



**João Carlos Ferreira Bento**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Avaliação Dimensional e Mecânica de  
peças produzidas na Impressora 3D M1  
*Cusing***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica

Orientador: Professor Dr. João Manuel Vicente Fradinho,  
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

**Setembro de 2017**



**Avaliação Dimensional e Mecânica de peças produzidas pela impressora 3D M1 Cusing**

***Copyright* © 2017 João Carlos Ferreira Bento**

**Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Desejo manifestar a minha profunda gratidão:

Ao Professor João Fradinho pela orientação, incentivo e disponibilidade demonstrada ao longo do desenvolvimento deste trabalho;

Ao Professor António Mourão pelo auxílio prestado principalmente na fase inicial de definição do tema da dissertação;

Ao Professor Jorge Pamies pelas sugestões dadas ao longo da dissertação;

Aos técnicos do laboratório de tecnologias do DEMI da FCT, pela disponibilidade e pela colaboração demonstrada na fase experimental;

A alguns colegas do curso, pela ajuda, boa disposição e companheirismo manifestado diariamente;

À empresa DIMLASER, nomeadamente à CEO Andreia Nabais, pela colaboração e disponibilidade demonstrada através da realização de reuniões prévias e pela oferta dos provetes estudados;

À minha família pelo apoio prestado ao longo do meu percurso académico.



## Resumo

Na atualidade, a produção industrial é caracterizada por elevados níveis de competitividade. Por isso, as empresas tentam diferenciar-se pela inovação quer dos produtos finais, quer dos processos de fabrico, tendo sempre como objetivo maximizar os lucros através da captação de clientes, dando resposta às suas necessidades, independentemente da complexidade da geometria pretendida. Com efeito, a flexibilidade geométrica, aliada ao reduzido tempo de ciclo de produção e à eficiência na utilização de recursos inerentes ao processo de impressão 3D, faz deste uma escolha cada vez mais procurada industrialmente, em particular para metais e ligas metálicas.

O principal objetivo desta dissertação foi estudar a influência dos parâmetros de produção (potência do laser, espessura por camada e velocidade do laser) em algumas propriedades mecânicas/respostas (rugosidade, dureza, tensão de cedência, tensão de rotura, tensão a que ocorre a fratura e extensão nominal) de provetes normalizados segundo a norma ASTM E08-01. Estes provetes foram produzidos utilizando o aço 316L por impressão 3D, na impressora M1 *Cusing*, que utiliza o método de impressão SLM.

Os resultados obtidos na medição das propriedades mecânicas foram inseridos no *software* de estatística denominado “STATISTICA”, tendo sido utilizada a metodologia da superfície de resposta (RSM) do planeamento de experiências (DoE), medindo desta forma a significância de cada variável em estudo para as respostas supracitadas.

A variável que foi considerada mais significativa foi a potência do laser. O aumento desta variável influencia positivamente a rugosidade e a dureza e negativamente a extensão nominal.

A espessura por camada também teve influência no resultado obtido para a resposta dureza. O seu aumento tem como consequência a diminuição da dureza do material.

Por outro lado, a variável velocidade do laser não influenciou significativamente qualquer uma das respostas estudadas.

**Palavras-chave:** Impressão 3D (SLM), Aço 316L, Parâmetros de produção, Propriedades mecânicas, Planeamento de experiências (DoE).



## Abstract

Nowadays, industrial production is characterized by high levels of competitiveness. So, companies try to differentiate themselves by innovating, both the final products and the manufacturing processes, always aiming to maximize profits by attracting customers, responding to their needs, regardless of the complexity of the desired geometry. In fact, geometric flexibility, coupled with the reduced production cycle time and the efficiency of the use of the inherent features of the 3D printing process, make it an increasingly sought-after choice, particularly for metals and metal alloys. The main objective of this dissertation was to study the influence of the production parameters (laser power, thickness per layer and laser speed) on some mechanical properties / responses (roughness, hardness, yield stress, stress at fracture and nominal extent) of standard test pieces according to ASTM E08-01. These specimens were produced using 316L steel by 3D printing on the *MI Cusing* printer, which uses the SLM printing method.

The results obtained in the measurement of the mechanical properties were inserted in the statistical software called "STATISTICA", using Response Surface Methodology (RSM) of Design of Experiments (DoE), thus measuring the significance of each variable in study for the aforementioned answers.

The variable that was considered the most significant was the power of the laser. The increase of this variable positively influences roughness and hardness and negatively the nominal extent. The thickness per layer also had influence in the result obtained for the hardness response. Its increase has the consequence of decreasing the hardness of the material. On the other hand, the variable speed of the laser did not significantly influence any of the studied responses.

**Key words:** 3D Printing (SLM), 316L Steel, Production parameters, Mechanical properties, Design of Experiments (DoE).



# Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Contextualização .....	1
1.2	Objetivo do trabalho.....	3
1.3	Organização da dissertação .....	3
2	Impressão 3D e métodos de impressão .....	5
2.1	Caracterização do processo de impressão 3D .....	5
2.2	Métodos de impressão 3D .....	6
2.3	Família das impressoras que fundem, ligam ou colam a matéria prima .....	7
2.3.1	Selective Laser Melting (SLM).....	7
2.3.2	Vantagens:.....	8
2.3.3	Desvantagens:.....	9
2.3.4	Parâmetros de funcionamento de impressoras 3D de SLM: .....	9
2.4	Família das impressoras que depositam a matéria prima em camadas .....	10
3	Impressão de peças utilizando a impressora 3D M1 <i>Cusing</i> e Metodologia.....	13
3.1	Funcionamento da impressora ( <i>LaserCUSING</i> ).....	13
3.1.1	Vantagens do processo .....	14
3.1.2	Desvantagens do processo.....	15
3.2	Características da impressora .....	15
3.3	Metodologia utilizada.....	16
3.3.1	Metodologia da Superfície de Resposta (RSM) e Planeamento de experiências (DoE) 18	
3.3.2	Estabelecimento de variáveis e respostas a estudar.....	23
3.3.3	Parâmetros a avaliar e Matriz de Planeamento Fatorial .....	24
4	Produção de peças na impressora 3D M1 <i>Cusing</i> e meios utilizados no trabalho experimental .....	25
4.1	Provetes utilizados.....	25
4.2	Material utilizado na construção da peça (aço 316L).....	26

4.3	Meios utilizados no trabalho experimental .....	28
4.3.1	Avaliação dimensional dos provetes .....	28
4.4	Avaliação do acabamento superficial e da rugosidade .....	29
4.4.1	Enquadramento teórico do acabamento superficial e da rugosidade.....	29
4.4.2	Procedimento experimental.....	30
4.5	Avaliação Metalográfica .....	31
4.5.1	Identificação da estrutura interna dos provetes .....	31
4.5.2	Procedimento experimental.....	31
4.6	Retificação dos provetes.....	35
4.7	Avaliação dimensional após a retificação .....	38
4.8	Ensaio de dureza.....	38
4.8.1	Ensaio de <i>Vickers</i> .....	38
4.8.2	Procedimento experimental.....	40
4.9	Ensaio de tração uniaxial.....	41
4.9.1	Norma ASTM-E8M-01 .....	41
4.9.2	Verificação .....	43
4.9.3	Definições do ensaio de tração.....	44
4.10	Procedimento experimental.....	45
5	Resultados experimentais.....	47
5.1	Resultados obtidos e justificações.....	47
5.1.1	Resultados da avaliação dimensional antes da retificação .....	47
5.1.2	Medição da rugosidade dos provetes.....	51
5.1.3	Avaliação dimensional dos provetes após a retificação .....	52
5.1.4	Resultados dos ensaios de dureza.....	55
5.1.5	Resultados dos ensaios de tração uniaxial.....	58
5.2	Tratamento estatístico dos resultados.....	63
5.3	Interpretação de resultados.....	81
6	Conclusão.....	85

6.1	Conclusões .....	85
6.2	Trabalhos futuros.....	86
	Referências Bibliográficas .....	89



## Índice de figuras

Figura 1.1 - Comparação de custos de produção entre a utilização da impressão 3D e de um método convencional (moldagem por injeção), em função do número de peças produzidas .....	2
Figura 2.1 - Sequência de processos para a produção de uma peça em impressão 3D .....	5
Figura 2.2 - Principais variantes da impressão 3D .....	7
Figura 2.3 - Representação esquemática do funcionamento e dos componentes de uma impressora 3D de SLM .....	8
Figura 2.4 - Comparação dos custos de produção de peças usando SLM e usando a injeção por molde .....	9
Figura 3.1- Impressora 3D M1 <i>Cusing</i> da <i>Concept Laser</i> .....	13
Figura 3.2 - Método de impressão de peças metálicas <i>LaserCUSING</i> .....	14
Figura 3.3 - Sequência de imagens que representam os ensaios e medições realizadas bem como a ordem pela qual foram executados. ....	17
Figura 4.1 - Representação bidimensional dos provetes normalizados e suas dimensões .....	25
Figura 4.2 - Paquímetro digital da marca <i>powerfix</i> , utilizado na valiação dimensional dos provetes produzidos por impressão 3D .....	29
Figura 4.3 - Rugosímetro da marca <i>Mahr</i> , modelo <i>MarSurf PS 10</i> (duas vistas) .....	30
Figura 4.4 – Defeitos, rebarbas e irregularidades laterais do provete número 1 .....	31
Figura 4.5 - <i>Epoxy Resin</i> e <i>Epoxy Hardener</i> usados na produção da resina (imagem do lado esquerdo) e amostra contendo a resina (imagem do lado direito) .....	32
Figura 4.6- Visualização microscópica da amostra após a passagem na primeira lixa (imagem do lado esquerdo) e após a passagem no pano de polimento (imagem do lado direito) .....	33
Figura 4.7 - Microscopia ótica usando uma lente de 100x .....	34
Figura 4.8 - Microscópio ótico da marca <i>Olympus</i> , modelo <i>CX40</i> .....	34
Figura 4.9 – Processo de retificação e fixação dos provetes na plataforma de retificação .....	35
Figura 4.10 - Prensa de aperto de precisão fixando um conjunto de três provetes (duas vistas) .....	36
Figura 4.11 - Representação numa perspectiva isométrica da peça em <i>solidworks</i> (imagem do lado esquerdo) e imagem da rectificação dos provetes na máquina de polir (imagem do lado direito) .....	37
Figura 4.12 - Provetes antes da retificação (imagem superior) e após a retificação (imagem inferior) .....	37
Figura 4.13 - Máquina de medição de dureza de <i>Vickers</i> da marca <i>Mitutoyo</i> e do modelo <i>HM-12</i> (imagem do lado direito) e visor com os parâmetros de operação da máquina (imagem do lado direito) .....	39

Figura 4.14 - Representação esquemática do ensaio de dureza de <i>Vickers</i> , com a representação das principais variáveis de ensaio .....	40
Figura 4.15 - Fixação de um dos provetes nas amarras da máquina de tração e do respectivo extensómetro .....	42
Figura 4.16 - Extensómetro da marca MTS e do modelo 632.12C-21, utilizado no ensaio de tração uniaxial.....	43
Figura 6.16 - Provetes fraturados após o ensaio de tração uniaxial .....	43
Figura 4.18 - Representação bidimensional da máquina de tração onde foram realizados os ensaios .....	45
Figura 5.1 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta rugosidade .....	67
Figura 5.2 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta dureza .....	67
Figura 5.3 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta tensão de cedência.....	67
Figura 5.4 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta tensão de rotura .....	67
Figura 5.5 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta tensão a que ocorre a fratura .....	68
Figura 5.6 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta extensão nominal.....	68
Figura 5.7 - Gráfico dos resíduos em função da ordem de experiências para a dureza .....	68
Figura 5.8 - Gráfico dos resíduos em função da ordem de experiências para a rugosidade.....	68
Figura 5.9 - Gráfico dos resíduos em função da ordem de experiências para a tensão de cedência .....	69
Figura 5.10 - Gráfico dos resíduos em função da ordem de experiências para a tensão de rotura .....	69
Figura 5.11 - Gráfico dos resíduos em função da ordem de experiências para a tensão a que ocorre a fratura .....	69
Figura 5.12 - Gráfico dos resíduos em função da ordem de experiências para a extensão nominal .....	69
Figura 5.13 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a dureza .....	70
Figura 5.14 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a rugosidade .....	70
Figura 5.15 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a tensão de rotura .	70
Figura 5.16 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a tensão de cedência .....	70

Figura 5.17 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a extensão nominal	71
Figura 5.18 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a tensão de fratura	71
Figura 5.19 - Importância relativa das variáveis quanto à rugosidade	71
Figura 5.20 - Importância relativa das variáveis quanto à dureza	72
Figura 5.21 - Importância relativa das variáveis quanto à tensão de rotura	72
Figura 5.22 - Importância relativa das variáveis quanto à tensão de cedência	73
Figura 5.23 - Importância relativa das variáveis quanto à tensão a que ocorre a fratura	73
Figura 5.24 - Importância relativa das variáveis quanto à extensão nominal	74
Figura 5.25 - Superfície de resposta para a rugosidade em função da potência do laser e da velocidade do laser	75
Figura 5.26 - Superfície de resposta para a rugosidade em função da potência do laser e da espessura por camada	76
Figura 5.27 - Superfície de resposta para a dureza em função da potência do laser e da velocidade do laser	77
Figura 5.28 - Superfície de resposta para a dureza em função da potência do laser e da espessura por camada	78
Figura 5.29 - Superfície de resposta para a dureza em função da espessura por camada e da velocidade do laser	79
Figura 5.30 - Superfície de resposta para a extensão nominal em função da potência do laser e da velocidade do laser	80
Figura 5.31 - Superfície de resposta para a extensão nominal em função da potência do laser e da espessura por camada	81



