com  $136^\circ$ . O experimento seguiu os métodos Vickers ( $HV_{0,5} = 0,5$  kg), conforme norma ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008

O intuito deste experimento foi verificar o comportamento da dureza ao longo do corpo de prova, (começando no metal base, passando pela interface e terminando na amostra fabricada por SLM). Para isso foram realizadas 21 indentações com espaçamento de 0,5 mm entre os centros das indentações, respeitando a solicitação da norma. A Figura 14 apresenta um perfil de indentações realizado no Estudo D1.

Figura 14 – Perfil de indentações analisadas.



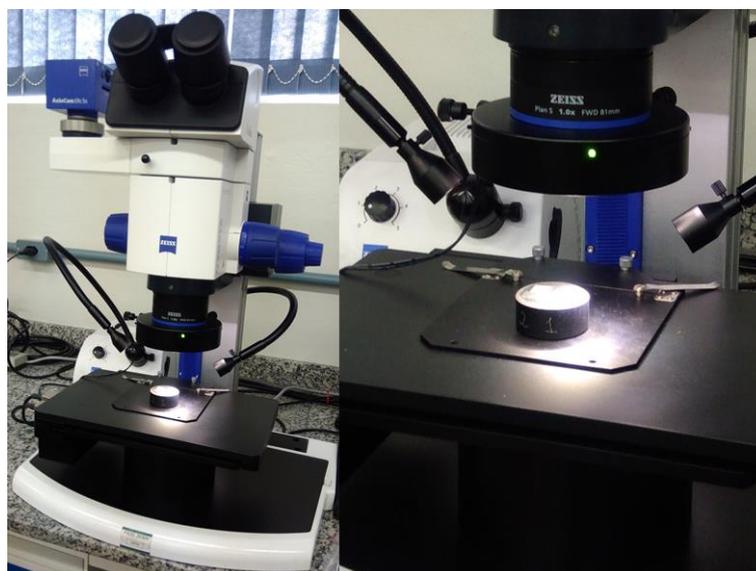
Fonte: O Autor (2017)

Foi tomado o cuidado para que a primeira indentação fosse realizada sob a região da interface, 10 indentações na região da peça e outras 10 indentações na região do metal base.

#### 3.5.4. Análise da profundidade de interação peça/metal base

Para analisar a profundidade de interação da amostra fabricada por SLM com o metal base, foram capturadas macrofotografias da interface com o Estereoscópio Zeiss modelo Discovery.V8. As imagens foram obtidas com 25 vezes de aumento, as amostras foram polidas e para revelar a interação foram imersas por cerca de 60 segundos em um reagente composto por: 10 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 10 ml de HNO<sub>3</sub> + 20 ml de HF + 50 ml de água destilada. A Figura 15 demonstra a análise feita no estereoscópio.

Figura 15 – Análise de interação realizada no estereoscópio Discovery.V8 Carl Zeiss.



Fonte: O Autor (2017)

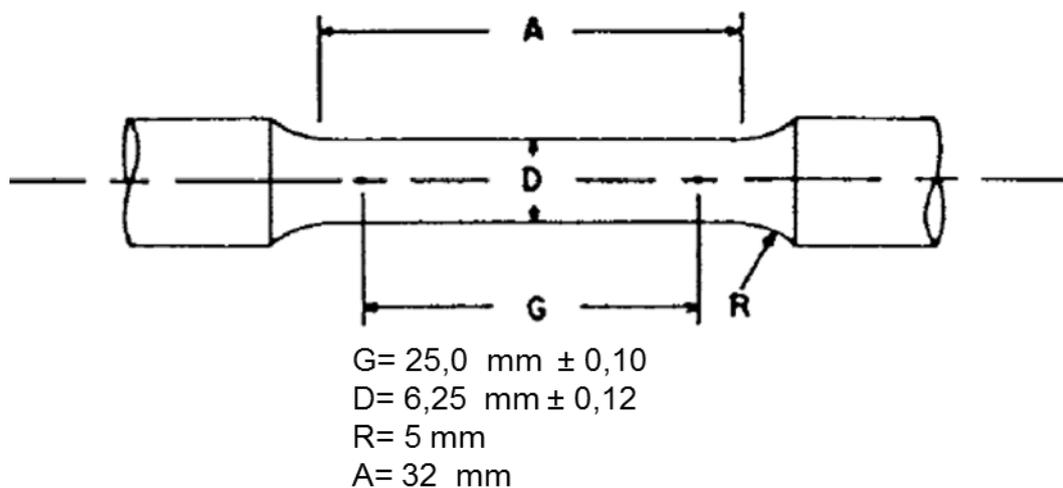
A quantificação da interação da amostra com o metal base foi realizada traçando duas retas paralelas, uma em relação à superfície do metal base e outra até o limite visível de interação. Com auxílio do programa AxioVision Realease 4.9.1 SP1 disponível no próprio estereoscópio foi possível medir a distância entre as retas.

