

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PEÇAS DE AÇO OBTIDAS POR FUNDIÇÃO OU
IMPRESSÃO 3D: ANÁLISE TRIDIMENSIONAL POR MICROCT E
CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



MAYARA GUILHERME MARZANO

Orientador: Sidnei Paciornik

Co-orientadores: Ana Rosa Martins e Marcos Henrique de Pinho Mauricio

Rio de Janeiro

2015

**ANALYSIS STEEL PARTS OF COMPARATIVE OBTAINED BY FOUNDRY OR 3D
PRINTING: DIMENSIONAL MICROCT FOR ANALYSIS AND CHARACTERISTICS
OF MECHANICAL PROPERTIES**

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



MAYARA GUILHERME MARZANO

Orientador: Sidnei Paciornik

Co-orientadores: Ana Rosa Martins e Marcos Henrique de Pinho Mauricio

Rio de Janeiro

2015

Dedico este trabalho aos meus pais, Marcos e Rita Marzano, e ao meu irmão, Marcos Marzano Jr., que sempre me ajudaram de alguma forma para a conclusão desta nova etapa da minha vida. Eu amo vocês, obrigada.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível se não fosse a valorosa ajuda dos professores Sidnei Paciornik, Ana Rosa Martins, Valter Rocha dos Santos, Marcos Henrique Maurício e Henrique Chayin Inocêncio. Agradeço a dedicação, paciência, ajuda e toda contribuição relevante ao meu aprendizado.

Agradeço ao CNPq pela oportunidade de ter trabalhado com pesquisa durante dois anos introduzindo-me ao mundo microscópico do qual tomei tanto gosto e obtive conhecimento.

Agradeço ao departamento de Materiais e ao professor Eduardo Brocchi por terem me acolhido.

À minha madrinha, Léa Agrelli e a Iracema Aprígio que sempre oraram por mim desejando meu sucesso.

Aos meus familiares que mesmo não podendo me abraçar, sei que estão comigo vibrando, torcendo e me guiando.

Agradeço principalmente aos meus pais por sempre me darem força, colo, amor e a confiança de que eu conseguiria chegar ao final.

“Mil serão jubilados, dez mil serão reprovados, mas tu não serás atingido.”

-M.G.Marzano.

SUMÁRIO

As novas técnicas de manufatura aditiva, tais como impressão 3D, permitem criar peças metálicas com formas variadas facilitando a prototipação de diferentes componentes. No entanto, pouco se sabe ainda sobre a microestrutura das peças impressas e sobre suas propriedades mecânicas.

Neste trabalho, peças de aço obtidas pelo processo tradicional de fundição e usinagem foram comparadas com peças obtidas por impressão 3D, ambas de mesma composição química. Para isso, utilizou-se microtomografia de raios-x, tecnologia esta que permite fazer análises não destrutivas, e microscopia ótica para caracterização da microestrutura. Ensaios mecânicos como teste de tração e microdureza foram empregados para análise das propriedades mecânicas dos materiais devido ao distinto processo de fabricação.

Através destas análises concluiu-se que a peça impressa apresenta maior resistência a tração quando comparada com a fundida, essa diferença é devido ao processo de fabricação diverso, explicado através da formação distinta de microestrutura das peças.

Palavras-chave: impressão 3D; microtomografia.

ABSTRACT

The new additive manufacturing techniques, such as 3D printing, allow you to create metal parts with varied shapes facilitating the prototyping of different components. However, do not exists many knowledge about the microstructure of printed pieces and on its mechanical properties.

In this paper, steel parts obtained by the traditional process of casting and machining were compared with obtained by 3D printing pieces, both of the same chemical composition. For this, we used x-ray microtomography, this technology that allows non-destructive analysis, and optical microscopy to characterize the microstructure. Mechanical tests such as tensile test and hardness were employed for the analysis of mechanical properties of materials due to different manufacturing process.

Through these analyzes it was concluded that the printed part has a higher tensile strength compared with the melt, this difference is due to a manufacturing process explained by formation of different parts of the microstructure.

Keywords: 3D printing; microtomography.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	3
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Impressão 3D.....	4
2.2	Microtomografia de Raios-x.....	6
3	Materiais e Métodos Experimentais	11
3.1	Materiais dos corpos de prova	11
3.2	Impressão 3D – A impressora específica e condições de operação.....	16
3.2.1	Processo de Densificação	20
3.2.2	Propriedades do Sinterizado	21
3.3	Microtomografia de Raios-x – Versa 510 e condições de operação	22
3.4	Ensaio Mecânico – A máquina utilizada e condições de operação.....	23
4	Resultados e Discussão.....	30
4.1	Peças fundidas versus Peças impressas	30
4.2	Caracterização por MicroCT	31
4.2.1	Peças Fundidas	31
4.2.2	Peças Impressas.....	34
4.3	Ensaio Mecânico.....	37
4.3.1	Peças ensaiadas antes da ruptura	37
4.3.2	Peças ensaiadas até a ruptura.....	39
4.4	Análise dos Dados.....	40
5	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	47
6	Bibliografia.....	49

Índice de Figuras

Figura 1: Arquitetura Interna do CNC (Arquitetura interna do CNC, 2002)	5
Figura 2: Componentes básicos do sistema mecânico de um tomógrafo industrial de feixe cônico e principais parâmetros de configuração geométricos.....	7
Figura 3: Corpo de Prova (Corpos de Prova para o ensaio de tração)	13
Figura 4: Acabamento superficial. a) rugosidade; b) ondulações; c) direção das irregularidades; d) falhas (MACHADO, 1999).....	14
Figura 5: Amostra fundida de 4mm de diâmetro.....	16
Figura 6: Eosint M 280 (EOS-EOSINT-REVIEW).....	17
Figura 7: Processo de construção (L. ESPERTO)	18
Figura 8: Hatching do tipo Up-Down Stripes (L. ESPERTO).....	19
Figura 9: Hatching do tipo Squares (L. ESPERTO).....	20
Figura 10: ZEISS Xradia 510 Versa	22
Figura 11: Corpo de prova padrão (JOSEPH E. SHIGLEY, 2005).....	24
Figura 12: Dispositivo de ensaio de tração para determinação da curva tensão x deformação do material metálico. A célula de carga mede a carga aplicada e o extensômetro acoplado ao corpo de prova mede o alongamento. (Propriedades Mecânicas , 2011)	25
Figura 13: Uso do extensor GL	25
Figura 14: Máquina Instron 5500R.....	26
Figura 15: Representação do diagrama típico de tensão-deformação para materiais (a) dúcteis e (b) frágeis (JOSEPH E. SHIGLEY, 2005)	27
Figura 16: (a) Amostra impressa; (b) Amostra fundida	30
Figura 17: Amostra Fundida utilizando lente 0.4X aumento antes do teste de tração	31
Figura 18: Amostra Usinada utilizando lente 4X aumento antes do teste de tração	32
Figura 19: Amostra Fundida utilizando lente 4X aumento depois do teste de tração	33
Figura 20: Amostra Impressa utilizando lente 4X aumento antes do ensaio de tração	35
Figura 21: Amostra Impressa utilizando lente 4X aumento antes do ensaio de tração	36
Figura 22: Gráfico tensão-deformação das amostras tendo ensaio interrompido até atingir o limite de escoamento	38
Figura 23: Gráfico tensão-deformação das amostras tendo ensaio até a ruptura	40
Figura 24: Amostras polidas com aumento de 500 vezes (a) impressa (b) fundida	41
Figura 25: Amostra fundida após ataque de Vilella com aumento de 50x e 500x.....	42
Figura 26: Amostra impressa após ataque de Vilella com aumento de 50x e 500x	43
Figura 27: Microestrutura da amostra impressa após ensaio de microdureza Vickers.....	45
Figura 28: Microestrutura da amostra fundida após ensaio de microdureza Vickers	45

Índice de Tabelas

Tabela 1: Propriedades mecânicas do material fornecidas pelo fabricante	11
Tabela 2: Norma para Corpos de prova Sub-Size	12
Tabela 3: Dados do ensaio 1 de tração para materiais fundidos	37
Tabela 4: Dados do ensaio 1 de tração para materiais fundidos	38
Tabela 5: Dados do ensaio 2 de tração para materiais fundidos e impressos	39
Tabela 6: Resultado do ensaio de microdureza Vickers.....	46

1 Introdução

Diante da crescente demanda de fabricação de peças, estudos são aprimorados buscando, através de novas máquinas ou aperfeiçoamento de métodos, maior facilidade de confecção. Dentre eles está impressão 3D que conquistou espaço dentro das indústrias e universidades possibilitando o desenvolvimento de objetos essenciais para o andamento das pesquisas, sem depender de recursos adicionais.

O processo de impressão 3D consiste primeiramente no desenho da peça com o auxílio de um software de edição em três dimensões bastando submeter o arquivo no computador da impressora e a mesma fatiará o objeto em diversas camadas. Em seguida, um laser é projetado no pó da matéria-prima fazendo o material aquecer e chegar próximo do ponto de fusão criando a primeira camada por aderência da superfície das partículas. A primeira camada é resfriada de modo muito rápido após a passagem do laser. O processo segue cobrindo a camada recém-criada com mais pó repetindo todo o processo até a conclusão do objeto.

Diferentemente da produção de aço, já que as peças fundidas geralmente requerem um tratamento térmico de recozimento ou normalização para alívio das tensões originadas na solidificação e para homogeneização da microestrutura. Apesar de ser uma técnica que já se tornou corriqueira no cotidiano, por constituir o mais importante grupo de materiais na engenharia e na indústria, ainda exige atualização de técnicas, justificando o investimento constante em pesquisa.

Além deste processo para tratamento do aço, para transformar o lingote em peças ou modificar seu formato deve-se usinar a chapa ou tarugo. A possibilidade de simplificar o processo, reduzindo o número de etapas, mas mantendo a qualidade do material, surge com a introdução das impressoras 3D.

Por se tratar de uma tecnologia nova de fabricação é importante avaliar o impacto do processo sobre as propriedades do componente impresso, especialmente as propriedades mecânicas, definindo suas aplicações para projeto e comercialização.

Dentre as diferentes formas de análise, os ensaios não destrutivos (END) vêm se destacando devido ao aprimoramento das técnicas utilizadas.

Alguns exemplos estão listados abaixo:

1. Ensaio por líquidos penetrantes: método desenvolvido para a detecção de descontinuidades essencialmente superficiais, abertas na superfície do material.
2. Ensaio por partículas magnéticas: consiste em submeter uma peça, ou parte dela, a um campo magnético, pois onde houver descontinuidade das propriedades magnéticas na região magnetizada da peça, causará um campo de fuga do fluxo magnético. A aplicação de partículas ferromagnéticas provoca a aglomeração destas nesses campos de fuga, indicando o contorno do campo de fuga, fornecendo a visualização do formato e da extensão da descontinuidade.
3. Ensaio com radiografia: se baseia na absorção diferenciada da radiação penetrante na peça inspecionada. Devido às diferenças de densidade e variações de espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes regiões de uma peça absorvem quantidades diferentes da radiação penetrante. Essa absorção distinta da radiação pode ser detectada por meio de um filme, tubo de imagem ou mesmo medida por detectores eletrônicos de radiação. A variação de quantidade de radiação absorvida indica a existência de uma falha interna ou descontinuidade no material.

Após a identificação da grande eficiência da Tomografia Computadorizada (TC) na medicina, vários estudos foram iniciados com a finalidade de efetivar esta técnica no campo da indústria. A tecnologia de raios X permite o desenvolvimento de métodos de TC, rápidos, não destrutivos e tridimensionais para a análise de materiais.

O uso da TC em materiais apresentou bom resultado na indústria, possibilitando a aplicação dessa técnica na avaliação interna de amostras para a visualização de defeitos, sem a necessidade de danificar a amostra. Dependendo do interesse da pesquisa, isto permite a realização do ensaio diversas vezes para o acompanhamento da degradação ao longo do tempo.

Visando entender e validar as características das peças impressas 3D, para comparação de propriedades, amostras de aço inoxidável de composição conhecida foram fabricadas por impressão 3D (sinterização a laser) e também pela técnica tradicional de fundição/laminação. Em seguida as amostras foram caracterizadas por microtomografia de raios-x, microscopia ótica, ensaios de tração e microdureza.

Os capítulos a seguir apresentarão uma breve revisão bibliográfica das técnicas utilizadas. Em seguida, há descrição da metodologia empregada para obtenção das peças, caracterização mecânica e microestrutural.

1.1 Objetivos

O objetivo é estabelecer uma metodologia de caracterização mecânica e microestrutural de peças metálicas obtidas por impressão 3D. Com esse estudo será possível determinar como a diferença do processo de fabricação das peças impacta na resposta mecânica desses materiais.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Impressão 3D

A Impressão 3D, também conhecida como prototipagem rápida, é uma nova forma de tecnologia de fabricação aditiva onde um modelo tridimensional é criado pela deposição de sucessivas camadas de material.

O processo permite de forma rápida a construção de ferramentas, peças ou modelos a partir da sinterização de matérias-primas, tais como ABS (resina sintética feita a partir do petróleo), Nylon e misturas de pós-metálicos, por ação de um laser. As peças são obtidas numa única operação apresentando resistência mecânica, rigor dimensional, reprodução de detalhes e rugosidade superficial, permitindo servirem como simples protótipos, modelos finais que terão utilização imediata ou ferramentas de produção, como nos moldes para injeção de plástico ou metal.

Apesar de a divulgação recente ser aparentemente maior, esta técnica surgiu em 1984, inventada por um norte-americano, chamado Chuck Hull. Hull já havia desenvolvido pouco antes a tecnologia do que viria a ser a máquina, tendo como função principal, a criação de lâmpadas para solidificação de resinas (Duarte).

O êxito aconteceu com a elaboração de peças utilizando como matéria prima o plástico. Na época, a produção demandava muito tempo de confecção, e em casos onde ocorressem defeitos de fabricação todo o processo deveria ser repetido postergando a finalização do produto. A flexibilidade da impressora 3D permitiu reprogramar facilmente a operação para realizar outros tipos de trabalho, ocorrendo uma melhoria no atendimento das demandas diferenciadas ou a novos modelos de produção de uma peça.

O processo de impressão pode levar de poucos minutos até algumas horas, os fatores determinísticos é a complexidade do modelo impresso e os parâmetros que são usados. Porém, de um modo geral podem ser consideradas rápidas e mais fáceis de usar do que outras tecnologias de fabricação aditiva, contribuindo para reduzir custos.

