

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Simulação Computacional do Processo Aditivo
LPBF no aço maraging 18Ni300**

Danielle Mariano Espíndola da Silva

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado em Mecânica Computacional

Orientador (FEUP): Abílio Manuel Pinho de Jesus
Co-orientadores (INEGI): Jorge Wolfs Gil e Rui Amaral

Dezembro 2021

Esta página está intencionalmente em branco

*“É exatamente disso que a vida é feita: de momentos!
Momentos os quais temos que passar, sendo bons ou não,
para o nosso próprio aprendizado, por algum motivo.
Nunca esquecendo do mais importante: nada na vida é por acaso.”*

Chico Xavier

Esta página está intencionalmente em branco

Resumo

A tecnologia de manufatura aditiva (AM) tem como uma de suas utilidades a produção de peças para aplicações estruturais, sendo o seu diferencial nas peças bem mais complexas quando comparadas às fabricações mais tradicionais, como forjamento, por exemplo. Devido ao mercado estar cada vez mais exigente, esta técnica tem como ambição fabricar peças com alta resistência e boas características mecânicas. Apesar de vantajosa, há também alguns efeitos não desejados na AM, como por exemplo as tensões residuais e as distorções causadas, principalmente, pelo aquecimento e resfriamento em ciclos das camadas sobrepostas. Porém, o fato de a formação das tensões residuais depender não somente das variáveis de processamento, mas sobretudo das propriedades do material e da geometria da peça, dificulta prever facilmente o seu comportamento. Tendo em conta esta dificuldade, foi levantada a necessidade de modelos numéricos que conseguissem antecipar, com uma certa precisão, a microestrutura formada no interior das peças após o fabrico, as tensões residuais e as distorções. Os modelos matemáticos são complexos, então a simulação tornou-se uma ferramenta bastante útil de auxílio ao trabalho experimental, reduzindo, portanto, o tempo de cálculos numéricos, otimizando tempo e custo monetário. Porém, essas simulações têm se mostrado bastante desafiadoras e com certas limitações, pelo fato de a manufatura aditiva ser algo relativamente novo quando comparada aos processos tradicionais de fabrico, e também devido aos fenômenos associados, como interação fonte de calor e material, solidificação, mudanças de fase, etc.

O principal objetivo deste trabalho consistiu em simular o campo de tensões residuais e de distorções geométricas de uma peça manufaturada por LPBF, através do software de método de elementos finitos Ansys, e comparar esses resultados com os obtidos experimentalmente. O respectivo módulo do Ansys permite ajustar os parâmetros da máquina de manufatura aditiva em uma interface de utilização intuitiva. Porém, há nele ainda várias limitações que impede a realização de uma simulação fidedigna.

Para o alcance do objetivo, foi utilizada uma peça de dimensões idealizadas pelo NIST, fabricada com o aço maraging 18Ni300 através do projeto MAMTool - *Machinability of Additive Manufacture Parts of Tooling Industry* (parceria entre a Faculdade de Ciências e Tecnologia de Coimbra e o INEGI). De maneira geral, o estudo teve um resultado satisfatório em relação às distorções, mostrando-se de boa aplicabilidade na área estudada. O mesmo não se pode dizer em relação às tensões residuais, o que mostra a necessidade de estudos e desenvolvimento de formulações que simulem mais de perto os fenômenos associados à fabricação de peças pelo método de manufatura aditiva.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, tensões residuais, 18Ni300, distorções, LPBF, Ansys, aço maraging.

Esta página está intencionalmente em branco

Abstract

Additive manufacturing technology (AM) has as one of its utilities the production of parts for structural applications, being its differential in the most complex parts when compared to the most traditional fabrications such as forging, for example. Due to the market increasingly demanding, this technique has as ambition to manufacture parts with high strength and good mechanical characteristics. Although advantageous, there are also some unwanted effects in the AM, such as residual stresses and distortions caused mainly by heating and cooling in overlapping layers cycles. However, the fact that the formation of the residual stresses depends not only on the processing variables, but mainly of the properties of the material and the piece geometry, makes it difficult to easily predict their behavior. In view of this difficulty, there was a need for numerical models that could anticipate, with a certain precision, the microstructure formed within the parts after manufacturing, the residual stresses and the distortions. Mathematical models are complex, then simulation has become a very useful tool for experimental work assistance, therefore reducing the time of numerical calculations, optimizing time and monetary cost. However, these simulations have shown to be very challenging and with certain limitations, because the additive manufacture is something relatively new when compared to traditional manufacturing processes, and also due to associated phenomena, such as interaction of source heat and material, solidification, phase changes, etc.

The main objective of this work consisted of simulating the field of residual stresses and geometric distortions of a LPBF-manufactured part, through the ANSYS finite element method software, and compare these results with those obtained experimentally. The respective ANSYS module allows adjusting the additive manufacturing machine parameters in an intuitive user interface. However, there are still several limitations that prevents a reliable simulation.

For the achievement of the objective, a part of dimensions designed by the NIST, manufactured with the 18Ni300 maraging steel within the MAMTool project - Machinability of Additive Manufacture Parts of Tooling Industry (partnership between the Faculty of Sciences and Technology of the University of Coimbra and INEGI) was used. In general, the study had a satisfactory result in relation to distortions, showing good applicability in the studied area. The same cannot be said in relation to residual stresses, which shows the need for further studies and development of formulations that simulate more closely the phenomenon associated with the manufacture of parts by the additive manufacturing method.

Keywords: Additive manufacturing, residual stresses, 18Ni300, distortions, LPBF, Ansys, maraging steel.

Esta página está intencionalmente em branco

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, institucionalmente ao projeto ADD.Strength (Referência PTDC/EME/EME/31307/2017) intitulado “Propriedades Mecânicas Melhoradas em Componentes de Fabricos Aditivos”, financiado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI), e Programa Operacional Regional de Lisboa financiado pela FEDER e Fundos Nacionais (FCT).

Ao projeto MAMTool (Referência PTDC / EME-EME / 31895/2017) intitulado “Usinabilidade de Peças Aditivas Fabricadas para Indústria de Ferramentas”, financiado pelo Programa Operacional Competitividade e Internacionalização, e Programa Operacional Regional de Lisboa financiado pela FEDER e Fundos Nacionais (FCT).

Ao projeto “GEAR3D: Reconstrução 3D de dentes de engrenagens de grande dimensão via deposição direta por laser” (Referência POCI-01-0247-FEDER-039848), co-financiado pela FEDER através da POCI.

Em especial, gostaria de agradecer ao Professor Abílio de Jesus, por ter me dado a oportunidade de fazer a pesquisa num campo encantador, novo e com uma grande expansão para o futuro. Também ao Rui Amaral por fazer parte dessa equipa.

Pessoalmente, gostaria de agradecer ao Jorge Wolfs por toda a ajuda, transmissão de conhecimentos e paciência para me ensinar tudo, desde os experimentos até a simulação computacional e acompanhamento em todo o processo de experimentos e análises dos resultados.

À equipa envolvida no projeto MAMTool, idealizadora do projeto da fabricação das pontes, da EROFIO que foi a responsável pela fabricação das peças estudadas em aço maraging, assim como à equipa da Tornitrofa que foi a responsável pelo corte e medição das pontes antes e depois do corte. Um especial agradecimento à equipa do Centro de Física da Unidade de Coimbra que precederam à análise de tensões residuais, Prof. Maria José Maques e Prof. António Castanhola Batista.

À equipa do INEGI que realizou os ensaios não destrutivos e o metalográfico.

À FEUP e aos meus colegas e professores do curso de mestrado que, direta ou indiretamente, me encorajaram a chegar até aqui.

Minha eterna gratidão a Gabriella e a Hélio pelo companheirismo, paciência e compreensão nessa jornada deliciosa de aprendizagem, onde não deixaram de estar ao meu lado em um só segundo.

Aos meus pequenos Maria Paula e Gael que na sua pequenice em idade, mesmo inconscientemente, me deram a alegria e o entusiasmo nos dias que eu mais necessitava.

E, finalmente, gostaria de agradecer aos meus pais, Kassy e Inaldo e ao meu irmão, Fábio que, mesmo distantes, nunca me deixaram desistir de um sonho.



Esta página está intencionalmente em branco

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Siglas	xv
Lista de Símbolos.....	xvi
1. Introdução.....	17
1.1. Motivação e contexto	17
1.2. Objetivos	19
1.3. Descrição geral do trabalho	19
2. Revisão Bibliográfica	20
2.1. Histórico dos aços maraging	20
2.2. Composição química do aço maraging	21
2.2.1. Tratamento Térmico	23
2.3. Propriedades mecânicas do aço maraging	25
2.4. Manufatura aditiva (AM)	26
2.5. O Processo LPBF	28
2.5.1. Impacto do processo LPBF em aços de alta resistência	28
2.5.2. Parâmetros de Processamento	29
2.5.3. Vantagens e Limitações.....	30
2.6. Microestrutura dos aços produzidos por AM	31
2.7. Uso da difração por raio X (XRD) na inspeção de tensões residuais.....	32
2.8. Método dos Elementos Finitos (MEF).....	33
2.9. Ansys	35
3. Métodos e técnicas experimentais e numéricas.....	37
3.1. Métodos e técnicas experimentais	37
3.1.1. Fabricação do provete.....	37
3.1.2. Difração por raio-x (DRX)	39
3.1.3. Distorções.....	40
3.1.4. Análise metalográfica.....	46
3.2. Métodos e técnicas numéricas	47

3.2.1.	Modelagem do provete.....	47
3.2.2.	Definição de condições de fronteira	49
3.2.3.	Parâmetros de processo	50
4.	Resultados e discussões	52
4.1.	Resultados experimentais	52
4.1.1.	Tensões residuais	52
4.1.2.	Distorção dos provetes após corte dos pilares	53
4.1.3.	Metalografia.....	59
4.2.	Resultados computacionais	60
4.2.1.	Tensões residuais	60
4.2.2.	Distorção	64
5.	Conclusão	67
	Trabalhos Futuros	69
	Referências Bibliográficas	70
	Apêndice I – Propriedades do 18Ni300 usados no estudo	77

Lista de Figuras

Figura 1. Efeito do Molibdênio na dureza dos aços maraging (Lopes, 2007).....	20
Figura 2. Influência nas propriedades mecânicas dos maragings 18% (Loureiro, 2020).	22
Figura 3. (a) Diagrama de transformação metaestável Fe-Ni (Magneé et al, 1974); (b) diagrama de equilíbrio de fases para o sistema Fe-Ni (Silva, 2010).....	23
Figura 4. (a) Ciclo entre temperatura ambiente e a temperatura de austenitização; (b) Ciclo entre temperatura ambiente e $T > A_f$ (Muktinutalapati, 2006).	24
Figura 5. Diagrama de equilíbrio Fe-Ni com suas fases, sendo: L = líquido; δ_{Fe} = solução sólido-ferrita δ ; $\gamma_{Fe,Ni}$ = solução sólida - austenita; α = solução sólida - ferrita alfa; e $FeNi_3$ = composto intermetálico (Souza, 2018).	25
Figura 6. Classificação, descrição e nomenclaturas de sistemas mais comuns de processos MAM (Redwood et al., 2017, Adaptado).	27
Figura 7. Esquema do Processo LPBF (Souza, 2021).	28
Figura 8. Influência da velocidade de varrimento e distância entre varrimentos na falta de fusão entre camadas no aço SS316L (Mukherjee et. al, 2018, Adaptado).	30
Figura 9. Visão geral de microestruturas típicas de diferentes tipos de aços, produzidos convencionalmente e por manufatura aditiva; ppt.: precipitado, ret.: retido, α : ferrita, bcc, α' : martensita bcc/bct, γ : austenita, fcc.(Bajaj et al., 2020).	31
Figura 10. A geometria da estrutura de uma ponte (corpo de prova deste estudo) (Levine e Lane, 2019).	37
Figura 11. Representação esquemática da estratégia de varrimento dos provetes do Grupo 1 (provetes A e B) (Autor, 2021).	38
Figura 12. Representação esquemática da estratégia de varrimento dos provetes do Grupo 2 (proвете C e D) (Autor, 2021).....	38
Figura 13. Pontos usados para verificação das tensões residuais.	39
Figura 14. Pontos usados para medição das distorções nos provetes tipo pontes.	40
Figura 15. Corte das pontes pelo processo de eletroerosão por fio até o último suporte (Autor, 2021).....	41
Figura 16. Máquina da Tornitrofa com medição por coordenadas com 3 eixos, para efetuar a medição da altura de cada ressalto (Autor, 2021).....	41
Figura 17. Pontos de medição para definir o plano da placa base (Autor, 2021).	42
Figura 18. Corte das pontes com um ressalto de 1 mm (Autor, 2021).	42
Figura 19. Spray anti-reflexo utilizado para preparação do escaneamento 3D dos provetes (Autor, 2021).....	43
Figura 20. Vista superior de uma ponte com pontos de referência para levantamento de forma com sistema ótico (Autor, 2021).	43
Figura 21. Vista frontal de uma ponte após o corte para levantamento de forma com sistema ótico (Autor, 2021).	43
Figura 22. Scanner sendo calibrado com a mesa calibradora (Autor, 2021).	44
Figura 23. Mapeamento dos pontos para geração da geometria (Autor, 2021).....	44
Figura 24. Imagens sendo geradas no software com o escaneamento da peça estudada (Autor, 2021).	45

Figura 25. Esquema do corte longitudinal dos provetes.....	46
Figura 26. Esquema do corte transversal dos provetes.	46
Figura 27. Equipamentos utilizados na preparação das amostras para análise metalográfica. (a) Remet TR-60; (b) Struers DP-U4.....	47
Figura 28. Base representada pela cor verde e peça representada pela cor cinza (Autor, 2021).	47
Figura 29. Diferença das malhas entre a placa base e o provete (Autor, 2021).	49
Figura 30. Cantos selecionados para as condições de fronteiras.	49
Figura 31. Resultado das tensões residuais à superfície dos provetes A e B, nas direções x e y.	52
Figura 32. Resultado das tensões residuais à superfície dos provetes C e D, nas direções x e y.	52
Figura 33. Resultado do escaneamento 3D mostrando a distorção do provete A.	53
Figura 34. Resultado do escaneamento 3D mostrando a distorção do provete B.	54
Figura 35. Resultado do escaneamento 3D mostrando a distorção do provete C.	54
Figura 36. Resultado do escaneamento 3D mostrando a distorção do provete D.	54
Figura 37. Comparação entre as coordenadas medidas pela máquina da Tornitrofa e as coordenadas no scanner 3D, no provete A.	57
Figura 38. Comparação entre as coordenadas medidas pela máquina da Tornitrofa e as coordenadas no scanner 3D, no provete B.	57
Figura 39. Comparação entre as coordenadas medidas pela máquina da Tornitrofa e as coordenadas no scanner 3D, no provete C.	57
Figura 40. Comparação entre as coordenadas medidas pela máquina da Tornitrofa e as coordenadas no scanner 3D, no provete D.	58
Figura 41. Comparação das deflexões após o corte entre as 4 peças nas coordenadas medidas.	58
Figura 42. Metalografia do provete A. (a) Sentido transversal; (b) sentido longitudinal.	59
Figura 43. Metalografia do provete C. (a) Sentido transversal; (b) sentido longitudinal.	59
Figura 44. Análise de tensões residuais em y, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com a lateral engastada.	60
Figura 45. Análise de tensões residuais em x, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com a lateral engastada.	Error! Bookmark not defined.
Figura 46. Análise de tensões residuais em x, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com a face inferior engastada.	61
Figura 47. Análise de tensões residuais em y, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com a face inferior engastada.	61
Figura 48. Análise de tensões residuais em x, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com as duas faces laterais engastada.	62

Figura 49. Análise de tensões residuais em y , comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com as duas faces laterais engastada.	62
Figura 50. Análise de tensões residuais em x , comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com os dois cantos inferiores engastados.	63
Figura 51. Análise de tensões residuais em y , comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com os dois cantos inferiores engastados.	63
Figura 52. Campo de deslocamentos em Z após o corte dos pilares do provete.	64
Figura 53. Comparação da deflexão relativa dos pontos estudados experimentalmente com o simulado no Ansys.	65
Figura 54. Distorção da placa base com diferentes condições de fronteiras.	66

Lista de Tabelas

Tabela 1. Composição química dos aços maraging 18% Ni das classes 200, 250, 300 e 350 (Loureiro, 2020).	22
Tabela 2. Propriedades típicas da martensita nos aços maraging (Souza, 2018).	25
Tabela 3. Parâmetros de processamento usado LBPf do aço 18Ni300 (Silva, 2021)...	39
Tabela 4. Parâmetros para ensaio de difração de raio-x. Error! Bookmark not defined.	
Tabela 5. Simulação com as diferentes condições de fronteiras.	50
Tabela 6. Parâmetros da máquina de LPBF (NIST, 2019, adaptado).	50
Tabela 7. Resultado da distorção em Z (mm), ponto a ponto, da peça A após o corte dos pilares da ponte.	55
Tabela 8. Resultado da distorção em Z (mm), ponto a ponto, da peça B após o corte dos pilares da ponte.	55
Tabela 9. Resultado da distorção em Z (mm), ponto a ponto, da peça C após o corte dos pilares da ponte.	56
Tabela 10. Resultado da distorção em Z, ponto a ponto, da peça D após o corte dos pilares da ponte.	56



Lista de Siglas

AM	-	Additive Manufacture
C	-	Celsius
CAD	-	Computer-Aided Design
EDM	-	Electrical Discharge Machining
EF	-	Elementos Finitos
G1	-	Grupo 1
G2	-	Grupo 2
HIP	-	Hot Isostatic Pressing
J	-	Joule
Kg	-	Quilograma
LPBF	-	Laser Powder Bed Fusion
m	-	Metro
MAM	-	Metalic Additive Manufacture
MEF	-	Método de Elementos Finitos
mm	-	Milímetro
MPa	-	Mega Pascal
NIST	-	National Institute of Standards and Technology
Pa	-	Pascal
STL	-	Standard Triangle Language
XRD	-	X-Ray Diffraction

Lista de Símbolos

C	Tensor de elasticidade de quarta ordem
C_p	Calor específico
k	Condutividade térmica
T	Temperatura
Ψ_j	Função de forma definida no nó j
Ω_e	Domínio da função de forma
ρ	Densidade
σ	Tensão de Cauchy
ϵ	Extensão total
ϵ^p	Extensão plástica
ϵ^T	Extensão térmica

1. Introdução

1.1. Motivação e contexto

A manufatura aditiva (ou, prototipagem rápida, como era conhecida anteriormente) teve uma crescente aplicação industrial na última década, sendo antes utilizada como desenvolvimento de protótipos não funcionais. Com as capacidades do processo mais apuradas, a natureza dos materiais processados expandiu-se notoriamente aos metais, grupo este que teve uma aceitação muito boa no que diz respeito às propriedades mecânicas resultantes. Uma das principais vantagens do método aditivo é a possibilidade de se desenvolver geometrias complexas, que seriam muito difíceis de se alcançar com outros métodos de fabrico. Além disso, soma-se o fato de não serem necessário moldes, matrizes ou qualquer outra ferramenta que torne o processo mais oneroso, acelerando assim a produção de pequenos lotes. Sames et al. (2016) e Lewandowski e Seifi (2016) relatam que as resistências à tração e tensão de cedência de aços manufaturados aditivamente são idênticas às da manufatura convencional. Apesar disso, há pesquisas a decorrer no âmbito da identificação de propriedades mecânicas, diferentes das resultantes de avaliações com testes de tração uniaxiais, porém não menos importantes para o projeto de elementos metálicos fabricados por AM. Essas propriedades incluem caracterizações baseadas em ensaios de impacto, fadiga e fratura.

Contudo, consegue-se encontrar aplicações de AM nas mais diversas áreas, como peças extremamente complexas na indústria aeroespacial, reforço em montagens estruturais automotivas e substitutos ósseos ou próteses dentárias com alto grau de customização, na área da saúde. Mazur et al. (2016) ilustram as taxas de resfriamento otimizadas em insertos de molde com sistemas de canais conformados, indicando tempos de ciclo reduzidos e melhor vida útil do sistema de ferramentas.

As vantagens atraentes da AM e seu desenvolvimento como um processo de manufatura contribuirão para a maioria das peças fabricadas atualmente servirem como um componente funcional ou serem integradas em uma montagem. As peças são fabricadas no topo de uma placa base, às vezes com estruturas de suporte, as quais devem ser removidas no final do processo. O tratamento térmico para alívio de tensões e a prensagem isostática a quente (HIP) também podem ser necessários para algumas peças. Além disso, a qualidade superficial baixa e os desvios dimensionais e geométricos altos impõem a necessidade de operações de usinagem de acabamento (Fox et al., 2016). Para garantir a funcionalidade e permitir a montagem, as peças metálicas AM requerem tolerâncias dimensionais exigentes (precisão dimensional) e alta qualidade de superfície, sendo ambos requisitos limitados neste processo. A produção de furos roscados, por exemplo, é facilmente realizada nos processos de usinagem. Deste modo, surge a manufatura híbrida, que reúne as melhores características de cada processo de fabricação (Flynn et al., 2016).

Em resumo, o valor agregado da AM é altamente significativo em áreas que lidam com materiais caros e peças de alta complexidade (Kamal e Rizza, 2019). Vários aspectos da AM indicam que as operações de usinagem constituem um desafio maior, em relação ao corte de peças fabricadas convencionalmente. O comportamento anisotrópico derivado da camada e a ocorrência de elevadas tensões residuais podem ser apontadas como causas para eventuais diferenças na usinabilidade das peças metálicas. Além disso, a rigidez das peças topologicamente otimizadas (que muitas vezes são fabricadas em AM) é reduzida, o que significa a possibilidade de defeitos induzidos pela usinagem ou danos devido à vibração descontrolada ou fixação inadequada da peça (por causa de superfícies complexas).

O controle completo das operações de corte de metal é essencial para garantir o pós-processamento bem-sucedido de componentes fabricados aditivamente, que são valiosos demais para serem prejudicados por usinagem defeituosa. Portanto, é essencial compreender os parâmetros que contribuem para uma formação adequada das aparas. Apesar de ser uma tarefa desafiadora devido a todos os fenômenos envolvidos (altas deformações, taxas de deformação, temperaturas de interface local da ferramenta-chip, bem como tensões), ela tem sido objeto de investigação em uma gama considerável de ligas metálicas convencionais.

Entrando no contexto do aço maraging 18Ni300, este faz parte da classe dos aços de ultra-alta resistência (> 1000 MPa) que são atualmente processados por AM. Eles se diferenciam por combinar alta resistência com ductilidade relativamente boa, boa temperabilidade e soldabilidade, exigindo um tratamento térmico simples de envelhecimento. Este conjunto de propriedades é de grande importância nas indústrias automotiva, nuclear, de engrenagens, de rolamentos e, especialmente, aeroespacial e de ferramentas. Os materiais que combinam essas propriedades com a otimização geométrica concedida pela AM, que compensa parcialmente a densidade relativamente alta das ligas de ferro, são essenciais para o desenvolvimento de estratégias de projeto de engenharia leve (Oliveira, 2019).