### 3.5.5. Ensaio de Tração

Com o intuito de verificar a resistência à tração da ligação entre a amostra fabricada por SLM e o metal base, foram realizados ensaios de tração com o parâmetro de referência (Estudo A), com o parâmetro que apresentou menor profundidade de interação e o parâmetro com maior profundidade de interação. Para cada parâmetro estudado, foi fabricado 1 corpo de prova e uma réplica.

Os corpos de prova e o ensaio seguiram a Norma ASTM – 370 que orienta e padroniza os ensaios, a Figura 16 apresenta as dimensões de acordo com a norma. Os ensaios foram realizados na Máquina Universal de Ensaios Instron 5988 com capacidade máxima de carga de 400 kN.

Figura 16 – Corpo de prova de tração de acordo com a norma ASTM – 370.



Fonte: Fonte: ASTM – 370 (2017)

Os corpos de prova foram fabricados sobre o metal base, e posteriormente foram usinados para atender as dimensões da norma, a região fabricada por SLM foi maior para facilitar a usinagem. A foto apresentada na Figura 17 mostra os corpos de prova após fabricação por SLM e após a usinagem.

Figura 17 – Corpos de prova de tração fabricados sobre o metal base e após a usinagem.



O autor (2017)

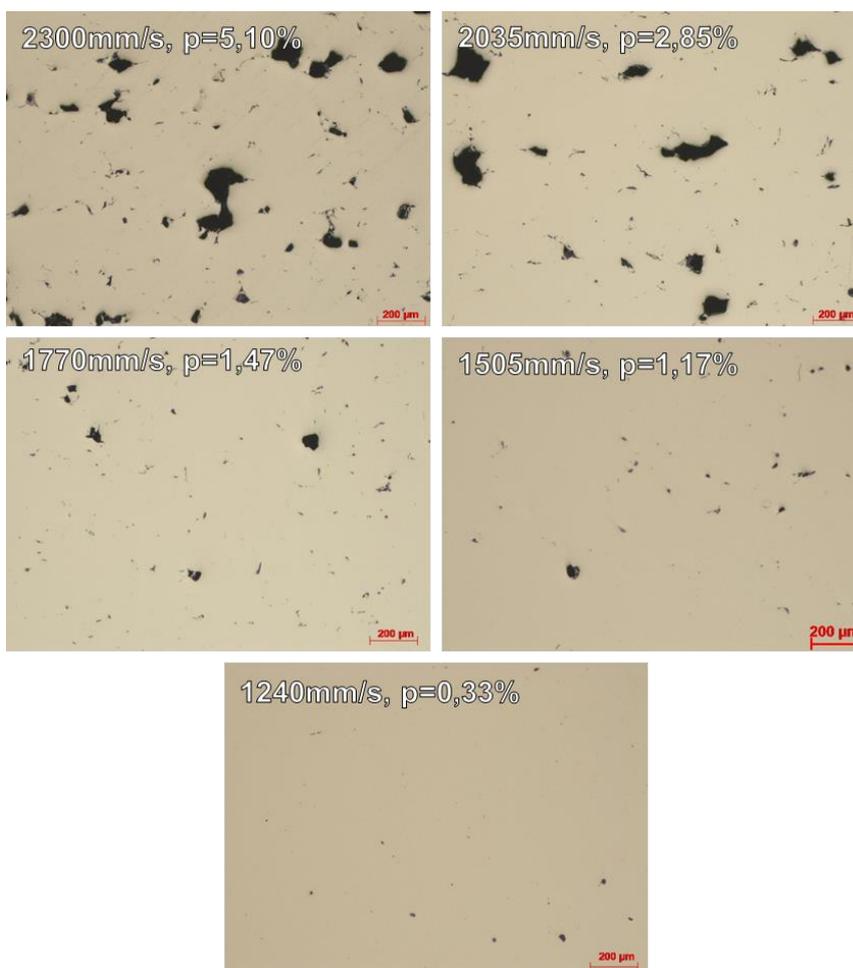
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos das análises e ensaios descritos anteriormente.

### 4.1. ANÁLISE DA DENSIDADE RELATIVA DAS AMOSTRAS FABRICADAS POR SLM

Para analisar a densidade relativa foram obtidas 28 imagens de cada estudo. A Figura 18 apresenta algumas dessas imagens exemplificando a porosidade encontrada.

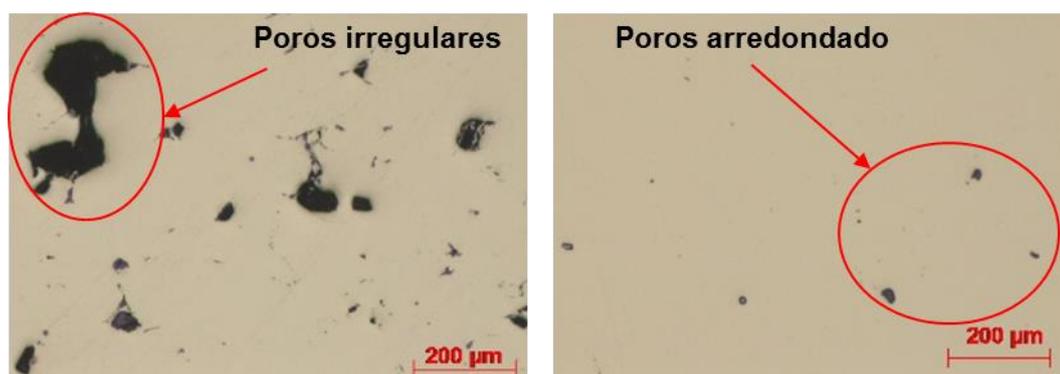
Figura 18 – Porosidade encontrada em cada estudo, aumento 50 vezes.