Impressoras 3D são consideradas máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) já que seus componentes mecânicos, tais como motores, atuadores lineares, etc., são diretamente controlados por um computador. A forma de como a máquina é estruturada pode ser averiguada na Figura 1, a qual explica a arquitetura de uma máquina CNC:

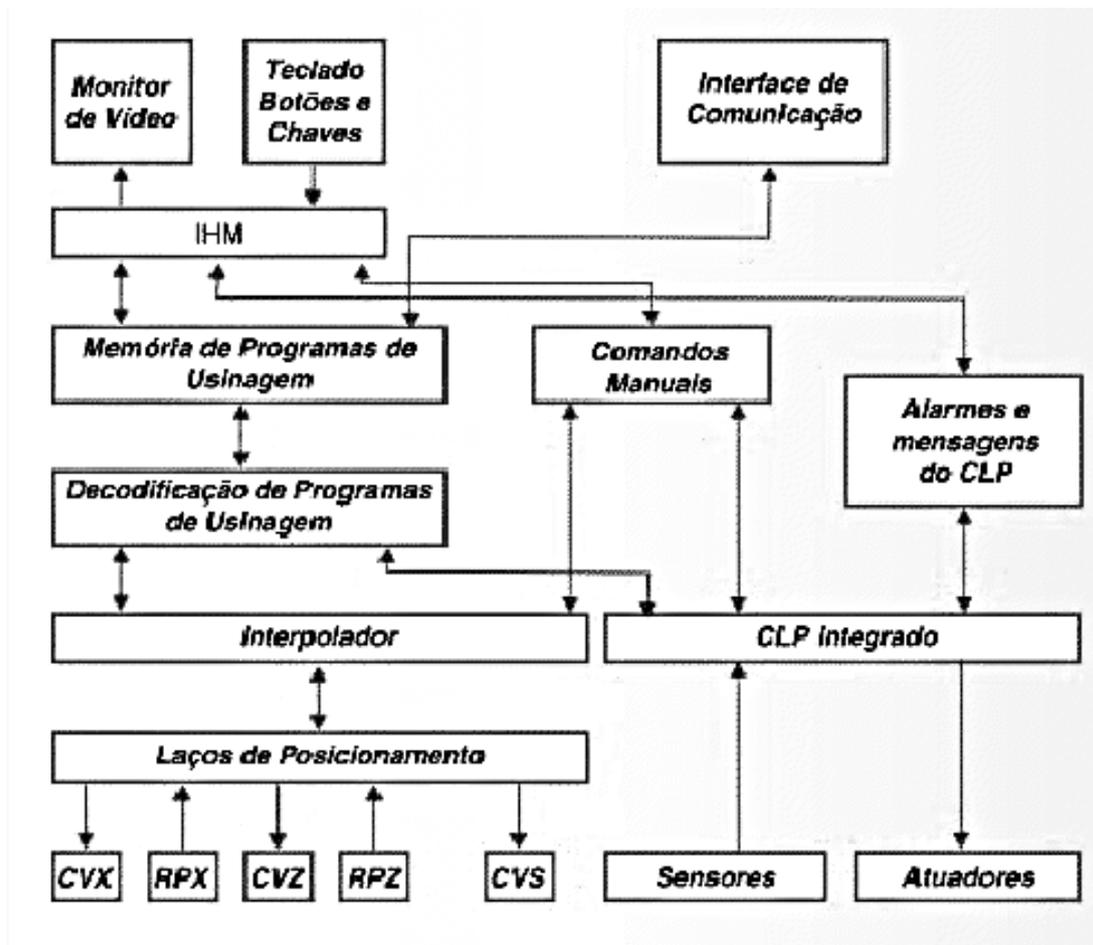


Figura 1: Arquitetura Interna do CNC (Arquitetura interna do CNC, 2002)

A construção do objeto desejado se inicia com um desenho auxiliado pelo computador em sistemas CAD 3D e o próprio software da impressora fica encarregado de fatiar em camadas. Para iniciar o processo de fabricação, é preciso preencher a câmara de impressão com o pó. Depois disso, a máquina nivela o material em uma camada completamente uniforme. O laser efetua em seguida a varredura da área que será sinterizada correspondente a cada camada (seção XY) da peça, promovendo a adesão de superfície do pó e a sua ligação metalúrgica à placa de aço conforme é fornecido energia (através do laser) para a sinterização.

Após a varredura da área que sofrerá o processo de densificação, a plataforma de construção se movimenta para baixo (direção Z), o que correspondente à espessura de uma camada, criando as condições para que uma nova camada de pó seja espalhada e sinterizada. Esta sequência de operações é repetida até que a construção esteja concluída.

Ao término da construção o excesso de pó do objeto impresso que não foi utilizado é recolhido para poder ser reutilizado posteriormente, evitando ao máximo qualquer desperdício de material. O processo apenas pode se tornar demorado dependendo do tamanho do objeto ou caso seja necessário alterar o tipo de matéria-prima. Pois, para que não ocorra contaminação de material, quando houver troca de matéria-prima é necessário que haja uma limpeza no filtro e em toda a máquina removendo qualquer fragmento do outro material.

2.2 Microtomografia de Raios-x

A microtomografia computadorizada de raios X (MicroCT) é uma versátil técnica de aquisição de imagens, capaz de gerar representações volumétricas a partir de um conjunto de imagens bidimensionais denominadas projeções.

Esta tecnologia foi consolidada há mais de trinta anos em aplicações industriais. Recentemente vem se destacando como uma alternativa aos outros métodos de medição por

coordenadas. A possibilidade de realizar análises não destrutivas no interior da peça e simultaneamente realizar controle de qualidade dimensional e de integridade do material particulariza a tecnologia de MicroCT em relação a outros sistemas de medição por coordenadas.

Dentre as aplicações da MicroCT estão à análise de características dimensionais e geométricas de peças, medição de espessura de parede e medição de formas livres. A estas aplicações metrológicas somam-se as aplicações de análise de materiais como, por exemplo, a análise de fibras em materiais compósitos e a análise de porosidade em rochas, aglomerados de minério de ferro, dentre outras. A combinação das aplicações metrológicas com as de análise de materiais aponta para possíveis aplicações em engenharia biomédica, prototipagem rápida e medições de componentes micros mecânicos.

O sistema tomográfico é constituído basicamente por: uma fonte de radiação, amostra, conjunto de detectores de radiação e um sistema computacional, conforme apresentado na Figura 2. Independente da geração do sistema tomográfico, a forma como a informação (imagem) é gerada é a mesma. No entanto, o tempo necessário para aquisição de dados para formação da imagem depende do tamanho da amostra, da precisão e da resolução desejada.

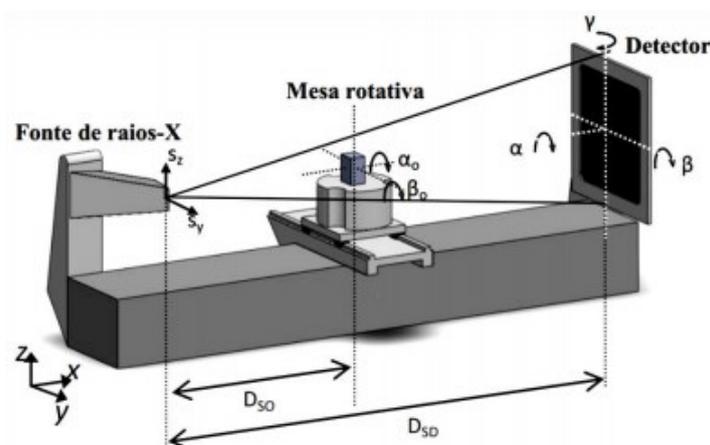


Figura 2: Componentes básicos do sistema mecânico de um tomógrafo industrial de feixe cônico e principais parâmetros de configuração geométricos

O procedimento de transformar a aquisição de dados em imagens digitais está dividido conforme as técnicas de processamento de imagem (PDI): aquisição (sistema fonte-amostra-detector), pré-processamento (reconstrução matemática, filtros e segmentação) e análise (análise quantitativa das propriedades de interesse).

Durante o processo de aquisição ocorre o movimento de varredura do feixe de radiação sobre o objeto de interesse, no qual a radiação sofre diferentes interações com a matéria da amostra ao atravessá-lo. Cada feixe interage com um dado ponto no interior de uma secção transversal da amostra em diversos ângulos, sofrendo atenuações que variam com a densidade ou número atômico do material constituinte da amostra, e é detectado no lado oposto da fonte. Este processo é caracterizado como a parte de aquisição de dados.

A imagem bidimensional formada e apresentada através do computador corresponde a uma matriz dos valores de atenuação do feixe, visualmente apresentada em tons de cinza (ARAÚJO, 2006). Esta captura de imagens poderá utilizar filtros para melhorar a qualidade de imagem adquirida, seguindo para o processo subsequente de reconstrução volumétrica.

O filtro controla o espectro de energia dos fótons de raios X (radiação útil, cerca de 10% apenas) emitidos pelo dispositivo. Sua função é bloquear feixes de menor energia os quais são pouco penetrantes e não contribuem para a formação da imagem tomográfica. Assim, os filtros ficam localizados entre a fonte e a amostra.

O tamanho do ponto focal tem um efeito muito importante na formação da imagem e, em conjunto com os detectores, é um dos fatores limitantes da resolução (capacidade do sistema em identificar estruturas pequenas) do equipamento. As dimensões do ponto focal variam entre 0,1 mm e 2,5 mm e os tubos são construídos para terem tamanhos específicos de ponto focal de acordo com a aplicação desejada (NERSISSIAN, 2004).

Os aparelhos de microtomografia computadorizada atuais, comparados aos aparelhos de tomografia computadorizada da área médica, apresentam a vantagem de um ponto focal de menor dimensão, o que permite que a amostra seja colocada mais perto do tubo de Raios X, gerando assim maior ampliação e melhor resolução (VAN GEET, 2000).

Os detectores de radiação são responsáveis por captar a radiação que atravessa o objeto estudado, ou seja, a radiação que não foi absorvida totalmente durante sua trajetória. Eles podem ser utilizados não só para detectar a presença de radiação, mas também para medir a energia da radiação. São responsáveis por converter as diversas intensidades de radiação, em informação, caracterizada por ser um sinal elétrico analógico (PONTES, 2010).

Na retroprojeção sem o uso de filtros, a imagem é formada pela soma de todos os raios que passam pelo ponto (x,y) nos diferentes ângulos de varredura. Conforme comentado, o filtro controla o espectro de energia dos fótons de raios X emitidos pelo dispositivo, bloqueando feixes de menor energia e que não contribuem para a formação da imagem tomográfica. Caso a retroprojeção seja feita sem o uso de filtros, a mesma apresentará a soma de todos os feixes obtidos em cada projeção. Assim, a imagem reconstruída perde resolução espacial e fica com muito brilho no centro, devido às propriedades aditivas da retroprojeção.

Os sistemas atuais de microtomografia computadorizada empregam a técnica de retroprojeção filtrada, para melhorar a eficiência de reconstrução de imagem, obtendo imagens de melhor qualidade. Quando a reconstrução é feita com certo número de projeções, nota-se que quanto mais projeções forem realizadas, melhor será a resolução espacial da imagem.

As técnicas de pré-processamento têm a função de melhorar a qualidade da imagem digital. É comum em imagens tomográficas combinar métodos como a aplicação: de filtro

mediana para a redução de ruídos, filtros passa-alta para realce dos contornos e bordas dos objetos da imagem (GONZALEZ, 1993).

Esta combinação de métodos, filtros e funções de pré-processamento irá variar de amostra para amostra dependendo da região de interesse.

3 Materiais e Métodos Experimentais

3.1 Materiais dos corpos de prova

O material utilizado foi um aço inox identificado por PH-1, para uso na impressora, fornecido pela empresa EOS, com composição igual ao do aço fundido, aço inox 17-4 PH, fornecido pela Villares Metais. As especificações desses materiais estão de acordo com as normas DIN 14540 e ASTM A-564.

Concentração em peso % dos principais elementos presentes:

- Carbono (C) – 0,035%
- Cromo (Cr) – 15,40%
- Níquel (Ni) – 4,40%
- Cobre (Cu) - 3,50%

Abaixo segue Tabela 1 informando as propriedades mecânicas do material impresso fornecidas pelo fabricante:

Tabela 1: Propriedades mecânicas do material fornecidas pelo fabricante

	Fabricado	Endurecido (mod H9000 tratamento térmico)
Força de tração		
- em direção horizontal (XY)	1150 ± 50MPa	min 1310 Mpa (tipicamente 1450 ± 100 Mpa)
- no sentido vertical (z)	1050 ± 50MPa	min 1310 Mpa (tipicamente 1450 ± 100 Mpa)
Cedência (Rp 0.2%)		
- em direção horizontal (XY)	1050 ± 50MPa	min 1170 Mpa (tipicamente 1300 ± 100 Mpa)
- no sentido vertical (z)	1000 ± 50MPa	min 1170 Mpa (tipicamente 1300 ± 100 Mpa)
Alongamento na ruptura		
- em direção horizontal (XY)	16 ± 4 %	min 10 % (tipicamente 12 % ± 2 %)
- no sentido vertical (z)	17 ± 4 %	min 10 % (tipicamente 12 % ± 2 %)
Dureza		
- como contruído	30 - 35 HRC	min 40HRC

As amostras devem ser padronizadas com dimensões que atendam as normas de ensaio mecânico e que possam ser caracterizadas dentro da limitação dimensional do tomógrafo.

Os corpos de prova para o ensaio de tração devem seguir um padrão de forma e dimensões para que os resultados dos testes possam ser significativos. No Brasil é seguida a norma MB-4 da ABNT que define formatos e dimensões para cada tipo de teste. A norma de ensaio de tração é a ASTM E-8, porém a norma ABNT é apenas uma tradução. Abaixo segue Tabela 2: Norma para Corpos de prova Sub-Size, para corpos de prova com tamanho reduzido (sub-size).