A simulação também entra neste contexto como uma maneira eficaz para a realização de testes preliminares antes do desenvolvimento de protótipos de alto custo ou de execuções reais, sendo validada conforme a representação exata das características do processo ou material criados. A representação de um ambiente real em forma de modelo virtual recorre a modelos elaborados através de formulações matemáticas e elementos finitos que devem reproduzir, o mais fielmente possível, as características físicas do sistema original. O baixo custo e a rapidez com que podem ser realizadas as alterações nos protótipos permite produtos de melhor qualidade com menos tempo para serem desenvolvidos e dispostos no mercado (Silva, 2015).

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal simular, através do Ansys, as tensões residuais e a distorção de uma peça feita com material aço maraging 18Ni300, fabricada pela manufatura aditiva, através do processo de *laser powder bed fusion* (LPBF). Adicionalmente, também se propõem um conjunto de objetivos específicos relativos a trabalhos experimentais sobre peças produzidas por fabrico aditivo, recorrendo ao modelo geométrico proposto pelo *National Institute of Standards and Technology (NIST)* (NIST, 2019), visando a posterior análise do desempenho de simulações do processo. Estes objetivos incluem a medição de tensões residuais recorrendo à difração de raio x, a medição de distorções da peça após a sua separação parcial da placa base, por meio de usinagem de descarga eletrônica de fio (EDM) e a comparação dos resultados numéricos das simulações com os resultados experimentais gerados neste trabalho.

1.3. Descrição geral do trabalho

O conteúdo do presente trabalho está distribuído da seguinte forma:

Capítulo 2: destinado a uma revisão bibliográfica a contemplar o histórico, as características e as propriedades do aço maraging 18Ni300, uma explanação do processo de manufatura aditiva, bem como do Método dos Elementos Finitos e software utilizado para a realização da simulação, a fim de uma melhor compreensão do projeto desenvolvido.

Capítulo 3: os métodos e técnicas são apresentados e explicados neste capítulo, com informações específicas do material utilizado, parâmetros de processamento e simulação através do software.

Capítulo 4: exposição dos resultados obtidos pelas simulações realizadas com as discussões inferidas a partir deles.

Capítulo 5: considerações finais acerca do trabalho desenvolvido e dos resultados apresentados, além de proposições de trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Histórico dos aços maraging

Antes da década de 50, as ligas convencionais para aeronaves eram as ligas de alumínio. Tendo em vista o objetivo de se alcançar velocidades supersônicas da ordem de Mach 3, este material sofreria um aquecimento superficial em virtude do atrito com o ar, chegando a uma temperatura de aproximadamente 300 °C, tornando inviável a utilização das ligas de alumínio. Na tentativa de desenvolver um aço resistente a elevadas temperaturas e de beneficiar a sua aplicação otimizando parâmetros como soldabilidade, tenacidade e resistência mecânica (Avelino Júnior, 2017) foram realizadas uma série de pesquisas, levando ao desenvolvimento de um aço inoxidável que suportasse temperaturas elevadas e uma elevada relação resistência/peso. Para isto, foram adicionadas pequenas quantidades de alumínio (Al) e titânio (Ti) em aços inoxidáveis que continham níquel (Ni) (Lopes, 2007).

Os estudos realizados a partir de 1960 levaram ao emprego simultâneo de cobalto (Co) e molibdênio (Mo), produzindo um maior endurecimento na matriz martensítica durante o tratamento térmico de envelhecimento, o que aumentou significativamente a resistência da liga (Figura 1). Estudos mais aprofundados mostraram que a adição de 2% de molibdênio nas ligas que continham ferro, níquel, cobalto, alumínio e titânio aumentavam a tenacidade à fratura do material. Isto ocorre porque o Mo diminui a segregação dos elementos de liga no contorno de grão, o que evita a ocorrência da fratura intergranular (Lopes, 2007; Nunes, 2015). Floreen e Speich (1979) concluíram que a presença do Co nessas mesmas ligas proporciona um endurecimento por solução sólida, com exceção do molibdênio. Já com a adição do Mo, o endurecimento é proporcionado pela diminuição da solubilidade deste elemento na matriz pela presença do cobalto.

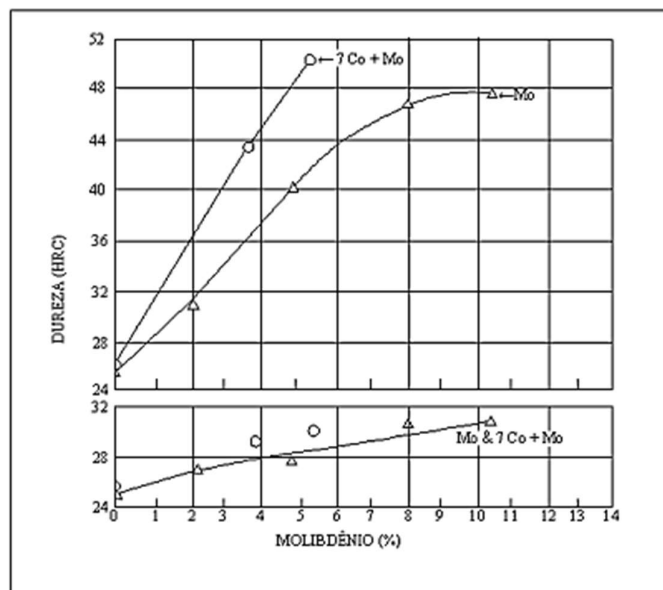


Figura 1. Efeito do Molibdênio na dureza dos aços maraging (Lopes, 2007).

Os anos 70 e 80 foram marcados pelo desenvolvimento do aço maraging sem o cobalto (ou com teores inferiores aos estudados anteriormente), devido à falta de disponibilidade deste metal aliada aos altos custos (Nunes, 2015), além da substituição parcial do níquel pelo manganês, unicamente por este ser mais barato. Porém, há consequências nestas modificações, como por exemplo a fragilização dos contornos de grãos (Avelino Júnior, 2017).

Em contrapartida às excelentes propriedades dos aços maraging, há o seu alto custo proveniente do elevado teor dos elementos de liga utilizados e às refinadas técnicas de fusão (Sha & Guo, 2009). Esta relação custo-benefício torna-os aplicáveis para componentes mecânicos de alto desempenho como, por exemplo, carcaças de foguetes, células de carga e cilindros para ultra centrífugas, onde é necessária uma alta resistência (Castro Güiza, 2015). Nos dias atuais, podemos observar a aplicabilidade dos aços maraging em diversos setores, sendo ainda mais utilizado no setor aeroespacial (aviões e foguetes) (Guo & Sha, 2004), por produzir chapas mais finas, diminuindo o peso e mantendo toda a sua resistência. Outra indústria que utiliza muito estes aços é a indústria nuclear, nos processos de enriquecimento de urânio, para as centrífugas, onde se necessita a resistência e a densidade do material. Há também algumas aplicações em automóveis (utilização na fórmula 1), na parte médica (próteses para reposição de membros danificados), em ferramentas (Guo & Sha, 2004), vasos de pressão, cascos de submarinos, equipamentos esportivos (Castro Güiza, 2015), peças de máquinas e no setor militar (Sha & Guo, 2009).

2.2. Composição química do aço maraging

Os aços maraging são um tipo especial de aço, diferenciando-se dos demais pelo fato de não serem endurecidos por carbono, o que confere uma melhoria significativa na sua temperabilidade, formabilidade e combinação de resistência e tenacidade. São martensíticos na condição solubilizada, sendo facilmente usinados nesta condição pela estrutura Fe-Ni ser de baixa dureza e não exigir uma velocidade de resfriamento elevada para a sua formação. Ainda em relação ao carbono, por ser considerado uma impureza na composição dos maragings (Tabela 1), é mantido em uma porcentagem muito baixa, a fim de minimizar a formação de carboneto de titânio (TiC), combinação que pode afetar as características citadas acima.

O endurecimento do aço dá-se pelo envelhecimento da estrutura martensítica (*mar + aging* = envelhecimento da martensítica) em uma temperatura de ordem de 480 °C (Magnee et al., 1974).

A Tabela 1 apresenta as composições químicas usuais de aços maraging com 18% de Ni e está dividida nas classes 200, 250, 300 e 350, de acordo com os seus limites de escoamento ($\times 10^6$ psi). O teor de níquel permite uma estrutura totalmente austenítica em temperaturas superiores a 750 °C (Magnee et al., 1974; Loureiro, 2020).

Tabela 1. Composição química dos aços maraging 18% Ni das classes 200, 250, 300 e 350 (Loureiro, 2020).

Aço	Ni [%]	Co [%]	Mo [%]	Al [%]	Ti [%]	Fe
18 Ni (200)	17 – 19	8 – 9	3 – 3,5	0,05 – 0,15	0,15 – 0,25	Bal.
18 Ni (250)	17 – 19	7 – 8,5	4,6 – 5,2	0,05 – 0,15	0,3 – 0,5	Bal.
18 Ni (300)	17 – 19	8,5 – 9,5	4,6 – 5,2	0,05 – 0,15	0,5 – 0,8	Bal.
18 Ni (350)	17,5 – 18,5	12 – 12,5	3,8 – 4,6	0,05 – 0,15	1,4 – 1,7	Bal.

É possível observar, também, a influência da composição química nas propriedades mecânicas nos diversos tipos de aços maraging (Figura 2).

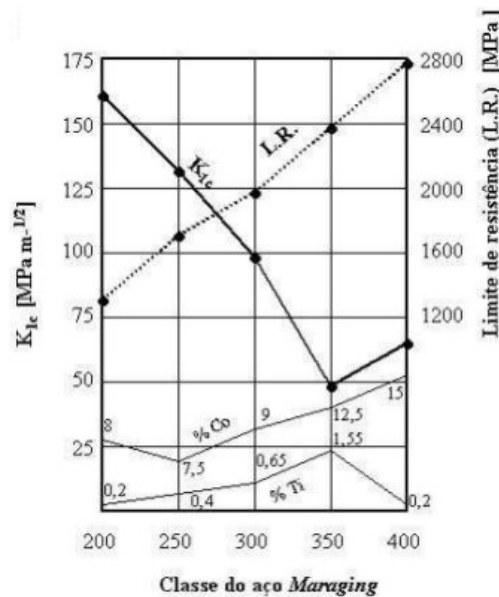


Figura 2. Influência nas propriedades mecânicas dos maragings 18% (Loureiro, 2020).

A presença de altas quantidades de Ni nos aços maragings garante a formação totalmente martensítica após o tratamento térmico de solubilização seguido de têmpera, porém essa relação de transformação entre as fases austenítica e martensítica não se dá uniformemente nas ligas de Fe-Ni (Loureiro, 2020). Essas ligas mantêm as suas características térmicas entre a formação da fase martensítica no resfriamento e sua reversão para a fase austenítica no aquecimento. A manutenção das características térmicas é mais constante quando se aumenta a quantidade de níquel na liga.

Para uma explicação mais clara das transformações de fase, são apresentados dois diagramas na Figura 3. O diagrama de fase da Figura 3a é o metaestável, que traça a transformação de austenita para martensita por resfriamento e a reversão de martensita para austenita pelo aquecimento. Já a Figura 3b é um diagrama de equilíbrio que nos evidencia que, para teores mais elevados de Ni das fases de equilíbrio, as baixas temperaturas são de ferrita e austenita (Padial, 2002).

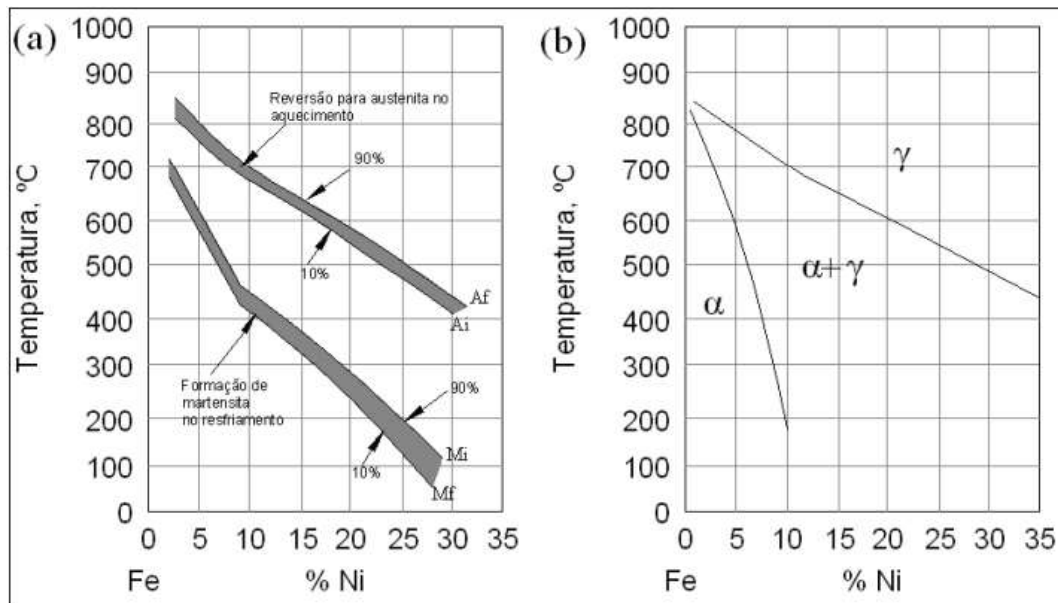


Figura 3. (a) Diagrama de transformação metaestável Fe-Ni (Magneé et al, 1974); (b) diagrama de equilíbrio de fases para o sistema Fe-Ni (Silva, 2010).

O diagrama da Figura 3a indica um comportamento típico dos aços maragings durante o resfriamento a partir do campo austenítico ou da temperatura de solubilização. É importante saber que não ocorre transformação de fase até a temperatura M_i (temperatura onde se inicia a formação da martensita a partir da austenita) (Silva, 2010).

2.2.1. Tratamento térmico

Para se fazer refinar os contornos de grãos da austenita prévia nos aços maragings 18%Ni, foi desenvolvida uma técnica de ciclos térmicos, a qual divide-se em dois deles (Figura 4):

- Um ciclo de tratamento térmico entre a temperatura ambiente e a temperatura de austenitização (transformação da austenita abaixo de Af);
- Um ciclo entre a temperatura ambiente e a temperatura no campo de fase austenítica, acima de Af.

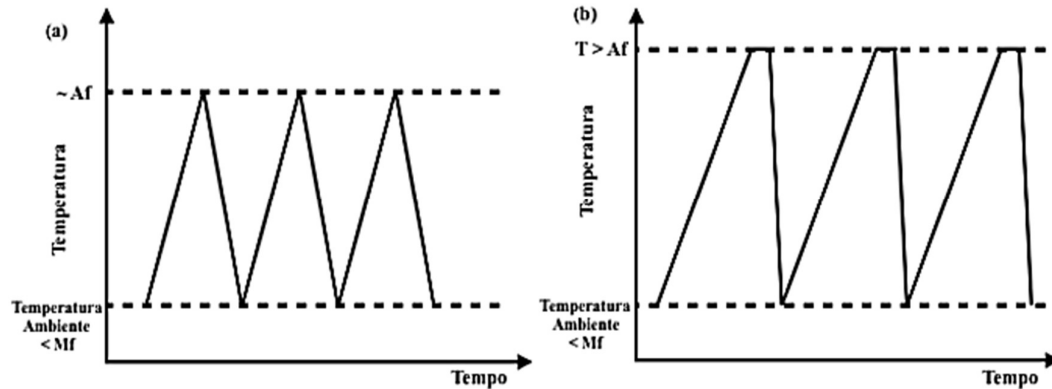


Figura 4. (a) Ciclo entre temperatura ambiente e a temperatura de austenitização; (b) Ciclo entre temperatura ambiente e $T > A_f$ (Muktinutalapati, 2006).

No intuito de endurecer a matriz martensítica do aço maraging, é feito o procedimento de tratamento térmico de solubilização. A preparação envolve o aquecimento da liga significativamente acima da temperatura final de transformação de austenita (A_f); fica, então, tempo suficiente para fazer a alocação dos elementos de liga em solução sólida e então há o resfriamento à temperatura ambiente para obter a estrutura martensítica (Padial, 2002).

Esses aços são, normalmente, solubilizados à temperatura de 815°C e depois resfriados ao ar. Estudos prévios mostram que, para haver uma melhor combinação de tenacidade com a resistência, poderá ser realizada uma solubilização dupla, ou seja, o aço é aquecido entre 870°C e 980°C , resfriado ao ar, reaquecido a uma temperatura entre 760°C e 815°C e, novamente, resfriado ao ar (Santos, 2001).

O tratamento térmico de envelhecimento é aplicado, usualmente, após a solubilização e tem como objetivo aumentar a dureza e a resistência do material, consistindo em reaquecer a liga entre uma faixa de temperatura de 455°C a 510°C , mantendo a esta temperatura por 3h a 12h dentro de um forno elétrico, geralmente, e depois resfriando a uma temperatura ambiente (Santos, 2001).

A microestrutura celular é retida durante este processo, porém, quando em temperaturas mais elevadas (600°C , por exemplo), a austenita é revertida substancialmente; ainda, quando o tratamento é feito com solução aquosa (entre 815°C e 840°C), a microestrutura celular austenítica desaparece completamente após o processo, sendo substituída por uma microestrutura totalmente martensítica, diminuindo a dureza e a resistência comparando-se com o estado como produzido (Bajaj et al, 2020).

2.3. Propriedades mecânicas do aço maraging

O aço maraging possui um sistema cristalino de martensita do tipo cúbico de corpo centrado (CCC), o qual é formado por cisalhamento, apresentando uma rede cristalina rica em elementos de liga. Isto implica em um material dúctil e de boa usinabilidade devido ao baixo teor de carbono presente (Souza, 2018). A Tabela 2 apresenta as propriedades do aço em seu estado solubilizado.

Tabela 2. Propriedades típicas da martensita nos aços maraging (Souza, 2018).

$\sigma_{LE(0,2)}$ (Mpa)	σ_{LR} (Mpa)	Elongação (%)	Redução de área (%)	Dureza (HV)
650-800	950-1050	17-19	70-75	290-320

Conforme trata-se de ligas quaternárias Fe-Ni-Co-Mo, os aços maraging se baseiam no diagrama de equilíbrio Fe-Ni, sendo as fases deste diagrama demonstradas na Figura 5, ressaltando que a fase martensítica é apenas apresentada após o resfriamento rápido a partir de γ (austenita).

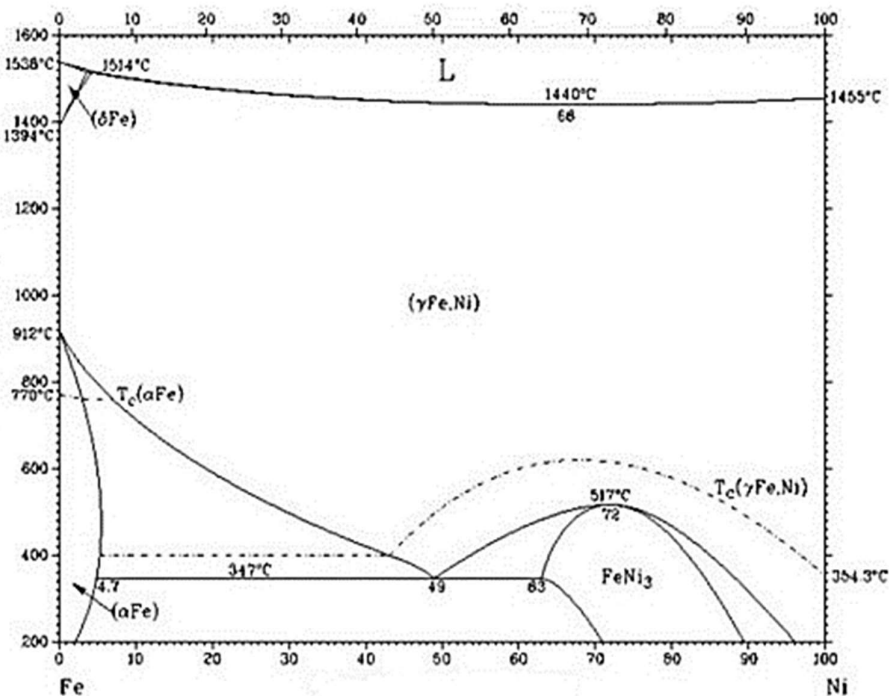


Figura 5. Diagrama de equilíbrio Fe-Ni com suas fases, sendo: L = líquido; δ Fe = solução sólida-ferrita δ ; γ Fe,Ni = solução sólida - austenita; α = solução sólida - ferrita alfa; e FeNi₃ = composto intermetálico (Souza, 2018).

Nota-se que, ao serem mantidas temperaturas menores que 610°C, as fases predominantes são a austenita (γ) e a ferrita (δ) quando em equilíbrio termodinâmico (Souza, 2018).

O aço maraging produzido por LPBF apresenta resistência à tração igual ou um pouco superior ao material produzido convencionalmente (processo de conformação ou usinagem) (Silva, 2021).

Após um tratamento térmico de envelhecimento, um aumento significativo na dureza e na resistência à tração acompanhada por uma redução na ductilidade é observada, (Kempen et al., 2011). Ainda, a razão para a boa combinação entre resistência e tenacidade dos aços maraging é o endurecimento da microestrutura martensítica por precipitados intermetálicos durante este tipo de tratamento (Bajaj et al., 2020).

Estudos sobre a influência das altas temperaturas e taxas de deformação do aço maraging têm sido realizados. Como exemplo, Schmidova et al. (2019), por meio da análise de ensaios de tração dinâmica, relatam que o LPBF 18Ni300 apresenta capacidade de endurecimento significativa para taxas de deformação aumentadas. Já Church et al. (2018) compararam o comportamento à tração dos aços maraging LPBF e 18Ni300 forjados, em sua condição envelhecida, para diferentes taxas de deformação e temperaturas.

2.4. Manufatura aditiva (AM)

Um processo de usinagem tradicional tem início com um tarugo de material o qual vai sendo retirado gradativamente até que a geometria da peça final seja estabelecida, sendo denominado, assim, de processo subtrativo. A Manufatura Aditiva, pelo contrário, é um processo caracterizado por iniciar com um modelo sólido digital (modelo CAD) e, ao utilizar uma fonte de calor e o material de preenchimento específico, produz diretamente as peças ou os componentes, ganhando esta denominação pelo fato de o método depender da adição de material em cada camada até alcançar a geometria final dos modelos tridimensionais (Silva, 2021). Para isto, o modelo sólido digital é dividido em várias camadas, criando um caminho da ferramenta para rastrear as camadas individuais e, em seguida, construindo a peça, camada por camada, através de um sistema automatizado (Pires, 2021).

O termo Manufatura Aditiva possui alguns sinônimos utilizados coletivamente, como fabricação aditiva, prototipagem rápida e impressão 3D (EPMA, 2015). Porém, é importante destacar que a AM envolve várias técnicas, como adição de material para fins de reparo, remanufatura e melhoria de propriedade de peças ou componentes existentes. Suas principais vantagens são a capacidade de criar componentes diretamente a partir de dados CAD, permitindo uma redução significativa no tempo de design e nos custos, a oferta de um maior grau de liberdade de design e a possibilidade de desenvolvimento de geometrias que não são alcançáveis pela manufatura tradicional (Pires, 2021).