Fonte: O autor (2017)

É possível notar que os estudos com maior velocidade (2300 e 2035 mm/s) apresentam maior quantidade de poros, além disso, possuem formato irregular e de maior tamanho, nos estudos com velocidade menor (1770, 1505 e 1240 mm/s) a quantidade de poros é visivelmente menor, o formato em geral é arredondado e tem tamanhos menores que os poros apresentados nos demais estudos. A Figura 19 apresenta exemplos de poros irregulares e poros arredondados.

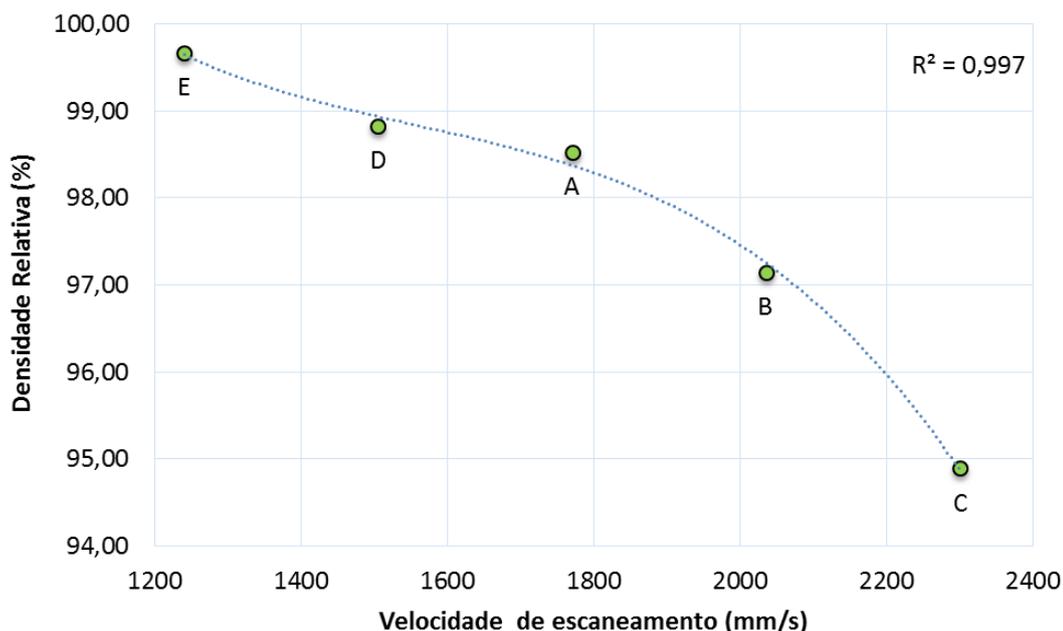
Figura 19 – Exemplo de poros irregulares e arredondados.



Fonte: O Autor (2017)

Os poros irregulares presentes na imagem acima, são decorrentes da falta de fusão do pó metálico e entre camadas, devido à baixa densidade de energia entregue pelo laser, este tipo de poro foi encontrado nas amostras com maior velocidade de escaneamento. Já os poros com formato arredondado são oriundos do aprisionamento de gases durante a solidificação da poça fundida, são observados principalmente nos estudos com velocidades de escaneamento menores.

Figura 20 – Densidade relativa em função da velocidade de escaneamento.



Fonte: O autor (2017)

O Estudo A usado como referência nesse trabalho, alcançou uma densidade de 98,53%, as amostras fabricadas com menores valores de velocidade do estudo de referência apresentaram maiores valores de densidade, o Estudo D apresentou 98,83% e o Estudo E apresentou a maior densidade entre todas as amostras 99,67%. Já as amostras fabricadas com parâmetro B apresentaram uma pequena queda no valor de densidade (97,15%) comparado com o Estudo A e as amostras fabricadas com a maior velocidade de escaneamento (Estudo C) apresentaram o menor valor de densidade (94,90%).