Tabela 2: Norma para Corpos de prova Sub-Size

For Test Specimens with Gage Length Four times the Diameter [E8]					
	Standard Specimen				
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G-Gage length	50 ± 0.1	36 ± 0.1	25 ± 0.1	16 ± 0.1	11 ± 0.1
	[2.000 ± 0.005]	[1.400 ± 0.005]	[1.000 ± 0.005]	[0.640 ± 0.005]	[0.450 ± 0.005]
D-Diameter (Note1)	12.5 ± 0.2	9.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	4.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1
	[0.500 ± 0.010]	[0.350 ± 0.007]	[0.250 ± 0.005]	[0.160 ± 0.003]	[0.113 ± 0.002]
R-Radius of fillet,min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A -Length of reduced section,min (Note	58 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.26]	20 [0.75]	16 [0.625]

Dimensions, mm [in]					
For Test Specimens with Gage Length Five times the Diameter [E8M]					
	Standard Specimen				
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G-Gage length	62.5 ± 0.1	45.0 ± 0.1	30.0 ± 0.1	20.0 ± 0.1	12.5 ± 0.1
	[2.500 ± 0.005]	[1.750 ± 0.005]	[1.250 ± 0.005]	[0.800 ± 0.005]	[0.565 ± 0.005]
D-Diameter (Note1)	12.5 ± 0.2	9.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	4.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1
	[0.500 ± 0.010]	[0.350 ± 0.007]	[0.250 ± 0.005]	[0.160 ± 0.003]	[0.113 ± 0.002]
R-Radius of fillet,min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A -Length of reduced section,min (Note	75 [3.0]	54 [2.0]	38 [1.4]	24 [1.0]	20 [0.75]

A seção transversal do corpo de prova pode ser circular ou retangular dependendo da forma e dimensões do produto de onde for extraído.

Pode-se dividir o corpo de prova em duas partes: útil e cabeça. A parte útil é a porção efetivamente utilizada para medição do alongamento e a cabeça são as extremidades, cuja função é permitir a fixação do corpo de prova na máquina de ensaio de tração (veja Figura 3).

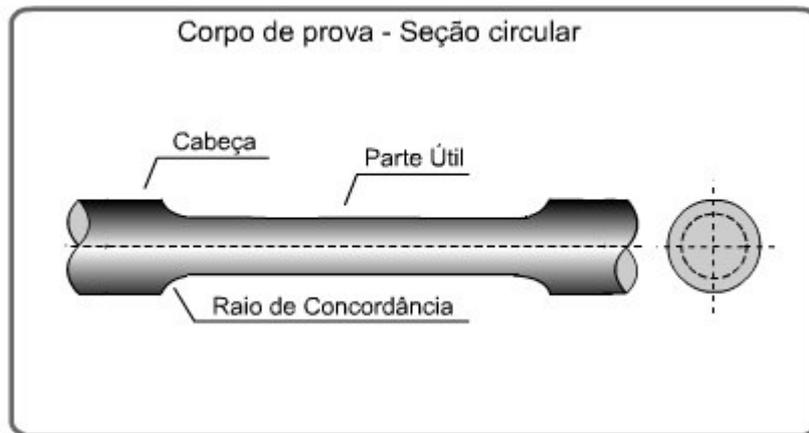


Figura 3: Corpo de Prova (Corpos de Prova para o ensaio de tração)

No caso de peças produzidas por fundição, o corpo de prova é obtido fundindo-se um tarugo que é posteriormente usinado. O acabamento superficial de uma peça usinada não pode ser comparado ao de uma impressa, visto que uma peça usinada possui tolerância e grau de acabamento, não havendo esse nível de controle no processo de fabricação da peça impressa, apresentando, portanto maior irregularidade (rugosidade) na superfície.

O acabamento superficial consiste em um conjunto de irregularidades que tendem a formar uma textura característica em uma superfície, conforme ilustrado na Figura 4.

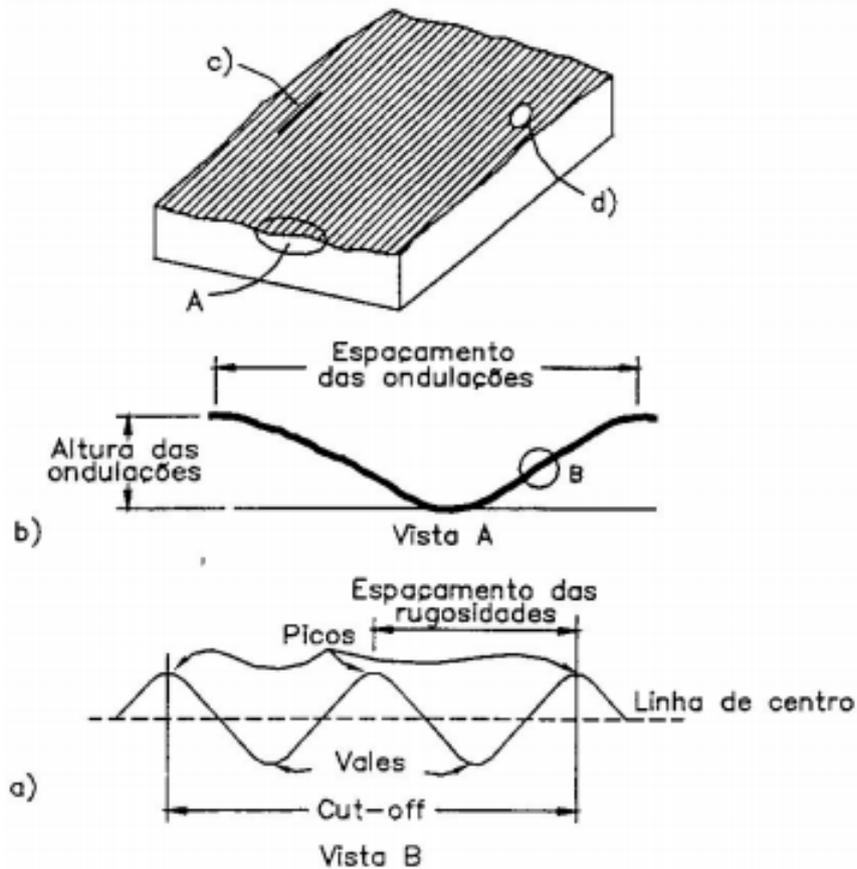


Figura 4: Acabamento superficial. a) rugosidade; b) ondulações; c) direção das irregularidades; d) falhas (MACHADO, 1999).

Este pode ser classificado em:

1. Rugosidade – irregularidades finas geralmente relacionadas ao processo de fabricação;
2. Ondulações – irregularidades superficiais cujo espaçamento é maior que o percurso de medição;
3. Marcas de avanço – na usinagem, determinam a direção predominante das irregularidades superficiais. Dependem principalmente dos parâmetros de corte;
4. Falhas – acidentes ocorridos durante a usinagem, etc.

A importância do acabamento superficial justifica-se pela sua relação:

- a. Precisão e tolerância: em peças com acoplamentos onde furo e eixo estejam em movimento relativo.
- b. Resistência à corrosão: superfícies com acabamentos superficiais mais pobres tendem a reter maior quantidade de líquidos, tornando-se mais vulneráveis à corrosão.
- c. Resistência à fadiga: peças que trabalham sob carga dinâmica necessitam de melhor acabamento superficial, pois superfícies com alta rugosidade são mais propensas à concentração de tensões, oferecendo melhores condições para a nucleação de trincas de fadiga.

Para obter um melhor acabamento superficial nas amostras, fundida e impressa foram torneadas sob as mesmas condições para obter mesmo acabamento superficial mantendo um padrão de rugosidade a fim de evitar qualquer canto vivo (visto que entalhes propiciam a propagação de trincas).

O dimensionamento das peças teve limitação de usinagem, pois para peças muito finas ocorreu fratura próximo ao raio de concordância (Figura 5) em função do formato da ferramenta de corte do torno. Apesar da limitação de usinagem de espessura do torno, o diâmetro usinado atendeu ao tomógrafo obtendo resolução para visualizar os defeitos (quanto menor a espessura de uma peça no tomógrafo mais fácil torna a passagem do feixe de radiação sobre o objeto de interesse melhorando a visualização de defeitos).



Figura 5: Amostra fundida de 4mm de diâmetro

3.2 Impressão 3D – A impressora específica e condições de operação

A EOS M Eosint 280 usa sinterização de metal seletiva a laser para imprimir peças 3D prontas para uso. Algumas impressoras 3D profissionais utilizam fabricação aditiva para transformar arquivos CAD em objetos. A EOS M Eosint 280 usa um método um pouco diferente do que muitas outras impressoras 3D profissionais, pois a mesma imprime com metais leves tais como alumínio, titânio e metais pesados como o aço ou ferro em vez de plástico ou cera.

A vantagem da impressão é possibilitar a concepção, o desenvolvimento, à simulação, e a fabricação do produto, em um curto espaço de tempo e com menores custos, vantagens estas que são em muitos casos determinantes para o sucesso do produto ou das atividades industriais.

De um modo geral as ferramentas rápidas não dispõem de todas as funcionalidades ou características das ferramentas de produção convencionais, sendo inadequadas para a fabricação em grandes séries, pois possui menor precisão dimensional (tolerância e ajustes).

Para impressão 3D em larga escala, é necessário um software profissional para criar designs precisos de forma a assegurar que as tolerâncias e os ajustes necessários serão

consumados. O software incluso, Ferramentas EOS RP, juntamente com qualquer programa de CAD transforma os arquivos em peças e modelos.

Semelhante à maioria das impressoras 3D industriais, a Eosint M 280 (Figura 6) a construção da peça começa com o desenho do objeto, utilizando o auxílio do computador, em sistemas CAD 3D.



Figura 6: Eosint M 280 (EOS-EOSINT-REVIEW)

O começo da fabricação ocorre com o distribuidor espalhando o pó sob uma placa de construção, formando sucessivas camadas com espessura uniforme, conforme explicado na seção 2.1. Em seguida, o laser efetua a varredura da área que será sinterizada correspondente a cada camada (seção XY) da peça, promovendo a adesão do pó metálico à placa de aço.

Após a varredura da área que sofre aumento de densidade, o material é resfriado de forma muito rápida e a plataforma de construção se movimenta perpendicularmente à área densificada, correspondendo à espessura de uma camada. Assim, novas condições são

empregadas para que uma nova camada de pó seja espalhada e sinterizada, repetindo esta sequência de operações até que o volume total da construção seja concluído conforme Figura 7:

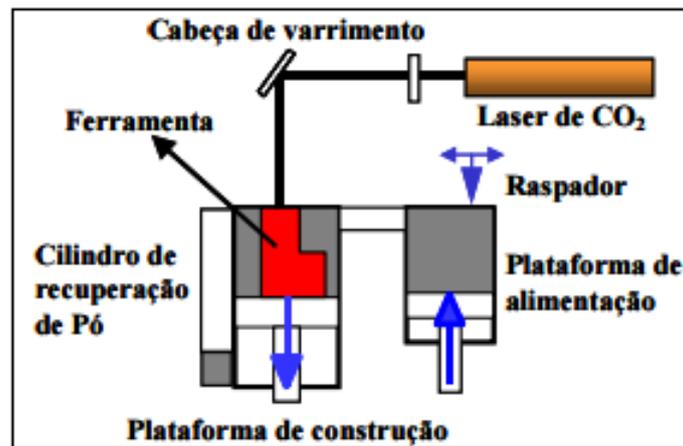


Figura 7: Processo de construção (L. ESPERTO)

No final da construção das peças, estas são retiradas da placa de aço por corte e o pó não sinterizado é reutilizado sendo introduzido no depósito da máquina para nova utilização.

Os parâmetros da sinterização de metal seletiva a laser que controlam o processo são a potência do laser, a velocidade de varredura e a distância entre camadas. A técnica consiste em fazer o laser sinterizar cada partícula de pó com certa velocidade (impactando na velocidade de resfriamento da mesma) construindo cada camada da peça, uma sobrepondo a outra.

A posição do laser é deslocada quando uma zona afetada por ele é superior à dimensão do foco, assim, sua posição é alterada para o interior da camada cerca de metade do diâmetro da referida zona, de modo que a linha traçada corresponda ao contorno definido no CAD. Esta correção à posição do foco é definida por compensação do laser e tem uma influência crucial sobre a precisão dimensional das peças.

A potência, a velocidade de varredura e a distância entre as linhas de varredura do laser são os parâmetros que controlam o fornecimento de energia ao material e, conseqüentemente o processo de sinterização e densificação.

A forma como o laser efetua as varreduras determina não só a densificação do material como também o tempo de construção das peças. A varredura pode ser efetuada em banda, em linha, em quadrados, em X, Y, ou alternadamente em X e Y conforme mostrado na Figura 8 e na Figura 9.

A varredura efetuada em banda ocorre no formato de uma linha, ou seja, para uma seção reta, os pontos deste comprimento são varridos simultaneamente. Quando a varredura ocorre em X e Y, o processo de densificação ocorre simultaneamente ou de forma alternada no eixo X e Y de modo a formar um quadrado.

No processo de sinterização por laser, o material recebe grande energia apenas durante frações de segundo, esfriando logo em seguida, devido à velocidade com que o laser se desloca. Este processo de aquecimento e resfriamento do material ocorre de forma muito rápida.