O Fabrico Aditivo Metálico (MAM) é geralmente caracterizado pelo estado do material de alimentação (pó, arame, filamento ou folha) e sua fonte de energia (laser, feixe de elétrons, arco elétrico ou energia ultrassônica). Apesar dos inúmeros processos AM atualmente disponíveis, a fabricação de peças metálicas classificam-se em categorias, apresentadas na Figura 6, de acordo com a norma ISO / ASTM52910-17 (Silva, 2021).

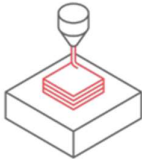

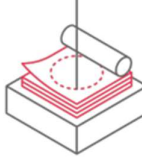
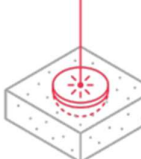
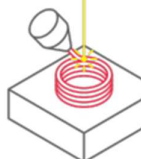
PROCESSOS				
Extrusão de Material	Jateamento do Aglutinante	Laminação de Folhas	Fusão em Leito de Pó	Deposição de Energia Dirigida
				
O material é distribuído seletivamente através de um bico ou orifício.	O agente de ligação líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó.	Folhas de material com contorno específico são coladas para formar um objeto.	A energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó.	A energia térmica funde os materiais derretendo à medida que o material é depositado.

Figura 6. Classificação, descrição e nomenclaturas de sistemas mais comuns de processos MAM (Redwood et al., 2017, Adaptado).

É importante notar que as três primeiras apresentam-se como processos de várias etapas, uma vez que a forma e as propriedades do material final não são alcançadas em uma única operação (Silva, 2021), sendo a Extrusão do Material e o Jateamento do Aglutinante necessitadas das etapas de lavagem e sinterização, e a Laminação de Folhas envolvendo mecanismos de soldagem para consolidação e de contorno específico para garantir a forma das peças.

Os processos de etapa única permitem a manufatura de peças quase totalmente densas e a (re) fusão completa do material sem a necessidade de sinterização e cura adicionais, tudo em uma única etapa (Silva, 2021), sendo eles: Fusão em Leito de Pó (PBF) e Deposição de Energia Dirigida (DED), os quais são similares nas condições de processamento e são considerados os mais comumente utilizados na fabricação de componentes metálicos (Herzog et al., 2016).

O DED é o processo AM mais rápido, apresentando altas taxas de construção, o que o tornam adequado para a fabricação de peças de alto volume com nível de precisão e detalhe aceitável, se comparado com alguns processos tradicionais de fabricação. Consiste na utilização de uma fonte de energia para fundir o material de adição, o qual é depositado no local pretendido formando a camada de peça. É adequado para o reparo de componentes ou melhoria de funcionalidade (Silva, 2021).

Em PBF, uma fonte de calor funde as camadas do pó metálico a fim de se chegar à forma desejada. O processo é constituído por 3 etapas: (a) transferência do pó para a placa

de impressão; (b) fundição da camada de superfície através de um feixe de elétrons ou de um laser; (c) deslocamento da placa de construção conforme espessura de cada camada, repetindo o ciclo até a conclusão da peça. Para o estudo em questão, foi realizado o processo de manufatura aditiva via fusão em leito de pó, o que será melhor detalhado na Seção 2.5.

2.5. O Processo LPBF

O processo de *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF) atua com diversos materiais desde polímeros até cerâmicos e metais, e conta com diversos processos que trabalham de forma semelhante (Souza, 2021). A formação do produto se dá pela fundição do material em pó, o qual fica armazenado em um tanque com uma plataforma que se eleva para que ele seja transferido para a plataforma de transformação. Esta transferência é realizada por um rolo ou lâmina, que empurra o pó até a segunda plataforma, onde um feixe de laser é direcionado ao material, fazendo com que o material se funda (Souza, 2021; Araújo, 2018). Na sequência, a plataforma de produção despeja mais pó e todo o processo se repete até o produto ser finalizado. A Figura 7 ilustra um breve esquema do LPBF.

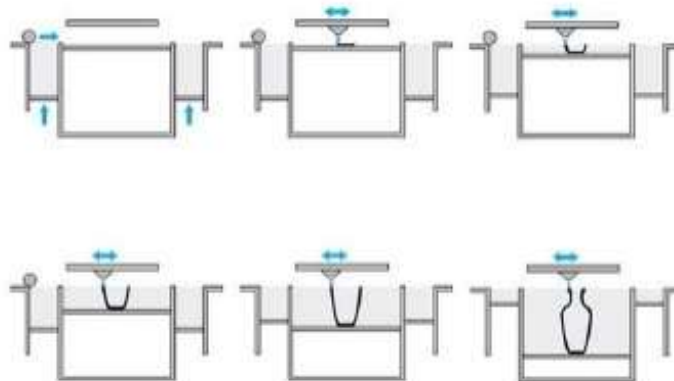


Figura 7. Esquema do Processo LPBF (Souza, 2021).

2.5.1. Impacto do processo LPBF em aços de alta resistência

O comportamento mecânico favorável e a integridade estrutural de componentes produzidos por aços de alta resistência podem ser prejudicados seriamente pelas diversas variáveis presentes no processo LPBF. Para que se alcance a menor quantidade de defeitos (densidades superiores a 98%) é necessária a otimização dos parâmetros de processamento e a seleção das partículas (pós) com seus atributos apropriados (especificamente forma e distribuição).

A peculiaridade da microestrutura do aço devido a processos de AM dá origem ao comportamento anisotrópico, assim como tensões residuais que são comuns em processos como soldagem, sendo responsáveis por distorções na superfície das peças. Quando se necessita de uma resistência mecânica excepcional, os aços maraging apresentam uma das soluções aditivamente manufaturável mais viáveis, especialmente pelo fato de sua boa soldabilidade (Turk et al., 2019). O seu uso extensivo traz uma literatura abrangente e apresenta as condições de processamento mais adequadas e a influência direta dos parâmetros mais importantes.

2.5.2. Parâmetros de processamento

Quando olhamos as desvantagens do processo de manufatura aditiva (mais especificamente o LPBF), vemos que uma das maiores delas são os defeitos causados pela deposição das camadas. Para minimizar esses defeitos, é comumente controlada a velocidade de deposição do material alinhado com a potência do feixe do laser (Bajaj et al., 2019). A densidade de energia volumétrica (E_v) é um parâmetro unificador em LPBF que permite identificar quantitativamente as condições de processamento adequadas.

Segundo os estudos da influência na densidade relativa das peças, feita por de Zhang et al. (2017b), corpos de prova com certo desvio das condições ótimas de densidade de energia (E_v0) foram fabricados através a ação laser e a densidade relativa foi inspecionada via análise de imagens.

No processo de LPBF, a profundidade da poça de fusão é normalmente controlada pela condução de calor através das camadas depositadas anteriormente. Pelos estudos de King et. al (2014), o mecanismo de fusão pode mudar para o modo de *keyhole*, onde a profundidade da poça é controlada pela evaporação do metal. De acordo com as configurações da velocidade de varredura, Gong et al. (2014) relatam a tendência típica na porosidade na peça, mostrando, assim, o aumento da porosidade do tipo *keyhole* para alta densidade de energia e falta de fusão em configurações de parâmetros de densidade mais baixa. Isso decorre por causa da sobreposição insuficiente das poças de fusão sucessivas.

Uma das partes mais desafiantes no processo LPBF é a escolha de parâmetros adequados. Uma seleção cuidadosa de espaçamento entre varrimentos pode minimizar defeitos de falta de fusão e distorção para um conjunto fixo de parâmetros (Mukherjee et al., 2018). Com o intuito de validar o seu próprio modelo numérico, Mukherjee et. al. (2018) examinaram a influência dos parâmetros de processamento em ligas processadas com LPBF comuns. Pode-se observar pela Figura 8 o efeito da velocidade de deposição da camada, causando o defeito da falta de fusão.

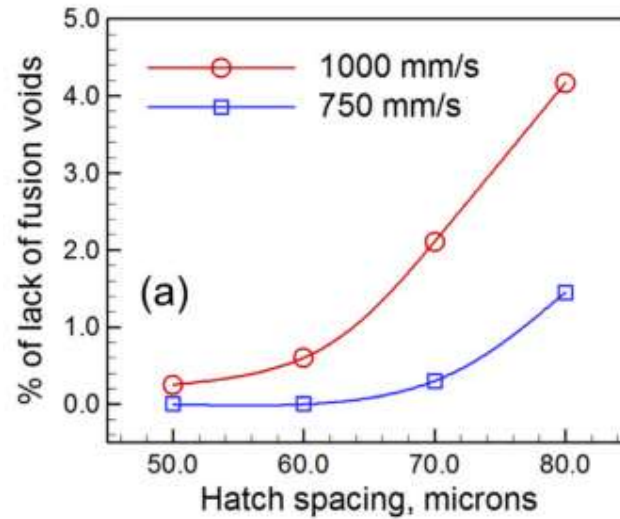


Figura 8. Influência da velocidade de varrimento e distância entre varrimentos na falta de fusão entre camadas no aço SS316L (Mukherjee et. al, 2018, Adaptado).

Podemos deduzir que valores mais altos de espaçamentos entre varrimentos nas camadas dificultam a união apropriada por fusão resultando, assim, em um aumento de porosidade. No processo LPBF, a tensão superficial na poça de fusão é normalmente determinada pelo tamanho máximo de partículas do pó. O tamanho da impressão é definido pela espessura da camada ao longo da direção da construção (Z) e pelo tamanho do ponto do laser (plano XY) (Silva, 2021).

2.5.3. Vantagens e limitações

As vantagens do LPBF são, em grande proporção, a razão para que essa tecnologia cresça tanto dentro dos setores industriais a nível global. Uma das principais é um menor desperdício de material que, segundo Ford e Despeisse (2016), elimina até 60% das perdas que se tinham de material em processos convencionais (usinagem, estampagem, laminação). Não se pode deixar de citar também os prazos de entrega para produções de baixa série, que são reduzidos significativamente por se apresentar apenas uma única etapa para processar todo o produto. Por último, a produção personalizada de baixo volume, que cada vez mais é o ponto de diferenciação entre empresas rivais, onde a facilidade de alterar o design da peça é facilmente ajustado dada a ausência de moldes ou ferramentas necessárias à modificação do produto no mesmo equipamento (Markusson, 2017).

Apesar das vantagens, processos LPBF possuem desvantagens como a baixa taxa de deposição, visto que a produção se foca em um ou pequenos lotes de produtos, não sendo aplicável à produção em massa. A matéria-prima também se mostra como um desafio, uma vez que se apresenta com altos custos de aquisição e com falta de novos materiais de qualidade, sendo um convite para esforços em pesquisas para desenvolvimento de novos

materiais (Ford e Despeisse, 2016). Ainda, o maior desafio no processo consiste na grande distorção causada pelo processo aditivo das camadas (depositadas umas em cima das outras), além do acúmulo das tensões residuais nas peças.

E, para finalizar, o grande desafio de hoje é a confiabilidade e qualidade deste processo frente aos processos convencionais que a indústria já está acostumada a utilizar. Novamente, pesquisas precisam ser feitas para que se prove o valor e a importância desse processo, para que este tenha o seu lugar na indústria da manufatura metalomecânica.

2.6. Microestrutura dos aços produzidos por AM

Em relação às fontes de calor utilizadas, as estruturas produzidas no processo de manufatura aditiva dos aços maragings podem assemelhar-se às produzidas nos processos tradicionais de soldagem multipasse. No entanto, o LPBF permite o aumento na flexibilidade, levando a um maior grau de precisão e personalização. Os metais manufaturados aditivamente têm sua microestrutura criada por sucessivas estruturas de solidificação a partir de um *melt pool* das partículas de pó. Estas estruturas são influenciadas pelos parâmetros de solidificação - taxa de solidificação (R) e gradiente de temperatura (G) - podendo ser planares, celulares, dendríticas colunares ou dendríticas equiaxiais (Silva, 2021). Bertoli et al. (2017), ao desenvolverem um modelo que previa os parâmetros de solidificação em função da potência do laser e da velocidade de varredura para o aço inoxidável 316L, mostraram que, em condições realistas destas características, a morfologia da microestrutura resultante não é afetada. Entretanto, Choo et al. (2019) realizaram estudos com maior e menor potência do laser, ilustrando que o ajuste dos parâmetros de processamento pode contribuir para uma melhor microestrutura, levando a uma maior resistência mecânica.

A Figura 9 apresenta um comparativo das microestruturas típicas entre os aços manufaturados convencionalmente e os fabricados aditivamente. Para o aço maraging 18%Ni, a microestrutura é de solidificação celular/dendrítica quando são fabricados por LPBF e DED, diferindo do mesmo aço quando convencional (o qual é totalmente martensítico), sendo composto de uma matriz martensítica com pequenas regiões de austenita retida (Bajaj et al., 2020).

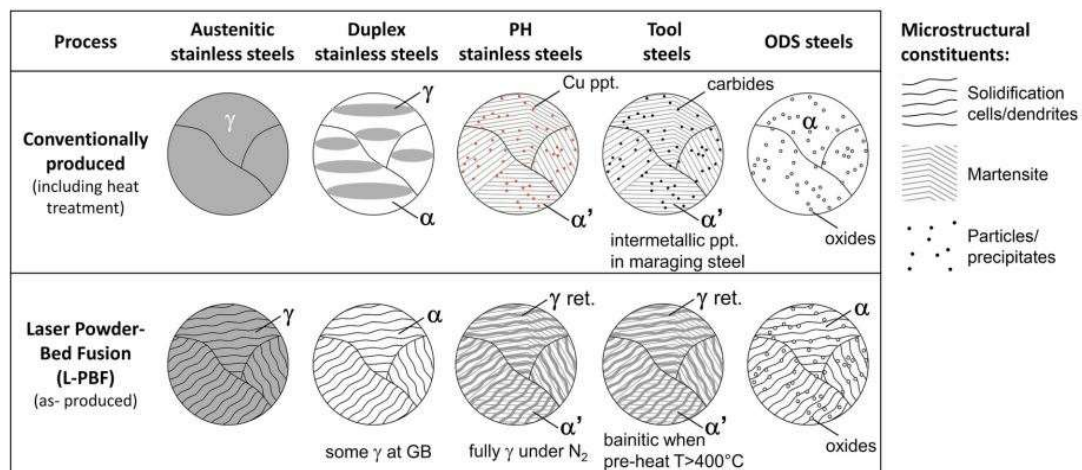


Figura 9. Visão geral de microestruturas típicas de diferentes tipos de aços, produzidos convencionalmente e por manufatura aditiva; ppt.: precipitado, ret.: retido, α : ferrita, bcc, α' : martensita bcc/bct, γ : austenita, fcc. (Bajaj et al., 2020).



2.7. Uso da difração por raio X (XRD) na inspeção de tensões residuais

A difração de raios X é uma técnica analítica versátil e não destrutiva, destinada a realizar a caracterização de materiais quanto à sua estrutura atômica, permitindo conhecer a estrutura cristalina do material, composição de fases, tamanho dos grãos, orientação e espessura da camada, entre outras coisas (Silva, 2020).

A partir da interação dos raios X com o material a ser analisado, parte da radiação é refletida de forma coerente. Esse fenômeno dá origem à difração com base na lei de Bragg, obtendo-se, assim, um difratograma da amostra com a representação da intensidade da radiação difratada em função do ângulo de difração ou da distância interplanar característica (Lima, 2006).

Na geometria de feixe paralelo, a profundidade de penetração do feixe na amostra, normalmente, depende da densidade do material a ser analisado, do comprimento de onda do feixe e do ângulo de incidência. A área irradiada da amostra é a máxima possível e constante em toda a faixa angular do teste.

Um difratograma contém vários picos que são caracterizados por sua posição, intensidade e forma. Cada fase ou substância, tem um difratograma de raio-X característico. A identificação da fase é realizada comparando o difratograma de uma amostra desconhecida com o difratograma de um banco de dados de referência.

A técnica de difração por raio X é utilizada de forma a obter análises qualitativas da existência de fases em substâncias puras ou misturas. Também é usada na avaliação de tensões residuais presentes nos materiais, as quais são responsáveis pela distorção da microestrutura do material, sendo muito interessante nos estudos envolvendo fabrico aditivo dada a importância das tensões residuais nestes processos. Recorrendo à usinagem química, é possível usar esta técnica também para avaliação das tensões residuais em profundidade, além de suas aplicações industriais atuais, como na área farmacológica, análise de corrosão e aplicações geológicas e microeletrônicas (Silva, 2020).

Feitosa (2017), por exemplo, em sua caracterização microestrutural e análise de textura cristalográfica do aço maraging 300 produzido por AM, utilizou esta técnica para produção de figuras de pólo e Função de Distribuição de Orientação Cristalográfica, possibilitando análise de macrot textura, microscopia ótica e eletrônica de varredura. Uma outra aplicação foi realizada por Araújo (2020), na manufatura aditiva da liga reciclada Al-Fe-Cr-Ti formadora de fase quasicristalina, proporcionando uma elevada resistência mecânica principalmente em altas temperaturas, sendo estas ligas consideradas promissoras como peças de motores automotivos e aeronáuticos.

2.8. Método dos elementos finitos (MEF)

O Método de Elementos Finitos tem como metodologia a divisão do domínio em várias regiões com geometrias mais simples e conhecidas, podendo ser elas em formatos triangular, quadrilateral, cúbico, entre outros. A estas sub-regiões dá-se o nome de elementos finitos, pois sua geometria é bem definida. Aos vértices dessas pequenas geometrias, dá-se o nome de pontos nodais. Ao conjunto de elementos finitos e pontos nodais chama-se ‘malha de elementos finitos’. Quanto mais refinada for a malha, ou seja, quanto mais elementos possuir, maior a precisão do resultado. Ao processo de separar e dividir o material em vários elementos com geometrias conhecidas dá-se o nome de discretização.

O objetivo do MEF é obter uma formulação que possa explorar a análise, de forma automática, de sistemas complexos, por intermédio de programas computacionais. Para que seja alcançado com êxito, o método considera o sistema contínuo como igual ou equivalente a um agrupado de elementos finitos no qual cada estrutura é considerada uma estrutura contínua simples. Tendo em conta que os elementos finitos são unidos pelos pontos nodais, ao se deslocarem, deslocam-se todos os adjacentes, reagindo, assim, como um elemento único (Souza, 2003)

Apesar do MEF considerar os elementos finitos como contínuos ele é, essencialmente, um processo de discretização, pois exprime os deslocamentos em qualquer ponto do elemento contínuo em termo de um número finito de deslocamentos nos pontos nodais, ponderados por funções de forma apropriadas (Tavares, 1998).

Dentro de cada elemento, uma expressão polinomial é utilizada para expressar a variância espacial dos parâmetros do problema, como os deslocamentos em uma estrutura. O MEF oferece apenas uma aproximação para a solução exata, uma vez que a variância empírica de tais parâmetros é mais elaborada e geralmente, desconhecida.

A equação inicial que define o problema é transformada usando um princípio variacional: uma declaração matemática mais ampla que reduz a ordem da equação diferencial parcial, ao multiplicá-la por uma função de teste e integrá-la ao domínio, transformando, assim, uma formulação diferencial em uma formulação integral.

As funções de forma são expressões matemáticas que mapeiam valores nodais para o domínio do problema. Eles podem ser definidos para toda a geometria ou para cada parte individual (como é o caso do MEF). As funções de forma devem atender a dois requisitos matemáticos: ser definido unitário em seu respectivo nó e zero nos demais; e a soma de todas as funções de forma deve ser igual à unidade em qualquer ponto do domínio (Pires, 2021).

Escrevendo, matematicamente essas condições, resultam as Equações (1) e (2).

$$\Psi_j(\epsilon_i, \eta_i, \zeta_i) = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 0, & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (1) \quad \text{🗨️}$$

$$\sum_{j=1}^{N_n} \psi_j (\epsilon_i, \eta_i, \zeta_i) = 1, \quad \forall i \in \Omega_e \quad (2)$$

Dentro da manufatura aditiva, a modelagem de elementos finitos é aplicada com o objetivo de prever as distorções e as tensões residuais. Em virtude da AM ser um processo de adição de material e conter diversos passos para a fabricação da peça, observa-se um elevado tempo de processamento computacional, o que acarreta em uma maior complexidade e custos computacionais (Denlinger, 2015).

Visto a grande importância de simular as peças cada vez mais complexas, principalmente em relação à AM, os softwares comerciais que se baseiam nos elementos finitos estão cada vez mais se adaptando àquela técnica, a fim de simular várias abordagens e prever a microestrutura, tensões e distorções de peças impressas (Song et al., 2020).

Algo que otimiza os resultados das condições do tempo e no espaço é a análise termo-mecânica, que é usada por ser uma abordagem mais confiável do que a análise de mecânica pura de forças aplicada, porém é algo que exige muito mais do processamento computacional (Costa, 2005).

A análise termo-mecânica não linear é usada em todos os procedimentos de modelagem em AM e pode ser dividida em duas categorias: realizar uma análise térmica pura ou de transferência de calor para determinar a temperatura nodal no modelo baseado em FE; e estabelecer uma configuração estrutural objetivando determinar a resposta mecânica do modelo baseado em EF sob gradientes de temperatura nodal aplicados e, em última análise, atingir a distorção e tensões residuais da peça fabricada.

Quando a análise térmica é acompanhada de uma avaliação estrutural para cada incremento, o método é denominado termo-mecânico totalmente acoplado, porém, se a análise mecânica for realizada após a conclusão da avaliação térmica, o método é denominado desacoplado ou fracamente acoplado. O primeiro é caracterizado por uma avaliação estrutural após cada fase da etapa de análise térmica, o que significa que a geometria é modificada a cada estágio de tempo e seus deslocamentos afetam o campo de temperaturas da peça. Já o segundo é caracterizado por uma simulação térmica completa realizada antes de qualquer análise estrutural, o que implica que o campo térmico não é afetado pela resposta mecânica do componente. Devido à sua menor intensidade computacional e desempenho adequado, a simulação termo-mecânica fracamente acoplada é a abordagem mais comumente usada em pacotes de simulação comercial (Hajjalizadeh, 2020; Yang et al., 2016).

A análise de transferência de calor é baseada no princípio de conservação de energia do corpo e é expressa na Equação (3):

$$Q(X, t) - \rho C_p \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot [k(T) \nabla T] = 0 \quad (3)$$

onde X representa as coordenadas espaciais, t representa o tempo, Q representa o calor, ρ a densidade do material, C_p representa o calor específico do material, k é a condutividade e T a temperatura. O histórico de temperaturas nos pontos nodais é obtido numericamente resolvendo a Equação (3) dada a geometria do corpo e as condições de fronteira. As condições de fronteiras térmicas, incluindo condução, convecção e radiação estão contidas na fonte de calor (Xie et al., 2019).

A modelagem mecânica estrutural é baseada na mecânica de equilíbrio de um corpo e incorpora um modelo constitutivo para o comportamento elástico usando a lei de Hook e o comportamento plástico através da regra de endurecimento isotrópico ou cinemático do material construído, Equações (4) e (5) respectivamente:

$$\nabla \cdot \sigma = 0 \quad (4)$$

$$\sigma = C (\epsilon - \epsilon^p - \epsilon^T) \quad (5)$$

onde σ é a tensão de Cauchy, C é a matriz de elasticidade de quarta ordem e ϵ , ϵ^p e ϵ^T são, respectivamente, os tensores das extensões totais, plástica e térmica. As tensões residuais e as distorções são calculadas aplicando as condições de fronteira à peça modelada em EF (Pires, 2021).