## Índice de tabelas

Tabela 3.1- Características principais da impressora 3D M1 <i>Cusing</i> .....	15
Tabela 3.2 - Tabela de análise de variância (ANOVA) .....	19
Tabela 3.3 - Valores percentuais da distribuição <i>t-student</i> .....	21
Tabela 3.4 - Valores percentuais (5%) da distribuição F de <i>Snedcor</i> .....	22
Tabela 3.5 - Aumento e diminuição dos parâmetros a avaliar (matriz de planeamento fatorial 23) .....	24
Tabela 4.1 - Provetes e sua localização na tabela de aumentos e diminuições dos parâmetros ..	26
Tabela 4.2 - Composição química do aço 316L.....	27
Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável 316L .....	27
Tabela 4.4 - Divisão da Rugosidade Média em classes .....	30
Tabela 5.1 - Avaliação dimensional dos provetes normalizados antes da retificação.....	48
Tabela 5.2 - Comprimento principal (L) de cada conjunto de 3 provetes normalizados .....	49
Tabela 5.3 - Largura de ensaio (W) de cada conjunto de 3 provetes normalizados .....	49
Tabela 5.4 - Espessura (T) de cada conjunto de 3 provetes normalizados.....	50
Tabela 5.5 - Avaliação dimensional média de cada conjunto de três provetes .....	50
Tabela 5.6 - Rugosidade Média ( $R_a$ ) dos provetes normalizados.....	51
Tabela 5.7 - Valores obtidos para a rugosidade de cada conjunto de 3 provetes .....	52
Tabela 5.8 - Dimensões dos provetes após a retificação.....	53
Tabela 5.9 - Largura de ensaio (W) de cada conjunto de 3 provetes .....	54
Tabela 5.10 - Espessura (T) de cada conjunto de 3 provetes .....	54
Tabela 5.11 - Área da secção de ensaio de cada conjunto de 3 provetes .....	55
Tabela 5.12 - Avaliação dimensional média de cada conjunto de três provetes. ....	55
Tabela 5.13 - Valores de dureza obtidos para os vinte e quatro provetes analisados.....	56
Tabela 5.14 - Valores de dureza médios para os oito conjuntos de provetes .....	57
Tabela 5.15 - Valores das tensões de rotura, fratura e cedência obtidos para os vinte e quatro provetes .....	59
Tabela 5.16 - Resultados experimentais relativos à medição da tensão de rotura medida através de ensaios de tração uniaxial.....	60
Tabela 5.17 - Resultados experimentais relativos à medição da tensão de fratura medida através de ensaios de tração uniaxial.....	60
Tabela 5.18 - Resultados experimentais relativos à medição da tensão de cedência medida através de ensaios de tração uniaxial.....	61

Tabela 5.19 - Extensão verificada no extensômetro em milímetros e extensão nominal em percentagem para os vinte e quatro provetes.....	62
Tabela 5.20 - Extensão nominal dos oito conjuntos de três provetes.....	63
Tabela 5.21 - Plano de experiências e resultados obtidos .....	64
Tabela 5.22 - Tabela ANOVA referente à rugosidade (retirada do programa <i>STATISTICA</i> ).....	64
Tabela 5.23 - Tabela ANOVA referente à dureza (retirada do programa <i>STATISTICA</i> ).....	65
Tabela 5.24 - Tabela ANOVA referente à tensão de rotura (retirada do programa <i>STATISTICA</i> ) .....	65
Tabela 5.25 - Tabela ANOVA referente à tensão de cedência (retirada do programa <i>STATISTICA</i> ) .....	65
Tabela 5.26 - Tabela ANOVA referente à tensão a que ocorre a fratura (retirada do programa <i>STATISTICA</i> ).....	66
Tabela 5.27 - Tabela ANOVA referente à extensão nominal (retirada do programa <i>STATISTICA</i> ) .....	66
Tabela 5.28 - Resultados qualitativos das respostas estudadas face ao aumento do valor das variáveis .....	82

# Lista de abreviaturas e símbolos

## Lista de abreviaturas

3DP	<i>Three Dimensional Printing</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer-aided design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	<i>Computer numerical control</i>
DoE	<i>Design of experiments</i>
FA	Fabrico aditivo
FDM	<i>Fused deposition modeling</i>
HV	<i>Hardness vickers</i>
LENS	<i>Laser engineered net shaping</i>
LOM	<i>Laminated object manufacturing</i>
PR	Prototipagem rápida
RSM	<i>Response surface methodology</i>
SL	<i>Stereolithography</i>
SLA	<i>Stereolithography apparatus</i>
SLM	<i>Selective laser melting</i>
SLS	<i>Selective laser sintering</i>
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>

## Símbolos

$\beta_k$	Coeficiente de regressão
$\varepsilon_u$	Erro
$\bar{\sigma}$	Variância
$\bar{\chi}$	Média
$A$	Área
$A_l$	Comprimento da secção de redução
$A_0$	Área Inicial
$B$	Comprimento da secção de aperto
$C$	Largura da secção de aperto
$c$	Comprimento
$d$	Diâmetro
$d_1$	Diagonal um
$d_2$	Diagonal dois
$d_i$	Diagonal média
$DV$	Distância de varrimento
$E$	Extensão nominal
$Y$	Módulo de <i>Young</i>
$ec$	Espessura por camada
$G$	Comprimento do calibre
$H$	Altura
$H_0$	Hipótese nula
$H_a$	Hipótese alternativa
$L$	Comprimento total
$l$	Comprimento final
$l_0$	Comprimento inicial
$N_2$	Azoto
$ND$	Número de dureza
$p$	Carga
$P$	Potência do laser
$R$	Raio
$R^2$	Coeficiente de correlação
$R_a$	Rugosidade média
$R_A^2$	Coeficiente de correlação ajustada
$t$	Tempo

$T$	Espessura
$v_l$	Velocidade do laser
$W$	Largura
$X_{ui}$	Valor da $i$ ésima variável na $u$ ésima experiência
$Y_u$	Resposta do sistema
$\sigma$	Tensão de rotura



# 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

Nos últimos anos, as empresas têm-se deparado com a necessidade de aumentar a qualidade dos seus produtos acompanhada com a redução dos custos e dos prazos de entrega. Para que estes objetivos sejam alcançados, algumas empresas têm recorrido a tecnologias de fabrico rápido, como é o caso do Fabrico Aditivo (FA) ou *Additive Manufacturing* (AM). Hoje em dia, o termo mais utilizado neste tipo de matérias é o de Impressão 3D.

Esta terminologia pressupõe a utilização de processos tecnológicos que facilitam a produção de modelos tridimensionais diretamente a partir de um modelo CAD em formato STL praticamente sem a intervenção do Homem [1].

O fabrico aditivo (FA) teve como inventor, na década de 60 do século passado, Herbert Voelcker ao desenvolver máquinas controladas por computadores. O FA teve um impacto muito positivo no aumento da competitividade das empresas uma vez que possibilitou o fabrico de produtos com maior rapidez e envolvendo menores custos de produção.

Assim, são apontadas como vantagens desta tecnologia, as seguintes:

- Redução do tempo de produção de qualquer produto;
- Redução dos custos de produção através da eliminação/diminuição dos erros de produção;
- Aumento do tempo de vida útil do produto através do aperfeiçoamento da produção;
- Possibilidade de produção de peças mais complexas sem aumentar o tempo da sua produção;
- Redução dos prazos de entrega e, por consequência, de comercialização do produto [2].

A esta tecnologia também são apontadas as seguintes desvantagens:

- Impossibilidade de produzir peças de grande dimensão o que inviabiliza a sua aplicação em alguns tipos de indústrias;

- Os tipos de materiais utilizados por esta tecnologia ainda são reduzidos; apesar de existirem estudos que permitirão no futuro alargar a gama desses materiais;
- Necessidade de operações de pós-processamento;
- As peças produzidas podem apresentar defeitos porque são produzidas por camadas sucessivas [2].

A Impressão 3D, também conhecida por Prototipagem Rápida (PR), é um “processo de união de materiais para fazer objetos a partir de um modelo 3D, geralmente camada por camada” [3].

Em 1986, Charles Hull (co-fundador da empresa americana *3D systems*) desenvolveu a primeira impressora 3D comercial e a técnica de obtenção de peças foi denominada estereolitografia (SL), também conhecida por SLA (*stereolithography apparatus*) [4].

Esta técnica, permitiu aos utilizadores, pela primeira vez, a obtenção de um modelo físico, a partir de um modelo digital.

Inicialmente, devido aos custos elevados, este método de obtenção de peças era exclusivo das grandes empresas. A partir desse momento, as pesquisas relacionadas com a impressão 3D foram-se intensificando, levando ao desenvolvimento de novas técnicas de impressão 3D, com custos e parâmetros de qualidade muito variados. Neste momento, devido aos avanços tecnológicos, as impressoras 3D estão a um preço muito mais acessível, sendo por esse motivo, uma técnica de obtenção de peças muito comum nos dias de hoje. Atualmente esta tecnologia tem sido usada por um número crescente de empresas e a gama de materiais utilizados tem vindo a ser cada vez mais alargada [1].

Quando é necessário produzir uma determinada peça com elevada complexidade, o uso dos métodos tradicionais e convencionais, pode tornar a produção dessa peça uma tarefa quase impossível, demorando muito tempo e, conseqüentemente, aumentando os custos de produção, principalmente quando a produção não será feita em série, como se pode verificar na figura 1.1.

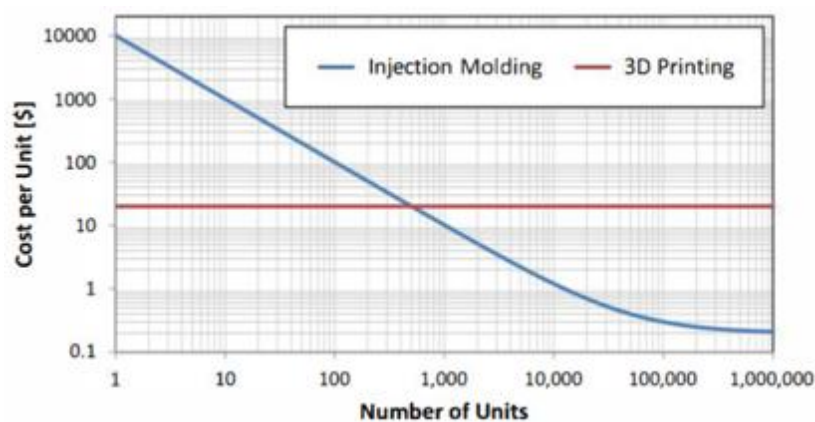


Figura 1.1 - Comparação de custos de produção entre a utilização da impressão 3D e de um método convencional (moldagem por injeção), em função do número de peças produzidas [5]

## 1.2 Objetivo do trabalho

A presente dissertação tem como principal objetivo estudar, a influência de alguns parâmetros de produção em algumas propriedades dimensionais e mecânicas de peças feitas com o aço AISI 316L, produzidas através da impressão 3D e utilizando o método de impressão SLM (este método apresenta-se desenvolvido no capítulo 3 da presente dissertação).

A impressora que foi utilizada no fabrico das peças foi uma impressora que funciona através do método do *LaserCusing* (variante do SLM da marca *Concept Laser*) e encontra-se na empresa Dimlaser sediada na zona de Leiria.

As peças a produzir foram provetes retangulares normalizados segundo a norma ASTM E8M-01, todas com a mesma geometria. Estes provetes foram produzidos fazendo variar percentualmente em relação ao seu valor nominal alguns parâmetros de produção. É de referir que a empresa Dimlaser não está autorizada pelo fabricante do equipamento, nem a fazer alterações na maioria dos parâmetros nem a divulgar os seus valores. Os parâmetros da impressora 3D cujo valor nominal foi alterado foram a potência do laser, a espessura das camadas da peça e a velocidade do laser.

As peças produzidas foram submetidas a uma avaliação dimensional e a uma avaliação da rugosidade, assim como a ensaios de tração uniaxial e de dureza, que permitiram inferir as suas propriedades mecânicas. Devido à grande quantidade de provetes que seriam necessários, os ensaios de fadiga e de torção não foram realizados, por questões económicas e de disponibilidade da empresa. Também não foi possível obter os tempos de produção dos provetes para análises relativas a produtividade.

Na fase final, utilizando um *software* de estatística, foi contruída uma tabela referente ao planeamento de experiências que se inclui na Metodologia da Superfície de Resposta. Desta forma, foi possível inferir a influência dos parâmetros avaliados, relativamente às propriedades a estudar, obtendo-se a conjugação ótima de parâmetros. Com este estudo, pretende-se alcançar uma melhoria das propriedades das peças obtidas por impressão 3D (usando a metodologia de *LaserCusing* ou SLM) na impressora em causa.

## 1.3 Organização da dissertação

A organização desta dissertação centrou-se em nove capítulos, divididos em vários subcapítulos. Assim, no primeiro capítulo foi apresentado o conceito e principais vantagens e desvantagens do fabrico aditivo, seguindo-se a indicação dos principais objetivos a alcançar neste trabalho, bem como a organização da dissertação.

No capítulo dois, foram desenvolvidos os processos de impressão 3D e foi feita a caracterização do método utilizado pela impressora M1 *Cusing*, uma vez que foi a impressora utilizada na

produção dos provetes estudados nesta dissertação. Foram ainda apresentadas as vantagens, as desvantagens e os parâmetros de funcionamento deste processo.

O capítulo três incidiu sobre a apresentação da impressora 3D M1 *Cusing*, realçando as suas características técnicas e as vantagens e desvantagens da mesma.

No capítulo quatro foi feita uma apresentação da metodologia utilizada ao longo da dissertação, desenvolvendo-se a metodologia da superfície de resposta (RSM) e o planeamento de experiências (DoE). Para esse efeito, foram estabelecidas as variáveis e as respostas a estudar bem como os parâmetros a avaliar e a matriz de planeamento fatorial.