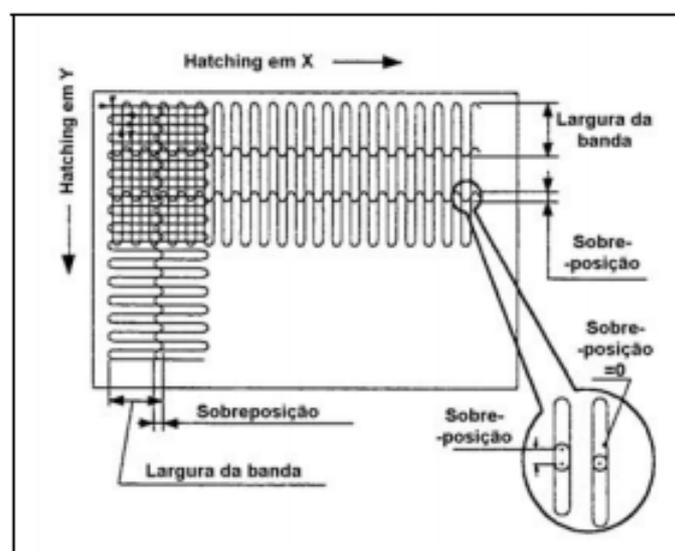


Figura 8: Hatching do tipo Up-Down Stripes (L. ESPERTO)

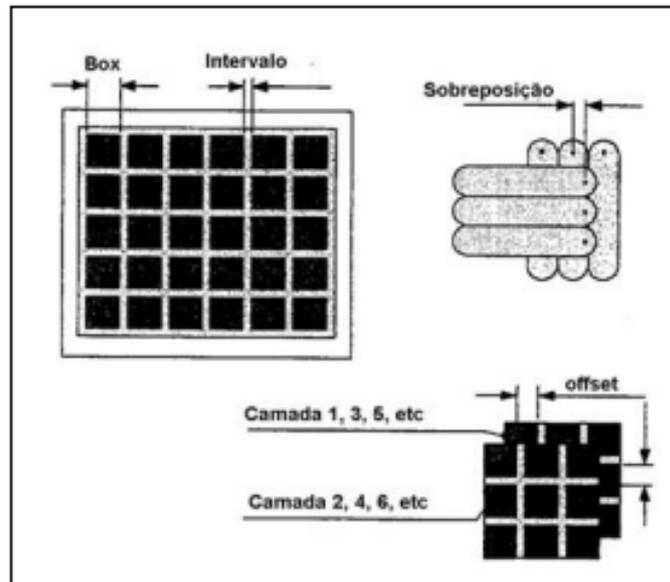


Figura 9: Hatching do tipo Squares (L. ESPERTO A)

Abaixo constam alguns dos parâmetros utilizados para impressão:

- “*Layer thickness*”: 20 Microns.
- Potência máxima: 200 W (existe uma variação dessa potência quando se está fazendo o preenchimento de uma camada (maciço), fazendo o contorno das peças (basicamente uma linha) e quando se está fazendo o suporte das peças).
- “*Hatch distance*”: calculado no software específico para geração do suporte, chamado “*Magics da Materialise*”.

3.2.1 Processo de Densificação

A densificação do material depende primordialmente das características químicas dos pós, uma vez que o processo de sinterização decorre em camadas subsequentes. Aspectos como a distribuição granulométrica, forma da partícula e densidade aparente interferem diretamente em como o nível de temperatura e seus gradientes são distribuídos em cada camada e entre camadas de pó adjacentes. A energia absorvida e transmitida por condução térmica aumenta conforme há

o aumento da área específica dos pós e o respectivo “empacotamento”, favorecendo o processo de densificação.

Outro fator importante que tem influência direta com a temperatura atingida localmente e os gradientes de temperatura na camada de pó é a taxa de absorção/emissão do laser pelo material. A velocidade da taxa de absorção/emissão do laser impacta no tempo que o pó ficará exposto a essa energia e, portanto pode acabar beneficiando ou não a condução da temperatura.

A absorção e a capacidade fotoenergética de filtrar raios luminosos através da reflexão da radiação (refletividade) dos materiais variam com a composição e a qualidade superficial (ausência ou não de óxidos). A seleção adequada da potência do laser, do “*hatching*”, da distância entre linhas de varredura e da estratégia de construção permitirá atingir a densificação requerida para a peça.

3.2.2 Propriedades do Sinterizado

A densificação depende da quantidade de energia fornecida pelo laser, aumentando a energia com o aumento da potência do laser e, com a diminuição da velocidade e da distância entre linhas de varredura. A velocidade de varredura do laser é o parâmetro que mais influencia a densidade do sinterizado conforme explicado na seção 3.2.1.

Variações na potência e na distância entre linhas de varredura não afetam de forma significativa a densidade. As propriedades mecânicas e térmicas dos materiais sinterizados dependem da densidade obtida, a qual por sua vez depende dos parâmetros do processo e das propriedades da mistura de pós-metálicos. A maximização da densificação conduz ao aumento das tensões residuais, o que pode induzir alterações dimensionais, de forma ou fissuração nas peças. A redução da espessura de camada inerente à utilização de pós mais finos e a utilização de

novas estratégias de sinterização, permitem a obtenção de sinterizados com resistência mecânica mais elevada e uma rugosidade superficial menor.

3.3 Microtomografia de Raios-x – Versa 510 e condições de operação

A Zeiss / Xradia Versa 510 é uma máquina de tomografia computadorizada com sistema de microfoco (μ CT) (veja Figura 10), a qual emprega métodos de microscopia de raios-X para alcançar resoluções sub-micrométricas em amostras de tamanho moderado (milímetros a centímetros). O processo de microtomografia é essencialmente não destrutivo, e pode ser realizado sem a preparação da amostra específica, dependendo dos resultados necessários.



Figura 10: ZEISS Xradia 510 Versa

Preliminarmente, diversas varreduras foram realizadas de modo experimental até serem encontrados os parâmetros necessários para fornecimento de um campo de imagem e resolução razoável para o requerido estudo.

Abaixo seguem os parâmetros utilizados para Microtomografia no ZEISS Xradia 510

Versa:

- ✓ Lente de 4X
- ✓ 140 kV, 71mA
- ✓ 1014 camadas – 1014 x 1014 pixels
- ✓ Tempo de exposição 14 (s)

Após diversos testes, os parâmetros que apresentaram melhores imagens, reconstruídas e processadas com o próprio programa incorporado no tomógrafo, nos levaram a ter corpos de prova cuja área transversal foi de 2,5 milímetros para uso da lente de 4X.

3.4 Ensaios Mecânicos – A máquina utilizada e condições de operação

A máquina Instron de série 5500 é um sistema o qual executa testes em materiais representando uma gama de carga de alto desempenho DSP (Digital Signal Processamento) com base eletrônica e software modular Bluehill, acoplado com aplicação extensiva da Instron. O sistema da série 5500 oferece os dados do teste de tração através deste software.

O Software Bluehill é dividido em seis grandes módulos de aplicativos, cada um adaptado para abordar exigências particulares, permitindo mudanças futuras em seus requisitos de teste. Parâmetros tais como fixação, set-up, terminologia de teste, escolhas de unidades e cálculos são configurados para cada tipo de teste sendo a taxa de velocidade máxima dependente do hardware.

O ensaio padrão de tração é normalmente empregado com a intenção de obter inúmeras características e resistências que são utilizadas em projeto. As propriedades elásticas do material são requeridas nos casos onde tenha que ser feito avaliações de deflexões, por exemplo, e as avaliações de tensão em um ponto crítico de um membro de máquina requerem uma comparação

com a resistência do material naquele ponto, na geometria e nas condições de uso. A Figura 11 ilustra um corpo de prova típico de ensaio de tração e suas dimensões características, como o diâmetro original d_0 e o comprimento de bitola l_0 , mensurados antes do ensaio para serem usados como parâmetros para medir as deformações.

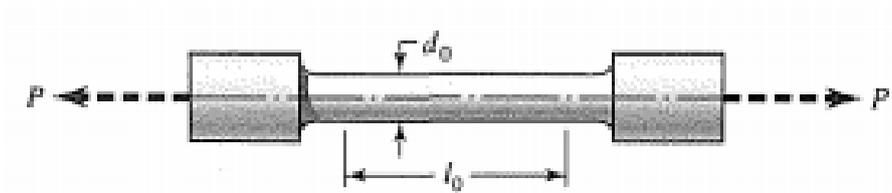


Figura 11: Corpo de prova padrão (JOSEPH E. SHIGLEY, 2005)

O corpo de prova é então montado na máquina de ensaio, sendo vagarosamente tracionado. A força P de tração aplicada é convertida em tensão pelo cálculo:

$$\text{Equação 1} \quad \sigma = \frac{P}{A_0}$$

Na fórmula acima, $A_0 = \frac{P_0 d_0^2}{4}$, é a área original do corpo de prova visto que sua seção transversal é circular.

A variação que ocorre no comprimento da bitola após ser tracionada é expressa por $(l - l_0)$, sendo l o comprimento de bitola correspondente à carga P . A deformação é calculada por:

$$\text{Equação 2} \quad \epsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0}$$

Em um ensaio de tração, o corpo de prova é submetido a um estímulo que tende alongá-lo até à ruptura. A carga aplicada é mensurada na própria máquina de ensaio (Figura 12) através do software incluso. Normalmente o ensaio ocorre até a ruptura do material (ensaio destrutivo), embora o mesmo possa ser interrompido a qualquer momento.

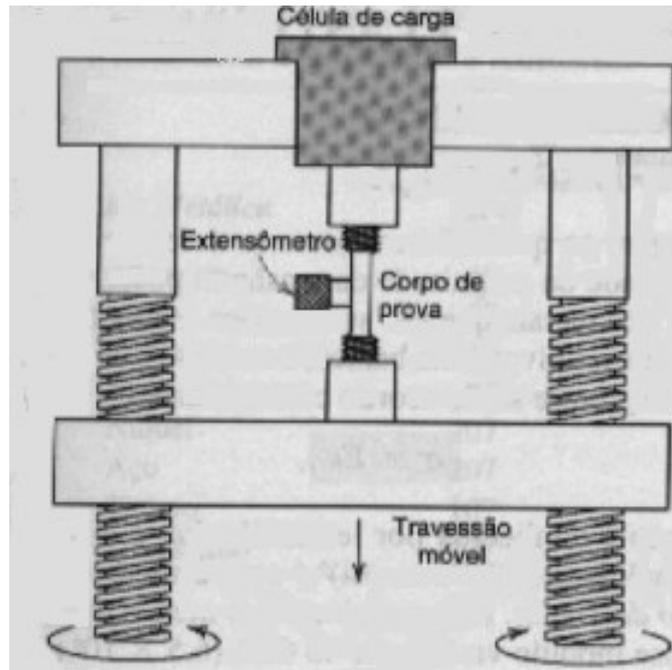
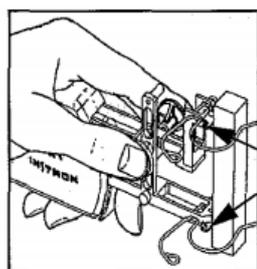


Figura 12: Dispositivo de ensaio de tração para determinação da curva tensão x deformação do material metálico. A célula de carga mede a carga aplicada e o extensômetro acoplado ao corpo de prova mede o alongamento. (Propriedades Mecânicas , 2011)

O software Bluehill suporta dois possíveis Gage Lengths: Specimen e Extensômetro. Gage Length (GL) é importante e deve ser definido corretamente quando se mede percentual de alongamento, estirpe, ou percentual de deformação. Extensômetro Gage Length (para canais de deformação) é a distância entre os cutelos do extensômetro. O comprimento útil no canal de tensão associada deve ser igual à distância *knife edge*. A Figura 13 ilustra o uso do extensor GL na máquina Instron (Figura 14).



Knife Edges = Extensometer G.L.



Figura 13: Uso do extensor GL

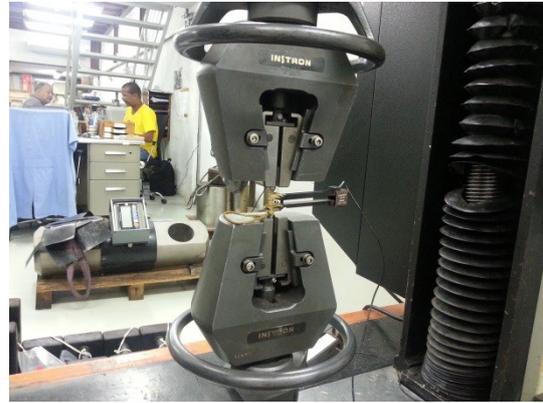


Figura 14: Máquina Instron 5500R

Conforme comentado na seção 3.1, os corpos de prova para o ensaio de tração seguiram a norma MB-4 da ABNT que define formatos e dimensões para cada tipo de teste.

Na conclusão do ensaio, os resultados são representados graficamente como um diagrama de tensão-deformação. A Figura 15 representa diagramas típicos de tensão-deformação para materiais dúcteis e frágeis, sendo que os primeiros deformam muito mais que os últimos, portanto materiais dúcteis possuem maior tenacidade (capacidade do material em absorver energia até sua ruptura).

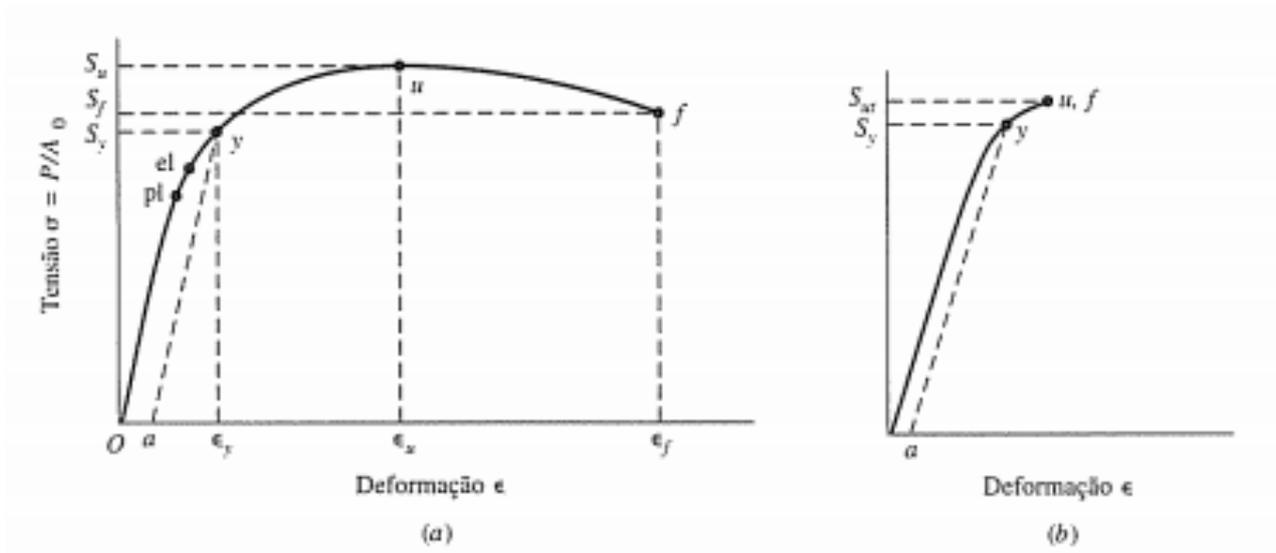


Figura 15: Representação do diagrama típico de tensão-deformação para materiais (a) dúcteis e (b) frágeis (JOSEPH E. SHIGLEY, 2005)

O ponto pl na Figura 15 (a) é denominado limite de proporcionalidade. Este ponto como o próprio nome diz, é o limite no qual as tensões são diretamente proporcionais às deformações. Para a maioria dos materiais, existe uma relação de proporcionalidade linear entre a tensão e a deformação no regime elástico. Caso a carga aplicada seja removida, o corpo de prova não apresentará nenhuma deformação permanente, e a equação fundamental do regime elástico é a lei de Hooke:

$$\text{Equação 3} \quad \sigma = E\epsilon$$

O módulo de elasticidade é constante para cada material, sendo independente de qualquer tratamento térmico ou mecânico realizado, sendo definido como a inclinação da parte linear da curva de tensão-deformação chamada de módulo de Young ou módulo de elasticidade que determina a rigidez de um material.