2.9. Ansys

Em se tratando do desenvolvimento em estudos de modelos numéricos para elementos finitos (MEF) nos diversos campos científicos, considera-se o Ansys um dos softwares comerciais mais usual, ainda pelo mesmo apresentar um vasto número de recursos e pelas intervenções que podem ser realizadas durante as análises, o que resulta em um maior controle sobre os resultados obtidos (Scherer, 2018). O Ansys possui ferramentas de pré e pós processamento e uma linguagem de programação paramétrica, com a qual é desenvolvida uma rotina que pode ser estendida a uma variedade de estruturas em camadas (Kavamura et al., 2004).

Segundo o desenvolvedor (Ansys, 2021), com o sistema computacional proporcionado pelo ANSYS é possível a utilização nas mais diversas classes de engenharia como a modelagem de sistemas estruturais, problemas de escoamento de fluidos, transmissão de calor, elétricos, problemas dinâmicos modais e transientes.

Em sua utilização, caracteriza-se o problema real, avaliando quais resultados se quer alcançar e pode-se determinar quais as informações disponíveis para a correta entrada de dados (Scherer, 2018). Transformando um problema físico em um equivalente matemático ou numérico, o Ansys simula uma situação real, permitindo simular alguns fenômenos e grandezas que podem ser simplificados ou até mesmo desconsiderados (Abreu, 2016).

Os subprogramas *Ansys/Multiphysics*, *Ansys/Mechanical*, *Ansys/Structural* e *Ansys/Professional* realizam os sete tipos de análises disponíveis, sendo elas e suas utilizações (Ansys, 2021):

- Análise estática: deslocamentos, tensões em sólidos etc., sob condição de uma carga estática. Apresenta a possibilidade de análises linear e não linear, podendo ser incluídos nesta última itens como plasticidade, grandes deformações, contato e fratura.

- Análise modal: cálculo de frequências naturais e modos de vibração.

- Análise harmônica: determinação de respostas frente a cargas harmônicas no tempo.

- Análise dinâmica transiente: determinação da resposta de uma estrutura às cargas arbitrariamente variáveis no tempo, cabendo todas as não linearidades mencionadas na análise estática.

- Análise espectral: uma extensão da análise modal, utilizada para cálculos de tensões e deformações devido a uma resposta ou contribuição PSD (vibrações aleatórias).

- Análise de flambagem: cálculo das cargas e determinação do modo de flambagem.

- Análise dinâmica explícita: promove uma interface entre o Ansys e o LS-DYNA, programa de elementos finitos usado para calcular soluções rápidas para cargas dinâmicas, grandes deformações e complexos problemas de contato (Silva, 2015).

O software também proporciona a simulação da manufatura aditiva, através do plugin *AdditiveWizzard*, que tem a proposta de simular um processo no qual se faz o ajuste dos parâmetros da máquina em relação à deposição do material (como velocidade de deposição e espessura de cada camada). Além desses parâmetros, ainda é possível identificar qual o material que será analisado, qual a base e o local de contato entre os elementos e o material de fabricação de cada um. Se a peça for complexa, é possível posicionar os suportes que serão retirados depois da peça pronta. Esse assunto será discutido com maiores detalhes no Capítulo 3.

3. Métodos e Técnicas Experimentais e Numéricas

Como o presente estudo incluiu uma componente experimental e outra numérica, este capítulo irá ser dividido em duas partes, do modo seguinte:

- Métodos e técnicas experimentais, onde se apresentam a descrição do material e a geometria usada no estudo. Irá incluir os parâmetros de fabrico e as técnicas e equipamentos de caracterização laboratorial utilizados;

- Métodos e técnicas numéricas, onde se descreve as principais funcionalidades do software utilizado na simulação do fabrico aditivo metálico - o ANSYS.

3.1. Métodos e técnicas experimentais

3.1.1. Fabricação do provete

Para o presente estudo foi selecionado o aço maraging (18Ni300), dado ser um material popular na indústria dos moldes e para o qual ainda há carência de pesquisas sobre o seu comportamento mecânico, quando produzido por fabrico aditivo (LPBF), incluindo o desenvolvimento de tensões residuais e distorções resultantes do processo.

Assim, para conduzir este estudo, foram adotados provetes com a forma de pontes como apresentadas na Figura 10, as quais foram originalmente propostas num *Round Robin Exercise* proposto pelo NIST. Foram produzidos 4 corpos de prova (pontes) em dois grupos distintos, sendo o grupo 1 (G1) formado pelos provetes A e B e o grupo 2 (G2) formado pelos provetes C e D. Cada dois provetes foram produzidos com os mesmos parâmetros (repetições) e os grupos G1 e G2 foram produzidos com diferentes parâmetros.

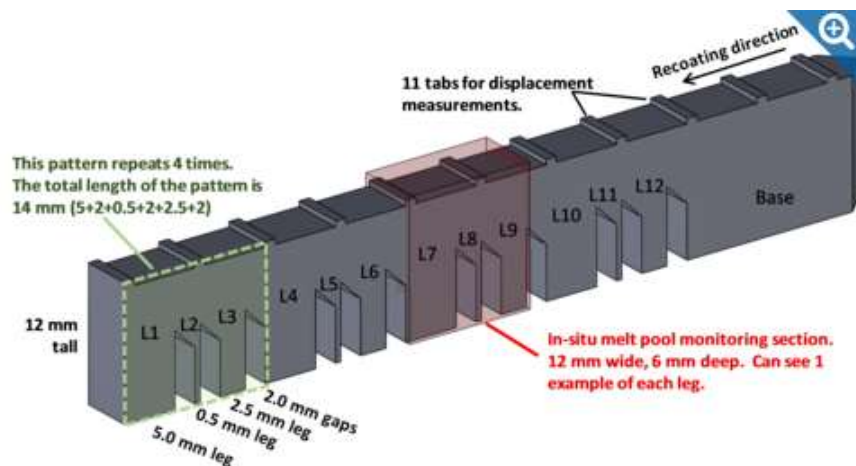


Figura 10. A geometria da estrutura de uma ponte (corpo de prova deste estudo) (Levine e Lane, 2019).

Como observável na Figura 11, para o grupo G1 a estratégia de deposição consistiu em alternar camadas, onde as camadas ímpares consistiam em varrimentos longitudinais e as camadas pares em varrimentos transversais, sem interrupção entre uma deposição e outra. Com esse tipo de deposição do material em cada camada, há uma concentração de calor e tensões residuais fortes após a deposição de cada uma. Não foram realizados passes de contorno da peça antes do preenchimento do seu interior.

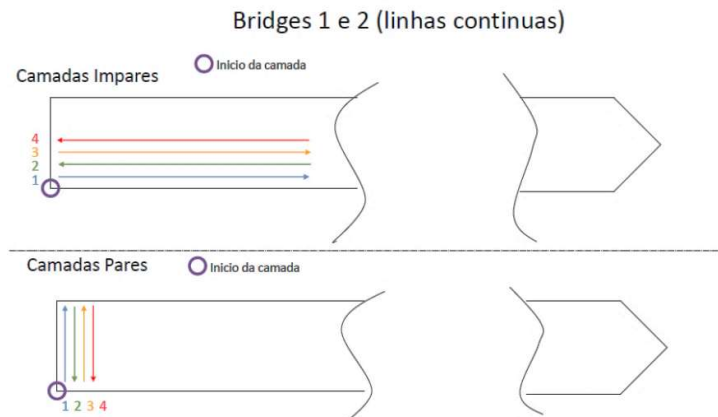


Figura 11. Representação esquemática da estratégia de varrimento dos provetes do Grupo 1 (provetes A e B) (Autor, 2021).

Para o grupo G2, a estratégia de deposição consistiu numa alternância entre as camadas pares e ímpares de ilhas, ou seja, as camadas ímpares continuam sendo realizadas de forma longitudinal, mas limitadas a uma largura específica (5 mm) e as camadas pares de forma transversal, e tendo as ilhas uma espessura de 1 mm (Figura 12). Este tipo de deposição tem como objetivo evitar o acúmulo de calor e diminuir as tensões residuais em cada passagem do laser por camada.

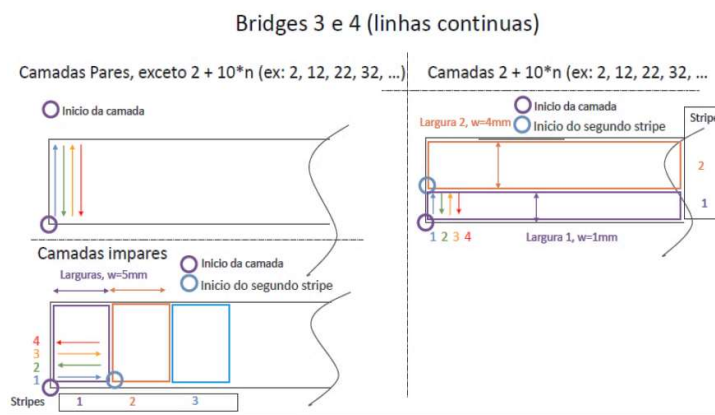


Figura 12. Representação esquemática da estratégia de varrimento dos provetes do Grupo 2 (provetes C e D) (Autor, 2021).

Os parâmetros usados nas diferentes estratégias de deposição foram sempre os mesmos, e estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de processamento usado LBPF do aço 18Ni300 (Silva, 2021).

Material	PL [W]	v_s [m / s]	h_s [μ m]	d_s [μ m]	PSD (μ m)
18Ni300	400	0,86	95	40	15/45

3.1.2. Difração por raio-x (DRX)

Após a produção das pontes, foram medidas tensões residuais utilizando a técnica de difração por raio-x, para a condição *as-built* e com as pontes ainda conectadas à placa base. Para a verificação das tensões residuais, foi definido um conjunto de 10 pontos (Figura 13) escolhidos exatamente no centro entre dois ressaltos, com o intuito de evitar que estes fossem utilizados como pontos de concentração de tensão.

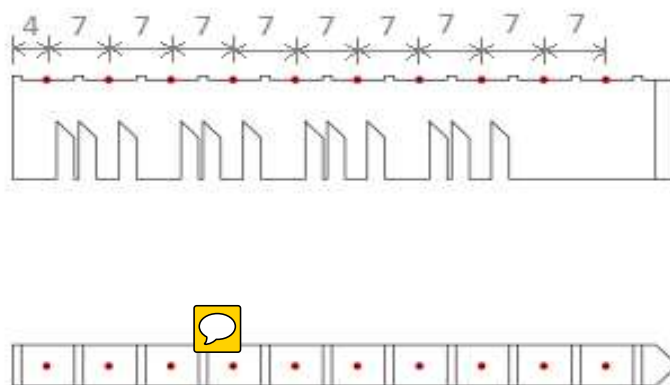


Figura 13. Pontos usados para verificação das tensões residuais.

Essas medidas de tensão residual foram realizadas na Universidade de Coimbra por DRX, no Departamento de Física. Os parâmetros aplicados podem ser encontrados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros para ensaio de difração de raio-x.

Radiação	Montagem	Pico de difração	Número de ângulos β	Oscilações em β	Tempo de exposição por pico	Tempo total por aquisição (2 direções)
Cr-K α	Ômega	Fe- α (211) » $2\theta = 156^\circ$	21	$\pm 2^\circ$	30 s	≈ 30 min

3.1.3. Distorções

Já para a medição das distorções, o conjunto de pontos de medição foi definido no topo dos ressaltos, conforme ilustra a Figura 14.

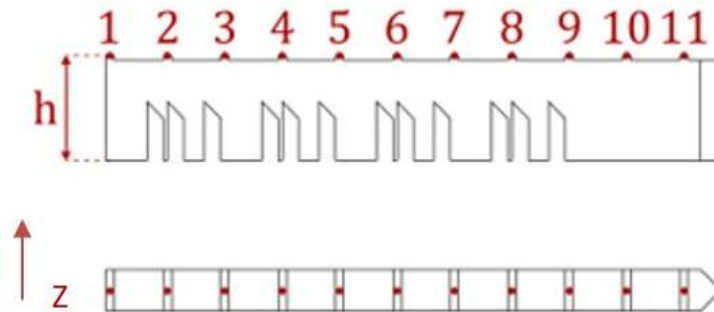


Figura 14. Pontos usados para medição das distorções nos provetes tipo pontes.

Após a fabricação dos 4 provetes sobre uma placa de aço maraging 18Ni300, esses provetes com a forma de pontes foram usados em um programa experimental que visou a avaliação de tensões residuais, distorções e microestruturas do material no estado *as-built*. As tensões residuais foram medidas pela técnica de difração de raio X no topo do provete, no centro de cada ressalto. Posteriormente, foram cortadas as bases dos pilares junto à placa, de modo a libertar a ponte com exceção da ligação na zona do provete designada de base (ver Figura 10), que se manteve ligada à placa base, com vista à medição da distorção. Esta medida foi feita com o sistema de medição de coordenadas por contacto, assim como com sistema ótico, sem contacto. Antes de se iniciar com os processos de medição, a placa base foi seccionada em 4 partes, em serrote, para isolar cada provete com uma porção de placa base ligada. Este seccionamento da placa base também serviu para a análise das tensões residuais referida na subsecção anterior. O passo seguinte foi a medição das pontes e posterior realização dos cortes dos pilares, que foram realizados através do processo de eletroerosão por fio com vista à minimização da intrusão do corte nas distorções da ponte. Finalmente, voltou-se a fazer medição das pontes e extração da sua distorção pela diferença entre as duas medições.

Na Figura 15 ilustra-se o processo de corte por eletroerosão por fio, através da máquina Accutex SP-600N com fluido de trabalho sendo água dessalinizada, realizada no provete D. Na Figura 16 ilustra-se o sistema de medição de coordenadas por contacto de três eixos, da marca Nikon, com cabeça Renishaw PH10T-Plus, de ponta esférica, tendo as medições sido realizadas através de 3 repetições.

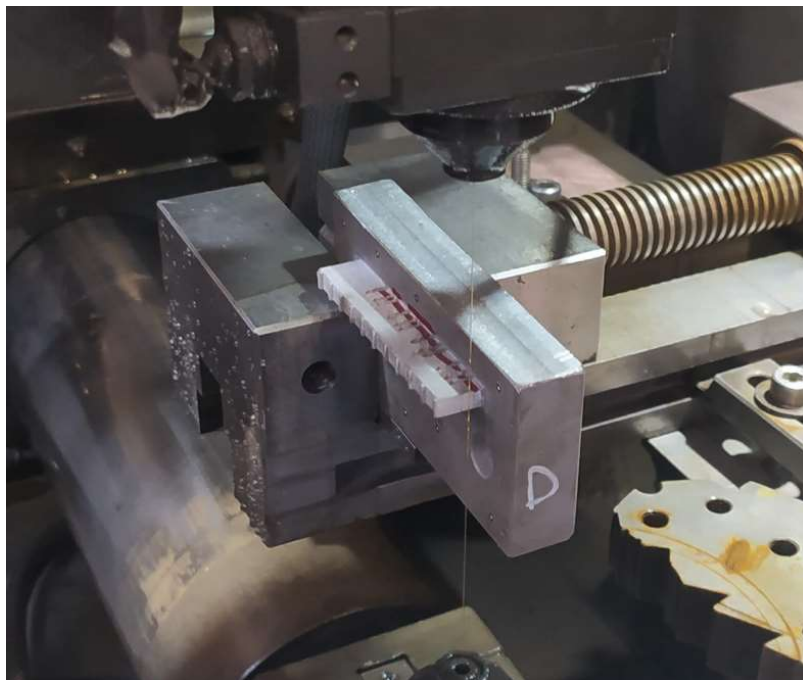


Figura 15. Corte das pontes pelo processo de eletroerosão por fio até o último suporte (Autor, 2021).



Figura 16. Máquina da Tornitrofa com medição por coordenadas com 3 eixos, para efetuar a medição da altura de cada ressalto (Autor, 2021).

Foram realizadas duas medidas de altura (antes e depois do corte), correspondentes à distância na direção vertical entre a placa base e os ressaltos da ponte. Deste modo, foi possível medir a deflexão (distorção) da peça após esta ser libertada, resultado do alívio de tensões residuais do processo. As repetições das medições foram realizadas em momentos distintos para se evitar o erro de paralaxe, ou seja, ter duas medidas do mesmo local e com o mesmo valor.

A placa base foi colocada contra uma régua e um gabarito de modo a permitir repetir o posicionamento da mesa nos dois momentos de medição. Foram ainda medidos 6 pontos na placa base, 3 em cada lado da ponte, conforme ilustra a Figura 17. Esses 6 pontos foram utilizados para definir o plano da placa base (referência para a avaliação da distorção).

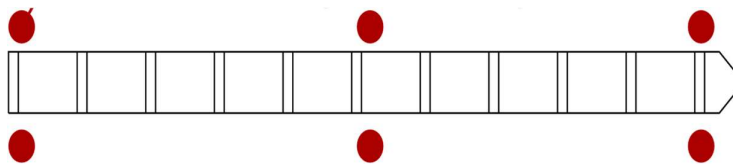


Figura 17. Pontos de medição para definir o plano da placa base (Autor, 2021).

A Figura 18 ilustra a distorção da ponte após o corte dos pilares.

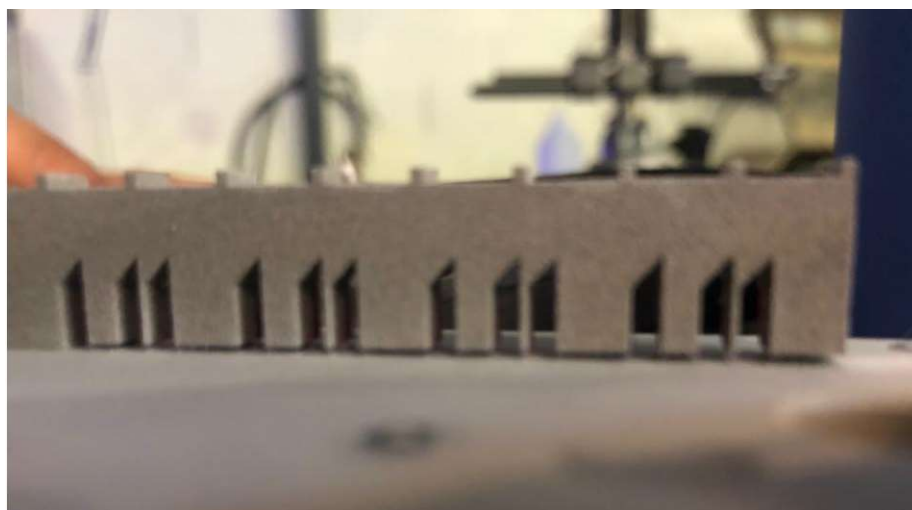


Figura 18. Corte das pontes com um ressalto de 1 mm (Autor, 2021).

A fim de se obter mais de um resultado com métodos já validados, recorreu-se ao escaneamento 3D de todos os provetes, antes e depois dos cortes, para que se fosse gerado um desenho 3D no computador e pudesse ser realizado um estudo mais preciso das distorções sofridas com o corte, validando assim o estudo com os resultados de ambos os métodos, mutuamente, recorrendo ao sistema de medição da GOM (sistema de luz estruturada, ATOS III Triple Scan, GOM mbH, Braunschweig).

O ensaio foi realizado através do escaneamento das peças cortadas tanto do G1 (A e B) e do G2 (C e D), baseado no método de nuvens de pontos, o qual tem como objetivo fazer a comparação prática da deflexão dos pontos estudados. Em primeiro lugar, as peças foram tratadas com spray anti-reflexo (Figura 19), para que a luz do scanner (laser) não refletisse na superfície do provete.

Em cima de cada peça foram colocados alguns pontos de referência, que consistem em adesivos pretos com pontos brancos (Figura 20), os quais podem variar de dimensão de acordo

com o tamanho da lente. A quantidade mínima para o caso da triangulação (base do scanner 3D) é de 3 pontos, para que o scanner faça o reconhecimento correto da peça, visto que ela é deslocada diversas vezes com o intuito de se realizar da leitura correta em x, y e z (comprimento, largura e altura, como visto na Figura 21). Neste caso, foram utilizados mais de 3 pontos para uma leitura mais precisa da peça.



Figura 19. Spray anti-reflexo utilizado para preparação do escaneamento 3D dos provetes (Autor, 2021).

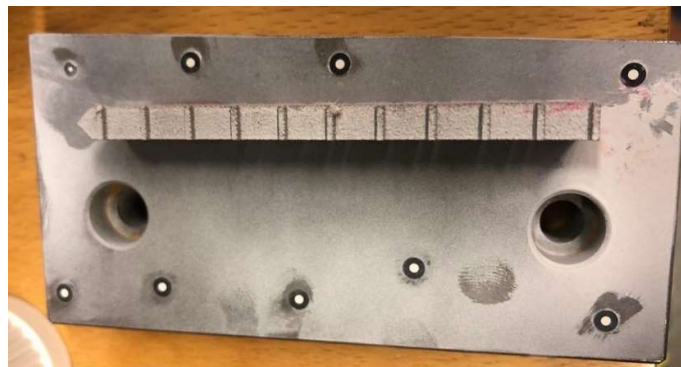


Figura 20. Vista superior de uma ponte com pontos de referência para levantamento de forma com sistema ótico (Autor, 2021).

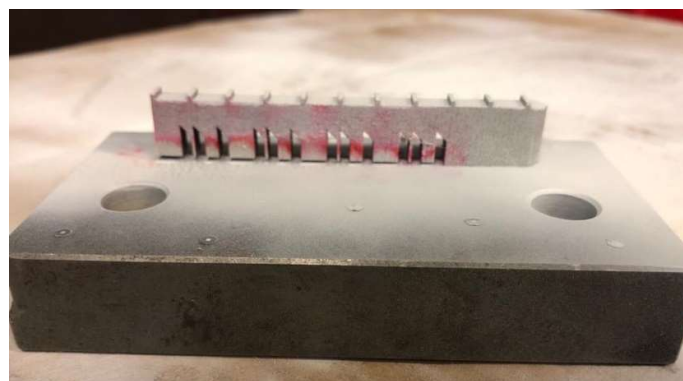


Figura 21. Vista frontal de uma ponte após o corte para levantamento de forma com sistema ótico (Autor, 2021).



O sistema de levantamento de forma ótico requer um processo de calibração que se realiza através de uma mesa calibradora (Figura 22) com uma malha de pontos. Para ser feita essa calibração, o scanner faz o reconhecimento em vários ângulos com o posicionamento do operador do mesmo.