O capítulo cinco abordou todo o processo de produção de peças na impressora 3D M1 *Cusing*. Para o efeito, foram apresentados a geometria e dimensões dos provetes estudados, bem como o material utilizado na sua construção.

O capítulo seis, traduziu-se nos ensaios realizados que permitiram a avaliação dos provetes produzidos pela impressora 3D referida anteriormente, através da avaliação dimensional dos provetes antes da retificação, da medição da sua rugosidade, da avaliação metalográfica, da retificação dos provetes, da avaliação dimensional dos mesmos após a retificação, da medição da dureza dos provetes e do ensaio de tração uniaxial.

No capítulo sete, foram apresentados todos os resultados obtidos, nomeadamente os resultados experimentais, o seu tratamento estatístico e a interpretação dos mesmos.

O capítulo oito apresenta as conclusões finais do trabalho. Neste capítulo, são também feitas considerações futuras, onde são apresentadas sugestões de metodologias e estudos a serem desenvolvidos, para assegurar a continuação dos trabalhos/estudos desenvolvidos ao longo desta dissertação.

# 2

## Impressão 3D e métodos de impressão

### 2.1 Caracterização do processo de impressão 3D

A prototipagem rápida (PR) é a conjugação de três tecnologias, sendo elas a desenho assistido por computador (CAD), o fabrico assistido por computador (CAM) e o controlo numérico computacional (CNC) [2].

A PR refere-se a uma variedade de diferentes processos de fabrico para produzir objetos tridimensionais com base em modelos CAD, através da sucessiva adição de camadas.

Para que esta produção seja efetuada, são necessárias oito etapas fundamentais (como se pode verificar na figura 2.1) em qualquer um dos processos de PR, sendo elas: a conceptualização e conversão de CAD para STL, a transferência e manipulação do arquivo STL na impressora em causa, a configuração da impressora, a construção do objeto, a remoção e a limpeza do objeto, as operações de pós-processamento e a aplicação do objeto [1].

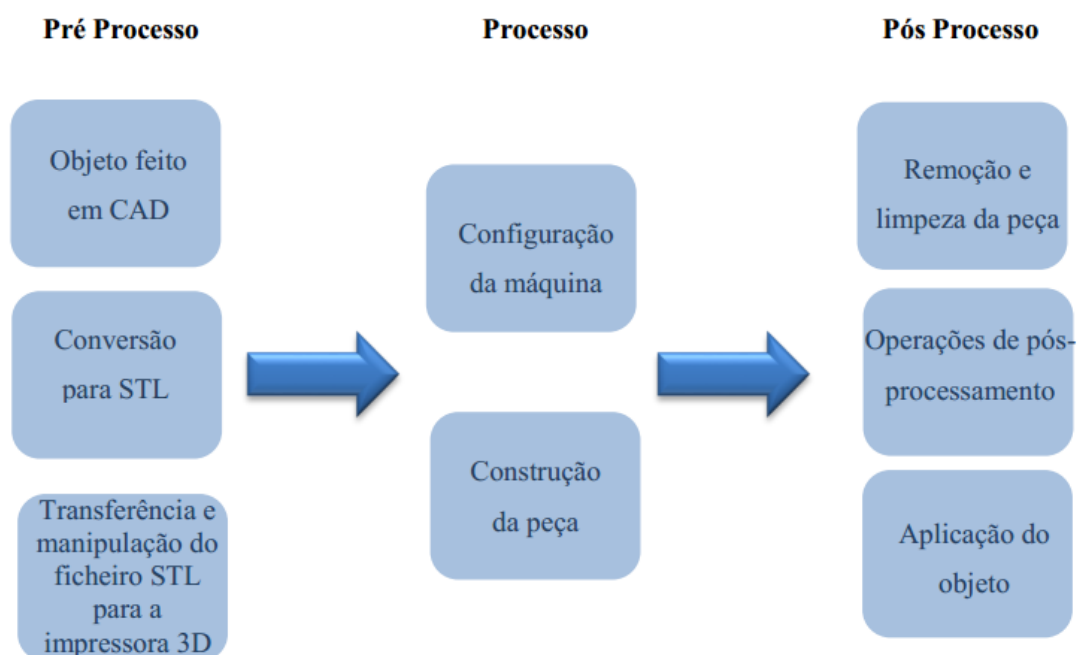


Figura 2.1 - Sequência de processos para a produção de uma peça em impressão 3D

Após o processo de produção da peça ou objeto, outras etapas podem ser ou não implementadas, como é o caso das operações de acabamento. Por este motivo, há duas possibilidades de implementação onde os processos de prototipagem rápida podem ser inseridos, sendo eles:

- A produção de peças por impressão 3D, onde, numa fase posterior serão introduzidas num sistema de fabrico industrial, servindo apenas de protótipo/exemplo para a produção em massa de peças semelhantes, utilizando para isso outros métodos de fabrico.
- A peça produzida por impressão 3D, após as operações de acabamento, já está pronta a ser comercializada/utilizada. Neste caso, o fabrico de peças por impressão 3D já faz parte do sistema de fabrico industrial ao contrário do caso anterior, onde a impressão 3D apenas servia como forma de obtenção de um protótipo e não de uma peça final [6].

### 2.2 Métodos de impressão 3D

Como referido anteriormente, desde os anos 80, os avanços tecnológicos têm permitido a obtenção de novas formas de produção de peças utilizando as impressoras 3D. Hoje em dia existem diversos métodos de impressão 3D como se pode verificar na figura 2.2.

Os métodos mais utilizados são os seguintes:

- *Stereolithography apparatus (SLA)*;
- *Selective Laser Sintering (SLS)*;
- *Selective Laser Melting (SLM)*;
- *Fused Deposition Modelling (FDM)*;
- *PolyJet*;
- *Laser Engineered Net Shaping (LENS)*;
- *Laminated Object Manufacturing (LOM)*.

Relativamente aos tipos de impressoras, existem três famílias de impressoras 3D; a primeira família corresponde às impressoras que utilizam o método de ligação de matérias primas em fase líquida para produzir o objeto; a segunda família utiliza o método da deposição de camadas de matéria prima para produzir o objeto e a terceira utiliza o método de ligação de matérias primas em fase sólida para produzir o objeto, como se pode verificar na figura 2.2 [7].

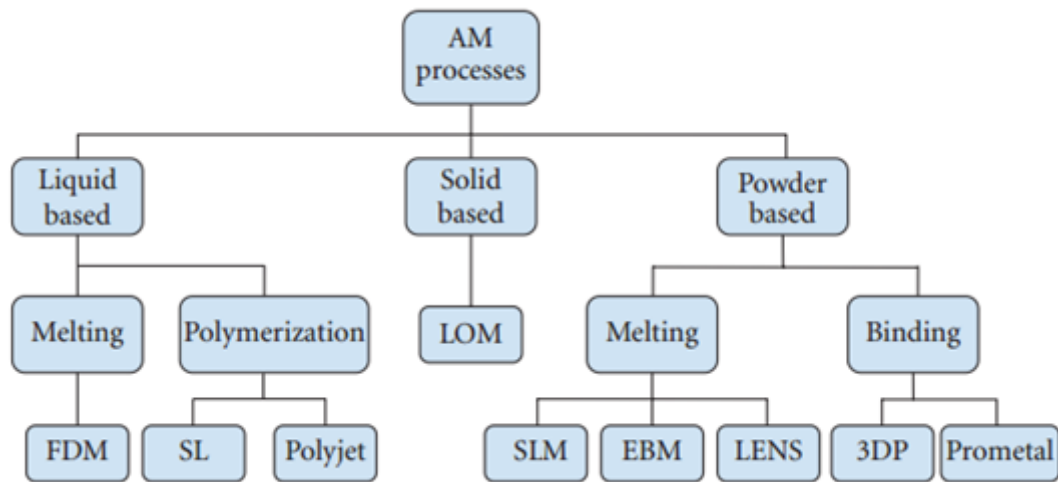


Figura 2.2 - Principais variantes da impressão 3D [8]

### 2.3 Família das impressoras que fundem, ligam ou colam a matéria prima

Esta família de impressoras 3D é composta por impressoras que usam um processo de ligação seletiva para fundir ou ligar matéria-prima em camadas. Esta foi a abordagem utilizada pelas primeiras impressoras comerciais. As quatro variantes deste método são a estereolitografia (SLA), a sinterização a laser (SLS), a impressão tridimensional (3DP) e a fusão seletiva por laser (SLM) [7].

#### 2.3.1 Selective Laser Melting (SLM)

A comercialização das impressoras 3D de fusão seletiva por laser (SLM), ocorreu no início dos anos 2000 na *MCP Technology*, antes designada por *F&S Company*. Em 2011, esta empresa alterou a sua designação para *SLM Solutions*.

Em 2004, M. Fockele criou a “*Realizer GmbH*”, tornando-se uma das grandes impulsionadoras desta tecnologia. Por sua vez a empresa “*ConceptLaser*”, patenteou uma tecnologia muito semelhante ao SLM assumindo a designação de *LaserCusing®*. [9]

A SLM é uma das técnicas com maior potencial no campo do desenvolvimento da prototipagem rápida e fabricação aditiva (AM). Este método de impressão permite produzir peças metálicas de grande complexidade através da fusão seletiva de camadas sucessivas de pós metálicos. Constitui-se como uma excelente alternativa aos métodos tradicionais, uma vez que, as peças produzidas por esta técnica apresentam densidades muito próximas da densidade do produto maciço, sendo possível produzir peças com elevada complexidade e com boas características mecânicas.

O fabrico de peças sem a utilização de ferramentas e a liberdade geométrica oferecida pelo SLM, apresentam-se como as principais características deste método. Por este motivo, o SLM é muito

utilizado na produção de estruturas complexas e produtos leves que são altamente desejados pelos diversos setores de engenharia.

O SLM, esquematizado na figura 2.3, permite novos métodos de projeto, nomeadamente na produção de estruturas leves, cujo fabrico utilizando processos de fabrico convencionais não era possível. [10]

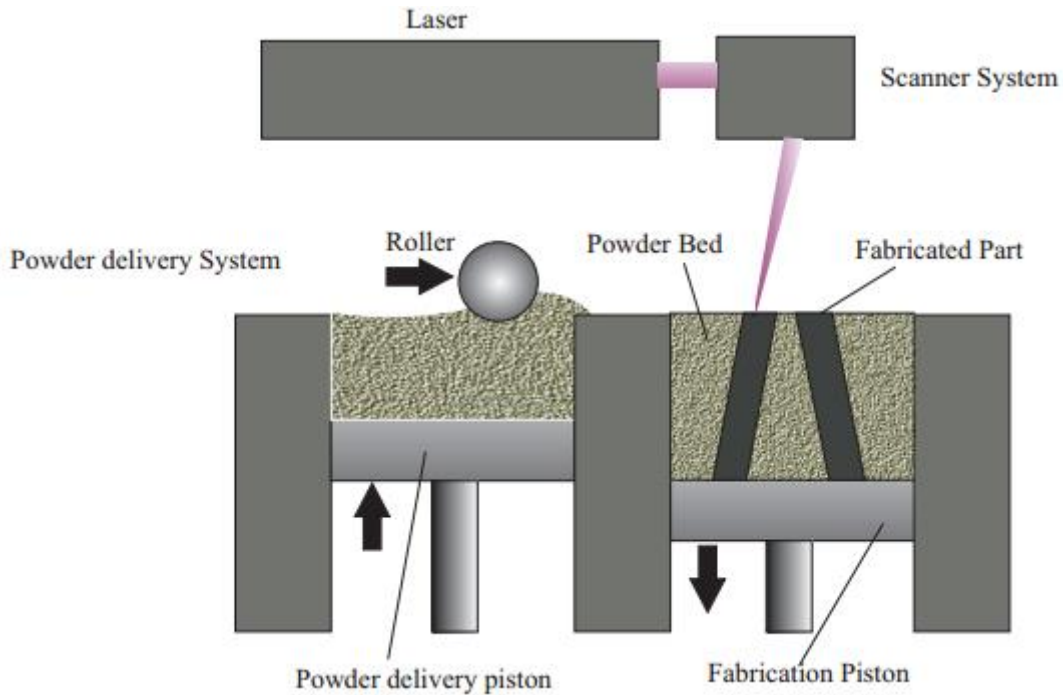


Figura 2.3 - Representação esquemática do funcionamento e dos componentes de uma impressora 3D de SLM [11]

### 2.3.2 Vantagens:

Nesta tecnologia, como o próprio nome indica, ocorre a fusão completa dos pós metálicos. Por consequência, este método é capaz de produzir produtos densos com uma forma muito semelhante à desejada e num único processo; situação que não ocorre quando são utilizados os métodos convencionais, sendo esta a principal vantagem deste processo.

Como pode ser verificado na figura 2.4, outra vantagem deste método é o custo por peça, que é constante e muito inferior quando comparado com os métodos tradicionais, nomeadamente quando comparado com a injeção por molde para pequenas quantidades de produção.