O ponto el na figura acima (a) é denominado como sendo o limite de elasticidade. Portanto, é a máxima tensão que um material pode suportar sem sofrer deformações

permanentes. Após um determinado nível de carregamento, o material entra no regime plástico, que é caracterizado pela existência de uma deformação permanente. Ou seja, uma vez retirado o esforço externo aplicado, permanece certa deformação no material.

A importância de se entender essa transição heterogênea da região elástica para a região plástica, é devido ao fato da falta de homogeneidade no início do processo de deformação plástica. A deformação plástica se inicia em um ponto de concentração de tensão, resultando em um amolecimento do material em torno desse ponto. Essa região sofre uma quantidade razoável de deformação plástica sem haver encruamento.

Essa deformação heterogênea ocorre em bandas que geralmente estão a 45° com o eixo de tração, e prosseguem nas regiões adjacentes devido à concentração de tensão entre a região deformada e a não deformada.

Nem todos os materiais têm um ponto de escoamento óbvio, especialmente os frágeis. Por tal razão, a resistência ao escoamento S_y é frequentemente definida por um método de desvio, como mostrado na Figura 15, no qual a linha ay é traçada na inclinação E .

O ponto a corresponde a uma quantidade definida de deformação permanente (geralmente 0,2% do comprimento original de bitola), e a resistência à tração, S_u , corresponde ao ponto u , e sendo a máxima tensão alcançada no diagrama de tensão-deformação.

Esse tipo de ensaio permite afirmar que praticamente as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em toda a sua extensão, pelo menos até ser atingida uma carga máxima próxima do final do ensaio. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições para a variação dessa deformação em função da tensão aplicada, terminando no momento em que é atingida a carga máxima suportada pelo material. Neste instante, o material

começa a sofrer diminuição da secção do corpo de prova (no caso de materiais com certa ductilidade), chamado de estrição.

A curva tensão-deformação de engenharia apresenta um ponto máximo devido à estrição. As equações de correção para obter a curva tensão-deformação verdadeira são estritamente válidas apenas até o ponto de carga máxima (relacionado ao limite de resistência à tração), pois a partir deste ponto a região da estrição está submetida a um estado triaxial de tensões.

Do ponto de vista plástico, a curva de tensão-deformação verdadeira pode, portanto, ser analiticamente obtida entre o limite de escoamento e o limite de resistência, extrapolando o restante da curva até o ponto de ruptura.

4 Resultados e Discussão

4.1 Peças fundidas versus Peças impressas

O corpo de prova que foi impresso apresenta em sua superfície um aspecto poroso e fosco, diferente quando comparado ao corpo de prova do aço fundido usinado cuja superfície é lisa e espelhada. A característica rugosa / texturizada que o material impresso exibe foi retratado na seção 2.1

O aspecto poroso que o material impresso apresenta, conduz a hipótese de que o processo de densificação do material não se forma de uma maneira tão compacta, portanto a suposição feita é que o material aparenta conter vazios internos à estrutura, apresentando maior porosidade (Figura 16).



Figura 16: (a) Amostra impressa; (b) Amostra fundida

4.2 Caracterização por MicroCT

4.2.1 Peças Fundidas

Primeiramente, os corpos de prova foram levados para captura das imagens de μ CT obtidas pelo microtomógrafo Zeiss / Xradia Versa 510, as quais foram reconstruídas e processadas com o próprio programa incorporado no tomógrafo. Conforme esclarecido anteriormente na seção 3.3, apesar da lente de 4X ter sido escolhida, testes com a lente de 0.4X (Figura 17) foram realizados a fim de minimizar a inconveniência do uso de maior aumento.

Abaixo seguem imagens demonstrando a posição de alinhamento da amostra no eixo x,y,z.

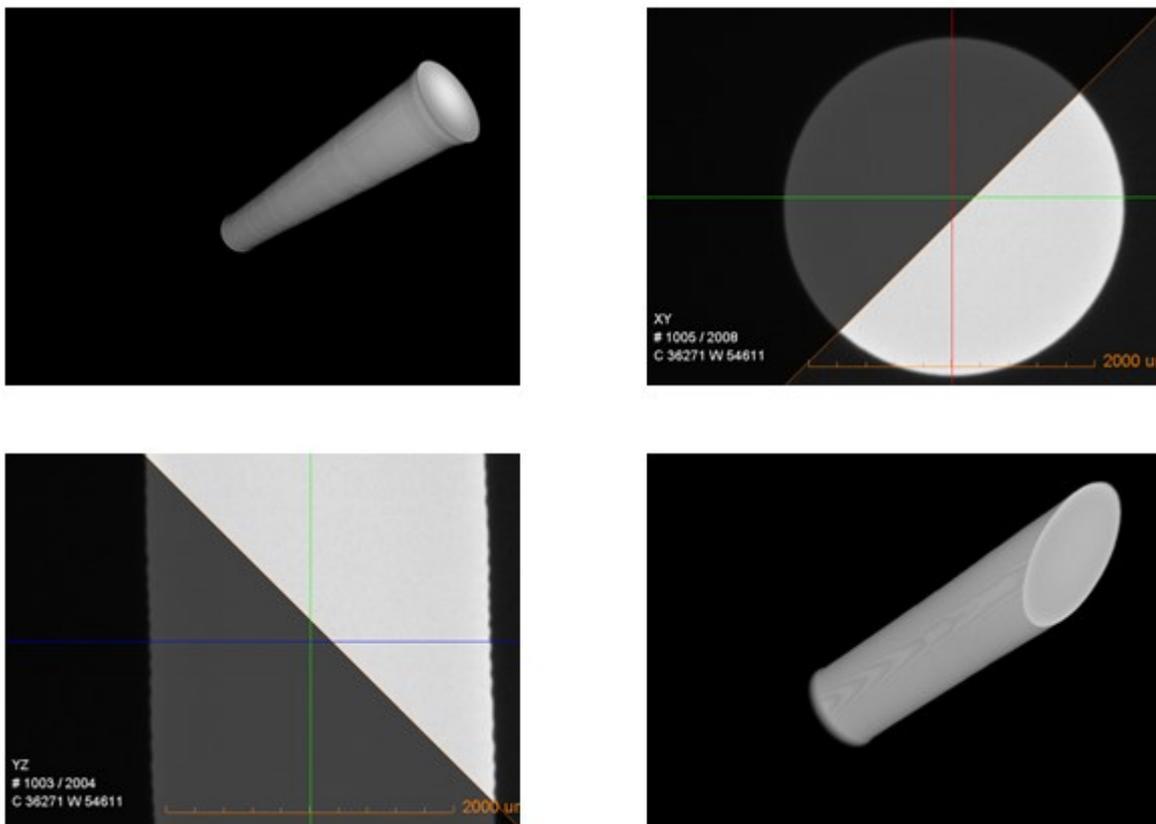


Figura 17: Amostra Fundida utilizando lente 0.4X aumento antes do teste de tração

As imagens acima representam o corte dado na reconstrução, permitindo avaliar camada por camada nos planos XY, YZ, XZ.

Como principal característica, os aços fundidos possuem alta resistência e pelo seu processo de fabricação pode-se dizer que é quase isento de porosidade. Para confirmar a ausência de vazios e inclusões, a mesma amostra foi tomografada novamente sob as mesmas condições, porém com a lente de aumento maior, neste caso, agora para 4X (Figura 18).

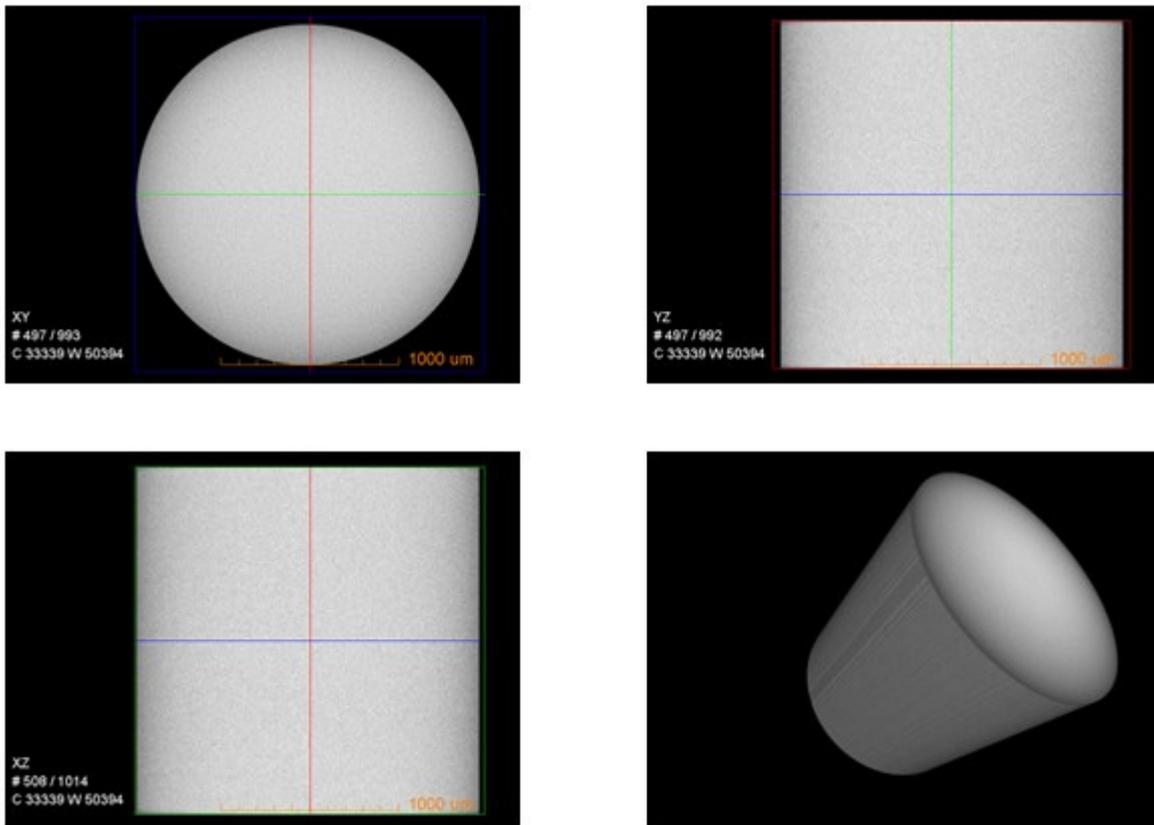


Figura 18: Amostra Usinada utilizando lente 4X aumento antes do teste de tração

O resultado de nenhuma das resoluções, 0.4X e 4X, apresentou quaisquer indicações de vazios ou inclusão. As amostras posteriormente foram levadas para ensaio no teste de tração com o propósito de alcançar o limite de escoamento, portanto sem levá-las a ruptura, para depois fazer a tomografia (pela segunda vez) e poder avaliar como o material se comportou.

A Figura 19 representa as imagens do corpo de prova após ensaio de tração.

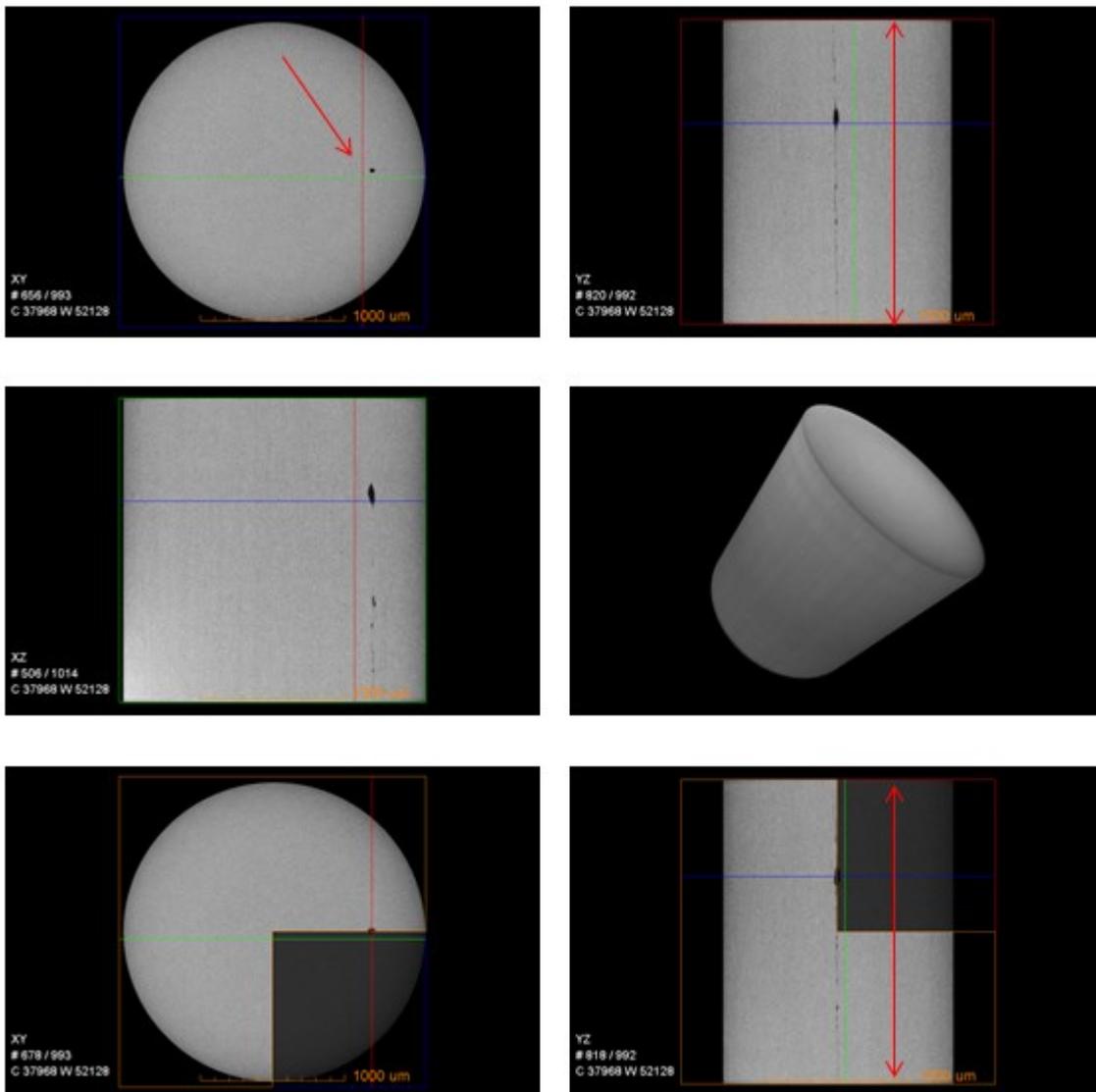


Figura 19: Amostra Fundida utilizando lente 4X aumento depois do teste de tração

Uma espécie de defeito é observado nos planos XZ,XY e YZ. A princípio, a hipótese é do defeito ser uma possível inclusão alongada.