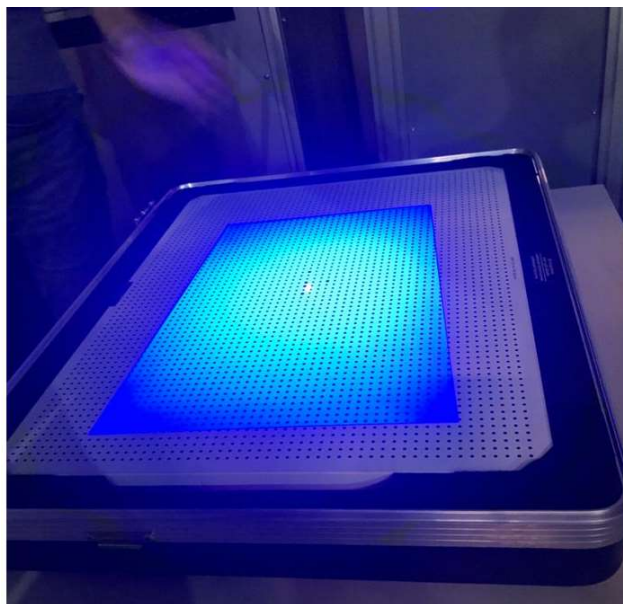


Figura 22. Scanner sendo calibrado com a mesa calibradora (Autor, 2021).

Na Figura 23 ilustra-se uma imagem relativamente ao mapeamento de um provete e nas Figuras 24 apresentam-se imagens digitais reconstituídas com o sistema ótico de levantamento de forma.



Figura 23. Mapeamento dos pontos para geração da geometria (Autor, 2021).

É importante frisar que no software de nuvens de pontos pode haver alguns lugares onde a luz do scanner não incide, causando lacunas na peça. Essas ausências de material, quando não reconhecidas em nenhum momento aquando da rotação da peça, podem ser ajustados dentro do próprio software. Alguns pontos ao redor do provete (como a placa base, por exemplo) também podem ser gerados, porém igualmente tratados rapidamente.

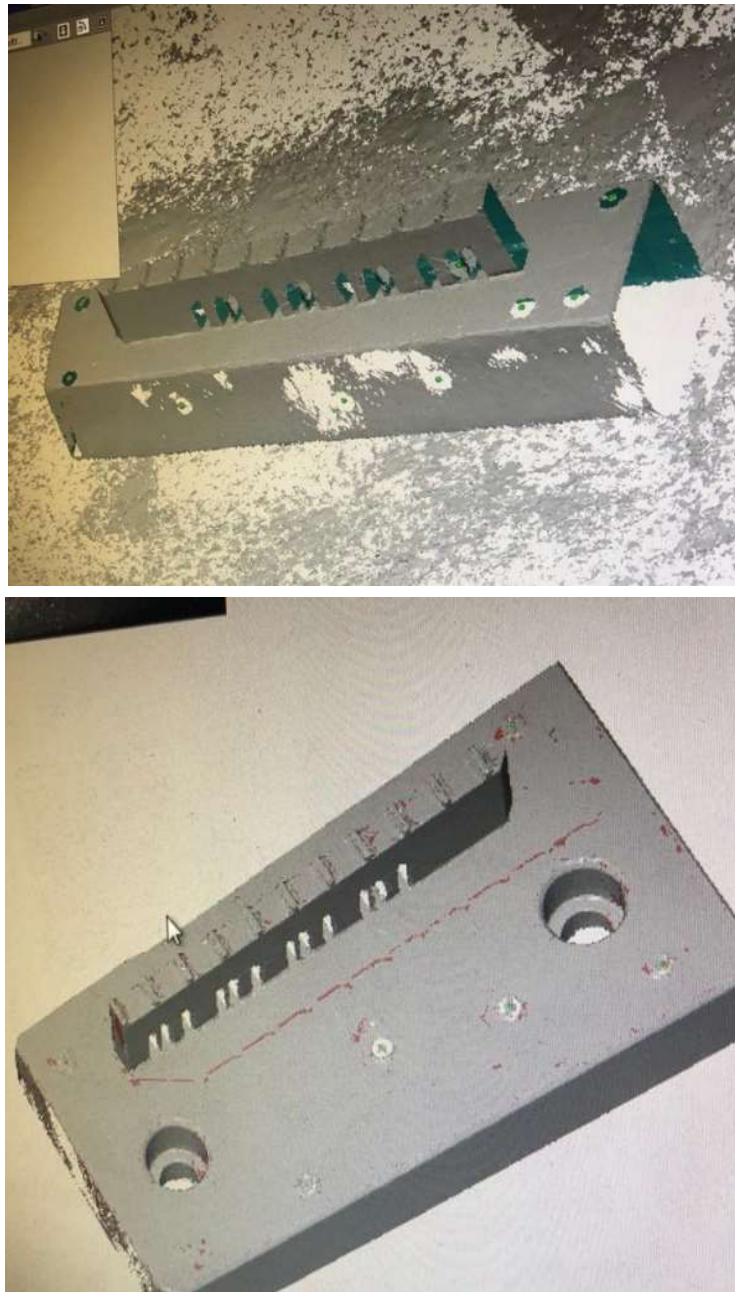


Figura 24. Imagens sendo geradas no software com o escaneamento da peça estudada (Autor, 2021).

Alguns pontos da geometria dos provetes são importantes destacar:

- Os furos que estão na base da peça não influenciaram no estudo; foram utilizados para a fixação desta na mesa de fabricação de adição.
- Os ressaltos acima da peça possuíam exatamente o mesmo distanciamento entre um e outro, servindo apenas para melhor medir o provete, não tendo impacto direto no ensaio.
- As marcações de cor rosa das Figuras 20 e 21 são demarcações do corte das pontes, também em nada influenciaram no teste (principalmente no escaneamento 3D).

- Depois de fazer a geração das nuvens de pontos pelo escaneamento 3D, esses arquivos foram salvos em STL e importados para o software de análise de distorção (software 3D: GOM Inspect) para fazer a comparação do antes e depois.

3.1.4. Análise metalográfica

A análise metalográfica foi realizada a partir do corte dos provetes A (G1) e C (G2) em duas direções - longitudinalmente (Figura 25) e transversalmente (Figura 26) - em disco rotativo Remet TR-60 (Figura 27a), seguido de polimento na Struers DP-U4 (Figura 27b) com lixas de grau 180, 320, 800, 1200 e 4000 a 150 rpm. Após, realizou-se um ataque eletrolítico durante um minuto, com diferença de potencial de 4V com ácido oxálico.

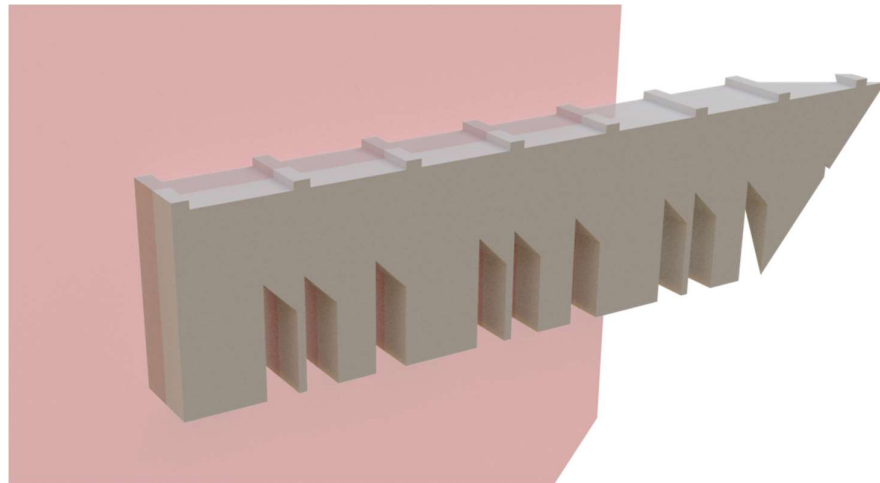


Figura 25. Esquema do corte longitudinal dos provetes.

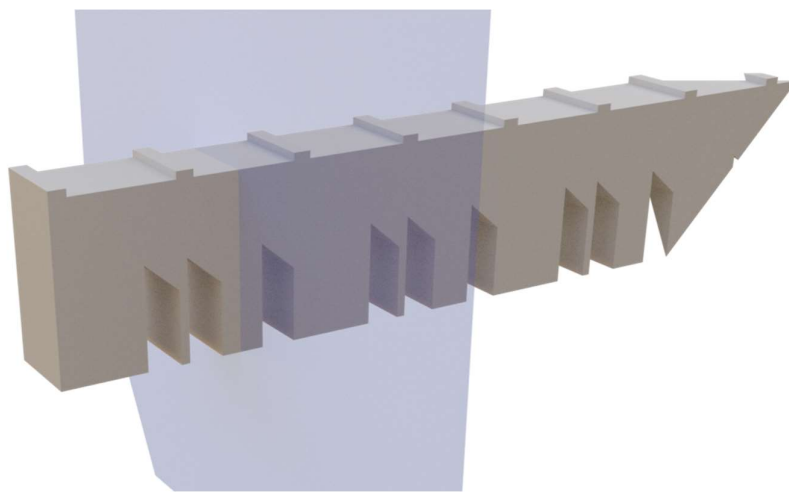


Figura 26. Esquema do corte transversal dos provetes.

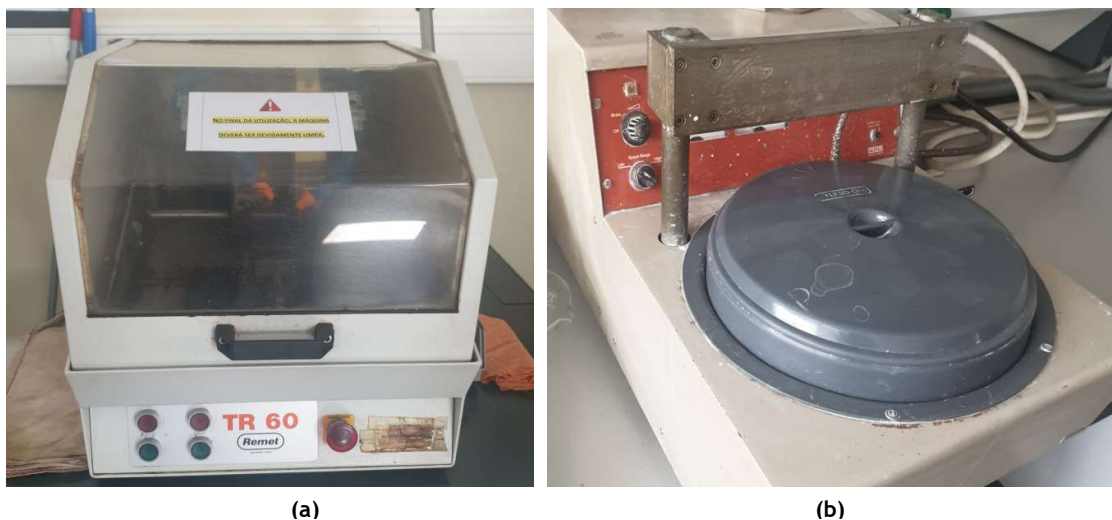


Figura 27. Equipamentos utilizados na preparação das amostras para análise metalográfica. (a) Remet TR-60; (b) Struers DP-U4.

3.2. Métodos e técnicas numéricas

3.2.1. Modelagem do provete

Um dos principais objetivos deste trabalho é a simulação do processo de fabrico aditivo metálico (LPBF) com vista à estimativa das distorções e tensões residuais nas peças produzidas. Para sua realização, recorreu-se ao software ANSYS Workbench versão 2020 R1, com o plugin *AdditiveWizard* de mesma versão, o qual faz com que se consiga construir e simular a deposição de diversas camadas da peça estudada, além de permitir definir parâmetros do processo como o material da placa base, peça e suportes, quando necessário. No presente caso, não foi necessária a utilização dos suportes.

A construção de um modelo no ANSYS inicia com a importação da geometria da peça a produzir, que pode ser feita com recurso a arquivos STL. Para além da peça, será ainda necessário definir a placa base que pode ser definida diretamente no ANSYS (ver Figura 28).

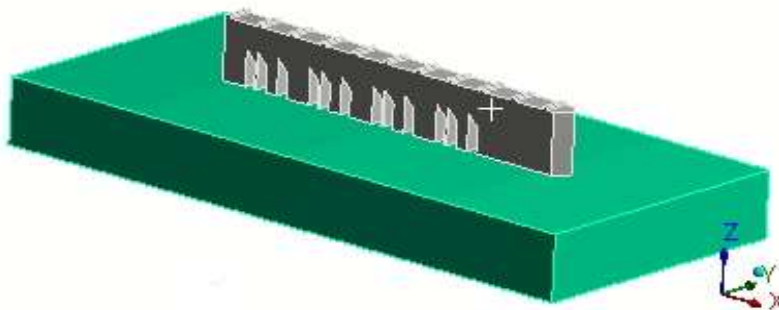


Figura 28. Base representada pela cor verde e peça representada pela cor cinza (Autor, 2021).

É importante destacar a forma através da qual o software realiza a deposição das camadas, visto que não há uma deposição progressiva do material por camada - o que ocorre no processo AM experimental - e sim uma deposição da camada inteira, não havendo, portanto, o aquecimento ponto a ponto. Deste modo não existe uma direcionalidade da deposição não sendo possível distinguir deposições na direção x (0°), de deposições na direção y (90°), podendo acarretar variações na consistência dos resultados.

Após a definição da geometria da peça a simular o processo produtivo, é preciso definir as propriedades dos materiais dos elementos constituintes do modelo. Apesar do ANSYS já possuir uma biblioteca de materiais, foi verificado que o aço maraging 18Ni300 não pertence à biblioteca nativa do Ansys, tendo sido necessário cadastrar este material.

Estas propriedades foram obtidas da literatura, em particular de Silva (2021), e estão listadas abaixo:

- Temperatura ambiente de referência para as simulações
- Densidade
- Coeficiente isométrico de expansão térmica
- Temperatura de fusão
- Elasticidade isotrópica
- Endurecimento isotrópico bilinear
- Condutividade térmica isotrópica
- Calor específico

Os valores imputados para esse trabalho, tanto na parte estrutural, quanto na parte térmica podem ser encontrados no Apêndice I.

É importante destacar que as propriedades registradas para o material é o processo mais importante da simulação, pois são as propriedades que regem o comportamento do domínio em análise. Essas propriedades, em função da temperatura, são extraídas experimentalmente de uma forma rigorosa. No caso do presente trabalho, como ainda há poucas referências na literatura para o aço maraging 18Ni300, muitas propriedades foram extraídas experimentalmente por Silva (2021) nos laboratórios do INEGI e IST no âmbito do projeto MAMTOOL.

3.2.1.1. Definição da malha

Outra etapa de extrema importância da construção do modelo de elementos finitos consiste na construção da malha, ou seja, etapa de discretização do domínio de análise. De um modo geral desejam-se malhas refinadas, garantindo uma convergência de resultados para um patamar estável, porém malhas demasiado refinadas podem acrescentar um custo computacional inoportável. Após algumas simulações preliminares, adotou-se como referência uma malha com a dimensão de 1 mm para a peça e 5 mm para a placa base (Figura 29).

A compatibilização das malhas (compostas de elementos hexahédricos de 8 nós) é feita com recurso a elementos de contato do tipo *bonded*, que permitem tanto a transferência dos deslocamentos entre submodelos quanto de transferência de calor. Estes elementos vão permitir também simular a separação dos pilares da ponte da placa base.

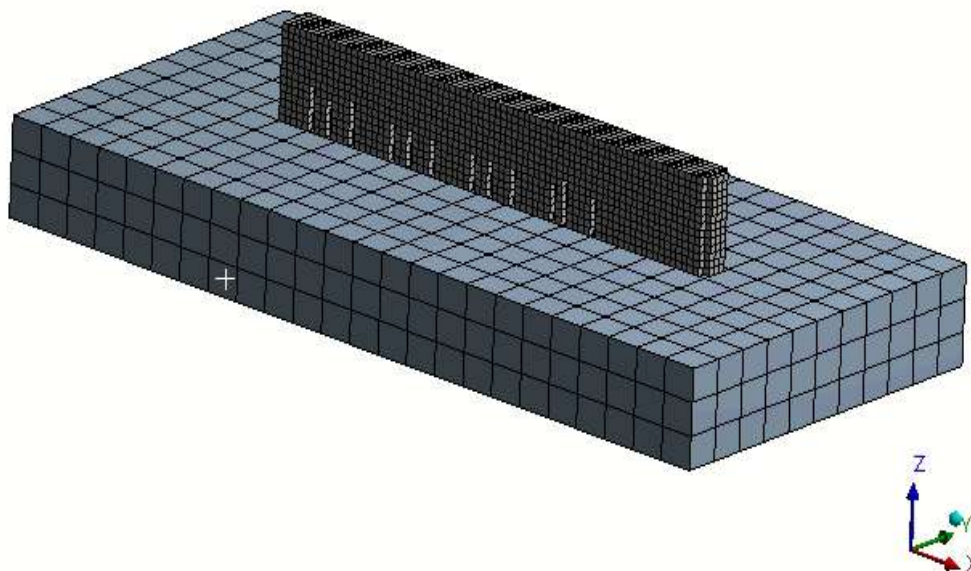


Figura 29. Diferença das malhas entre a placa base e o provete (Autor, 2021).

3.2.2. Definição de condições de fronteira

A zona da placa base foi apoiada, conforme Figura 30. Os cantos ao longo dos vértices inferiores esquerdo e direito da placa foram restringidos nas 3 direções.

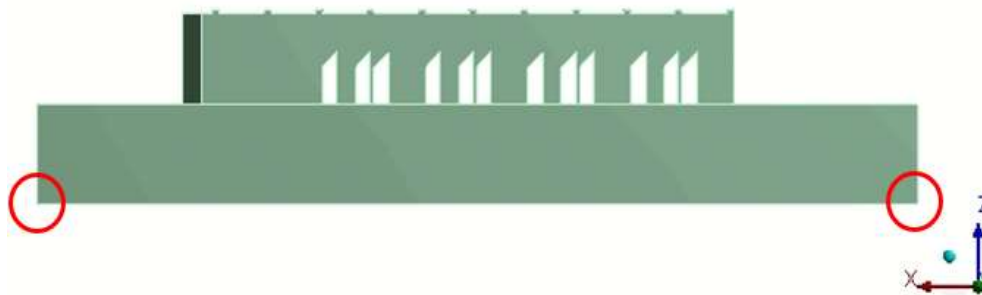


Figura 30. Cantos selecionados para as condições de fronteiras.

Além das condições de fronteira mostradas na Figura 30, foram impostos outros tipos de condições de fronteira em simulações distintas, a fim de ilustrar a respetiva influência nos resultados, uma vez que as condições de fronteira reais são difíceis de estabelecer com rigor. Estes diferentes tipos de simulações estão dispostos na Tabela 5. Dentro de cada simulação, dois momentos distintos foram analisados: no instante imediatamente antes do corte das

pernas das pontes; e no momento quando as pernas são cortadas até o ponto 9 (Figura 14). Na parte experimental, a peça toda foi colocada simplesmente apoiada (apenas 1 grau de liberdade restrito, no caso o do eixo z negativo), o que dá a possibilidade do relaxamento das tensões residuais.

O Ansys tem como limitação as condições de fronteiras, não simulando o que realmente acontece no momento experimental, ou seja, quando se aplica uma condição de fronteira em um local desejado o Ansys restringe todos os tipos de graus de liberdade.

Tabela 5. Simulação com as diferentes condições de fronteiras.

Condição de fronteira	Elemento engastado
2 cantos	Base engastada nos dois cantos inferiores.
1 face lateral	Base engastada na face lateral (mais próxima do ponto 11).
2 faces laterais	Base engastada nas duas faces laterais.
Face inferior	Base engastada na face imediatamente oposta à face onde está localizado o provete.

3.2.3. Parâmetros de processo

Um aspecto muito importante das simulações dos processos de fabrico aditivo tem a ver com a simulação da entrega térmica. Uma simulação mais rigorosa do processo deveria ser baseada na entrega térmica compatível com a estratégia de varrimento e parâmetros de processo. No entanto, no ANSYS, apenas existe a possibilidade de ativar camadas inteiras de material, não sendo possível discretizar a ativação da camada em função da estratégia de varrimento. Esta limitação acaba por ser mais compatível com a estratégia de varrimento dos provetes do Grupo 1.

O tempo entre ativação de camadas deve corresponder ao tempo que o laser demora a varrer cada camada. Foram utilizados os parâmetros de camadas exatamente como foi feito experimentalmente. Para conseguir tais parâmetros, utilizou-se o caso de estudo da NIST, o qual disponibiliza todos eles na tabela abaixo:

Tabela 6. Parâmetros da máquina de LPBF (NIST, 2019, adaptado).

Espessura da deposição de camada (μm)	Velocidade de deposição (mm/s)	Tempo entre camadas (s)	Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	Tipo de remoção da base
20	0.8	0.307	22	Progressivo

Algumas considerações adicionais sobre as simulações são:

- Como os furos na placa base não influenciam a simulação, não se procedeu à sua simulação;
- Os resultados de distorção serão apresentados no instante em que o corte alcança o ponto 9.
- Os resultados de tensão residual serão apresentados em dois instantes: imediatamente antes do começo da separação entre o provete e a base; e no exato momento em que o corte alcança o ponto 9.

4. Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados do trabalho, quer os das atividades experimentais, quer os das simulações, sendo igualmente estabelecidas comparações entre ambos os resultados e apresentada a discussão dos mesmos.

4.1. Resultados experimentais

4.1.1. Tensões residuais

Os provetes foram submetidos ao ensaio de distorção por raio X, realizado na universidade de Coimbra. Essas medições foram feitas nos pontos 1 até ao 10, em ambos os grupos (G1 e G2), e extraídos os resultados das tensões residuais em x (longitudinal) e em y (transversal).

Os resultados são mostrados nas Figuras 31 (G1) e 32 (G2). Ao analisar os dois gráficos, fica claro que os valores registrados têm maior intensidade na direção y (na ordem de -200 MPa) quando comparados à direção x (na ordem de -100 MPa) em qualquer que seja o provete.

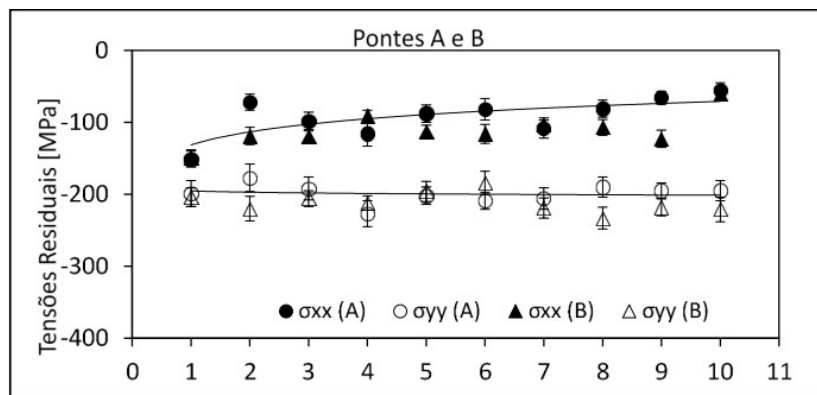


Figura 31. Resultado das tensões residuais à superfície dos provetes A e B, nas direções x e y.