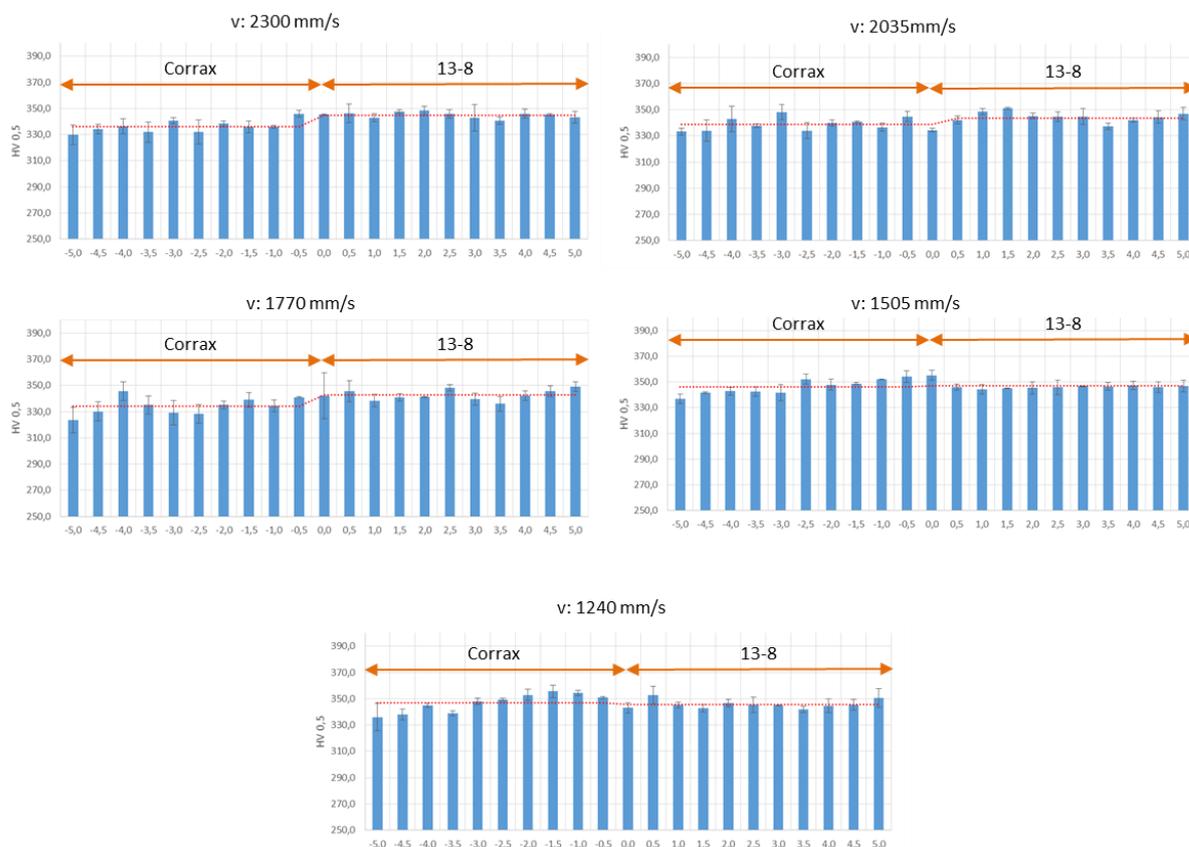
Os resultados apresentados nos Estudos A, D e E sugerem um valor de DEV adequado para a fusão do pó metálico, dos filetes e das camadas antecedentes. O valor de densidade, o formato e tamanho dos poros presentes nos Estudos B e C indicam que os valores de DEV utilizados são insuficientes para completa fusão do pó metálico, portanto, não há massa líquida suficiente para preencher os poros entre as partículas de pó e assegurar uma ligação metalúrgica entre as camadas. A Figura 19 apresenta exemplos de poros encontrados por falta de fusão e por aprisionamento de gases.

Como é possível observar na Figura 20, uma tendência cúbica pode ser traçada entre os pontos encontrados confirmando que o aumento da densidade está diretamente ligado com a queda da velocidade de escaneamento que por consequência gera um aumento da DEV. Segundo Wang, Wang, Wu, (2017) com aumento da DEV a densidade tende a aumentar, no entanto, para valores muito altos de DEV ocorre a evaporação de elementos de liga ocasionando aprisionamento de gases na poça de fusão causando a diminuição da densidade. Como os resultados obtidos nesse estudo apresentaram apenas tendência de aumento da densidade, acredita-se que exista ainda margem para aumento dos valores de DEV e por consequência um aumento da densidade.

#### 4.2. ANÁLISE DO PERFIL DE DUREZA VICKERS

Os valores obtidos da dureza e a distribuição ao longo do perfil analisado podem ser observados no gráfico presente na Figura 21.

Figura 21 – Distribuição da microdureza ao longo do perfil analisado.



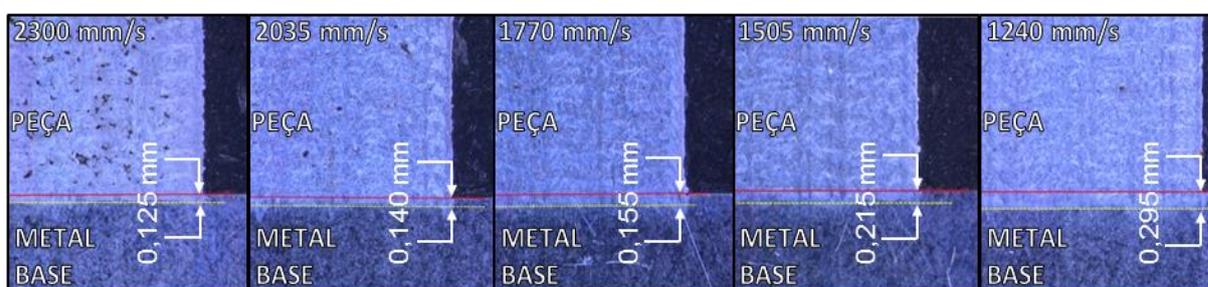
Fonte: O Autor (2017)