De um modo geral, quase todos os aços contêm pequenas partículas não-metálicas, em tamanhos na faixa de 0,1 a 20 μ m, compostas por diversos óxidos ou sulfetos, os quais são produzidos durante os processos de fabricação de aço. Além disso, partículas de carbonetos poderão estar intencionalmente presentes como resultado do tratamento térmico do aço fundido.

A diferença entre a inclusão alongada e a nucleação e propagação de uma trinca é que no corte XY (vista perpendicular a base da amostra) a peça apresentou defeito de forma circular

e uma trinca jamais se apresentaria assim, sendo esta por sua vez caracterizada apenas como um traço.

Normalmente, essas inclusões (partículas de segunda fase) serão bastante diferentes em termos de resistência ao escoamento e módulo de elasticidade do aço. Seu tamanho e distribuição influenciam a ductilidade. À medida que a deformação plástica ocorre, uma concentração de tensão é desenvolvida na interface partícula/aço em razão das diferenças na estrutura cristalina e nas propriedades físicas. A grandeza do aumento da tensão dependerá das dimensões da partícula, sendo que, quanto menor for o raio de curvatura na extremidade da partícula, maior será a concentração de tensão.

Uma vez que se tenha alcançado a tensão crítica, a interface partícula/aço sofrerá uma ruptura, ocorrendo um ou ambos os mecanismos a seguir:

- No primeiro, a tensão produzida poderá ser grande o suficiente para fraturar a partícula; há considerável evidência disso para as grandes partículas de carboneto e nitreto no aço.
- O segundo mecanismo representa o ponto onde a interface partícula/aço é fraca, e a partícula se desprende da matriz de aço adjacente.

Uma vez formado os vazios em torno das partículas, eles crescem conforme a tensão aumenta. O tratamento teórico demonstra que os vazios continuam a crescer durante a estrição e que a fração volumétrica de vazios aumenta durante esse estágio do ensaio de tração. Além disso, os vazios começam a se juntar, chegando ao ponto no qual não há mais material suficiente para suportar a carga, e o corpo-de-prova se fragmenta.

4.2.2 Peças Impressas

Diferentemente das amostras obtidas por fundição, o conjecturado era a aparição de algum defeito interno. Quando explicado o processo de impressão na seção 3.2, clarificou-se que

a obtenção de peças impressas é dependente de inúmeras variáveis, tais como potência, velocidade de varredura e a distância entre as linhas de varredura (conforme esclarecido nas seções 3.2.1 e 3.2.2). Há a consciência de que estas variáveis influenciam na fabricação final da amostra, apesar de não haver conhecimento para mensurar este impacto por ainda ser uma tecnologia nova.

A Figura 20 mostra as imagens tomográficas da amostra impressa antes do ensaio de tração utilizando lente de 4X de aumento.

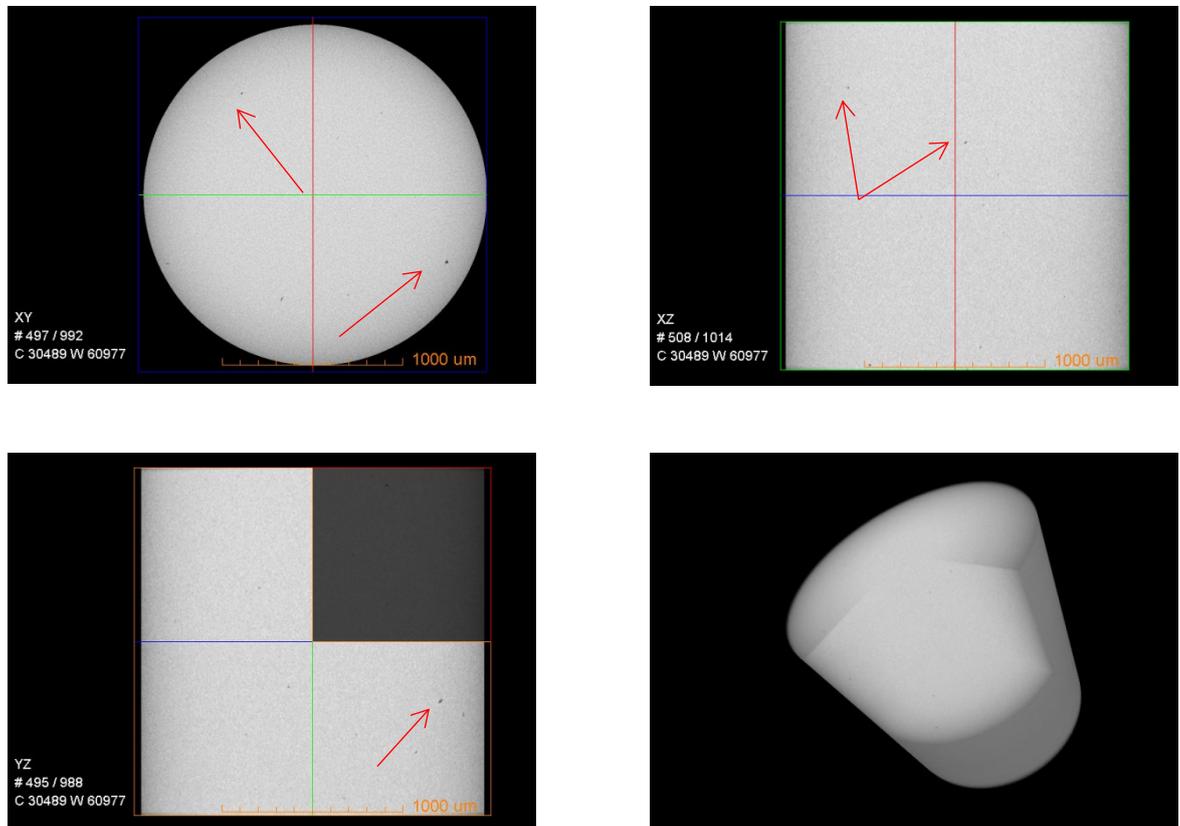


Figura 20: Amostra Impressa utilizando lente 4X aumento antes do ensaio de tração

A peça impressa apresentou pequenos defeitos internos à estrutura.

De maneira similar as fundidas, as amostras impressas foram levadas para o ensaio de tração, interrompendo o ensaio antes da ruptura para verificar com o uso da microtomografia o comportamento da peça, conforme mostrado na Figura 21.

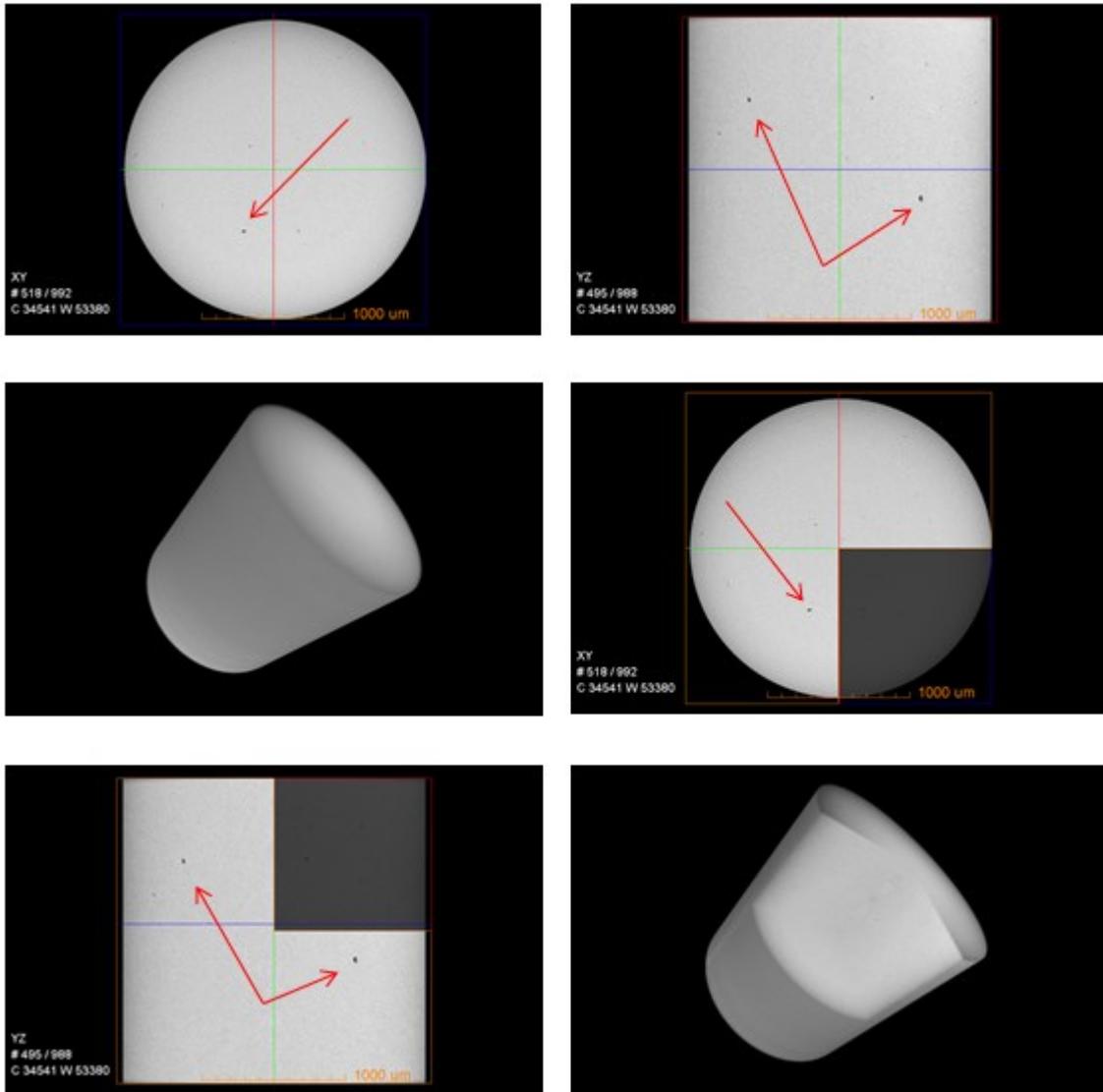


Figura 21: Amostra Impressa utilizando lente 4X aumento antes do ensaio de tração

Apesar de a amostra impressa ter apresentado inclusões antes do ensaio de tração, a mesma não apresentou nenhuma trinca ou inclusão alongada após o ensaio. Como o tomógrafo não conseguiu atingir a sensibilidade necessária para demonstrar as inclusões na amostra fundida antes do ensaio de tração, isto indica que as inclusões na amostra fundida são bem menores e

possivelmente em maior quantidade que as inclusões visualizadas no corpo de prova impresso (ilustrado na Figura 19).

4.3 Ensaios Mecânicos

4.3.1 Peças ensaiadas antes da ruptura

Em um ensaio de tração o material é submetido ao aumento de carga até que o mesmo se rompa. A uniformidade da deformação permite obter medições para a variação dessa deformação em função da tensão aplicada. Na seção 3.4, foi explicado que essa variação é determinada pelo traçado da curva tensão-deformação a qual pode ser obtida diretamente pela máquina ou por pontos.

Portanto, para a devida caracterização dos materiais quanto a sua resistência, os mesmos foram submetidos ao ensaio de tração. Os dados do ensaio foram fornecidos pelo software Bluehill, como tensão e deformação sofrida conforme o aumento da carga aplicada.

Abaixo, na Tabela 3 e Tabela 4, seguem os dados encontrados para os corpos de prova de material fundido que sofreram uma pequena carga e tiveram seus ensaios interrompidos para comparação com os materiais impressos.

Tabela 3: Dados do ensaio 1 de tração para materiais fundidos

Identificação	Diâmetro (mm)	Área (mm²)	Tensile stress at Yeld Offset 0,2%	Max. Tensile stress MPa
Fundida4	4	12,6	793,6	870,82
Fundida25	2,5	4,9	773,7	835,86

Como o número de amostragem foi pequeno (apenas duas amostras, cada uma com um diâmetro) não se pode confirmar com precisão o valor do limite de escoamento, porém pode-se dizer que o material atingiu aproximadamente 770 MPa.

Tabela 4: Dados do ensaio 1 de tração para materiais fundidos

Identificação	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	Tensile stress at Yield Offset 0,2%	Max. Tensile stress MPa
Impresso4	4	12,6	972,4	1250,34
Impresso25	2,5	4,9	942,5	1086,72

De maneira similar, os materiais impressos obtiveram o mesmo número de amostragem (apenas duas amostras, cada uma com um diâmetro). Para este caso pode-se estimar o valor de 950 Mpa para o limite de escoamento.

Abaixo, Figura 22, é apresentado o gráfico de tensão-deformação referente a cada amostra.