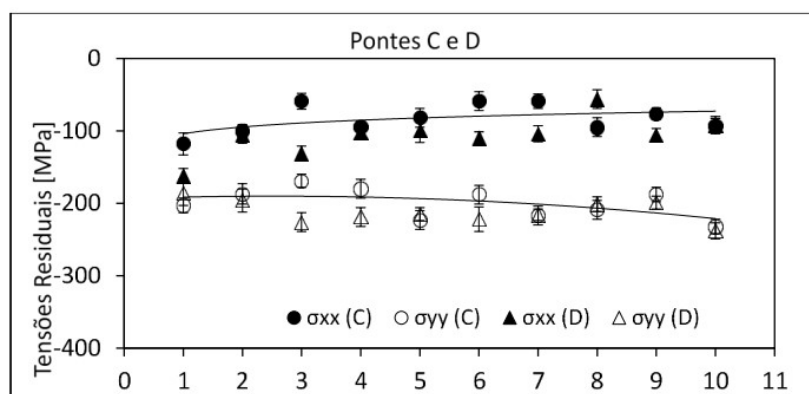


Figura 32. Resultado das tensões residuais à superfície dos provetes C e D, nas direções x e y.

Os resultados obtidos nos dois grupos (G1 e G2) são semelhantes, o que mostra que as estratégias de varrimento não têm uma relevância significativa nas tensões residuais nos pontos analisados na superfície dos corpos de prova. No entanto, as distorções registadas foram distintas, como se poderá verificar na subsecção seguinte, o que pode indiciar uma distribuição de tensões residuais no interior do provete distintas. Pelo fato das pontes sofrerem uma distorção ascendente, afastando-as da placa base, significa que tensões residuais na ponte trativas (positivas) são responsáveis por essa distorção. Isto significa que as tensões residuais superficiais negativas medidas deverão ter uma inversão de sinal à medida que se progride para o interior do material, sendo dominantes as tensões de tração.

4.1.2. Distorção dos provetes após corte dos pilares

Os provetes produzidos por fabrico aditivo metálico (LPBF) foram sujeitos a uma operação de corte dos pilares de modo a resultar em uma deflexão vertical do componente, devido à ação das tensões residuais do processo. Por forma a se obter a distorção, foram usadas duas técnicas, nomeadamente uma baseada em sonda por contato e outra baseada em métodos óticos, sem contato. As distorções foram avaliadas medindo a geometria das peças antes e depois dos cortes, resultando a distorção da diferença das duas configurações geométricas. A quantificação das distorções será traduzida na deflexão da superfície superior da ponte na direção perpendicular à placa base.

O resultado das distorções através do escaneamento 3D é apresentado nas Figuras 33, 34, 35 e 36, correspondendo estas aos provetes A, B, C e D, respectivamente.



Figura 33. Resultado do escaneamento 3D mostrando a distorção do provete A.

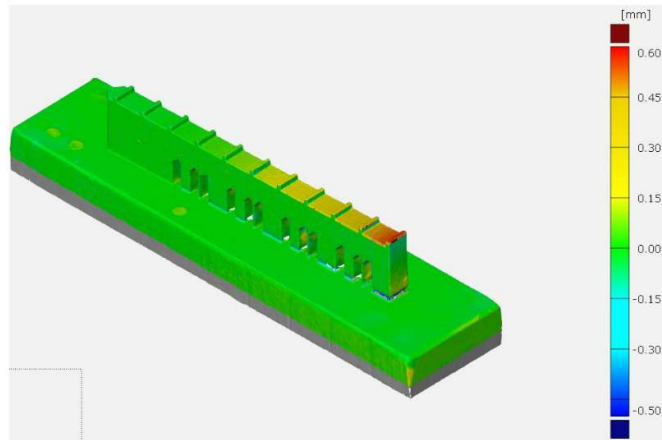


Figura 34. Resultado do escaneamento 3D mostrando a distorção do provete B.

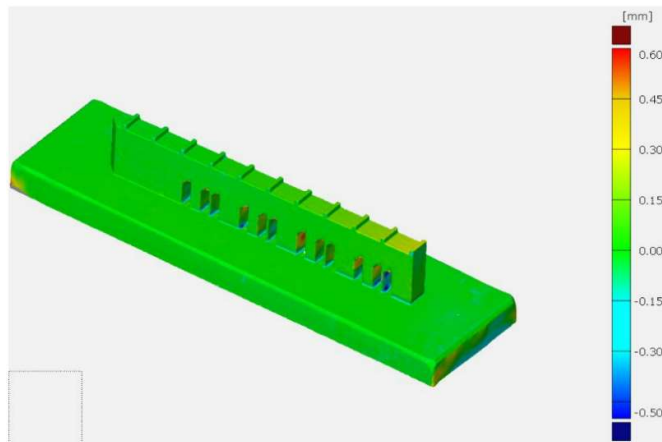


Figura 35. Resultado do escaneamento 3D mostrando a distorção do provete C.

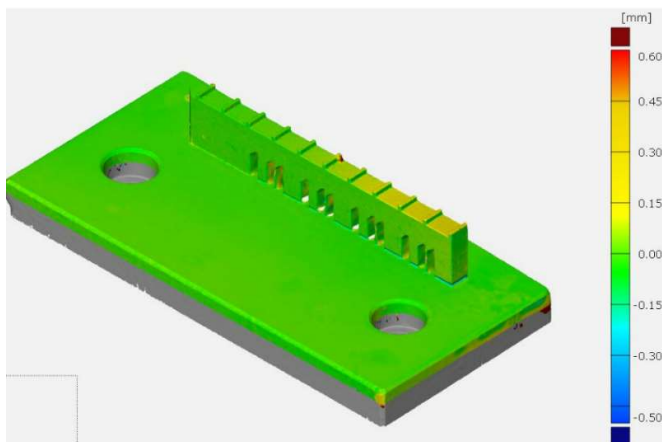


Figura 36. Resultado do escaneamento 3D mostrando a distorção do provete D.

Nas Tabelas 7, 8, 9 e 10 apresentam-se os resultados experimentais da distorção em Z (direção perpendicular à placa base e direção de construção), em cada uma das 4 peças (peças A e B pertencem ao grupo 1, enquanto as C e D pertencem ao grupo 2). Foram realizadas três medições com a máquina, sendo o Δ_1 , Δ_2 e Δ_3 a primeira, segunda e terceira medições, respectivamente. Como a máquina é extremamente sensível à rugosidade, foram registradas estas 3 medidas e realizada uma média dos valores obtidos. As tabelas mostram que as duas técnicas utilizadas - contato e ótica - apresentam um bom acordo.

Tabela 7. Resultado da distorção em Z (mm), ponto a ponto, da peça A após o corte dos pilares da ponte.

Ponto	Medidas de Coordenadas		Delta	Scanner 3D			Delta - média
	Antes do corte	Depois do corte		Delta-1	Delta-2	Delta-3	
1	12,996	13,564	0,568	0,580	0,560	0,560	0,567
2	13,017	13,464	0,447	0,470	0,470	0,450	0,463
3	12,982	13,337	0,355	0,360	0,350	0,340	0,350
4	12,994	13,235	0,241	0,270	0,270	0,260	0,267
5	12,971	13,157	0,186	0,200	0,210	0,220	0,210
6	12,969	13,115	0,146	0,200	0,130	0,140	0,157
7	12,970	13,071	0,101	0,060	0,080	0,080	0,073
8	13,008	13,055	0,047	0,050	0,050	0,040	0,047
9	12,994	12,996	0,002	0,000	0,010	0,010	0,007
10	13,003	12,992	-0,011	0,000	0,000	-0,010	-0,003
11	13,015	13,012	-0,003	0,000	-0,010	-0,020	-0,010

Tabela 8. Resultado da distorção em Z (mm), ponto a ponto, da peça B após o corte dos pilares da ponte.

Ponto	Medidas de Coordenadas		Delta	Scanner 3D			Delta - média
	Antes do corte	Depois do corte		Delta-1	Delta-2	Delta-3	
1	12,981	13,552	0,571	0,570	0,570	0,570	0,570
2	13,014	13,498	0,484	0,440	0,440	0,440	0,440
3	13,006	13,364	0,358	0,340	0,330	0,340	0,337
4	13,000	13,261	0,261	0,250	0,250	0,260	0,253
5	12,987	13,147	0,16	0,170	0,170	0,170	0,170
6	12,988	13,109	0,121	0,120	0,110	0,100	0,110
7	12,975	13,057	0,082	0,060	0,060	0,080	0,067
8	12,997	13,004	0,007	0,020	0,020	0,030	0,023
9	12,993	12,986	-0,011	-0,010	0,000	0,000	-0,003
10	12,983	12,972	-0,021	-0,010	-0,030	0,000	-0,013
11	12,971	13,007	0,024	-0,030	-0,020	-0,030	-0,027

Tabela 9. Resultado da distorção em Z (mm), ponto a ponto, da peça C após o corte dos pilares da ponte.

Ponto	Medidas de Coordenadas		Scanner 3D				
	Antes do corte	Depois do corte	Delta	Delta-1	Delta-2	Delta-3	Delta - média
1	13,014	13,317	0,326	0,290	0,280	0,270	0,280
2	13,002	13,215	0,215	0,220	0,210	0,220	0,217
3	12,999	13,179	0,187	0,180	0,160	0,170	0,170
4	13,014	13,167	0,153	0,140	0,130	0,120	0,130
5	13,013	13,14	0,127	0,100	0,090	0,090	0,093
6	13,022	13,1	0,078	0,070	0,060	0,060	0,063
7	12,996	13,04	0,044	0,030	0,040	0,040	0,037
8	12,990	13,023	0,033	0,000	0,020	0,010	0,010
9	12,992	13,006	0,014	-0,010	-0,010	0,000	-0,007
10	13,000	13,029	0,029	-0,010	-0,020	-0,030	-0,020
11	12,991	13,004	0,013	-0,010	-0,020	-0,020	-0,017

Tabela 10. Resultado da distorção em Z, ponto a ponto, da peça D após o corte dos pilares da ponte.

Ponto	Medidas de Coordenadas		Scanner 3D				
	Antes do corte	Depois do corte	Delta	Delta-1	Delta-2	Delta-3	Delta - média
1	12,992	13,287	0,295	0,280	0,270	0,260	0,270
2	12,980	13,231	0,251	0,210	0,200	0,190	0,200
3	13,035	13,189	0,154	0,150	0,150	0,140	0,147
4	13,016	13,137	0,121	0,110	0,110	0,120	0,113
5	12,967	13,082	0,115	0,080	0,080	0,080	0,080
6	13,017	13,083	0,066	0,080	0,070	0,060	0,070
7	12,972	13,016	0,044	0,030	0,040	0,030	0,033
8	12,990	13,006	0,016	0,010	0,020	0,000	0,010
9	12,996	12,986	-0,01	0,010	0,010	0,000	0,007
10	12,982	12,99	0,008	0,000	-0,010	-0,010	-0,007
11	12,990	12,99	0	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010

Nas Figuras 37 a 40 são apresentados os resultados das distorções em termos gráficos, mostrando o excelente acordo entre as duas técnicas experimentais.

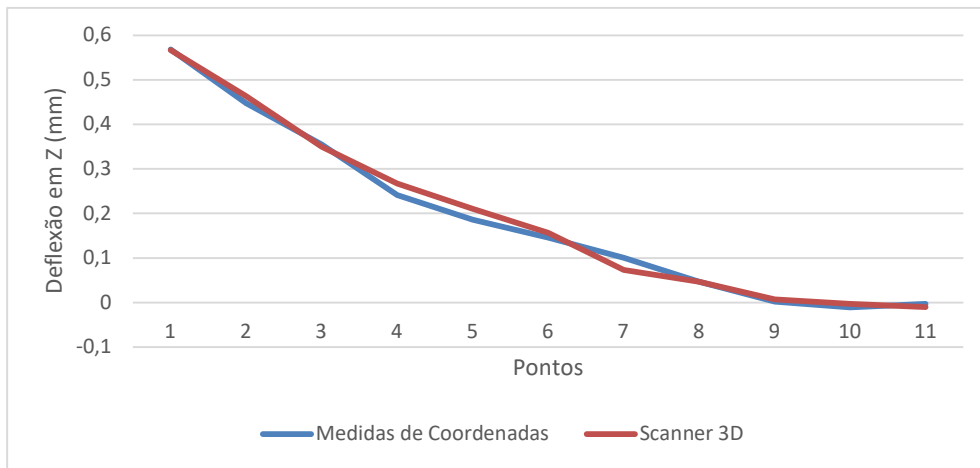


Figura 37. Comparação entre as coordenadas medidas pela máquina da Tornitrofa e as coordenadas no scanner 3D, no provete A.

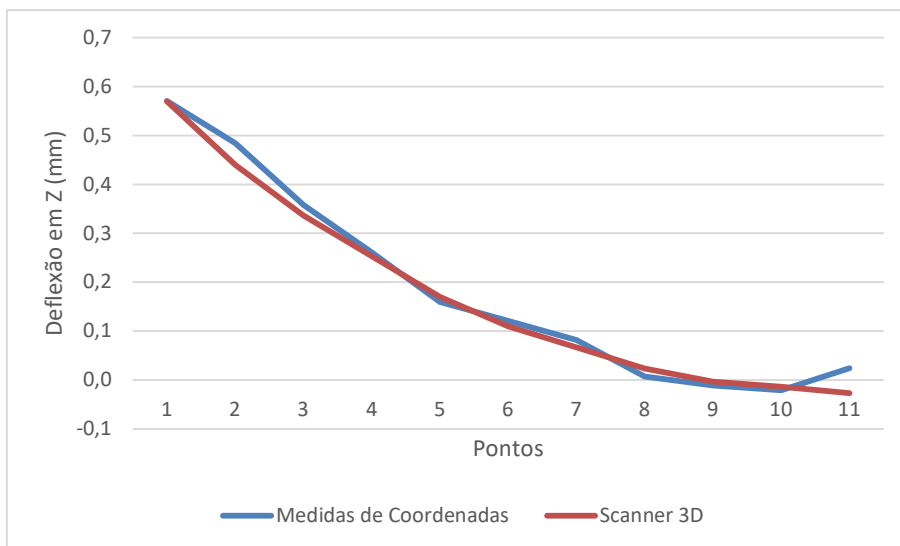


Figura 38. Comparação entre as coordenadas medidas pela máquina da Tornitrofa e as coordenadas no scanner 3D, no provete B.

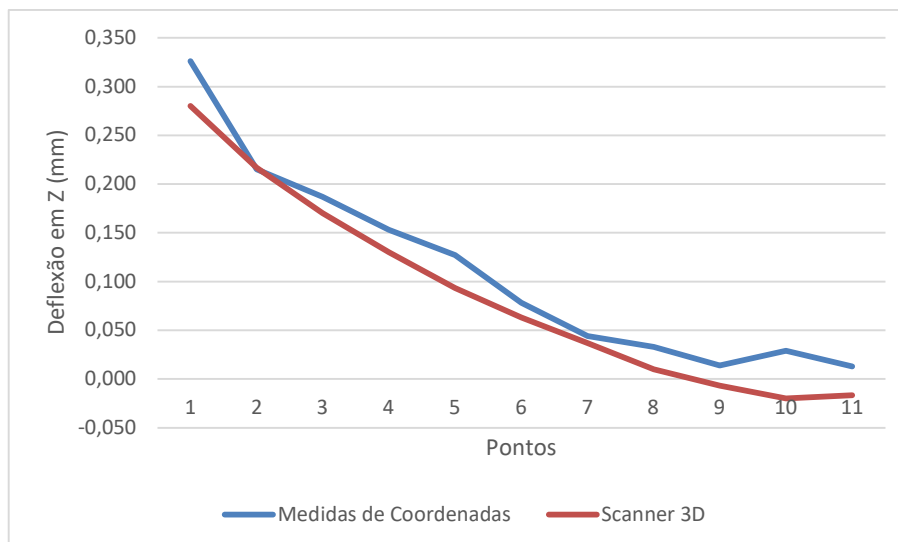


Figura 39. Comparação entre as coordenadas medidas pela máquina da Tornitrofa e as coordenadas no scanner 3D, no provete C.

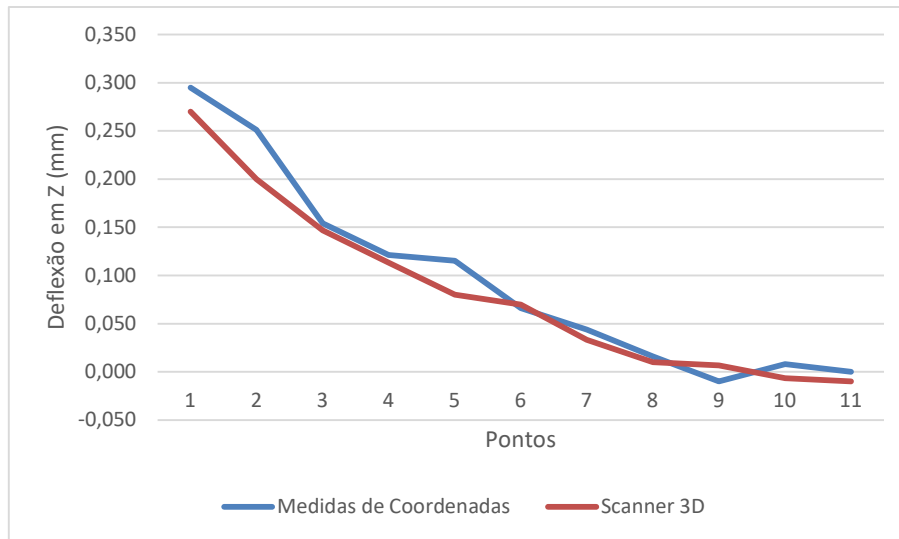


Figura 40. Comparação entre as coordenadas medidas pela máquina da Tornitrofa e as coordenadas no scanner 3D, no provete D.

É interessante perceber que o corte da peça foi feito do ponto 1 até o ponto 9. Observamos, então, que em todos os provetes a distorção a partir do ponto 10 foi negativa, ou seja, teve uma compressão naqueles pontos (10 e 11) e exatamente no ponto 9 foi onde ocorreu essa maior distorção negativa.

Pode-se também comparar a distorção nas 4 peças e perceber a influência do método de fabrico de cada provete na distorção (Figura 41). É possível observar, portanto, que o método de fabricação influencia a distorção do material e, por conseguinte, as tensões residuais. Em particular, as duas estratégias de varrimento adotadas tiveram impactos distintos, sendo que a estratégia baseada em varrimentos em toda a extensão do provete, aquela que conduziu a maiores distorções, teve aproximadamente o dobro das observadas com a estratégia baseada no varrimento de pequenas ilhas (*chess scanning*). Apesar destas diferenças ao nível das distorções, não se observou diferenças significativas nas respectivas distribuições das tensões residuais.

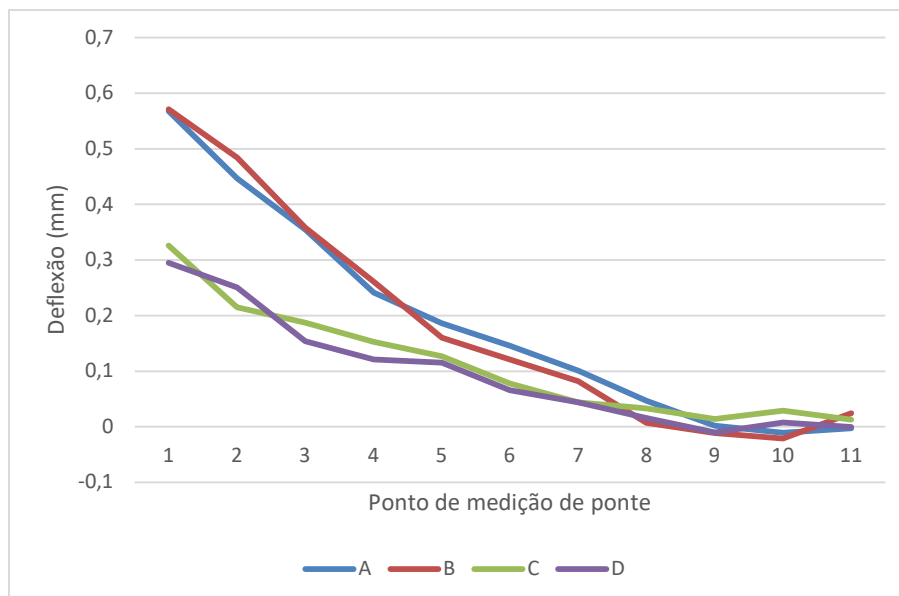


Figura 41. Comparação das deflexões após o corte entre as 4 peças nas coordenadas medidas.

4.1.3. Metalografia

Nas Figuras 42 e 43 apresentam-se metalografias do material das pontes obtidas em dois planos de corte distintos, e para cada uma das estratégias de construção distintas. Pelo exposto nas Figuras 42 e 43, fica claro um elevado nível de defeitos, sendo mais elevado na estratégia de deposição usada no Grupo 2. O estudo metalográfico objetivou perceber a diferença entre as deposições das camadas entre o G1 e o G2, mas nenhum dos cortes provou-se útil em fechar decididamente a questão. Apesar de os limites de deposição distinguirem-se bem em dadas partes da amostra, não fica evidente a diferença entre as estratégias de deposição/varrimento do laser.

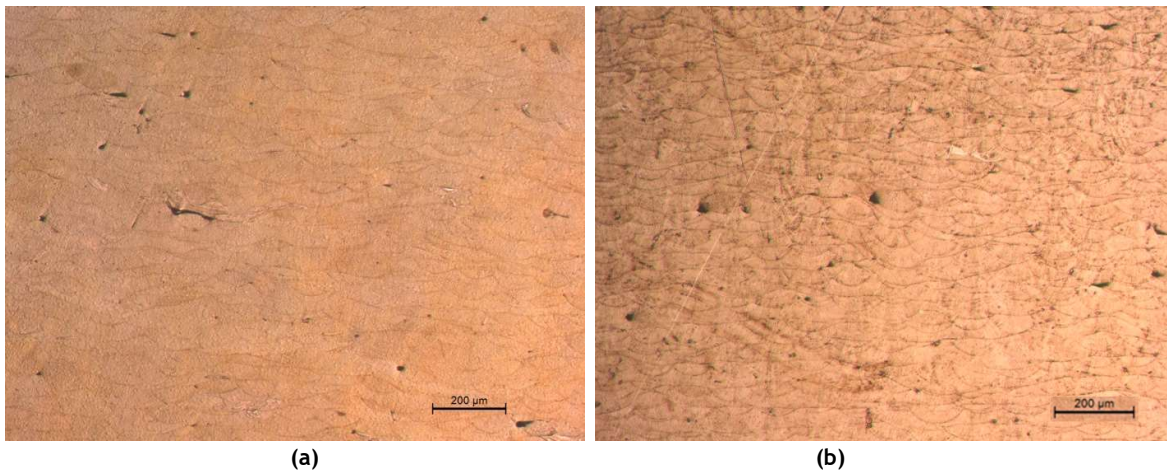


Figura 42. Metalografia do provete A. (a) Sentido transversal; (b) sentido longitudinal.