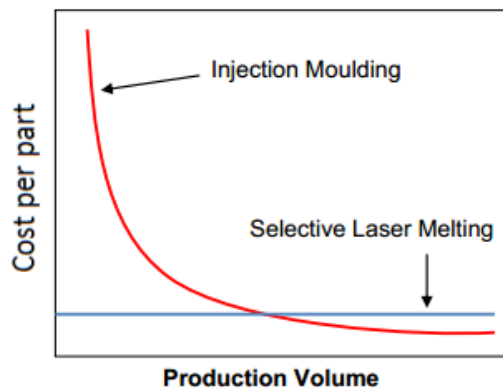


Figura 2.4 - Comparação dos custos de produção de peças usando SLM e usando a injeção por molde [12]

### 2.3.3 Desvantagens:

O SLM possui alguns problemas gerais, como é o caso das tensões internas, da distorção das peças devido a intensos gradientes de temperatura e devido à contração das peças. Os defeitos típicos do processo SLM são os seguintes [9]:

- A porosidade, o pó residual, as camadas não ligadas e o fenómeno de bolha (*balling*), sendo este último um problema mais substancial. *Balling* corresponde à formação de esferas de pequenas dimensões, aproximadamente com o diâmetro do feixe e pode resultar na formação de pistas de varredura descontínuas;
- O risco de movimentação da plataforma de fusão pode resultar em maus acabamentos superficiais. O material processado também pode sofrer os efeitos da vaporização, sendo o pré-aquecimento dos pó a temperaturas mais altas, a forma mais eficaz para evitar esses problemas. Além disso, o uso de aditivos para reduzir a tensão superficial também é sugerido para diminuir os defeitos do processo. O uso de diferentes tipos de laser pode levar à redução de tensões térmicas, da porosidade e da contração;
- Manter a precisão dimensional das peças é um fator que dificilmente é alcançado em tecnologias que utilizam lasers de alta potência, como é o caso desta tecnologia;
- A rugosidade superficial que as peças apresentam também é um fator a ter em conta;
- Outra desvantagem é o facto de este ser um método de produção de peças menos competitivo, principalmente quando se trata de uma produção em grande escala, sendo nesse caso considerado um método pouco viável do ponto de vista económico [9].

### 2.3.4 Parâmetros de funcionamento de impressoras 3D de SLM:

Os parâmetros do processo podem ser agrupados em quatro categorias:

- Parâmetros relacionados com o laser (potência do laser, tamanho do ponto, duração do pulso, frequência de pulso, etc.);
- Parâmetros relacionados com a digitalização ou leitura (velocidade de digitalização);
- Parâmetros relacionados com o pó (forma, tamanho e distribuição das partículas, densidade da camada de pó, espessura da camada, propriedades dos materiais, etc.);
- Parâmetros relacionados com a temperatura (temperatura do leito de pó, temperatura do alimentador de pó, uniformidade de temperatura, etc.) [13].

A maioria destes parâmetros está fortemente interdependente, interagindo mutuamente. Por exemplo, a potência de laser requerida aumenta tipicamente com o aumento do ponto de fusão do material que estiver a ser usado e quando o leito de pó se encontrar a uma temperatura mais baixa. A potência de laser também varia de acordo com as características de absorção do leito de pó, sendo este influenciado pelo tipo de material e forma do pó e pelo seu tamanho e densidade de empacotamento [13].

Os parâmetros com mais influência nas características finais da peça a ser impressa são:

- A potência do laser ( $P$ );
- A distância entre varrimentos ( $DV$ );
- A espessura de camada ( $ec$ );
- A velocidade do laser ( $vl$ ).

Estes parâmetros incluem-se na equação 2.1 que corresponde à equação da densidade de energia.

$$Densidade\ de\ energia = \frac{P[W]}{ec[mm] \cdot DV[mm] \cdot vl \left[ \frac{mm}{s} \right]} \left[ \frac{J}{mm^3} \right] \quad (2.1) \quad [13]$$

Nesta dissertação, os parâmetros que serão avaliados são: a potência do laser, a velocidade do laser e a espessura por camada de material porque são os parâmetros em que, de forma empírica, os operadores da impressora M1 *Cusing* consideraram ser os mais influentes nas propriedades que serão objeto de estudo [13].

#### 2.4 Família das impressoras que depositam a matéria prima em camadas

Este tipo de impressoras utilizam uma deposição seletiva de matéria prima através da cabeça de impressão ou bocal de impressão. Estas impressoras usam material polimérico macio que será fundido para que a deposição seja possível.

O nome técnico para a técnica de impressão usada neste tipo de impressoras é a “*fused deposition modeling*” ou “modelagem de deposição fundida” ou simplesmente FDM. As impressoras de FDM surgiram nos anos 80 do século passado por ação de Scott Crump.

A primeira fase de impressão, corresponde à delimitação do contorno da base da peça que se quer construir; de seguida, a cabeça de impressão vai cobrir o interior do contorno da base da peça com o material polimérico, dando desta forma origem à primeira camada de material.

Depois de gerada a primeira camada, a cabeça de impressão vai subir milimetricamente, repetindo o processo para depositar uma nova camada. Este processo será repetido inúmeras vezes até que seja obtida a forma final da peça. Por vezes, dependendo da complexidade e dimensão da peça, são necessários milhares de camadas, pelo que este é um processo que pode levar horas ou dias. Este processo de impressão 3D é muito silencioso e pode usar tecnologias simplistas o que permitiu o surgimento de impressoras *low cost*. Outra das vantagens é a possibilidade de utilização de matérias primas variadas, podendo ser utilizado qualquer material desde que seja possível fazê-lo passar através da cabeça de impressão.

A principal desvantagem das impressoras de deposição seletiva é a exclusiva utilização de materiais que possam ser extrudidos através da cabeça de impressão [7].



# 3

## Impressão de peças utilizando a impressora 3D M1 *Cusing* e Metodologia

A impressora 3D *M1 Cusing*, representada na figura 3.1, é uma impressora que funciona através de um método semelhante ao SLM. Este método foi patenteado pela empresa *Concept Laser* e foi denominado como *LaserCUSING* [14].



Figura 3.1- Impressora 3D M1 *Cusing* da *Concept Laser* [14]

### 3.1 Funcionamento da impressora (*LaserCUSING*)

Este processo de impressão 3D, representado na figura 3.2, corresponde a uma ramificação do processo de SLM, uma vez que, igualmente ao que acontece no SLM, o *LaserCUSING* (representação esquemática na figura 3.1) é um modo de impressão de peças que utiliza lasers para fundir pós metálicos. Esta fusão ocorre localmente por um laser de fibra de alta energia.

Durante o processo de movimentação do laser, o pó metálico é completamente fundido. Durante a produção de cada camada, o material constituinte da mesma solidifica imediatamente. Isto significa que o componente acabado é fornecido com propriedades ao nível do material quase ideais, sendo por esse motivo uma vantagem comparativamente com os processos convencionais. O contorno do componente é produzido através da movimentação orientada do feixe de laser que é conseguida devido à utilização de uma unidade de deflexão de espelho (*scanner*).

Como referido anteriormente, o componente é construído camada por camada. Após a produção da primeira camada, a parte inferior do espaço de instalação (local onde a peça está a ser produzida) desce verticalmente uma distância que corresponde à espessura de cada camada. De seguida, é libertado mais pó, que será novamente fundido pelo laser, formando-se desta forma a segunda camada. Este processo repete-se de forma análoga até que a peça esteja totalmente produzida.

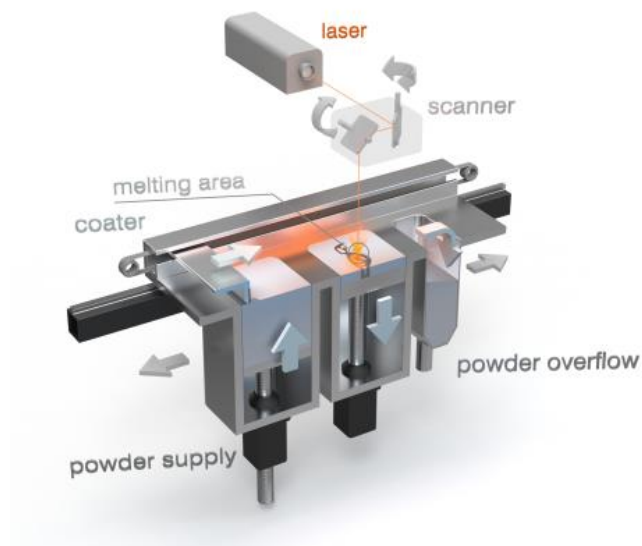


Figura 3.2 - Método de impressão de peças metálicas *LaserCUSING* [14]

### 3.1.1 Vantagens do processo

Este processo oferece vantagens, tais como [14]:

- Liberdade de geometria – Utilizando esta tecnologia, é possível obter peças com geometrias complexas que de um modo geral, não podem ser obtidas pela utilização de métodos convencionais. Usando o *LaserCUSING*, estas peças complexas podem ser produzidas sem usar qualquer ferramenta. Desta forma, não há limites para o fabrico de componentes, sendo possível obter estruturas ocas ou com alterações geométricas internas, de uma forma simples e rápida;

- Tecnologia verde – O processo *LaserCUSING* é um processo de produção que praticamente não produz desperdícios. O pó de metal que não foi fundido pode ser totalmente reutilizado, não sendo perdido qualquer tipo de material. Além disso, este processo não emite qualquer tipo de composto poluente. Uma vez que o sistema de lasers utilizado tem alta eficiência, a maior parte da energia que é introduzida é convertida em capacidade de trabalho por parte da impressora;
- O Processo de construção camada em camada do *LaserCUSING*, permite o fabrico de moldes com contornos fechados e componentes que podem ser utilizados diretamente nos setores da joalheria, médico, odontológico, automóvel e aeroespacial, entre outros [14].

### 3.1.2 Desvantagens do processo

Uma vez que este processo é muito semelhante ao processo de SLM descrito no capítulo 2, as suas desvantagens serão idênticas ao mesmo.

## 3.2 Características da impressora

A tabela 3.1 apresenta as principais características da impressora 3D *M1 Cusing*.

Tabela 3.1- Características principais da impressora 3D *M1 Cusing* [14]

<b>Tecnologia</b>	<i>LaserCUSING</i>
<b>Dimensões do tanque</b>	250 x 250 x 250 mm (x, y, z)
<b>Espessura das camadas</b>	20 a 80 micrómetros
<b>Velocidade de produção</b>	2 a 15 cm <sup>3</sup> /h (dependendo do material e da potência do laser)
<b>Sistema do laser</b>	Fibre laser 200W ou 400W
<b>Máxima velocidade de scanner</b>	7m/s
<b>Diâmetro do foco do laser</b>	50 micrómetros
<b>Sistema de fixação de referência</b>	EROWA, System 3R
<b>Cargas conectadas</b>	Consumo máximo de energia de 5.5 kW / 6.8 kW Fonte de energia de 3/N/PE AC 400V, 32 A Ar comprimido a 5 bar
<b>Fornecimento de gás inerte</b>	1 conexão de gás fornecida e um gerador externo de azoto (N <sub>2</sub> )
<b>Consumo de gás inerte</b>	< 1 m <sup>3</sup> /h
<b>Dimensões</b>	2323 x 1507 x 2308 mm (W x D x H)

<b>Peso</b>	Aproximadamente 1500 kg
<b>Condições de funcionamento</b>	15 a 35 °C

Uma particularidade desta impressora é o facto de poderem ser produzidas peças utilizando diferentes parâmetros (como a potência do laser, a velocidade do laser, a espessura por camada, o tipo de laser entre outros) na mesma produção, desde que o volume total de peças não ultrapasse o volume da plataforma de produção.

### 3.3 Metodologia utilizada

Para o desenvolvimento deste estudo procedeu-se, numa primeira fase, à produção de um provete retangular normalizado com área de secção transversal de 6 x 2 (mm<sup>2</sup>). Para esse efeito, o referido provete foi desenhado tridimensionalmente no *software* de CAD *solidworks*. De seguida, o ficheiro foi convertido para o formato STL, formato este que permite a sua leitura por parte da impressora 3D.

Relativamente ao processo de produção, a peça foi produzida no aço 316L e utilizando a impressora 3D M1 *Cusing da Concept Laser*, cujas características foram descritas no capítulo 4. Tendo como base os conhecimentos da empresa, as variáveis que foram avaliadas e cujos valores nominais foram alterados percentualmente foram os seguintes:

- a potência do laser;
- a espessura por camada da peça (resolução da peça);
- a velocidade de funcionamento do laser.

É de salientar que na produção dos provetes foram sendo alterados os valores destes parâmetros com o objetivo de se realizarem ensaios que permitissem efetuar a sua avaliação.

Uma vez que os provetes foram produzidos por impressão 3D, é normal que existam irregularidades localizadas principalmente na zona da plataforma de produção. Por esse motivo, antes da realização de qualquer ensaio, foi necessário proceder-se à maquinação dos mesmos, eliminando essas irregularidades e rugosidades.

Antes de se proceder à maquinação foi necessário fazer uma avaliação metalográfica, para averiguar se a microestrutura dos provetes permitia essa operação. Como os resultados desta avaliação foram positivos, procedeu-se então à maquinação e à realização dos respetivos ensaios.

É de salientar que a avaliação mecânica dos provetes foi feita através da realização de ensaios de tração uniaxial, tendo sido também realizada uma avaliação dimensional, de rugosidade e de dureza. Seria importante para este estudo obter igualmente resultados sobre o comportamento do provete perante ensaios de fadiga e de torção. No entanto, como estes ensaios requerem a

utilização de um grande número de provetes, o que pressupunha custos elevados por parte da empresa *Dimlaser* (colaboradora neste projeto), não foi possível realizar esses estudos.

Após a realização desta fase experimental da dissertação, para analisar os resultados obtidos, foi utilizado um software de estatística (*Statistica*) que permitiu a representação de superfícies através da Metodologia da Superfície de Resposta, o que facilitou a análise dos resultados e as relações entre as propriedades que se pretendiam avaliar.

A figura 4.1 representa uma sequência de imagens de toda a metodologia seguida.