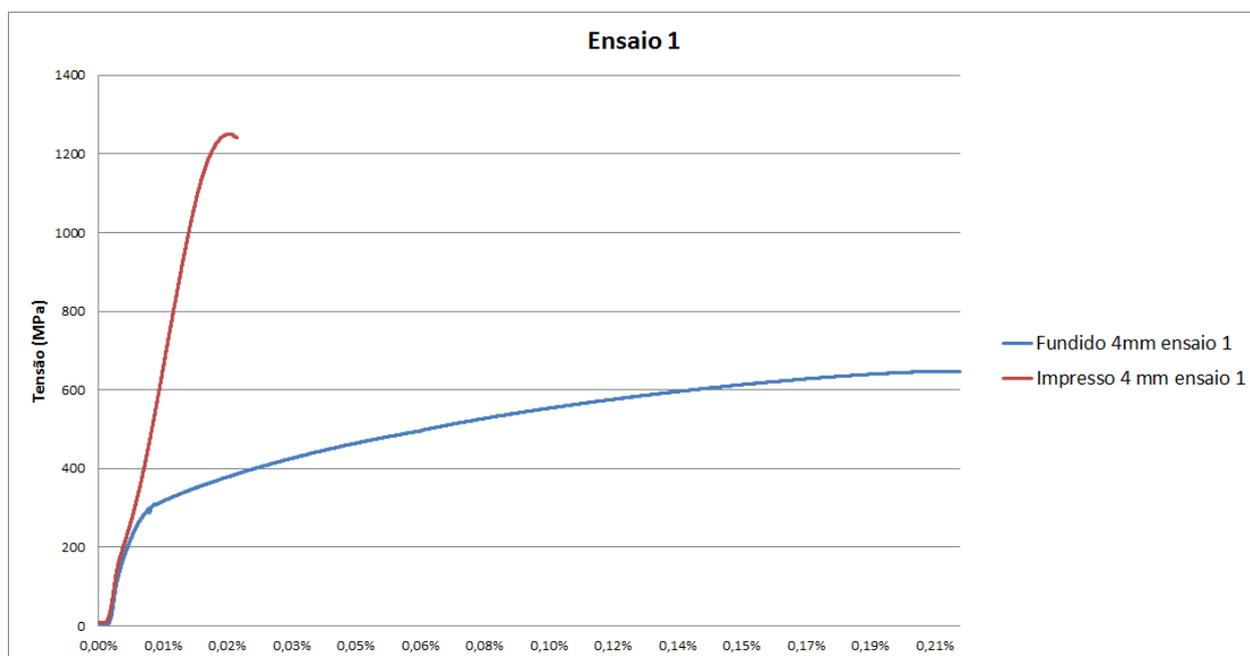


Figura 22: Gráfico tensão-deformação das amostras tendo ensaio interrompido até atingir o limite de escoamento

4.3.2 Peças ensaiadas até a ruptura

O objetivo do primeiro ensaio foi inspecionar através da microtomografia o comportamento que os corpos de prova obtiveram após o ensaio de tração, de forma a verificar a ocorrência/propagação de defeitos.

Posteriormente à análise de microtomografia, estas mesmas amostras foram levadas para um segundo ensaio, denominado ensaio 2, com o objetivo de levar os espécimes até a ruptura. Os corpos tracionados até o término do ensaio permitem a avaliação quanto aos limites de escoamento, máxima tensão e ruptura, pontos importantes para a caracterização quanto à resistência dos materiais.

Abaixo, na Tabela 5, seguem os dados encontrados para os corpos de prova que foram submetidos ao ensaio 1 de tração e que posteriormente foram ensaiados até a ruptura para comparação com os materiais impressos.

Tabela 5: Dados do ensaio 2 de tração para materiais fundidos e impressos

Identificação	Diâmetro (mm)	Área (mm²)	Max. Tensile stress Mpa
Impresso 25	2,15	3,63	1382,58
Fundido 25	2,35	4,33	1127,33
Impresso 4	3,75	11,04	1396,38
Fundido 4	3,15	7,79	1148,88

Como os corpos de prova foram submetidos ao ensaio 1, seu diâmetro ficou levemente reduzido devido à estrição que ocorre quando um material é submetido a cargas trativas. A máxima tensão de tração obtida para o corpo de prova impresso tem ordem de grandeza aproximada de 1300 MPa enquanto para o corpo de prova fundido foi 1100 Mpa, conforme ilustrado na Figura 23.

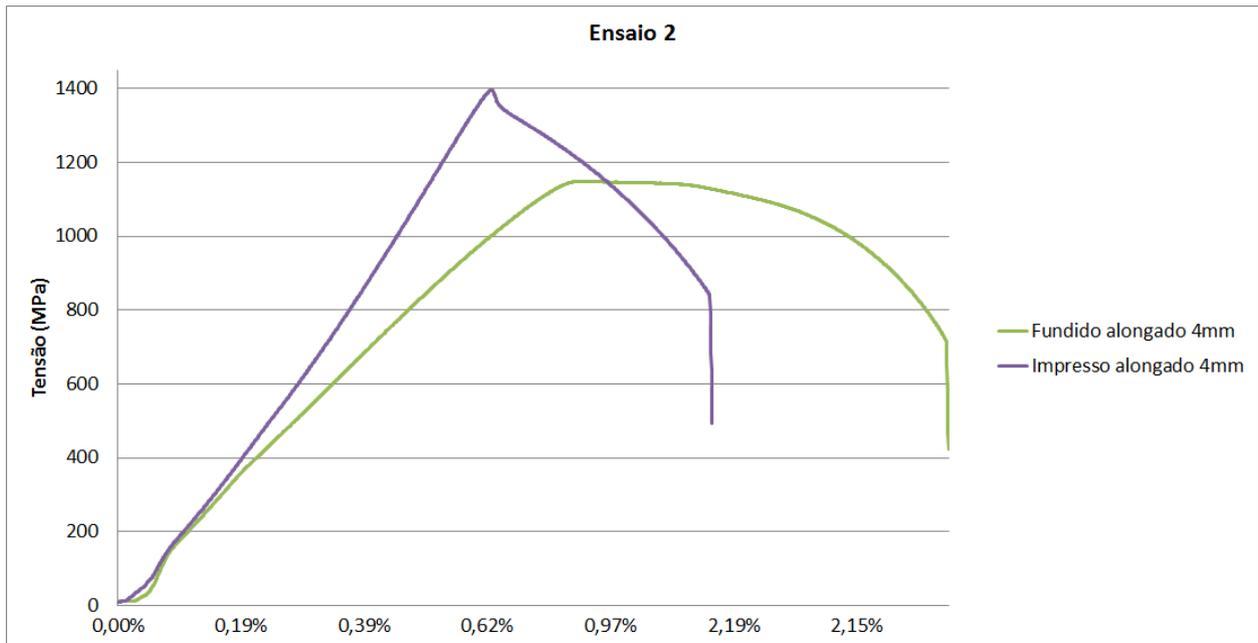


Figura 23: Gráfico tensão-deformação das amostras tendo ensaio até a ruptura

4.4 Análise dos Dados

A primeira captura de imagens através da microtomografia, a princípio, demonstrou que o material impresso apresentava inclusões. Dependendo do tipo de inclusões o material impresso poderia apresentar resistências menores, porém, após o ensaio de tração 1, o material impresso não apresentou nenhuma nucleação e/ou propagação de defeitos. O alongamento de inclusões ocorreu no material fundido.

Este resultado foi bastante inesperado, pois apesar de explicar a menor tensão no ensaio de tração para as amostras fundidas, não explicou o porquê do aparecimento dessas sucessões de inclusões alongadas.

Para conhecer e entender o comportamento destes materiais, as amostras foram levadas para uma análise metalográfica qualitativa, consistindo apenas em observar a microestrutura, determinando assim a microestrutura dos corpos de prova.

A microestrutura varia de acordo com os tratamentos térmicos e processos de fabricação, porém, para os aços os principais constituintes são: ferrita; perlita; martensita e austenita (constituente básico dos aços inoxidáveis).

As etapas de preparação das amostras consistiram em: embutimento metalográfico a frio; lixamento; polimento e ataque químico. O ataque realizado foi o de Vilella (5ml HCl + 2gr ácido pícrico + 100ml Álcool Etílico), indicado para aços inox, pois identifica as fases delta e sigma revelando ferrita em contorno de grão austenítico, mostrando a microestrutura com um contraste em branco e preto.

As imagens abaixo, Figura 24, foram capturadas antes do ataque com o objetivo de evidenciar as inclusões.

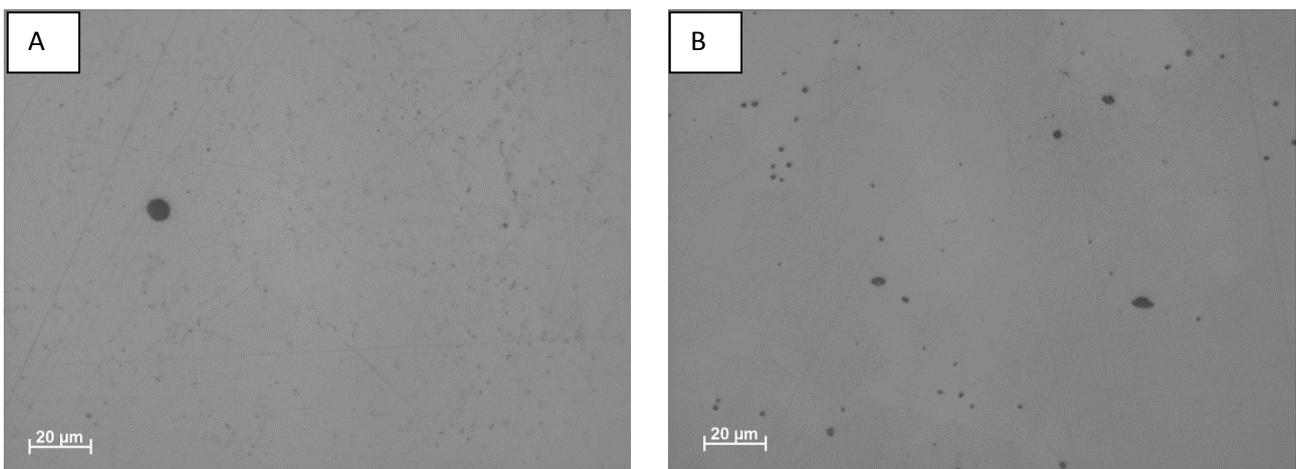


Figura 24: Amostras polidas com aumento de 500 vezes (a) impressa (b) fundida

A amostra impressa apresentou pouca inclusão com tamanho grande quando comparada com a fundida que apresentou muita inclusão, porém pequena. O fato da inclusão da amostra impressa ser maior que a fundida constata que o tomógrafo só teve resolução para captar as inclusões grandes, por isso, a microtomografia não apresentou nenhuma inclusão para a fundida por ter tamanho menor.

O tempo do ataque variou entre as amostras. A impressa revelou a microestrutura cerca de 3 vezes mais rápido quando comparada com a fundida. Provavelmente a impressa ocorreu de forma mais rápida por ter pouca fase para ser revelada. A seguir, Figura 25 e Figura 26, é apresentado o resultado após o ataque.