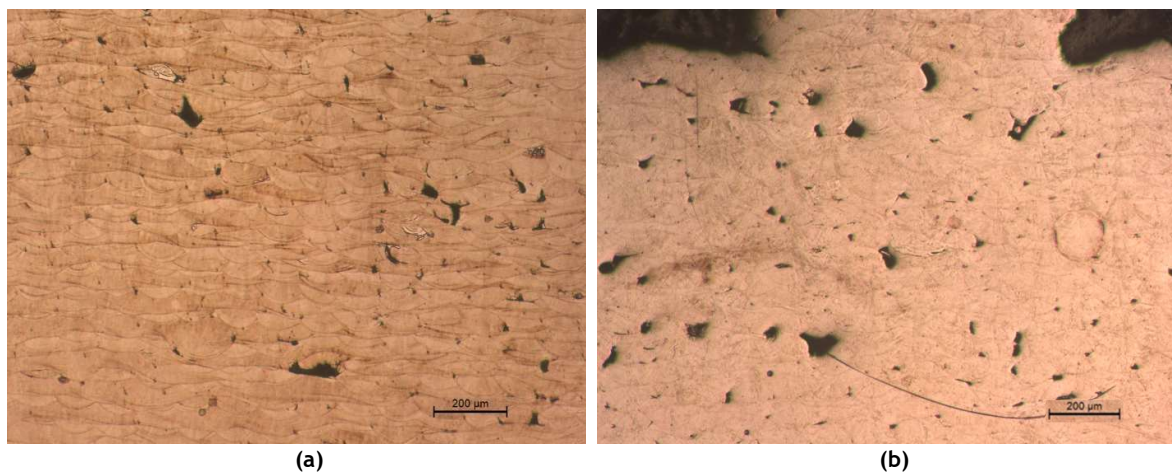


Figura 43. Metalografia do provete C. (a) Sentido transversal; (b) sentido longitudinal.

4.2. Resultados computacionais

4.2.1. Tensões residuais

As Figuras 44 a 51 mostram os resultados das tensões residuais das várias simulações realizadas com diferentes condições de fronteira (ver Tabela 5) e compara os valores com os resultados experimentais. São apresentados os resultados numéricos antes e depois da libertação dos pilares das pontes, sendo que os resultados experimentais correspondem ao estado antes do corte dos pilares da ponte. No entanto, convém ressaltar que os resultados experimentais não estão isentos de alguma relaxação pois a placa base foi seccionada em 4 porções, uma por ponte, para facilitar o seu manuseamento durante as medições no difratômetro de raio x.

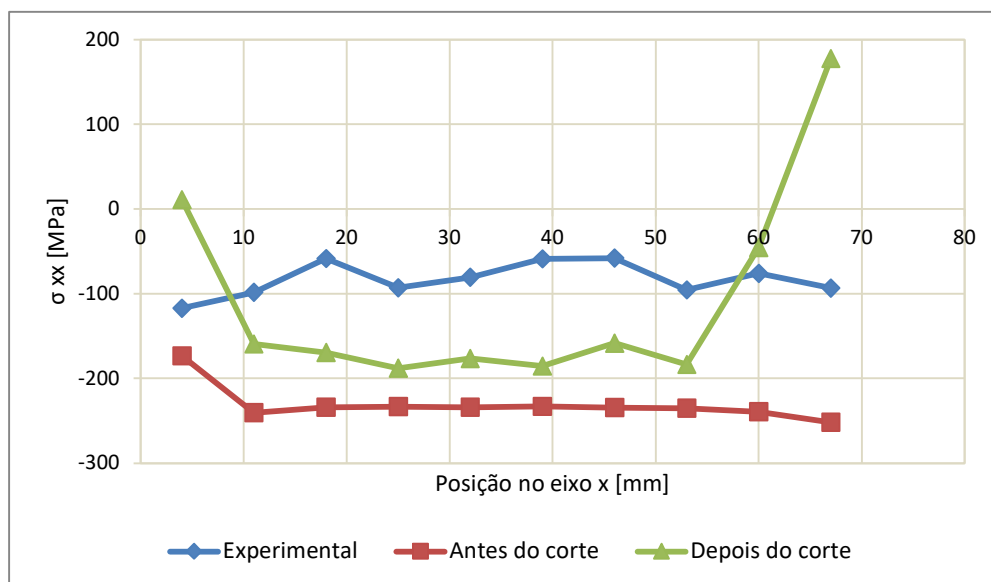


Figura 44. Análise de tensões residuais em x, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com a lateral engastada.

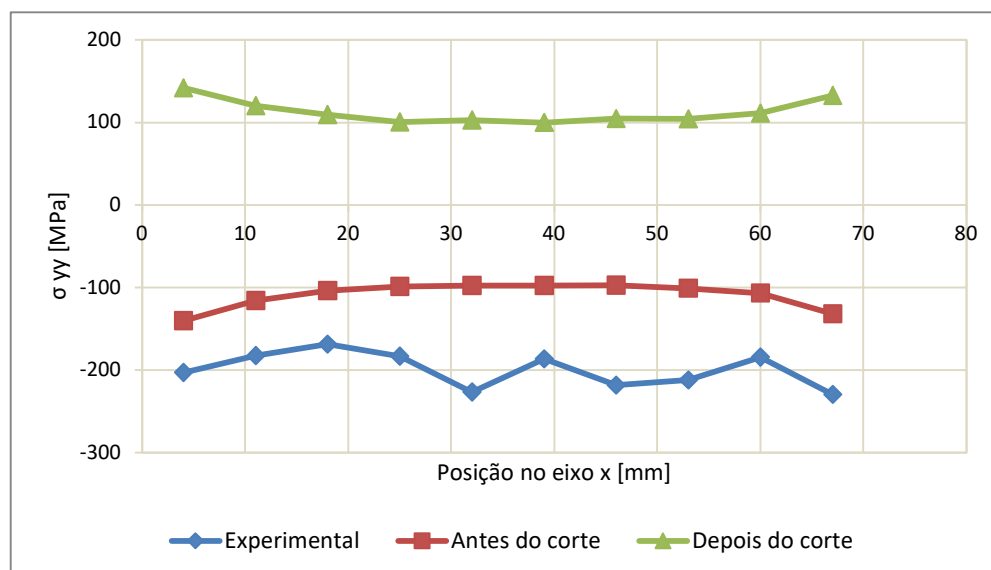


Figura 45. Análise de tensões residuais em y, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com a lateral engastada.

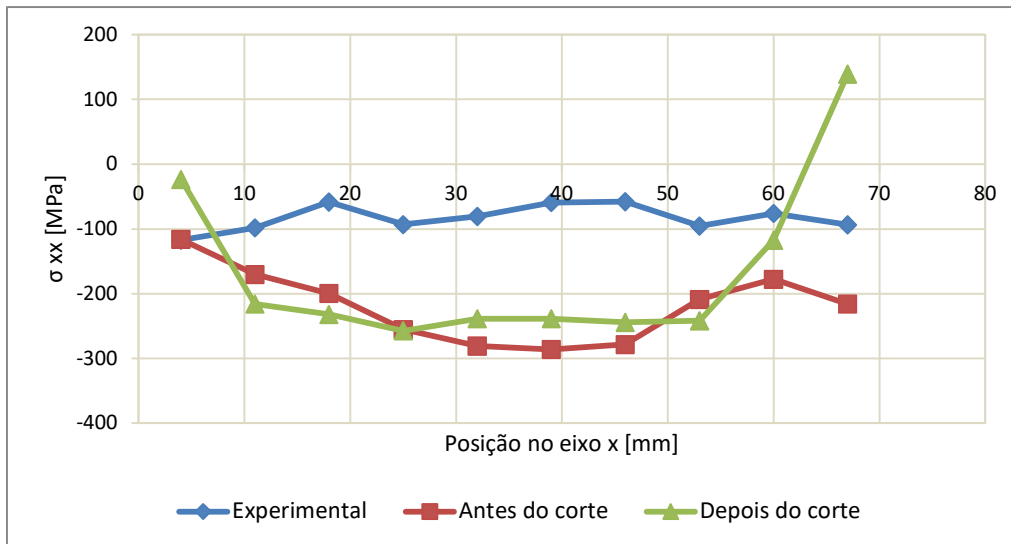


Figura 46. Análise de tensões residuais em x, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com a face inferior engastada.

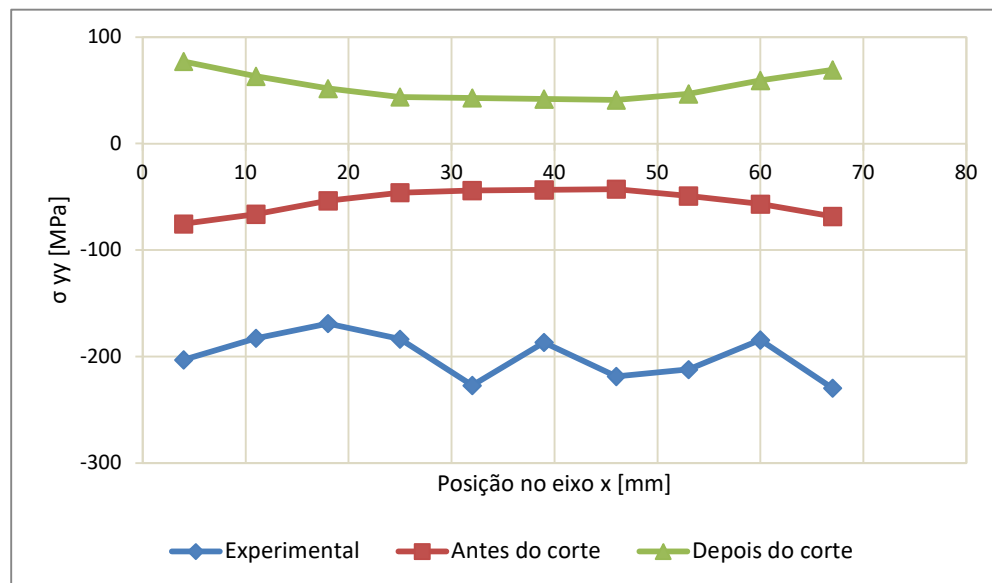


Figura 47. Análise de tensões residuais em y, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com a face inferior engastada.

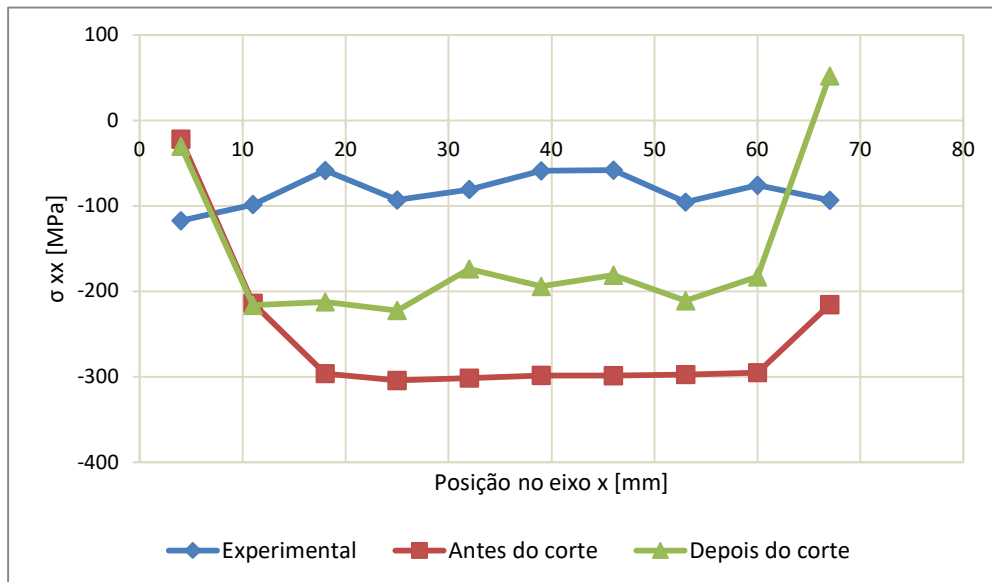


Figura 48. Análise de tensões residuais em x, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com as duas faces laterais engastada.

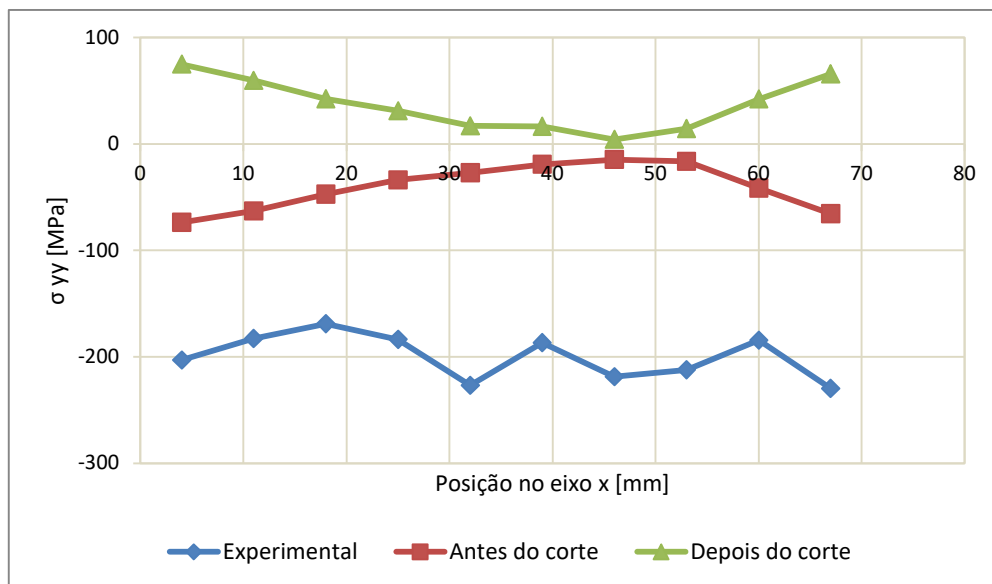


Figura 49. Análise de tensões residuais em y, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com as duas faces laterais engastada.

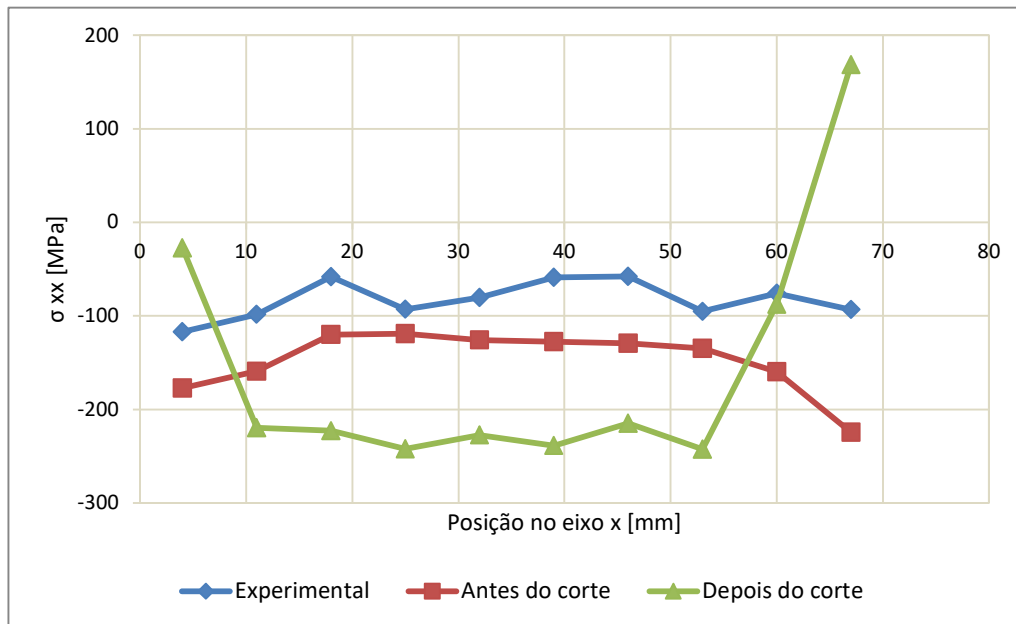


Figura 50. Análise de tensões residuais em x, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com os dois cantos inferiores engastados.

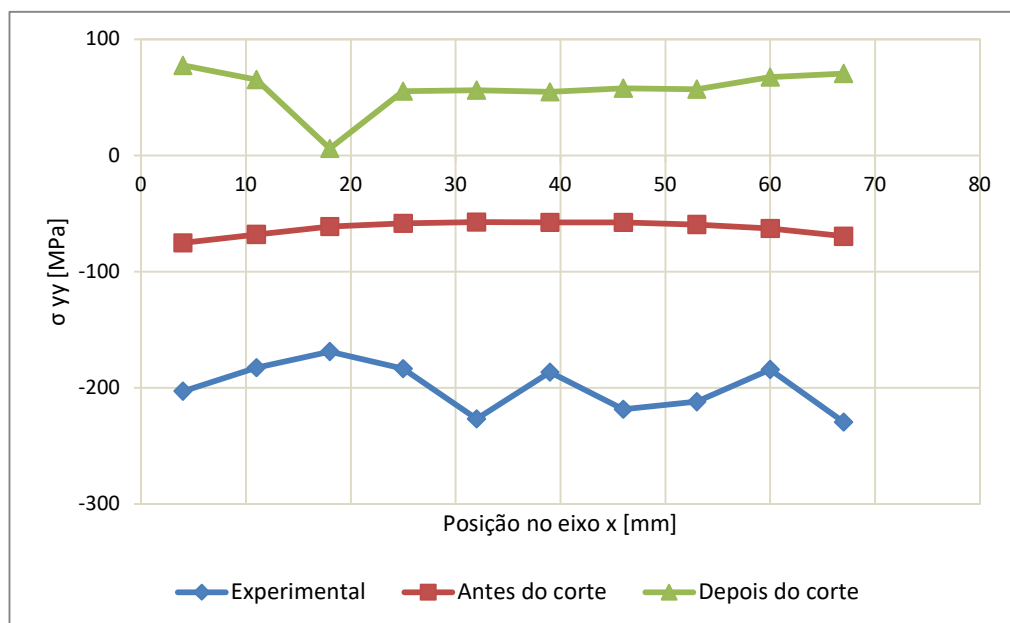


Figura 51. Análise de tensões residuais em y, comparando as obtidas experimentalmente com antes e depois do corte das pontes com os dois cantos inferiores engastados.

Ao analisar os gráficos das tensões residuais na direção x , é possível observar que o que mais se aproxima do resultado experimental é a simulação onde estão apenas os dois cantos como condição de fronteira e no momento imediatamente antes do corte das pontes (Figura 50- linha vermelha). Isso ocorre porque a peça tem mais graus de liberdade para acomodar as tensões residuais, o que não acontece nas condições de fronteira extremamente restritivas (Figuras 46 e 48), além de ser o momento em que o estudo experimental foi feito. Também é interessante observar nos gráficos que, quanto mais restritiva é a condição de fronteira, maior a tensão residual, o que realmente era esperado. É muito interessante notar que os resultados das Figuras 48 e 49 enquadram os resultados experimentais, o que é uma evidência clara da enorme influência das condições de fronteira da placa nas tensões residuais, o que não era expectável no início do estudo, dada a elevada espessura da placa base.

Relativamente às tensões residuais na direção y (Figuras 45, 47, 49 e 51) não há uma diferença significativa das tensões em relação às condições de fronteira pois as dimensões nessa direção são muito pequenas se comparadas com o resultado na direção x .

4.2.2. Distorção

Após a construção do modelo, foi gerado um caminho para extração de resultados no topo da peça (Z e Y fixos, X variável), local este onde, experimentalmente, os pontos estudados foram gerados. Após a criação do caminho, deu-se início à simulação.

Na Figura 52 é ilustrado o mapa dos deslocamentos na direção vertical, z , após o corte da peça. Constata-se que existe uma deformação significativa da placa, na configuração de simplesmente apoiada nas extremidades (primeira linha da Tabela 5).

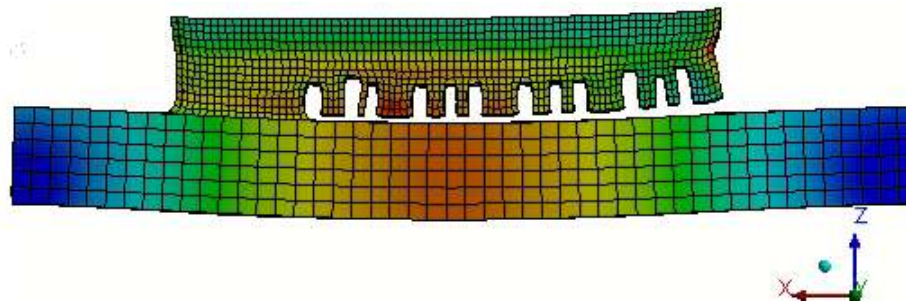


Figura 52. Campo de deslocamentos em Z após o corte dos pilares do provete.

A distorção medida na parte superior do provete está representada na Figura 53.

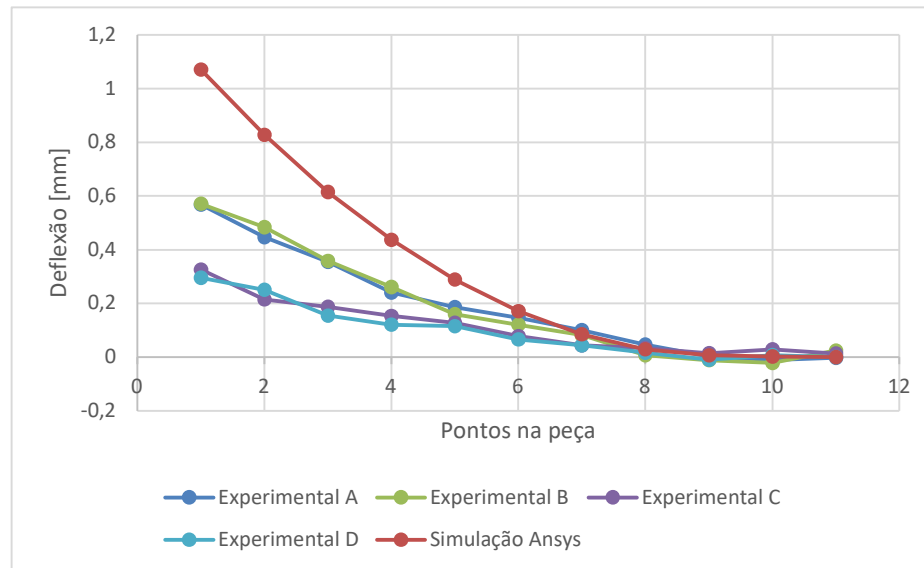


Figura 53. Comparação da deflexão relativa dos pontos estudados experimentalmente com o simulado no Ansys.

Ao analisarmos o gráfico, fica claro que esse resultado se aproxima muito mais dos valores das peças do Grupo 1 do que do Grupo 2, isso porque, como falado anteriormente, o Ansys não simula ilhas, diferença essencial entre os dois grupos. Nota-se uma diferença de deflexão maior nos primeiros pontos em relação aos valores experimentais, visto as condições de fronteira impostas pelo software. Pires (2021) ao realizar a mesma simulação, obteve o resultado da deflexão mais próximo ao Grupo 2, o que pode ser devido à utilização de um outro software no processo que tinha em conta as trajetórias do laser na construção de cada camada.

A Figura 54 descreve a distorção da placa base quando impostas diferentes condições de fronteira (descritas na Tabela 5).