A microdureza apresentou pouca variação entre os estudos, e valores muito próximos entre o metal base e a amostra fabricada por SLM. Nos Estudos A, B e C a microdureza na região da amostra apresentou em média  $HV 336 \pm 7$  (~34HRC) e  $HV 345 \pm 5$  (~35HRC) no metal base. Já nos Estudos D e E a microdureza tanto na região da amostra quanto no metal base ficou em média com  $HV 346 \pm 6$  (~35HRC) próximo da condição do aço Corrax® laminado. Acredita-se que a dureza foi menor nos Estudos A, B e C devido a presença de um número maior de poros irregulares que colapsam mais facilmente sob a carga durante o teste.

#### 4.3. ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DE INTERAÇÃO PEÇA/METAL BASE

Para quantificar a interação da amostra com o substrato foram traçadas duas retas paralelas, uma em relação à superfície do substrato e outra até o limite visível de interação. Com auxílio do programa Axion Vision presente no estereoscópio foi possível medir a distância entre as retas, a Figura 22 apresenta as macrofotografias obtidas de cada estudo. As réplicas apresentaram valores semelhantes, por este motivo não serão apresentadas.

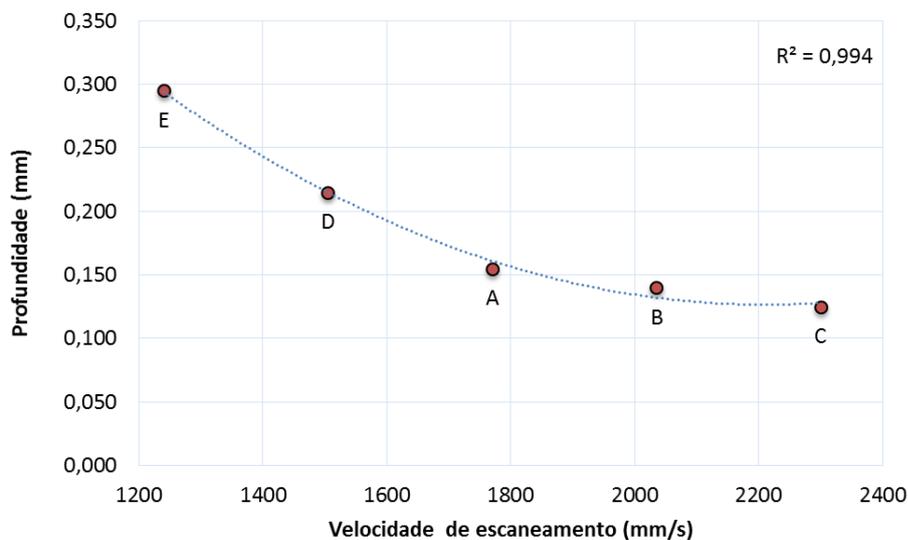
Figura 22 – Profundidade de interação Peça/Metal Base, aumento de 25 vezes.



Fonte: O Autor (2017)

Conforme observado nas imagens, os estudos tiveram uma variação de profundidade de interação de 0,125  $\mu\text{m}$  a 0,295  $\mu\text{m}$ . Estudos com menores velocidades de escaneamento apresentaram maior profundidade de interação, acredita-se que este fato ocorra devido ao maior tempo de interação do laser com o material. A Figura 23 apresenta o gráfico relacionando a velocidade de escaneamento e a profundidade de interação.

Figura 23 – Profundidade de interação em função da velocidade de escaneamento.



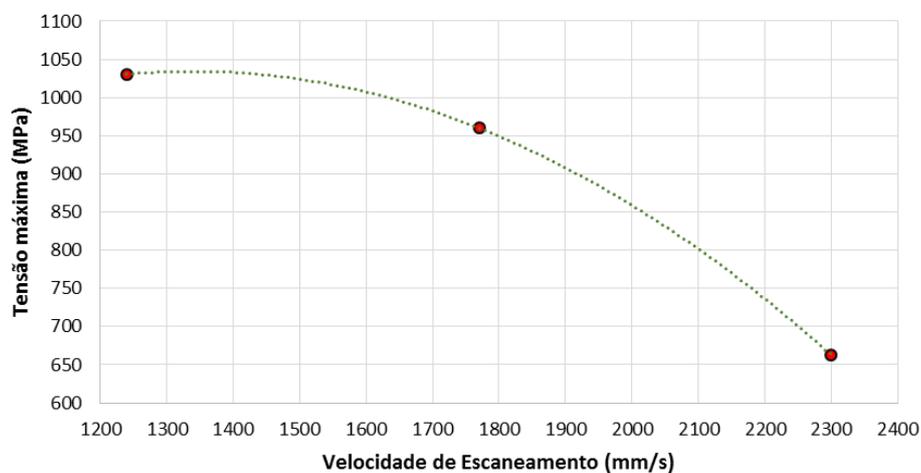
Fonte: O autor (2017)

É possível observar uma tendência de aumento quadrático da profundidade em função da diminuição da velocidade, portanto acredita-se que para valores maiores de DEV a profundidade de interação tende a aumentar ainda mais.