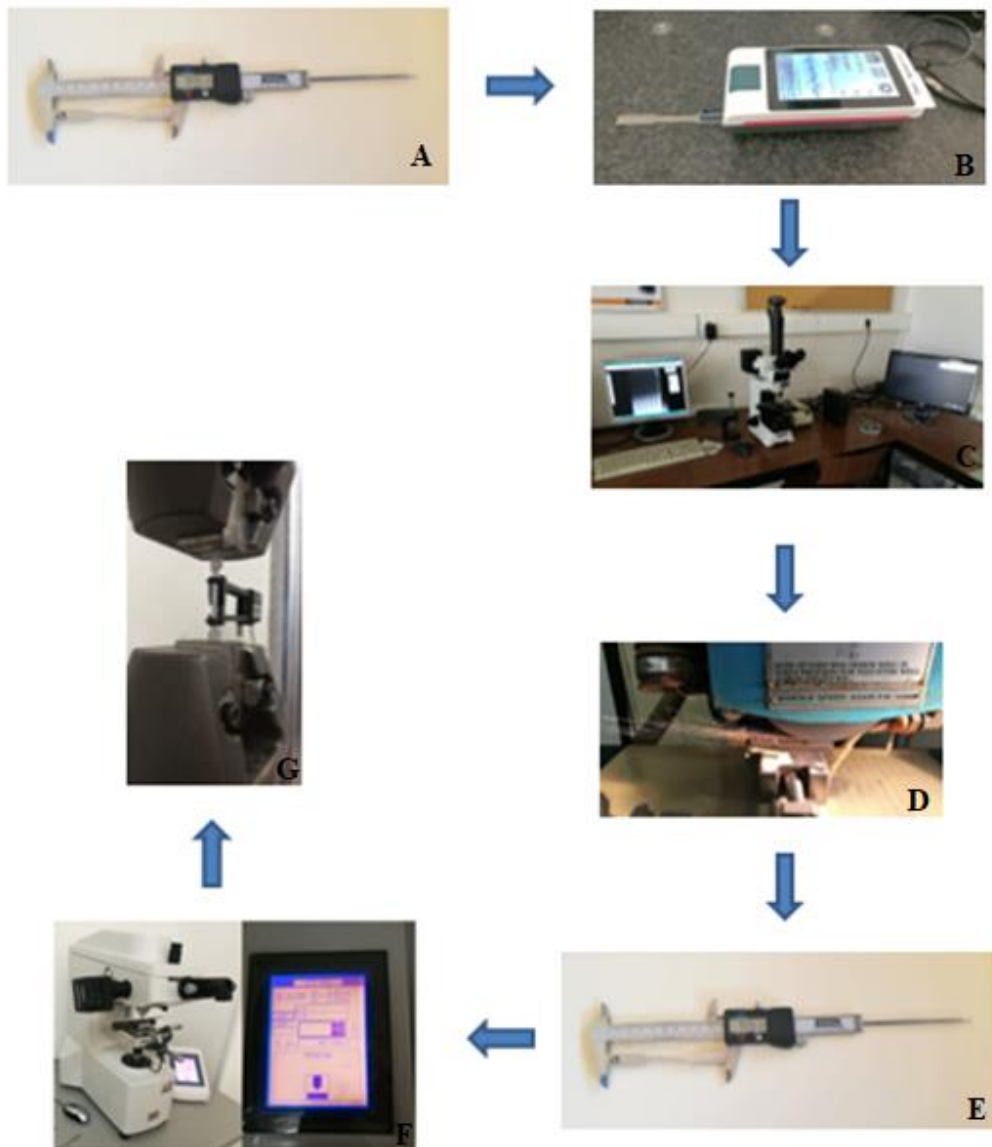


Figura 3.3 - Sequência de imagens que representam os ensaios e medições realizadas bem como a ordem pela qual foram executados.

Na figura 3.3, seguiu-se a seguinte ordem:

- A – Medição dos provetes antes da sua retificação;

- B – Medição da rugosidade dos provetes antes da sua retificação;
- C – Avaliação metalográfica dos provetes;
- D – Retificação dos provetes;
- E – Medição dos provetes após a sua retificação;
- F – Medição da dureza dos provetes;
- G – Ensaio de tração uniaxial.

### 3.3.1 Metodologia da Superfície de Resposta (RSM) e Planeamento de experiências (DoE)

O conceito “Metodologia da Superfície de Resposta” teve a sua génese a partir da perspetiva gráfica gerada após a análise e representação do modelo matemático e foi desenvolvida pelos Laboratórios Box e Col nos anos 50 do século XX [15].

Esta metodologia (RSM) tem sido utilizada de forma crescente a nível industrial, sobretudo em artigos científicos que são usados para otimizar processos de produção. Esta metodologia consiste num conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas que se baseiam no ajuste de modelos empíricos, através da análise dos dados experimentais obtidos. Para se efetuar esta análise, são utilizadas funções polinomiais lineares ou quadráticas para descrever o sistema estudado e, conseqüentemente, explorar (modelar e deslocar) as condições experimentais até à sua otimização [15].

Para a aplicação desta metodologia (MSR), podemos utilizar algumas das seguintes etapas:

- i. a seleção de variáveis independentes, que originem grandes efeitos no sistema através de estudos de triagem e delimitação da região experimental, de acordo com o objetivo do estudo e de acordo com a experiência do investigador;
- ii. a realização da atividade experimental de acordo com a matriz experimental selecionada;
- iii. o tratamento matemático-estatístico dos dados experimentais obtidos através do ajuste de uma função polinomial;
- iv. a avaliação da aptidão do modelo;
- v. a verificação da necessidade e da possibilidade de realizar um deslocamento em direção à região ótima;
- vi. obtenção dos valores ótimos para cada variável estudada, ou seja, a experimentação termina quando esta se tornar antieconómica. [15].

Esta adequação sequencial de modelos será o início de várias etapas a desenvolver de forma a serem alcançadas as condições ótimas ou aceitáveis de todo o processo.

Um polinómio do primeiro grau com k variáveis tem a seguinte representação:

$$Y_u = \beta_0 + \beta_1 X_{U1} + \beta_2 X_{U2} + \dots + \beta_K X_{Uk} + \varepsilon_U \quad (4.1)$$

Onde:

- $Y_u$  é a resposta do modelo;
- $\beta_K$  são os coeficientes de regressão;
- $X_{ui}$  o valor da  $i$ ésima variável na  $u$ ésima experiência;
- $\varepsilon_U$  o erro ocorrido na observação de  $Y_u$ .

Este é o modelo mais simples possível e é o mais adequado quando [16]:

- O que se pretende estudar é o comportamento das respostas apenas dentro da área limitada do espaço das  $k$  variáveis e se assume que a resposta em superfície pode ser aproximada pelo hiperplano;
- Na fase inicial de uma atividade experimental, quando não é conhecida a forma da superfície, tendo a vantagem de exigir um baixo número de experiências e assim reduzir ao mínimo o custo da atividade experimental;
- O objetivo da atividade experimental seja conhecer a importância relativa das variáveis [16].

Para determinar os termos significativos dessa regressão é usado o teste "t". O valor de  $t$  para cada termo é dado pelo quociente entre o respectivo coeficiente de correlação e o erro associado. O valor de  $t$  obtido é comparado com o valor tabelado da distribuição "t-Student" em que  $\alpha$  é o nível de significância ( $1-\alpha$  é o intervalo de confiança, ou de aceitação). Se o valor absoluto calculado de  $t$  exceder o valor tabelado, então, nesse caso, o termo é significativo.

O resultado da análise do conjunto de dados experimentais é normalmente tabelado na "Tabela de análise de variância", também designada por ANOVA, que apresenta a configuração representada na tabela 3.2 [16]:

Tabela 3.2 - Tabela de análise de variância (ANOVA)

Fonte de variação	SS	gl	MS	F
<b>Regressão</b>	$SSR$	$p-1$	$SSR/(p-1)$	$[SSR/(p-1)] / [SSE/(N-p)]$
<b>Resíduos</b>	$SSE$	$N-p$	$SSE/(N-p)$	
<b>Total</b>	$SST$	$N-1$		

Para testar a significância do modelo matemático resultante da regressão, é usualmente utilizado o teste da hipótese nula  $H_0$  (em que todos os  $\beta$ 's são zero, com exceção de  $\beta_0$ ) por oposição à hipótese alternativa  $H_A$  (em que pelo menos um dos  $\beta$ 's não é zero,

com exceção de  $\beta_0$ ). Este teste, assumindo a normalidade da distribuição dos erros, utiliza a função  $F$  cujo valor é determinado pela razão expressa na tabela supracitada. Após confirmada a hipótese nula, a razão  $F$  segue uma distribuição  $F$  com  $(p-1)$  e  $(N-p)$  graus de liberdade, respectivamente. De seguida, com o valor de  $F$  calculado, este será comparado com o valor tabelado de  $F(p-1, N-p, \alpha)$ , sendo  $\alpha$  o nível de significância adotado. Caso se verifique que o valor calculado de  $F$  exceda o valor tabelado, então a hipótese nula é rejeitada no  $\alpha$  nível de significância. Podemos então concluir que nem todos os coeficientes estimados são nulos e que a variação inerente ao modelo é significativamente maior que a parte da variação não considerada. Desta forma, o modelo da regressão é aceite [16].

Na presente dissertação, quer para determinar os termos significativos da regressão (distribuição  $t$ ), cuja representação se encontra na tabela 3.3, quer para testar a significância do modelo matemático proveniente da regressão (distribuição  $F$ ), que está representado na tabela 3.4, foi considerado  $\alpha = 0.05$  o que pressupõe um intervalo de confiança de 95% [16].

Tabela 3.3 - Valores percentuais da distribuição *t-student*



n	$\epsilon=0.4$	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001
1	0.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.31
2	.289	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.326
3	.277	.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.213
4	.271	.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5	0.267	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893
6	.265	.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7	.263	.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785
8	.262	.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501
9	.261	.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297
10	0.260	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144
11	.260	.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025
12	.259	.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930
13	.259	.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852
14	.258	.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15	0.258	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16	.258	.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686
17	.257	.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646
18	.257	.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610
19	.257	.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20	0.257	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552
21	.257	.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527
22	.256	.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505
23	.256	.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485
24	.256	.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467
25	0.256	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450
26	.256	.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435
27	.256	.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421
28	.256	.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408
29	.256	.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396
30	0.256	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385
40	.255	.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307
60	.254	.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232
120	.254	.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.160
$\infty$	.253	.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090

Tabela 3.4 - Valores percentuais (5%) da distribuição F de *Snedcor*

m \ n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.4	109.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	243.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

Geralmente também é calculado o chamado coeficiente de correlação,  $R^2$ ,

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \tag{4.2}$$

que pode ser interpretado de duas formas:

- como a proporção da variação total dos valores experimentais relativamente à média explicada pela equação de regressão;
- como a proporção dos valores previstos pelo modelo que expressam as respostas do processo.

Quando um modelo representa exatamente a resposta de um processo, tem  $R^2 = 1$ , apresentando-se assim como sendo um modelo ideal.

O coeficiente de correlação ajustado,  $R_A^2$  [16],

$$R_A^2 = 1 - \frac{SSE/(N - p)}{SST/(N - 1)} \tag{4.3}$$

é também utilizado com alguma frequência pois representa a diminuição da magnitude do erro ocorrido na equação de regressão quando comparado apenas com a média das respostas.

Esta metodologia RSM possibilita a utilização de vários modelos, desde os mais simples aos mais complexos. No entanto, o modelo a utilizar nesta dissertação será a hipótese mais simples possível que corresponde a um modelo do primeiro grau, pois entende-se que será o modelo mais adequado a usar numa fase inicial da experimentação, como é o caso [16].

Neste modelo cada variável é apenas considerada em dois níveis. Estes níveis são codificados para gerarem valores de -1 e de +1 para as correspondentes variáveis codificadas,  $x_i$ . Ao considerar todas as possíveis combinações dos níveis das  $k$  variáveis ( $2^k$  pontos), este plano de experiências é também conhecido por arranjo fatorial  $2^k$ . Geometricamente, consiste nos vértices de um hiper cubo com  $k$  dimensões [16].

### 3.3.2 Estabelecimento de variáveis e respostas a estudar

Para cada atividade experimental, é normal a existência de numerosas variáveis que podem afetar a resposta do sistema a ser estudado, tornando-se praticamente impossível identificar e controlar as pequenas contribuições de cada uma, no que diz respeito à sua influência. Por consequência, é necessário selecionar as variáveis com maiores efeitos e influências para o sistema. Deste modo, deve ser realizada uma triagem, com o intuito de determinar quais são as variáveis experimentais e quais são as suas interações que apresentarão efeitos mais significativos no sistema [16].

No contexto desta dissertação, para as respostas a estudar foram selecionadas as seguintes propriedades:

- Rugosidade;
- Dureza;
- Tensão de cedência;
- Tensão de rotura;
- Tensão a que ocorre a fratura;
- Extensão nominal.

A seleção das variáveis a estudar, foi feita, de acordo com os conhecimentos dos responsáveis da empresa *Dimlaser*, tendo sido consideradas as três mais importantes. Assim, selecionaram-se as seguintes variáveis para estudo:

- Potência do laser;
- Espessura por camada;
- Velocidade de funcionamento do laser.

Em suma, pretende-se estudar o efeito de 3 variáveis ( $k$ ) com dois níveis sobre 6 respostas ( $Y$ ), ou seja, será produzida uma matriz de planeamento fatorial completo  $2^3$  [16].

### 3.3.3 Parâmetros a avaliar e Matriz de Planeamento Fatorial

Depois de escolhidos os parâmetros a avaliar, foram efetuados os aumentos e as diminuições percentuais dos seus valores nominais (valores normalmente utilizados na impressora em causa), variações essas que se encontram na tabela 3.5, permitindo desta forma avaliar as suas influências nas características mecânicas das peças produzidas pela impressora M1 *Cusing* da *ConceptLaser*.