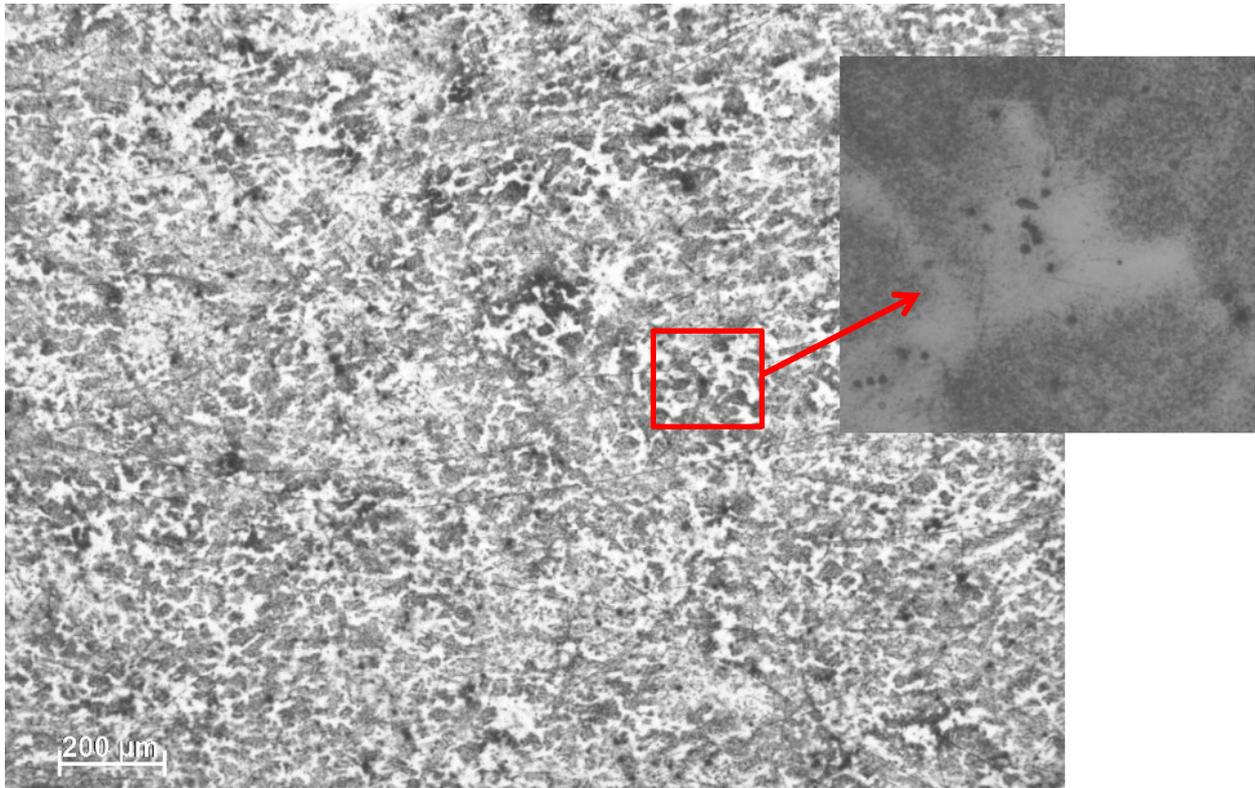


Figura 25: Amostra fundida após ataque de Vilella com aumento de 50x e 500x

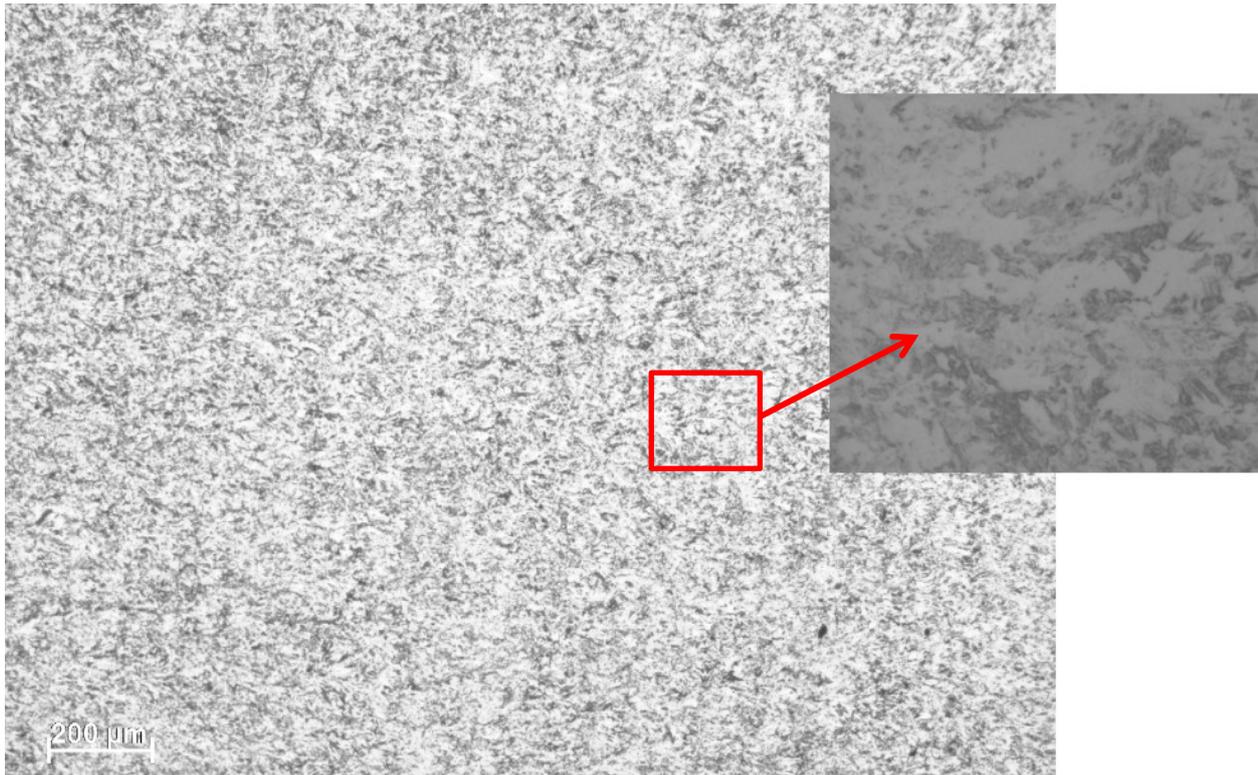


Figura 26: Amostra impressa após ataque de Vilella com aumento de 50x e 500x

Comparando a microestrutura dos dois materiais fica evidente a presença dominante da fase branca no material impresso. O reagente de Vilella é preferido para aços inox martensíticos e sua resposta ao ataque depende da sua condição de tratamento: Recozido, Temperado ou Revenido.

As amostras recozidas requerem maior tempo de ataque, não havendo muita microestrutura para ser observada. Isso explica o fato da amostra fundida ter demorado mais tempo no ataque devido ao próprio processo de fabricação.

Para confirmar a diferença de microestrutura, de modo a justificar os resultados encontrados no ensaio de tração, foi necessário efetuar o ensaio de microdureza tanto na amostra impressa quanto na fundida.

A técnica consiste em fazer endentações estáticas provocadas por cargas normalmente inferiores a 1kgf. No ensaio Vickers, o endentador tem formato de pirâmide e o valor da dureza é calculado como sendo a carga aplicada (em kgf) dividida pela área da superfície da endentação (em mm²).

$$\text{Equação 4: } HV \approx \frac{1,854F}{d^2}$$

Onde:

F= é a carga em kgf

d = é a média aritmética das duas diagonais , d1 e d2 em mm

HV = é a dureza Vickers

O endentador tem a forma de uma pirâmide quadrada com 1360 entre faces como mostrado na Figura 27. Para calcular o valor da dureza de Pirâmide de diamante Vickers, ambas as diagonais da endentação foram medidas, e a média destes valores foi usada na Equação 4 para a determinação do valor HV.

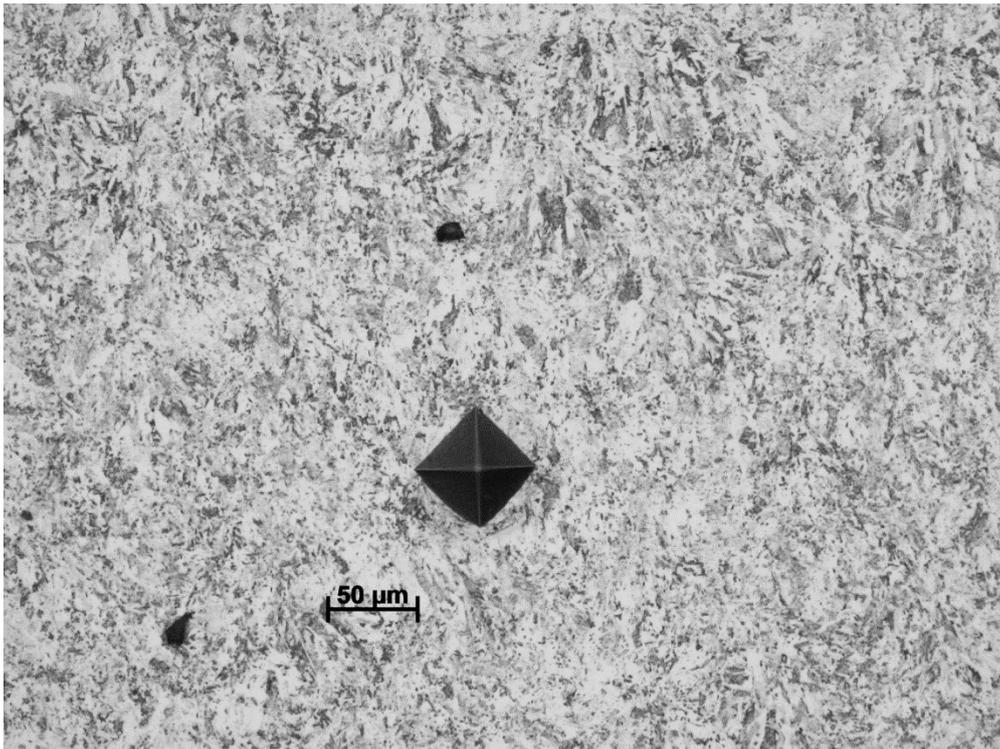


Figura 27: Microestrutura da amostra impressa após ensaio de microdureza Vickers

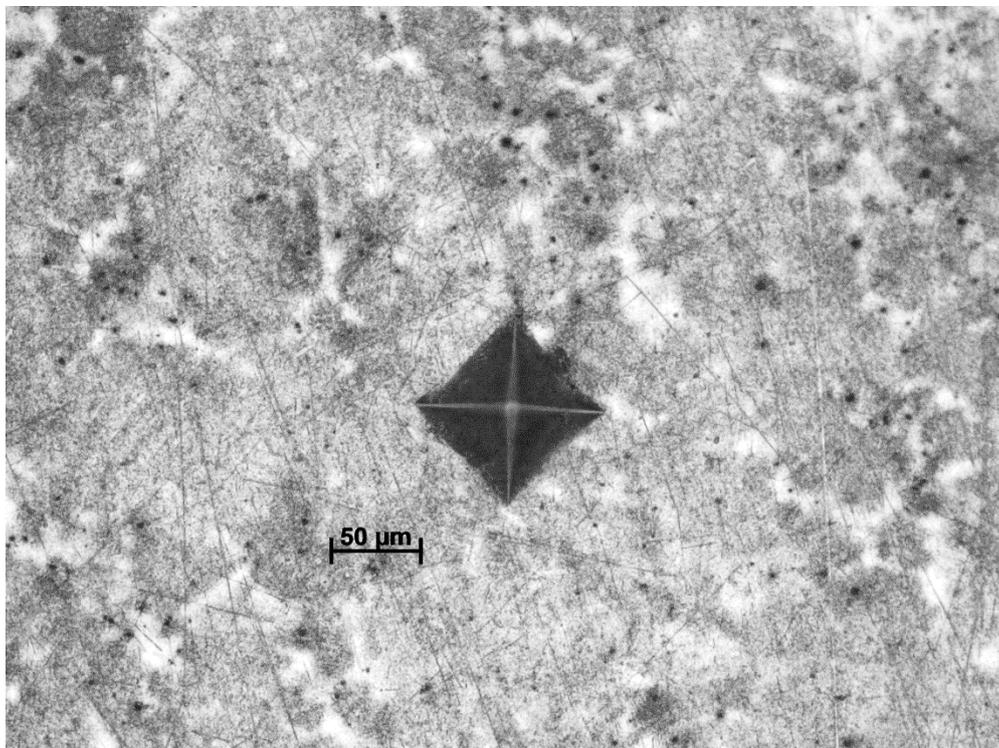


Figura 28: Microestrutura da amostra fundida após ensaio de microdureza Vickers

A Tabela 6 mostra o resultado do ensaio de microdureza. Foram medidos 3 pontos equidistantes, um na esquerda, um no centro e outro na direita de cada peça. Como os resultados não tiveram grande desvio, não foi necessário capturar mais pontos.

Tabela 6: Resultado do ensaio de microdureza Vickers

Microdureza Vickers					
Pontos	1	2	3	Média	Desvio
Impressa	378	372	370	373,3	4,2
Fundida	170	164	161	165,0	4,6

O ensaio Vickers validou o ensaio de tração, constatando que a peça impressa apresenta maior dureza, portanto maior limite de resistência em comparação com a fundida.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

As amostras de aço inoxidável fundida e por impressão 3D foram inicialmente caracterizadas por microtomografia de raios-x, o que demonstrou que as peças impressas não apresentam porosidade.

Posteriormente com o ensaio de tração, foi constatado que peças impressas apresentaram limite de escoamento e limite de resistência maior do que as peças fundidas. O fato das impressas terem apresentado inclusões na microtomografia e no primeiro momento aparentemente as fundidas não, foi necessário à utilização de microscopia ótica, para determinar o que de fato caracterizava o material impresso.

Com a microscopia ótica foi possível visualizar as inclusões na peça fundida. Isto confirma que o tomógrafo não teve sensibilidade para capturar estas pequenas inclusões e explica os valores de resistência encontrados no ensaio de tração.

A forma como a microestrutura das peças impressas se apresentou, mostrou distribuição de fases mais fina e uniforme. Este comportamento pode ser justificado pelo resfriamento muito mais rápido que ocorre no processo de sinterização sob as peças impressas, o que pode ocasionar na formação de martensita, material este que apresenta limite de resistência muito alto. Quando ocorre a deposição da segunda camada no processo de impressão, a temperatura da camada de cima interfere na temperatura da camada de baixo, formando gradiente de temperatura. Esse gradiente pode ocasionar em um recozimento e formação de ferrita na microestrutura.

Algumas sugestões para trabalhos futuros seria explorar mais os parâmetros da impressora 3D. As trocas térmicas envolvidas no processo de sinterização a laser, e avaliar o possível efeito de recozimento ou revenido causado por uma camada sinterizada sobre a anterior.

Identificar de forma mais específica as fases presentes nas microestruturas obtidas e calcular suas frações.

Ampliar o leque de possibilidades para realizar a mesma comparação com outros metais com maior condutividade térmica do que o aço inox.

6 Bibliografia

ARAÚJO, A. (2006). Tomografia Computadorizada - Princípios e Físicos e Aplicações Corpus.

Arquitetura interna do CNC. (2002). Mecatrônica Atual.

Corpos de Prova para o ensaio de tração. (s.d.). Acesso em 20 de 02 de 2015, disponível em CIMM:
http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6543-corpos-de-prova-para-o-ensaio-de-tracao#.VYOI10YX6H5

Duarte, H. (s.d.). Descubra como surgiu a impressora 3D. Acesso em 23 de 02 de 2015, disponível em
TECHTUDO: <HTTP://WWW.TECHTUDO.COM.BR/DICAS-E-TUTORIAIS/NOTICIA/2014/04/DESCUBRA-COMO-SURGIU-IMPRESSORA-3D.HTML>

EOS-EOSINT-REVIEW. (s.d.). Acesso em 23 de 02 de 2015, disponível em TOPTENREVIEWS: <HTTP://3D-PRINTERS.TOPTENREVIEWS.COM/INDUSTRIAL/EOS-EOSINT-REVIEW.HTML>

Fernandes, A. (2009).

GONZALEZ, R. C. (1993). DIGITAL IMAGE PROCESSING, ADDISON WESLEY.

JOSEPH E. SHIGLEY, C. R. (2005). Projeto de Engenharia Mecânica. 7ªed.

L. ESPERTO, A. O. (s.d.). RAPID TOOLING, SINTERIZAÇÃO DIRECTA POR LASER DE METAIS. REVISTA DA ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES ISSN 1646-7078.

MACHADO, A. D. (1999). USINAGEM DOS METAIS.

NERISSIAN, D. Y. (2004). DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DO PONTO OCAL DE TUBOS DE RAIOS X UTILIZANDO UM SENSOR CCD E O MÉTODO DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA.

OLIVEIRA, J. S. (2007). RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE IMAGENS OBTIDAS POR TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA.

PONTES, A. N. (2010). TÉCNICAS EXPERIMENTAIS; DETECTORES DE RADIAÇÃO. Acesso em 02 de 04 de 2015, disponível em
<WWW.PROFPC.COM.BR/QU%C3%ADMICA%20NUCLEAR%20X%20F%C3%ADSICA%20NUCLEAR/F%C3%ADSICA%20NUCLEAR/DETECTORES%20RADIACAO.PDF>

Propriedades Mecânicas . (2011). Joinville.

SANTOS, E. S. (2009). Manual de técnicas em tomografia computadorizada. Rubio LTDA.

VAN GEET, M. R. (2000). QUANTITATIVE ANALYSIS OF RESERVOIR ROCKS BY ICROFOCUS -RAY COMPUTERIZED TOMOGRAPHY. SEDIMENTARY GEOL.