#### 4.4. ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado afim de mensurar a resistência mecânica da ligação entre peça e metal base. Os resultados de limite de resistência a tração obtidos através dos ensaios podem ser observados na Figura 24.

Figura 24 – Tensão máxima de tração por velocidade de escaneamento laser.

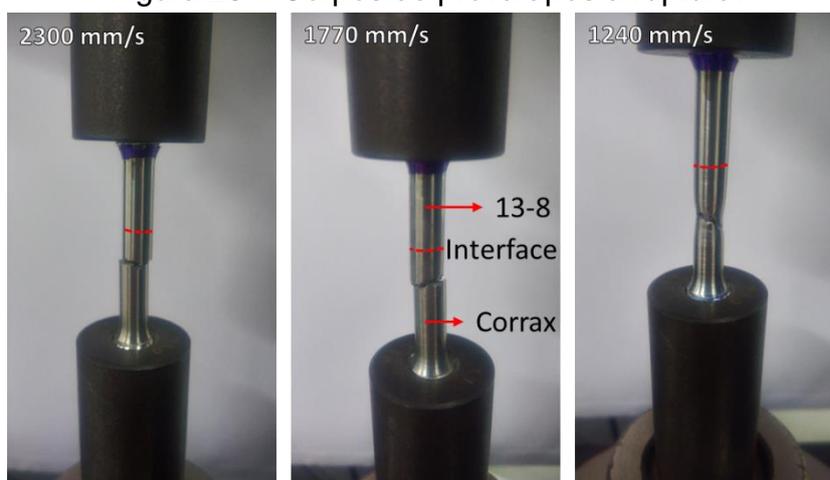


Fonte: O Autor (2017)

O Ensaio E (1240 mm/s) apresentou resistência máxima de 1030 MPa, seguido pelo Estudo A (1770 mm/s) com 960 MPa e pelo Ensaio C (2300 mm/s) com 663 MPa. O coeficiente de variação ficou abaixo dos 0,5% para todos os ensaios. Segundo Uddeholm (2017) a resistência máxima do aço Corrax® laminado na condição de 34HRC é de 1100 MPa, portanto o Estudo E apresentou 94% da resistência máxima do aço laminado para a mesma condição de dureza. É possível observar uma forte tendência de aumento da resistência com o aumento da DEV.

O Estudo C apresentou queda de 30,94% na resistência máxima com o aumento de 30% da velocidade em relação ao Estudo A. Já o Estudo E apresentou um aumento de apenas 7,30% em relação ao Estudo A com a diminuição de 30% da velocidade. A Figura 25 apresenta os corpos de prova após a ruptura.

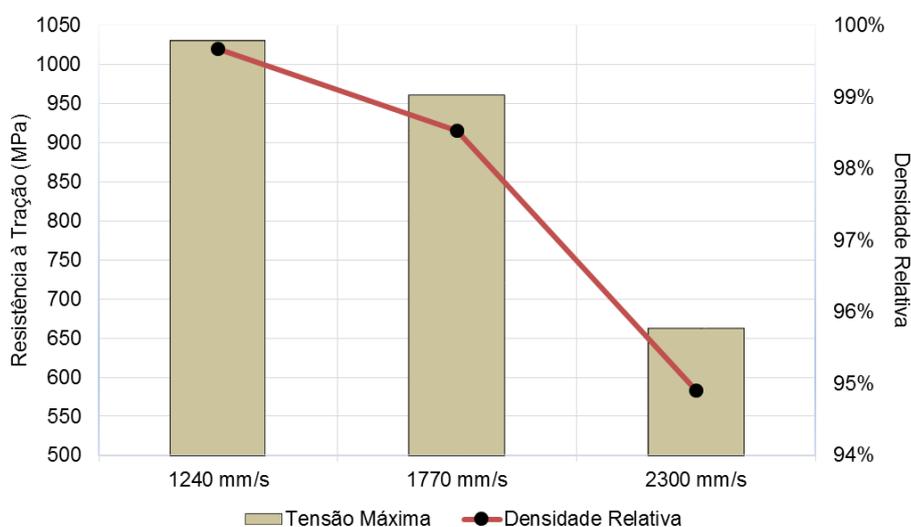
Figura 25 – Corpos de prova após a ruptura.



Fonte: O Autor (2017)

Devido a ligação entre dois metais diferentes, esperava-se que a região de ligação fosse a região mais fraca do corpo de prova. No entanto, todos os estudos analisados romperam na região fabricada por SLM. Sugere-se que os defeitos de fabricação observados na análise de densidade, como falta de fusão e aprisionamento de gás, são responsáveis pela fratura na região fabricada por SLM. Portanto, neste caso os defeitos decorrentes da fabricação requerem mais atenção do que a ligação entre os dois materiais. O gráfico apresentado na Figura 26 relaciona as tensões máximas encontradas para cada parâmetro com a sua respectiva densidade relativa e a velocidade de escaneamento.