Tabela 3.5 - Aumento e diminuição dos parâmetros a avaliar (matriz de planeamento fatorial  $2^3$ )

Conjunto de Provetes	Potência do Laser	Velocidade do Laser	Espessura por camada
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1

A tabela 4.4 corresponde a uma matriz de planeamento fatorial  $2^3$ , como tal apresenta as seguintes características:

- Os sinais de +1 e de -1, correspondem a um aumento ou diminuição percentuais, respetivamente, em relação ao valor normalmente utilizado;
- Em cada parâmetro, os valores aumentados e diminuídos devem ser constantes;
- As percentagens de aumento (+1) ou diminuição (-1) em relação ao valor nominal (0) de cada variável devem constituir valores sensatos dentro do domínio de utilização dessa variável. Como consequência, só poderão ser fixados por uma pessoa conhecedora do processo de impressão;
- Cada provete terá de ser produzido 3 vezes, para que o ensaio de tração seja feito de forma correta e coerente.

# 4

## Produção de peças na impressora 3D M1 *Cusing* e meios utilizados no trabalho experimental

### 4.1 Provetes utilizados

O provete normalizado produzido na impressora 3D, foi um provete retangular com uma secção transversal de  $6 \times 2$  (mm<sup>2</sup>). A forma retangular deveu-se ao facto de estes provetes terem como objetivo serem sujeitos ao ensaio de tração uniaxial, sendo por isso a sua forma definida pela norma ASTM E8M-01. As restantes dimensões estão apresentadas na figura 4.1.

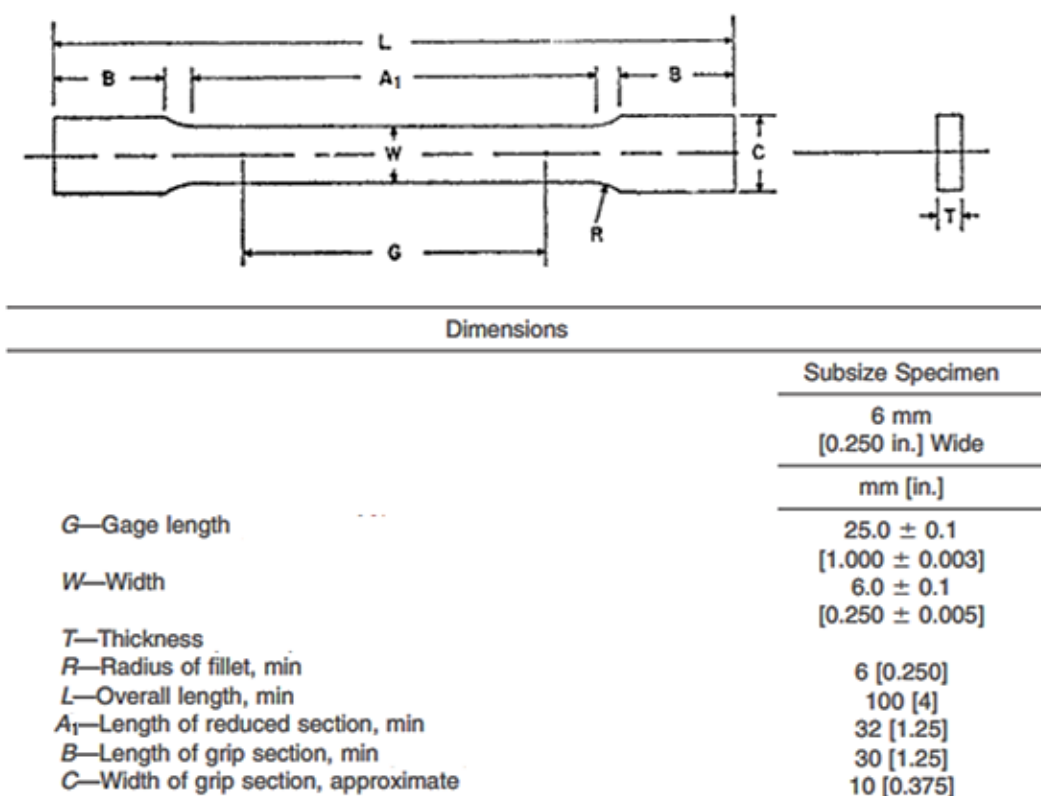


Figura 4.1 - Representação bidimensional dos provetes normalizados e suas dimensões [17]

Para minimizar o erro nos diversos ensaios, foram produzidos 3 provetes iguais em cada uma das 8 experiências perfazendo um total de 24 provetes.

A explicação para a necessidade da produção de 24 provetes encontra-se no capítulo 4. Os 24 provetes e os aumentos e diminuições percentuais dos parâmetros de produção encontram-se na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Provetes e sua localização na tabela de aumentos e diminuições dos parâmetros

Conjuntos	Potência do Laser	Velocidade do Laser	Espessura por camada
Conjunto 1	-1 (1)	-1 (9)	-1 (17)
Conjunto 2	-1 (2)	-1 (10)	+1 (18)
Conjunto 3	-1 (3)	+1 (11)	-1 (19)
Conjunto 4	-1 (4)	+1 (12)	+1 (20)
Conjunto 5	+1 (5)	-1 (13)	-1 (21)
Conjunto 6	+1 (6)	-1 (14)	+1 (22)
Conjunto 7	+1 (7)	+1 (15)	-1 (23)
Conjunto 8	+1 (8)	+1 (16)	+1 (24)

Como se pode verificar na tabela acima, há oito conjuntos de três provetes cada, sendo cada conjunto constituído pelos seguintes provetes:

- Conjunto 1 – 1; 9; 17;
- Conjunto 2 – 2; 10; 18;
- Conjunto 3 – 3; 11; 19;
- Conjunto 4 – 4; 12; 20;
- Conjunto 5 – 5; 13; 21;
- Conjunto 6 – 6; 14; 22;
- Conjunto 7 – 7; 15; 23;
- Conjunto 8 – 8; 16; 24.

#### 4.2 Material utilizado na construção da peça (aço 316L)

O material que foi utilizado na construção da peça foi o aço inoxidável 316L; este material foi introduzido em forma de pó na impressora 3D M1 *Cusing* e foi fundido camada por camada até à produção completa da peça.

O aço do tipo 316L também pode ser denominado por AMS 5507, ASTM A 240 e ASTM A 666. É um aço austenítico cromo níquel inoxidável que contém molibdénio. De referir que o

molibdênio permite uma redução da corrosão da peça final e proporciona um aumento da sua resistência em ambientes sujeitos a altas temperaturas. Por este motivo, este aço apresenta vantagens comparativamente a outros aços, quando sujeitos ao contacto com os ácidos sulfúrico, clorídrico, acético, fórmico e tartárico [18].

O aço do tipo 316L é uma versão do aço do tipo 316, cuja composição apresenta uma menor percentagem de carbono (C) [18].

Este aço é usado geralmente em coletores de escape, peças de forno, permutadores de calor, peças de motores a jato, equipamentos farmacêuticos e fotográficos, guarnição de válvulas e bombas, equipamento químico, digestores, tanques, evaporadores, equipamentos de processamento de têxteis e peças expostas a atmosferas marítimas [18].

Este material é utilizado massivamente em estruturas soldadas, onde a sua imunidade à precipitação de carboneto, (fenómeno que geralmente ocorre durante a soldadura), garante uma ótima resistência à corrosão, sendo dessa forma muito utilizado nessa indústria [18].

O aço 316L apresenta a constituição química que se encontra na tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Composição química do aço 316L [18]

<b>Elemento</b>	Fe	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S
<b>Quantidade (%)</b>	62-72	<0.03	16-18	10-14	2-3	<2	<0.75	<0.045	<0.03

O aço inoxidável 316L tem as seguintes características mecânicas apresentadas na tabela 4.3 [18]:

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável 316L

<b>Dureza</b>	B79 ou 145 HV
<b>Resistência à tração (Limite de rotura)</b>	558 MPa
<b>Resistência à tração (Limite de elasticidade)</b>	290 MPa
<b>Alongamento</b>	50%
<b>Modulo de Elasticidade</b>	193 GPa
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0.25
<b>Módulo de rigidez</b>	77 GPa

### 4.3 Meios utilizados no trabalho experimental

Como foi referido no capítulo anterior, na fase experimental da dissertação foram efetuados os seguintes ensaios/medições:

- Avaliação dimensional dos provetes sem retificação;
- Avaliação do acabamento superficial dos provetes sem retificação;
- Avaliação metalográfica;
- Retificação dos provetes;
- Avaliação dimensional dos provetes após a retificação;
- Medição da dureza;
- Ensaio de tração uniaxial:
  - a. Tensão de cedência;
  - b. Tensão de rotura;
  - c. Tensão de fratura.

#### 4.3.1 Avaliação dimensional dos provetes

Na primeira fase experimental desta dissertação, procedeu-se a uma avaliação dimensional dos 24 provetes produzidos na impressora 3D. Esta avaliação foi feita utilizando um paquímetro digital da marca *Powerfix*, ilustrado na figura 6.1, que possui uma resolução de  $0.01mm$  e uma precisão de  $\pm 0.02mm$  (de acordo com o manual de instruções do instrumento de medição)

A medição dos provetes foi feita tendo como elemento de comparação as dimensões nominais dos provetes gerados no *Solidworks*. As dimensões nominais dos provetes seguem a norma AISI E8M-01 e a sua representação bidimensional encontra-se na figura 5.1.

Como referido anteriormente, foram produzidos oito tipos diferentes de provetes, três vezes cada um. Como se pode verificar na figura 4.2, o valor nominal do comprimento principal (L) era de 100 mm, o valor nominal da largura de ensaio (W) era de 6 mm e o valor nominal da espessura (T) era de 2 mm.



Figura 4.2 - Paquímetro digital da marca *powerfix*, utilizado na valiação dimensional dos provetes produzidos por impressão 3D

#### 4.4 Avaliação do acabamento superficial e da rugosidade

##### 4.4.1 Enquadramento teórico do acabamento superficial e da rugosidade

O acabamento superficial refere-se às irregularidades (picos e vales) que uma superfície apresenta após a sua produção. Por convenção, a topologia da superfície de uma peça é composta por dois componentes: a rugosidade e a ondulação. A rugosidade está relacionada com as irregularidades finas características do próprio processo de fabrico que o trabalho mecânico da superfície pode induzir; por outro lado, a ondulação consiste em irregularidades mais espaçadas, que são frequentemente produzidas por vibrações induzidas pelo processo de maquinagem [19].

Frequentemente, os termos “acabamento de superfície” e “rugosidade” são utilizados de forma indiferenciada devido ao facto de a rugosidade ser quantificada muito mais frequentemente que a ondulação. O acabamento de superfície de qualquer peça deve ser adequado ao tipo de função que a mesma exerce. Por este facto, a importância do estudo do acabamento de superfície deve ser tanto melhor quanto maiores forem as exigências na qualidade superficial da peça final [19].

O principal parâmetro da rugosidade ( $R_a$ ) permite a divisão das superfícies em classes (N). As diferentes classes de rugosidade encontram-se na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Divisão da Rugosidade Média em classes [19]

Classe da Rugosidade	Rugosidade Média ( $R_a$ ) – ( $\mu$ )
N12	50
N11	25
N10	12.5
N9	6.3
N8	3.2
N7	1.6
N6	0.8
N5	0.4
N4	0.2
N3	0.1
N2	0.05
N1	0.03

#### 4.4.2 Procedimento experimental

Nesta fase da dissertação, foram realizadas medições da rugosidade, determinando dessa forma a qualidade e o tipo de acabamento superficial que cada um dos 24 provetes apresentava. Esta medição foi efetuada com a utilização de um rugosímetro da marca *Mahr*, modelo *MarSurf PS 10*, que se apresenta na figura 4.3.



Figura 4.3 - Rugosímetro da marca *Mahr*, modelo *MarSurf PS 10* (duas vistas)

A rugosidade referida anteriormente foi medida apenas numa das superfícies de maior área, por serem zonas onde a medição da rugosidade se torna mais acessível, devido à superioridade das suas dimensões.

## 4.5 Avaliação Metalográfica

### 4.5.1 Identificação da estrutura interna dos provetes

O parâmetro a medir após a obtenção dos resultados referentes à rugosidade foi o comportamento mecânico dos provetes através de ensaios de tração uniaxial.

Uma vez que os provetes foram obtidos por impressão 3D (*LaserCusing*), as superfícies laterais dos mesmos apresentavam alguns defeitos e rugosidades, principalmente na zona de ligação à plataforma de produção onde, ao retirar as peças, é normal a existência de zonas de irregularidade, como se pode verificar na figura 4.4.

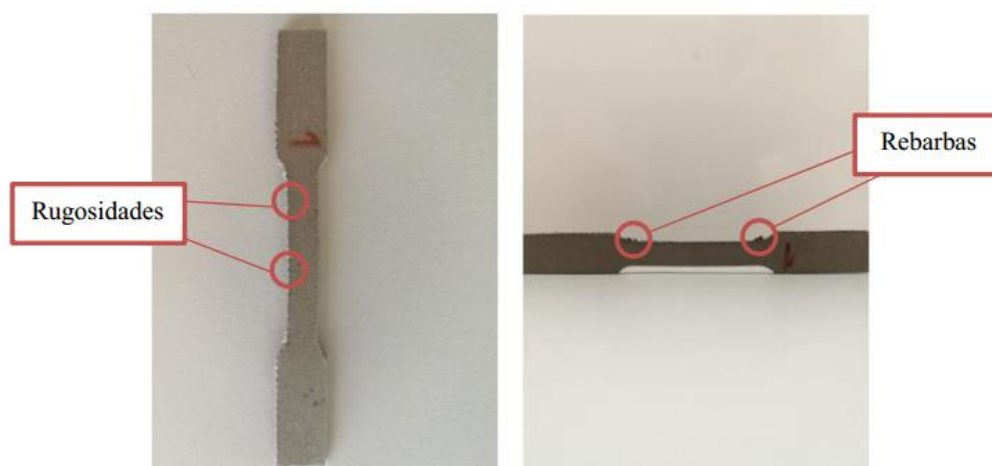


Figura 4.4 – Defeitos, rebarbas e irregularidades laterais do provete número 1

Estas irregularidades e defeitos seriam responsáveis por resultados com uma grande margem de erro e pouco coerentes, uma vez que esses defeitos, de um modo geral, estão em zonas onde há uma grande acumulação de tensões, facto que poderia provocar a rutura precoce do provete.