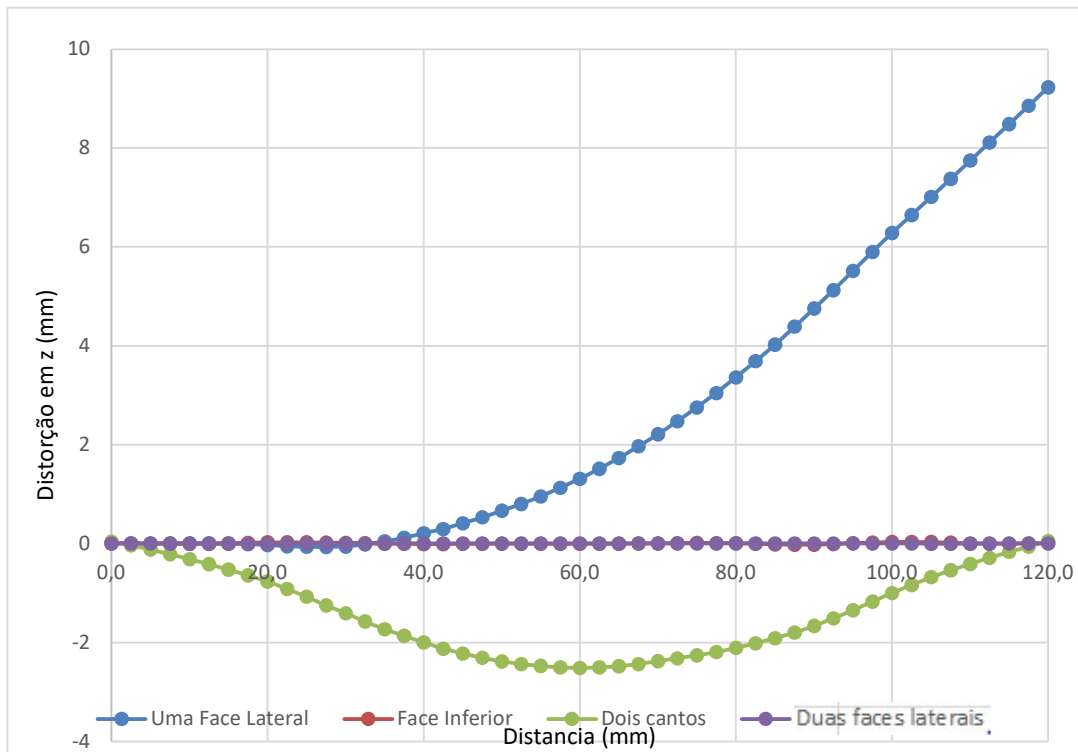


Figura 54. Distorção da placa base com diferentes condições de fronteiras.

Fica claro perceber que a condição de fronteira está diretamente ligada aos graus de liberdade da peça, o que influencia no estudo de tensão. Observando as séries das condições de fronteira extremamente restritivas - roxa e vermelha (por trás da roxa) - vemos que a distorção da base é quase desprezível quando comparada com as outras condições de fronteiras menos restritivas (séries azul e verde).

5. Conclusão

O estudo apresentado nesta dissertação relativamente à simulação do processo de fabrico aditivo foi muito desafiante, tendo sido suportado por um trabalho experimental de suporte igualmente complexo. Foi adotado um programa experimental que consistiu no fabrico de provetes usando a técnica LPBF, seguindo o exemplo do *Round Robin* da NIST e adotando duas estratégias de varrimento distintas com uma reptição. Do lado das simulações, procurou-se testar a ferramenta computacional Ansys e em particular o módulo recente para simulação do fabrico aditivo.

Na parte experimental, no que diz respeito às distorções, foi verificado que o G1 obteve maiores distorções quando comparado ao G2. Isso ocorreu pelo fato da estratégia de fabricação do G1 ter sido de forma contínua, ou seja, não houve tempo de haver um maior resfriamento que a outra camada já foi depositada em cima, o que não ocorreu no G2, já que este foi feito em ilhas, distribuindo a entrega térmica de forma mais eficaz, resultando em gradientes térmicos menores e, conseqüentemente, distorções menores. Esse resultado já era esperado pela proposta de diferenciação de estratégia de fabricação.

Ainda na parte experimental, mas na análise das tensões residuais, vê-se que as tensões são significativamente semelhantes, o que leva a concluir que a estratégia de fabricação não influencia nesse campo. Essa conclusão só é válida pelo fato de as tensões serem medidas na superfície de topo, não podendo ser aferidas conclusões acerca do campo de tensões residuais global.

Quando parte-se para as análises em relação às previsões numéricas, os dados não conseguiram ser fielmente simulados quando comparados os dois grupos, G1 e G2, por falta de funcionalidade do Ansys, uma vez que este apenas simula sobreposição de camadas em um único sentido e com a ativação completa de camadas, ou seja, não há parâmetros suficientes para simular a diferença entre os dois grupos. A partir desta limitação, decidiu-se simular apenas o grupo G1, porém com a ressalva de não intercalar as camadas. Além disto, foi considerada a questão “condição de fronteira”, a qual só é possível ser estabelecida dentro do software quando se restringe completamente o grau de liberdade naquela face ou canto, o que não condiz com a realidade, uma vez que, quando o experimento é realizado no processo AM, ele apenas restringe a distorção em Z negativo, deixando todos os outros sentidos com liberdade para ter distorções. Este fato tem implicações na deformação e na tensão residual no final do estudo. Foi possível demonstrar que as condições de fronteira simuladas para a placa têm uma influência muito significativa nas tensões residuais na direção xx, podendo inverter inclusive o sinal dessas tensões, demonstrando-se assim que, com a escolha apropriada das condições fronteira, será possível estimar tensões residuais similares às experimentais.

Para os pontos utilizados na medição das distorções nos provetes, verificou-se que os resultados obtidos pela simulação computacional se aproximam mais do Grupo 1 do que do

Grupo 2, o que já era esperado pela forma de deposição das camadas. Porém, quando comparado aos mesmos estudos realizados por Pires (2021), mas em um software de simulação diferente (ABAQUS), foi verificado que os resultados se aproximam mais do experimental do que o realizado no presente trabalho, levando à conclusão de que a ativação completa das camadas poderá ser a principal limitação do ANSYS.

Foi constatado, então, que há uma melhor previsão qualitativa das distorções, quando comparado aos resultados das tensões residuais. Finalmente, conclui-se que o plugin AdditiveWizard do Ansys mostrou-se mais confiável no estudo das distorções quando comparados estes resultados com os estudos das tensões residuais.

6. Trabalhos Futuros

A partir do exposto, seguem sugestões para futuros trabalhos a serem desenvolvidos:

- Refinamento de malha com a condição de fronteira nos dois cantos inferiores.
- Fazer o estudo da mesma geometria, mas com material diferente, ou seja testar o ANSYS com os resultados experimentais do Round Robin do NIST;
- Validação das propriedades do material;
- Verificar os tempos de deposição entre camadas, uma vez que foram produzidas várias pontes em simultâneo, o que leva a tempos entre as camadas superiores;
- Fazer o mesmo estudo que o proposto no presente trabalho, porém modificando o processo de LPBF para DED e simular no Ansys.

Referências Bibliográficas

Abreu, J. F. A. C. (2016). **Estudo computacional via ANSYS de vigas, arcos e anéis com restrições de contato impostas por bases elásticas**. Tese de Mestrado, PROPEC/Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto/MG, Brasil.

Ansys. Ansys [S.l.] [2021]. Disponível em: <<https://www.ansys.com/>>. Acesso em 28 out. 2021.

Araújo, G. G. (2018). **Fabricação Aditiva: Tecnologias e Parâmetros**. REGRAD-Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM-ISSN 1984-7866, 10(01), 417-432.

Araújo, A. P. M. D. (2020). **Manufatura aditiva da liga reciclada Al-Fe-Cr-Ti formadora de fase quasicristalina**. Tese de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos.

Avelino Júnior, A. F. (2017). **Estudo da corrosão do aço Maraging grau 300 em meio de cloreto contendo CO₂ e CO₂/H₂S**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará. http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/23472/1/2017_tese_afavelinoj%3%banior.pdf

Azevedo, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, v. 1, n. 7, 2003.

Bajaj, P. Wright, J. Todd, I. Jäggle, E.A. **Predictive process parameter selection for Selective Laser Melting Manufacturing: Applications to high thermal conductivity alloys**. *Additive Manufacturing*, 27:246-258, 2019.

Bajaj, P., Hariharan, A., Kini, A., Kürsteiner, P., Raabe, D., & Jäggle, E. A. (2020). **Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties**. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138633.

Barrio, R.C.A.V.G. **Efeito da Temperatura de solubilização na microestrutura, dureza, início da transformação martensítica e textura de um aço Mar300**. Universidade Federal do Ceará (UFC), págs 20-45, 2019.

Bertoli, U. S., Wolfer, A. J., Matthews, M. J., Delplanque, J. P. R., & Schoenung, J. M. (2017). **On the limitations of volumetric energy density as a design parameter for selective laser melting**. *Materials & Design*, 113, 331-340.

Callister, D.W. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**, Rio de Janeiro: LTC, 9. ed, 2016.

Castro Güiza, G. M. (2015). **Efeito da deformação a quente sobre a microestrutura, dureza e cinética de precipitação de um aço maraging C300**. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.

Chiaverini, V. **Geologia e Metalurgia**. Boletim CMR USP, n. 11, 1954. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/geologiaemetalurgia/Revistas/Edi%C3%A7%C3%A3o%2011/completo11.pdf>>, págs 3 -15. Acesso em 22/01/2021.

Choo, H., Sham, K. L., Bohling, J., Ngo, A., Xiao, X., Ren, Y., ... & Garlea, E. (2019). **Effect of laser power on defect, texture, and microstructure of a laser powder bed fusion processed 316L stainless steel**. *Materials & Design*, 164, 107534.

Church, P., Reynolds, M., Gould, P., Oakley, R., Harrison, N., Williamson, D., ... & Taylor, N. (2018). **Tensile properties of AM maraging steel**. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 183, p. 01058). EDP Sciences.

Coelho, A. W. F. (2018). **Manufatura Aditiva por Jato Aglutinante (Impressão 3D): Fabricação e Avaliação de Compósitos de Gesso com Fibras de Sisal**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Costa, L., Vilar, R., Reti, T., & Deus, A. M. (2005). **Rapid tooling by laser powder deposition: Process simulation using finite element analysis**. *Acta Materialia*, 53(14), 3987-3999.

Denlinger, E. R. (2015). **Thermo-mechanical model development and experimental validation for metallic parts in additive manufacturing**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual da Pensilvânia.

EPMA. **Introdução à tecnologia de manufatura aditiva**. Recuperado de:<<http://www.epma.com/additive-manufacturing>>, 2015.

Feitosa, A. L. M. (2017). **Caracterização microestrutural e análise de textura cristalográfica do aço maraging 300 produzido por manufatura aditiva**. Trabalho de Licenciatura, Universidade Federal do Ceará.

Floreen, S., & Speich, G. R. (1979). **Some observations strength and toughness of maraging steels**. *Source book on maraging steels*, 327-336.

Flynn, J. M., A. Shokrani, S. T. Newman, and V. Dhokia. **Hybrid additive and subtractive machine tools** - Research and industrial developments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 101:79-101, 2016.

Ford, S. & Despeisse, M. (2016). **Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges**. *Journal of cleaner Production*, 137, 1573-1587.

Fox, J. C., S. P. Moylan, and B. M. Lane. **Effect of process parameters on the surface roughness of overhanging structures in laser powder bed fusion additive manufacturing**. *Procedia Cirp*, 45:131-134, 2016.

Gong, H., Rafi, K., Gu, H., Starr, T., & Stucker, B. (2014). Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*, 1, 87-98.

Guo, Z., & Sha, W. (2004). **Modelling the correlation between processing parameters and properties of maraging steels using artificial neural network**. *Computational Materials Science*, 29(1), 12-28.

Hajjalizadeh, F., & Ince, A. (2020). **Short review on modeling approaches for metal additive manufacturing process**. *Material Design & Processing Communications*, 2(2), e56.

Herzog, D. Seyda, V. Wycisk, E. Emmelmann, C. **Additive manufacturing of metals**. *Acta Materialia*, 117: 371-392, 2016.

Huckstepp, A. **Directed Energy Deposition (DED)**. 2019. Disponível em: <<https://www.digitalalloys.com/blog/directed-energy-deposition/>>, Acesso em: 20/06/2021.

Kamal, M., & Rizza, G. (2019). **Design for metal additive manufacturing for aerospace applications**. In *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* (pp. 67-86). Elsevier.

Kavamura, E. E., Carvalho, N. F., Hecke, M. B., Machado, R. D., De Lacerda, L. A., & Krüger, D. A. V. (2004). **Análise termo-mecânica bidimensional de estruturas de concreto executadas por camadas**. *Métodos Computacionais em Engenharia*, Lisboa.

Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2011). **Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel**. *Physics Procedia*, 12, 255-263.

King, W. E., Barth, H. D., Castillo, V. M., Gallegos, G. F., Gibbs, J. W., Hahn, D. E., ... & Rubenchik, A. M. (2014). **Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing.** *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 2915-2925.

Lewandowski, J. J., & Seifi, M. (2016). **Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties.** *Annual review of materials research*, 46, 151-186.

Lima, S. C. (2006). **Estudo da técnica de difração de raios X.** Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Física, Universidade Estadual de Feira de Santana.

Lima, V.X.F (2018). **Influência da temperatura de solubilização nas propriedades mecânicas do aço maraging 300.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, págs 26-51.

Liu, R. et al. **Aerospace applications of laser additive manufacturing.** In: *Laser Additive Manufacturing*. Elsevier, 2017. p. 351-371

Lopes, J. C. O., 2007, **“Os aços Maraging”**. *Ciência e Tecnologia dos Materiais*. São Paulo, v. 19, n. 8, p.1-5.

Loureiro, R. D. C. P. (2020). **Influência dos ciclos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas de um aço maraging 300 18% Ni.** Tese de Mestrado, Universidade Federal do Ceará.

Magnee, A., Drapier, J. M., Coutouradis, D., Habrakan, L., & Dumont, J. (1974). **Cobalt-containing high-strength steels** (No. INIS-MF--1971).

Markusson, L. **Powder Characterization for Additive Manufacturing Process.** Lulea University of Technology, 2017.

Mazur, M., Leary, M., McMillan, M., Elambasseril, J., & Brandt, M. (2016). **SLM additive manufacture of H13 tool steel with conformal cooling and structural lattices.** *Rapid Prototyping Journal*.

Milewski, J. O. **Additive manufacturing of metals.** From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry. Springer Verlag, 2017. v. 258

Mukherjee, T. Wei, H.L. De, A. DebRoy, T. **Heat and fluid flow in additive manufacturing- Part II: Powder bed fusion of stainless steel, and titanium, nickel and aluminum base alloys.** *Computational Materials Science*, 150: 369-380, 2018.

NIST. Additive Manufacturing Benchmark Test Series (AM-BENCH) [S.l.] [2019]. Disponível em: <<https://www.nist.gov/ambench/amb2018-01-description>>. Acesso em 28 out. 2021.

Nunes, G. C. D. S. (2015). **Síntese e caracterização do aço Maraging-350 tratado termicamente sob diferentes condições**. Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá.

Oliveira, A. L. (2019). **Effect of heat treatment on SLM maraging C-300 steel parts**. Tese de Mestrado, Universidade do Porto.

Padial, A. G. F. **Transformações de Fase e Propriedades Mecânicas de um aço maraging sem cobalto**. Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares (IPEN), págs 20-35, 1994.

Padial, A. G. F. (2002). **Caracterização microestrutural do aço maraging de grau 400 de resistência mecânica ultra-elevada** Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo.

Pires, M. M. (2021). **Finite element analysis of residual stresses in metallic parts produced by additive manufacturing**. Tese de Mestrado, Universidade do Porto.

Rabelo, A. **Influência do tratamento térmico sobre a microestrutura e propriedades mecânicas do aço maraging C300 obtido por fusão seletiva a laser (FSL)**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), págs 43-68, 2016.

Redwood, B. Schffer, F. Garret, B. **The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications**. 3D Hubs, 1st edition, 2017.

Rohit, B., & Muktinatalapati, N. R. (2018). **Austenite reversion in 18% Ni maraging steel and its weldments**. *Materials Science and Technology*, 34(3), 253-260.

Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R., & Babu, S. S. (2016). **The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing**. *International materials reviews*, 61(5), 315-360.

Santos, D. R. (2001). **Otimização dos parâmetros de tratamento térmico e soldagem do aço maraging 18Ni 300**. 2001. 118f. Tese de Mestrado, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

Scherer, M. (2018). **Avaliação da confiabilidade de vigas de concreto armado pelo método dos elementos finitos**. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

Schmidova, E., Hojka, P., Culek, B., Klejch, F., & Schmid, M. (2019). **Dynamic strength and anisotropy of DMLS manufactured maraging steel**. *Komunikácie: Communications (Scientific Letters of the University of Žilina)*, volume 21, issue: 3.

SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial). **Tratamento Térmico**. Módulos Especiais Mecânica, telecurso 2000. Disponível em: <http://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/2_Mecatr%C3%B4nica/Materiais_1_Meca_2/Apostila_%20Tratamento_Termico_Complementar.pdf> . Acesso em: 16/05/2021

Sha, W., & Guo, Z. (2009). **Maraging steels**. In *Maraging Steels: Modelling of Microstructure, Properties and Applications* (pp. 1-3). Woodhead Publishing.

Silva, D. F. D. (2014). **Caracterização Mecânica e Microestrutural do aço Maraging 300, soldado a plasma e submetidas a reparos**. Tese de Pós-Graduação, Universidade Estadual Paulista.

Silva, D. M. E (2015). **Simulação Computacional de Juntas Soldadas no Aço AH36, Utilizado na Industria Naval e Offshore**. Tese de Licenciatura, Universidade de Pernambuco.

Silva, R. F. (2020). **A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais**. *Revista Processos Químicos*, 14(27), 73-82.

Silva, T. E. F (2021). **Machinability of Maraging Steel Manufactured by Laser Powder Bed Fusion**. Tese de Doutorado, Universidade do Porto. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/133908>

Souza, R. M. (2003). **O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. Apostila, Universidade Federal do Pará, Belém.

Song, X., Feih, S., Zhai, W., Sun, C. N., Li, F., Maiti, R., ... & Korsunsky, A. M. (2020). **Advances in additive manufacturing process simulation: Residual stresses and distortion predictions in complex metallic components**. *Materials & Design*, 193, 108779.

Soriano, H. L. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. vol. 48. Edusp, 2003.

Souza, C. P. D (2018). **Modelagem do endurecimento por precipitação durante o envelhecimento e superenvelhecimento do aço maraging classe 300**. Tese de Licenciatura, Universidade Federal Fluminense.

Souza, D. M. **Efeito do Resfriamento Ativo por Quase-Imersão nas Propriedades Mecânicas de Pré-Formas de Alumínio Fabricados por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.** Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2021.

Tang, M. Pistorius, P.C. Beuth, J.L. **Prediction of lack-of-fusion porosity for powder bed fusion.** *Additive Manufacturing*, 14:39-48, 2017.

Tavares, J. M. R. S., & Padilha, A. J. M. N. (1998). **Introdução ao método dos Elementos Finitos.**

Thomas-Seale, L.; Kirkman-Brownl, J.; Attallah, M.; Espino, D.; Shepherd, D. **The barriers to the progression of additive manufacture: perspectives from uk industry.** *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 198, p. 104-118, 2018.

Tschiptschin, A. P. **Mundo dos Aços Especiais**, 2017. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4354027/mod_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf> . Acesso em: 20/03/2021

Turk, C. Zunko, H. Aumayr, C. Leitner, H. Kapp, M. **Advances in Maraging Steels for Additive Manufacturing.** *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, 164(3):112-116, 2019.

Xia, M. Gu, D. Yu, G. Dai, D. Chen, H. Shi, Q. **Influence of hatch spacing on heat and mass transfer, thermodynamics and laser processability during additive manufacturing of Inconel 718 alloy.** *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 109:147-157, 2016.

Xie, R., Chen, G., Zhao, Y., Zhang, S., Yan, W., Lin, X., & Shi, Q. (2019). **In-situ observation and numerical simulation on the transient strain and distortion prediction during additive manufacturing.** *Journal of Manufacturing Processes*, 38, 494-501.

Yang, Q., Zhang, P., Cheng, L., Min, Z., Chyu, M., & To, A. C. (2016). **Finite element modeling and validation of thermomechanical behavior of Ti-6Al-4V in directed energy deposition additive manufacturing.** *Additive Manufacturing*, 12, 169-177.

Yap, C.Y. Chua, C.K. Dong, Z.L. Liu, Z.H Zhang, D.Q. Loh, L.E. Sing, S.L. **Review of selective laser melting: Materials and applications.** *Applied Physics Reviews*, 2(4):041101, 2015.

Zhang, M. Sun, C.-N. Zhang, X. Goh, P.C. Wei, J. Hardacre, D. Li, H. **Fatigue and fracture behaviour of laser powder bed fusion stainless steel 316L: Influence of processing parameters.** *Materials Science and Engineering: A*, 703:251-261, 2017.

Apêndice I - Propriedades do 18Ni300 usados no estudo

Densidade: 8000 kg/m^3

Coeficiente térmico de expansão:

Temperatura (°C)	Coeficiente térmico de expansão (C ⁻¹)
20	1.84E-06
100	1.08E-05
200	2.20E-05
300	3.32E-05
400	4.44E-05
500	5.56E-05
600	6.68E-05
700	7.80E-05
800	8.92E-05
900	0.0001
1000	0.000112

Temperatura de fusão: 1425 °C

Elasticidade isotrópica:

Temperatura(°C)	Módulo de Young(Pa)	Coeficiente de Poisson	Módulo Volumétrico (de Bulk) (Pa)	Módulo de Cisalhamento (Pa)
25	2.04E+11	2.91E-01	1.63E+11	7.90E+10
221	1.95E+11	2.95E-01	1.59E+11	7.53E+10
307	1.87E+11	2.96E-01	1.53E+11	7.21E+10
377	1.82E+11	3.05E-01	1.56E+11	6.97E+10
455	1.76E+11	3.16E-01	1.59E+11	6.69E+10
525	1.68E+11	3.09E-01	1.47E+11	6.42E+10
612	1.53E+11	3.22E-01	1.43E+11	5.79E+10
684	1.42E+11	3.32E-01	1.41E+11	5.33E+10
794	1.29E+11	3.48E-01	1.41E+11	4.78E+10
889	1.17E+11	3.61E-01	1.40E+11	4.30E+10



Endurecimento isotrópica bilinear:

Temperatura(°C)	Escoamento (Pa)	Módulo Tangente (MPa)
20	9.11E+02	1.09E+03
100	8.68E+02	1.04E+03
200	8.15E+02	9.72E+02
500	6.56E+02	7.82E+02
800	4.96E+02	5.92E+02
1000	3.90E+02	4.65E+02

Condutividade térmica isotrópica:

Temperatura (°C)	Condutividade Térmica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)
20	15.81
100	17.46
200	19.52
300	21.58
400	23.64
500	25.7
600	27.76
700	29.82
800	31.88
900	33.94
1000	36

Calor específico, Cp:

Temperatura (°C)	Calor Específico ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)
20	445
100	475
200	512
300	550
400	587
500	624
600	662
700	699
800	737
900	774
1000	811