Figura 26 – Resistência a tração, densidade relativa e velocidade de escaneamento.



Fonte: O autor (2017)

Uma análise simplificada pode ser feita analisando o gráfico a cima, observa-se que o limite de resistência a tração e a densidade relativa decrescem com o aumento da velocidade de escaneamento. Um aumento de 30% na velocidade de escaneamento do Estudo C (2300 mm/s) para o Estudo A (1770 mm/s) resultou em uma diminuição de 3,63% da densidade relativa e queda de 44,8% na resistência à tração, uma queda de aproximadamente 12,34% na resistência à tração para cada 1% de queda da densidade relativa. A diminuição de 30% na velocidade de escaneamento do Estudo A, para o Estudo E (1240 mm/s) refletiu em aumento de 1,14% da densidade relativa e um aumento de 7,30% na resistência à tração, aproximadamente 6,40% de aumento da resistência para cada 1% de aumento da densidade. Sugere-se que o maior aumento da resistência à tração por aumento percentual da densidade relativa observado do Estudo C para o A ocorre devido à falta de energia laser suficiente no processo de fabricação das peças, resultando em uma fraca ligação entre camadas e filetes adjacentes, e principalmente pela presença de poros com maior tamanho e de formato irregular que quando submetidos a esforços de tração agem como concentradores de tensão, propagando trincas mais facilmente e deixando o corpo de prova mais sensível aos esforços mecânicos. Quando a energia entregue pelo laser passa a ser maior (Estudo A e E) a ligação entre camadas e filetes passa a ser mais forte, diminuindo também a presença de poros irregulares, fazendo com que o corpo de prova se torne menos sensível aos esforços mecânicos.

## 5. CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas dos estudos realizados neste trabalho:

- É possível traçar uma linha de tendência quadrática de aumento da profundidade de interação entre peça e metal base com a diminuição da velocidade. A maior profundidade de interação encontrada foi de 0,30 mm para o estudo com velocidade de escaneamento de 1240 mm/s, e a menor profundidade foi de 0,12 mm para o estudo com velocidade de 2300 mm/s.
- Todos os corpos de prova romperam na peça fabricada por SLM. Sugere-se que os defeitos de fabricação da peça, como falta de fusão e aprisionamento de gás, são responsáveis pela fratura na região da peça. Os resultados comprovam que com a seleção adequada dos materiais, é possível fabricar peças por fusão seletiva a laser a partir de um metal base usinado sem ocorrência de defeitos na interface de ligação, diminuindo assim custos e tempo de fabricação.
- A velocidade de escaneamento impacta na densidade das peças fabricadas por SLM, que por sua vez, influencia na resistência à tração. Sugere-se que isso ocorra devido a fraca ligação entre camadas adjacentes e filetes vizinhos. Outro fato relevante é a presença de poros irregulares nas amostras fabricadas com velocidades maiores. Estes agem como concentradores de tensão quando submetidos a esforços mecânicos diminuindo a resistência à tração da peça.
- O aumento de 30% da velocidade de escaneamento do Estudo A (1770 mm/s) para o Estudo C (2300 mm/s) resultou em uma queda de 3,63% da densidade relativa e 44,80% na resistência à tração. Contudo, a diminuição de 30% da velocidade de escaneamento do Estudo A (1770 mm/s) para o Estudo E resultou em um aumento de 1,14% da densidade relativa e um aumento de 7,30% na resistência a tração.

- Mesmo na menor profundidade de interação metalúrgica entre peça e metal base, não ocorreu rompimento na interface.
- A densidade relativa das peças fabricadas por SLM aumentam com a diminuição da velocidade de escaneamento, sendo possível traçar uma linha de tendência cúbica de aumento da densidade com o aumento da velocidade de escaneamento
- O estudo com velocidade de escaneamento 1240 mm/s apresentou maior densidade relativa, alcançando 99,67% e o estudo com velocidade de 2300 mm/s apresentou a menor densidade, 94,90%;
- O perfil de dureza Vickers ao longo dos corpos de prova com velocidade de 1240 mm/s e 1505 mm/s apresentaram uma média de HV 346 (~35HRC) tanto no metal base quanto na amostra fabricada por SLM, os demais estudo apresentam uma média de HV 336 (~34HRC) na região da peça. Acredita-se que a dureza foi menor nestes estudos devido a presença de um número maior de poros irregulares que colapsam mais facilmente sob a carga durante o teste.

#### 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos são apresentados a seguir:

- Estudar a microestrutura na região de ligação metalúrgica;
- Estudar o comportamento da interface quando submetido ao tratamento térmico;
- Verificar outras propriedades mecânicas das peças fabricadas utilizando a técnica apresentada neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

AHMADI, A. et al. Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting: A computational framework. **Materials and Design**, v. 112, p. 328–338, 2016.

ASGARI, H.; MOHAMMADI, M. Microstructure and mechanical properties of stainless steel CX manufactured by Direct Metal Laser Sintering. **Materials Science and Engineering: A**, v. 709, n. October 2017, p. 82–89, 2018.