Para evitar este tipo de fenómenos, foi necessário efetuar a maquinagem dos provetes.

Antes de se proceder à maquinagem dos provetes, houve a necessidade de conhecer melhor a estrutura e os limites de grão dos provetes e as suas porosidades. Para que essa visualização/observação fosse possível, procedeu-se a uma avaliação metalográfica do provete 1.

### 4.5.2 Procedimento experimental

O primeiro passo do procedimento experimental realizado consistiu na manipulação de dois componentes com o objetivo de criar uma resina. Este processo dividiu-se nas seguintes fases:

- Retirou-se uma pequena parte do provete número 1 (que corresponde à parte do provete que foi analisada);
- Foi produzida uma resina utilizando os compostos *Epoxy Resin* e *Epoxy Hardener*;
- Foi necessário aguardar 24 horas para que a resina ficasse completamente curada (estado sólido).

A figura 4.5 representa os compostos constituintes da resina e a sua aplicação na amostra do provete.



Figura 4.5 - *Epoxy Resin* e *Epoxy Hardener* usados na produção da resina (imagem do lado esquerdo) e amostra contendo a resina (imagem do lado direito)

Na fase seguinte, já com a resina curada, a amostra foi polida. Este processo é fundamental para que seja possível observar a microestrutura da amostra de forma perceptível. O polimento dividiu-se nas seguintes fases:

- Inicialmente, colocou-se a lixa de granulometria de 240 na máquina de polir e através de trabalho manual exerceu-se pressão sobre a amostra garantindo que esta sofresse abrasão por parte da lixa.
- De seguida, inseriu-se a amostra no microscópio ótico para verificar a qualidade do polimento;
- Nas seguintes fases o procedimento foi semelhante, embora se tenha trocado a lixa por uma com as seguintes granulometrias, 320, 600, 1200 e 2500; entre cada lixa foi necessário verificar novamente a qualidade do polimento; esta verificação foi realizada no microscópio ótico;
- De seguida, fez-se o mesmo procedimento, mas, em vez de utilizar a lixa, usou-se um pano de polimento juntamente com um pó diamantado, de forma a garantir uma visualização da microestrutura sem resíduos, riscos e outras interferências.

A evolução da percepção da microestrutura da amostra após a utilização das lixas e do pano de polimento pode ser confirmada nas imagens constantes da figura 4.6.

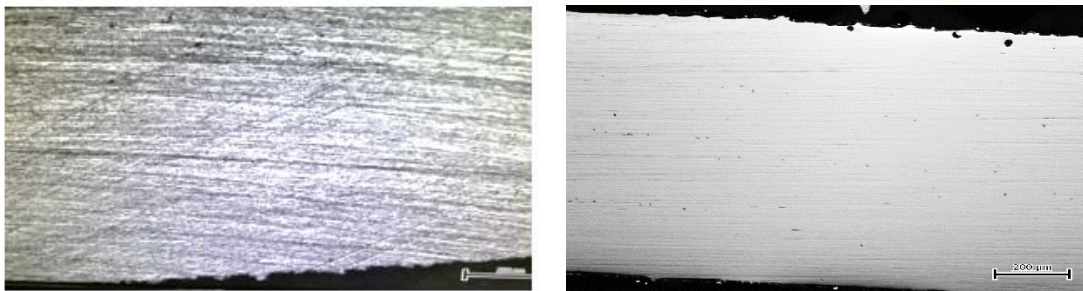


Figura 4.6- Visualização microscópica da amostra após a passagem na primeira lixa (imagem do lado esquerdo) e após a passagem no pano de polimento (imagem do lado direito)

Após o polimento, apesar de o número de interferências ser reduzido, ainda não é possível visualizar com exatidão a microestrutura do material. Por esse motivo, há a necessidade de utilizar um contraste. Uma vez que o aço 316L é um aço inoxidável, o contraste utilizado foi o reagente de *Vilella*.

A utilização deste reagente, garantiu a visualização do interior- da peça. A figura 4.7 é um exemplo de uma amostra retirada do provete 1, após a adição do contraste.

Analisando a figura 4.7, apresentada a baixo, é possível verificar a existência de porosidades, principalmente nas zonas de limites entre as camadas. Estas porosidades devem-se principalmente a fusões incompletas dos pós do aço 316L.

Na mesma figura é igualmente possível visualizar as diferentes camadas que constituem a peça, bem como a sobreposição entre elas.

De referir que a figura 4.7 corresponde a uma imagem microscópica do provete 1, provete este que, para além de ter sido produzido com uma potência de laser reduzida, também apresenta uma menor espessura por camada.

De salientar que a imagem microscópica representada na figura 4.7 foi obtida utilizando um microscópio ótico da marca *Olympus*, modelo CX40 que se encontra exposto na figura 4.8.

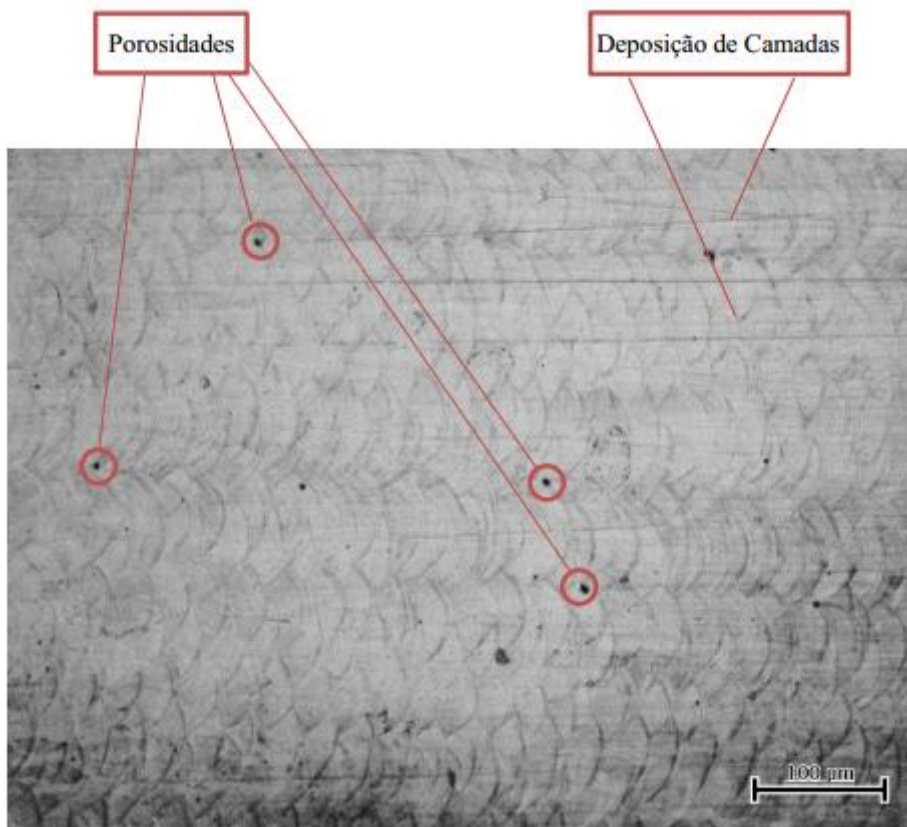


Figura 4.7 - Microscopia ótica usando uma lente de 100x



Figura 4.8 - Microscópio ótico da marca *Olympus*, modelo CX40

#### 4.6 Retificação dos provetes

Após a análise metalográfica, foi possível concluir que, dada a porosidade apresentada na figura 4.7, é possível maquinar os provetes sem a fratura ou danificação dos mesmos.

Como pode ser verificado na figura 4.4, os provetes apresentavam inúmeras zonas com rebarbas, defeitos e rugosidades, pelo que foi necessário proceder-se à maquinação e retificação dos mesmos. A retificadora usada é da marca *Sunlike*, modelo SSG-255. AH. A figura 4.9 é ilustrativa do processo de retificação utilizando a máquina referida anteriormente.



Figura 4.9 – Processo de retificação e fixação dos provetes na plataforma de retificação

A plataforma de retificação é magnética, sendo por isso muito importante na fixação das peças para a posterior retificação. A fixação dos provetes na plataforma de retificação foi possível devido à utilização de uma prensa de aperto de precisão que, por ser ferromagnética, foi utilizada na fixação de cada um dos 8 conjuntos de provetes, como está ilustrado na figura 4.10.



Figura 4.10 - Prensa de aperto de precisão fixando um conjunto de três provetes (duas vistas)

Cada conjunto de provetes foi retificado ao mesmo tempo, garantindo dessa forma a uniformidade dimensional de cada conjunto, originando assim resultados de tração e de dureza mais coerentes. A retificação dos provetes foi efetuada de acordo com as seguintes etapas:

- Fixação dos provetes na prensa de aperto de precisão;
- Fixação magnética da prensa de aperto de precisão na plataforma de retificação;
- Limitação do percurso nos eixos  $x$  e  $y$  da retificadora;
- Alteração manual da altura no eixo  $z$  da retificadora.

Após a retificação das superfícies de maior espessura, houve a necessidade de retificar igualmente as faces de maior área dos provetes. Estas superfícies não foram retificadas na retificadora, pelo facto de os provetes não serem de um material ferromagnético e por não ser possível fixá-los na prensa de aperto de precisão, impossibilitando desta forma a sua fixação na plataforma de retificação.

Para contornar este problema foi produzida numa impressora 3D de PLA uma peça cuja finalidade foi permitir a retificação manual das superfícies de maior área do provete. A figura 4.11 ilustra essa peça.

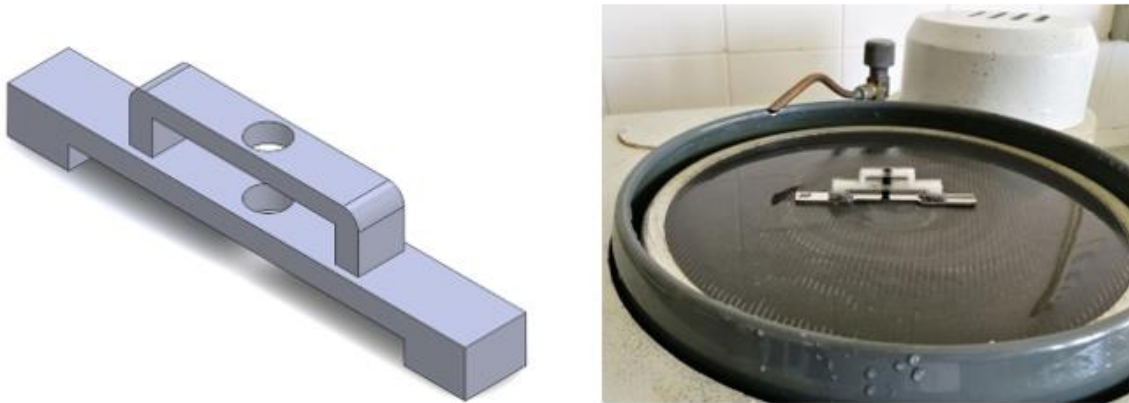


Figura 4.11 - Representação numa perspetiva isométrica da peça em *solidworks* (imagem do lado esquerdo) e imagem da retificação dos provetes na máquina de polir (imagem do lado direito)

A peça representada na figura 4.11 foi colada nas superfícies a maquinar com *Supercola 3* permitindo a retificação dos provetes na máquina de polir, utilizando para esse efeito uma lixa com uma granulometria de 240.

Após a retificação de todas as superfícies, os provetes encontraram-se sem rugosidades e prontos para serem utilizados no ensaio de tração.

Na figura 4.12 é possível verificar a evolução do acabamento superficial dos 24 provetes antes e após a retificação referida.

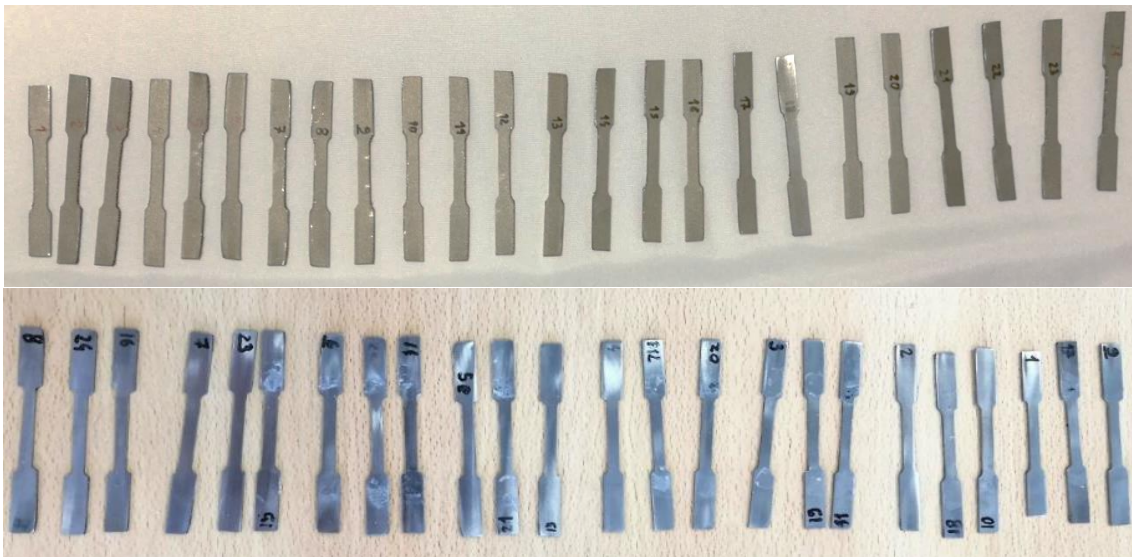


Figura 4.12 - Provetes antes da retificação (imagem superior) e após a retificação (imagem inferior)

#### 4.7 Avaliação dimensional após a retificação

A avaliação dimensional realizada após a retificação dos provetes foi efetuada com o mesmo aparelho de medição utilizado na avaliação dimensional efetuada antes da retificação e com a mesmo procedimento experimental.