BADROSSAMAY, M.; CHILDS, T. H. C. Further studies in selective laser melting of stainless and tool steel powders. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 5 SPEC. ISS., p. 779–784, 2007.

BARTOLOMEU, F. et al. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior—A comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting. **Additive Manufacturing**, v. 16, p. 81–89, 2017.

CHOI, J. P. et al. Densification and microstructural investigation of Inconel 718 parts fabricated by selective laser melting. **Powder Technology**, v. 310, p. 60–66, 2017.

CIURANA, J.; HERNANDEZ, L.; DELGADO, J. Energy density analysis on single tracks formed by selective laser melting with CoCrMo powder material. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 5–8, p. 1103–1110, 2013.

CONCEPT LASER GmbH, **M2 cusing operating manual**, version 1.0.11, Lichtenfels, Germany, 2011.

FISCHER, P. et al. Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd:YAG laser source. **Acta Materialia**, v. 51, n. 6, p. 1651–1662, 2003.

GONG, H. et al. Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting. **Materials and Design**, v. 86, p. 545–554, 2015.

HANDBOOK ASM. Properties and selection: Irons, steels and high performance alloys. **ASM International, The Materials Information Company**, EUA, v. 1, p. 1303-1408, 1990.

HU, Z. et al. Experimental investigation on selective laser melting of 17-4PH stainless steel. **Optics & Laser Technology**, v. 87, p. 17–25, 2017.

KEMPEN, K. et al. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted

18Ni-300 steel. **Physics Procedia**, v. 12, n. PART 1, p. 255–263, 2011.

KLOPP, W. D. Ferrous Alloys – PH13-8Mo. ASM Handbook, v.1510, p. 1-32, 1988.

LEARY, M. et al. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. **Materials and Design**, v. 98, p. 344–357, 2016.

MARQUES, S; Estudo Da Influência Da Espessura Da Camada E Velocidade Do Laser Na Microestrutura E Propriedades De Peças Fabricadas Por Fusão Seletiva A Laser No Aço Maraging 300 - **Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica**, Instituto Superior Tupy – IST, Joinville, Brasil, 2014.

MAZUR, M. et al. Numerical and experimental evaluation of a conformally cooled H13 steel injection mould manufactured with selective laser melting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1–20, 2017.

PARK, H.; NGUYEN, D. Study on flaking behavior in Selective Laser Melting process. **Procedia CIRP**, v. 0, p. 569–572, 2017.

PECKNER, D.; BERNSTEIN, I. M.; **Handbook of Stainless Steels**. 1. ed. New York, NY. McGraw-Hill, 1977. p. 1-1—1-10; 7-2—7-16; 14-7—14-9.

RAO, H. et al. The influence of processing parameters on aluminium alloy A357 manufactured by Selective Laser Melting. **Materials & Design**, v. 109, p. 334–346, 2016.

SALLICA-LEVA, E.; JARDINI, A. L.; FOGAGNOLO, J. B. Microstructure and mechanical behavior of porous Ti-6Al-4V parts obtained by selective laser melting. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 26, p. 98–108, 2013.

SANDER, J. et al. Microstructure and properties of FeCrMoVC tool steel produced by selective laser melting. **Materials and Design**, v. 89, p. 335–341, 2016.

THIJS, L. et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. **Acta Materialia**, v. 58, n. 9, p. 3303–3312, 2010.

UDDEHOLM, **Informativo Técnico**: Corrax. Disponível em: <<http://www.uddeholm.com.br/br/files/Corrax.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2017.

WANG, L. ZHI; WANG, S.; WU, J. JIAO. Experimental investigation on densification behavior and surface roughness of AlSi10Mg powders produced by selective laser melting. **Optics and Laser Technology**, v. 96, p. 88–96, 2017.

YADROITSEV, I. **Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders**. [s.l: s.n.].

YADROITSEV, I.; BERTRAND, P. Selective laser melting in micro manufacturing. **The 3rd International Conference on Additive Technologies; DAAAM Specialized Conference**, v. 21, n. 1, p. 1–2, 2010.

YADROITSEV, I.; BERTRAND, P.; SMUROV, I. Parametric analysis of the selective laser melting process. **Applied Surface Science**, v. 253, n. 19, p. 8064–8069, 2007.  
YAP, C. Y. et al. Review of selective laser melting: Materials and applications. **Applied Physics Reviews**, v. 2, n. 4, 2015.

YASA, E.; KRUTH, J.-P. Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. **Procedia Engineering**, v. 19, p. 389–395, 2011.

YU, G. et al. Influence of processing parameters on laser penetration depth and melting/re-melting densification during selective laser melting of aluminum alloy. **Applied Physics A: Materials Science and Processing**, v. 122, n. 10, p. 1–12, 2016.

ZLUHAN, Bruno Paulo. **ESTUDOS EXPERIMENTAIS DA MICROESTRUTURA E ANISOTROPIA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MARAGING 300 PROCESSADO POR FUSÃO SELETIVA A LASER (FSL) EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE FABRICAÇÃO**. 2015. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville, 2015.