#### 4.8 Ensaio de dureza

Outra propriedade mecânica que foi medida, foi a dureza de cada provete produzido.

A dureza de um material corresponde à resistência que este oferece à deformação permanente, à penetração, ao desgaste, à riscagem, à maquinagem e à resistência mecânica. O ensaio de dureza é um ensaio muito utilizado em engenharia, uma vez que [20]:

- Os equipamentos são comercializados a preços acessíveis;
- É um ensaio simples e de rápida execução;
- O ensaio pode não ser destrutivo.

Os ensaios de dureza podem ser feitos de 3 modos diferentes, sendo eles a dureza por: risco (I), dinâmica ou por ressalto (II) e por indentação ou penetração (III). O ensaio utilizado para medir a dureza dos provetes estudados nesta dissertação foi um ensaio do tipo III.

Os ensaios do tipo III são os mais importantes, sendo por isso os mais divulgados industrialmente. Nestes ensaios aplica-se lentamente no indentador com forma esférica, cônica ou piramidal uma força que o faz penetrar perpendicularmente na superfície do material que se quer ensaiar. Neste tipo de ensaios a dureza é medida através da relação entre a força aplicada e a área ou a profundidade de indentação. Podendo por isso definir-se a dureza como sendo a resistência que um dado material metálico oferece à deformação permanente.

Os ensaios do tipo III cuja aplicação industrial é mais comum são os ensaios de *Brinell*, de *Rockwell*, de *Vickers* (ensaio utilizado na medição da dureza na presente dissertação) e de microdureza por penetração [20].

##### 4.8.1 Ensaio de *Vickers*

O ensaio utilizado na medição da dureza dos provetes a estudar nesta dissertação foi o ensaio de *Vickers*. Este ensaio foi realizado numa máquina da marca *Mitutoyo* e do modelo HM-12, que se encontra ilustrada na figura 4.13.

O ensaio de *Vickers* surgiu em Inglaterra na década de 1920. Este modo de medição da dureza de um material utiliza um indentador de diamante em forma de pirâmide. A forma piramidal foi

escolhida de modo a que houvesse uma relação entre as medidas de dureza de *Vickers* e *Brinell*, tendo o ângulo da pirâmide sido definido com base numa geometria *Brinell*.

Este ensaio surgiu por ser a única forma de medição de dureza, cuja escala de números de dureza é contínua, sendo dessa forma possível comparar os valores obtidos entre si, permitindo uma comparação de dureza muito simples entre materiais [20].

Para definir a escala de durezas deste ensaio usa-se um princípio de semelhança da dimensão da impressão para cargas diferentes, combinando as dimensões do indentador com a sua força de penetração. A dureza de *Vickers* é medida de acordo com a seguinte nomenclatura [20]:

$$ND\ HV\ P/t$$

onde ND é o número de dureza calculado, HV indica que se trata de uma dureza de *Vickers* (*Hardness Vickers*), obtida através da aplicação de uma carga P (kg), durante t segundos.



Figura 4.13 - Máquina de medição de dureza de *Vickers* da marca *Mitutoyo* e do modelo HM-12 (imagem do lado direito) e visor com os parâmetros de operação da máquina (imagem do lado direito)

O número de dureza de *Vickers* obtém-se dividindo a força aplicada pela área da superfície indentada, determinada a partir do valor médio das duas diagonais da impressão, ou seja [20]:

$$HV = \frac{P}{A} = \frac{1.854P}{d^2} \left[ \frac{kg}{mm^2} \right] \quad (6.1)$$

Em que  $P$  [kg] corresponde à carga aplicada e  $d_i = \frac{(d_1+d_2)}{2}$  [mm] é o valor médio das diagonais do losango da impressão. A representação esquemática deste ensaio encontra-se na figura 4.14 [20].

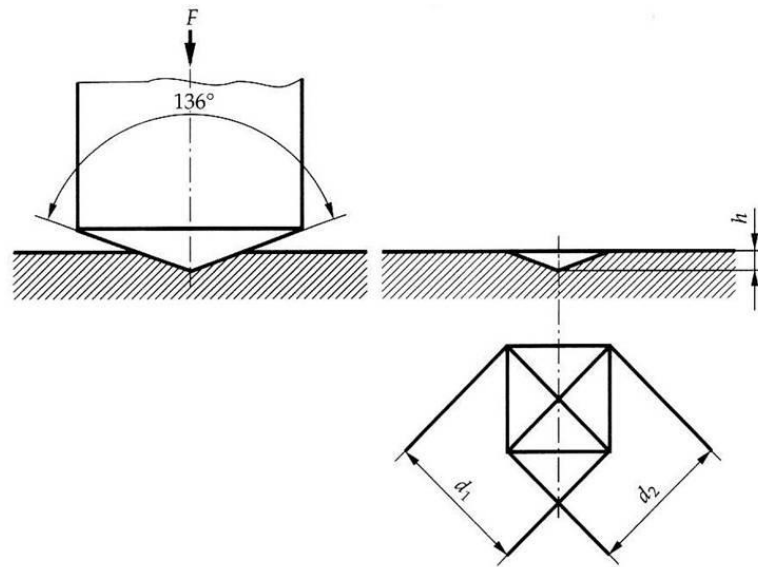


Figura 4.14 - Representação esquemática do ensaio de dureza de *Vickers*, com a representação das principais variáveis de ensaio [21]

#### 4.8.2 Procedimento experimental

O ensaio de dureza foi realizado antes do ensaio de tração, uma vez que, como os provetes foram produzidos camada por camada, após o ensaio de tração seria de esperar que se verificasse alguma quebra de ligação entre as camadas constituintes dos provetes, o que levaria a alterações relevantes na microestrutura do material. Este fator poderia dar origem a resultados de dureza não uniformes em todos os pontos dos provetes.

O local de indentação localizou-se entre a extremidade do provete e a zona de ensaio (local onde se verifica uma redução de área).

O ensaio de dureza foi dividido nas seguintes fases:

- Polimento da zona do ensaio para que as diagonais da pirâmide referida anteriormente sejam perceptíveis através do microscópio ótico;
- Escolha do primeiro ponto do provete onde a dureza foi medida;
- Medição das diagonais da pirâmide através da sua visualização no microscópio ótico; esta medição é feita com o auxílio de linhas paralelas que medem as diagonais referidas anteriormente;

- Medição da dureza em cinco pontos diferentes, obtendo-se assim cinco valores da dureza local do provete.

#### **4.9 Ensaio de tração uniaxial**

Os ensaios de tensão fornecem informações sobre a resistência e ductilidade de materiais sob influência de tensões de tração uniaxiais. Essas informações podem ser úteis para se obter uma comparação rigorosa de materiais, desenvolvimento de ligas, controle de qualidade de peças e projeto sob certas circunstâncias [17].

O ensaio referido, baseia-se na utilização de um provete normalizado, composto pelo material que se pretende analisar, cuja forma e dimensões foram estabelecidas pela norma utilizada. Quando sujeito a uma força de tração uniaxial, o provete irá esticar ou alongar até que ocorra a sua rotura [2].

Os resultados dos ensaios de tração são usados para selecionar materiais para aplicações nas várias áreas da engenharia. As propriedades de tração são frequentemente incluídas nas especificações técnicas para garantir a qualidade de um determinado material. Estas propriedades são muitas vezes medidas durante o desenvolvimento de novos materiais e processos, o que permite a sua comparação com os materiais e processos já existentes.

Este ensaio tem uma importância acrescida, uma vez que as propriedades de tensão obtidas são frequentemente usadas para prever o comportamento de um material sob a influência de cargas diferentes da carga de tensão uniaxial.

Para além da tensão obtida nos ensaios de tração, outra propriedade que é igualmente interessante é a ductilidade do material. Esta propriedade corresponde à quantidade de deformação que esse material pode suportar antes da sua fratura [22].

##### **4.9.1 Norma ASTM-E8M-01**

Para a execução deste ensaio, seguiu-se a norma ASTM E8M-01, onde foram obtidas informações essenciais no que diz respeito aos seguintes aspetos:

- Ao tipo de provete utilizado;
- Ao dimensionamento do provete;
- Aos parâmetros utilizados na programação da máquina de tração uniaxial.

A máquina utilizada nestes ensaios encontra-se no laboratório de mecânica estrutural do DEMI da FCT-UNL e é da marca MTS, modelo 312.21.

Nestes ensaios, a fixação do provete na máquina deve ser feita de modo a garantir que a tensão de tração axial execute uma deformação no provete na zona situada dentro do comprimento de

calibre (zona que apresenta menor largura). Por esse motivo, o eixo da amostra de teste deve coincidir com a linha central das cabeças da máquina de ensaio. Qualquer desvio deste requisito pode introduzir tensões de flexão que podem originar resultados que não correspondem a valores reais [17].

Para o provete produzido, foi efetuada uma fixação com amarras, como está ilustrado na figura 4.15, que são a forma indicada para a fixação de provetes com secção retangular, permitindo o alinhamento axial com a cabeça da máquina de tração [17].



Figura 4.15 - Fixação de um dos provetes nas amarras da máquina de tração e do respetivo extensómetro

Além das amarras, também foi colocado um extensómetro que permitiu obter os resultados da deformação e extensão dos provetes que foram submetidos ao ensaio de tração uniaxial. O extensómetro está ilustrado na figura 4.16 e é da marca MTS e do modelo 632.12C-21.



Figura 4.16 - Extensômetro da marca MTS e do modelo 632.12C-21, utilizado no ensaio de tração uniaxial

A figura 6.16 representa o estado dos provetes após o ensaio de tração uniaxial, sendo visível a zona de fratura e a quebra de ligação entre as camadas dos mesmos.



Figura 4.17 - Provetes fraturados após o ensaio de tração uniaxial

#### 4.9.2 Verificação

Uma vez que o limite da máquina que será utilizada no ensaio de tração é de 10 ton métricas (aproximadamente 100 kN), foi necessário proceder-se a uma verificação com o objetivo de saber se a geometria e material (aço 316L) dos provetes permitia a realização do ensaio.

Como referido no capítulo 5, a tensão de rotura para o aço 316L é cerca de 558 MPa. O provete retangular apresenta uma secção transversal de 6x2 (mm); sendo assim, a área da secção transversal corresponde à área de um retângulo e é dada por:

$$A = c \cdot W \quad (6.3)$$

A área do retângulo é aproximadamente  $A = 6 \cdot 2$ , obtendo-se o valor de  $A = 12\text{mm}^2$ .

A tensão de rotura é dada por:

$$\text{Tensão de rotura } (\sigma) = \frac{P}{A} \quad (6.4)$$

Uma vez que a tensão de rotura é  $558\text{MPa} = 558 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ , a força necessária para a rotura do provete é:

$$P = 558 \cdot 12 = 6696\text{N}$$

$$P \approx 6.7\text{KN}$$

Visto que a máquina de tração do laboratório da FCT é de 100kN, é possível fazer-se o ensaio com a geometria referida anteriormente.

### 4.9.3 Definições do ensaio de tração

Apresentam-se de seguida as definições principais deste tipo de ensaio, relativas à determinação das propriedades mecânicas de cada provete, segundo a norma ASTM E8M-01.

- **Tensão nominal ( $\sigma$ )**

A tensão nominal corresponde à força de tração por unidade de superfície da secção transversal inicial suportada pelo provete em cada momento do ensaio. Pode ser obtida pela equação 6.5, onde  $P$  é a força e  $A_0$  é a área da secção transversal inicial [2].

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (6.5)$$

- **Extensão nominal ( $e$ )**

A extensão nominal corresponde ao aumento do comprimento do corpo de prova comparativamente ao seu valor inicial. Pode ser obtido pela equação 6.6, onde  $l_0$  equivale ao comprimento inicial do corpo de prova e  $l - l_0$  equivale ao aumento do comprimento do mesmo [2].

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (6.6)$$

- **Tensão de cedência**

A tensão de cedência equivale ao primeiro ponto da curva tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) onde se verifica um aumento da deformação sem ocorrer aumento de tensão [2].

- **Tensão de rotura**

A tensão de rotura é a tensão máxima da curva de tensão nominal - extensão nominal. Quando ocorre num provete, corresponde a um decréscimo na área da secção reta (estricção) [2].

- **Módulo de Young ( $E$ )**

O módulo de Young é à razão entre a diferença de tensões e a diferença das deformações correspondentes [2].

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (6.7)$$

#### 4.10 Procedimento experimental

Os ensaios de tração foram realizados na máquina de tração da marca MTS. A representação bidimensional desta máquina de tração é apresentada na figura 4.18. Esta máquina está equipada com extensómetros automáticos da marca MTS e do modelo 632.12C-21. Dispõe igualmente de dispositivos de fixação próprios (amarras) para a dimensão e forma do provete de secção retangular de  $6 \times 2$  (mm<sup>2</sup>), de forma a minimizar o escorregamento do mesmo e garantindo, ao mesmo tempo, o alinhamento axial da aplicação da carga com o eixo do provete. Esta máquina apresenta tolerâncias na célula de carga (*load cell*) na ordem dos 0.0381mm [23].

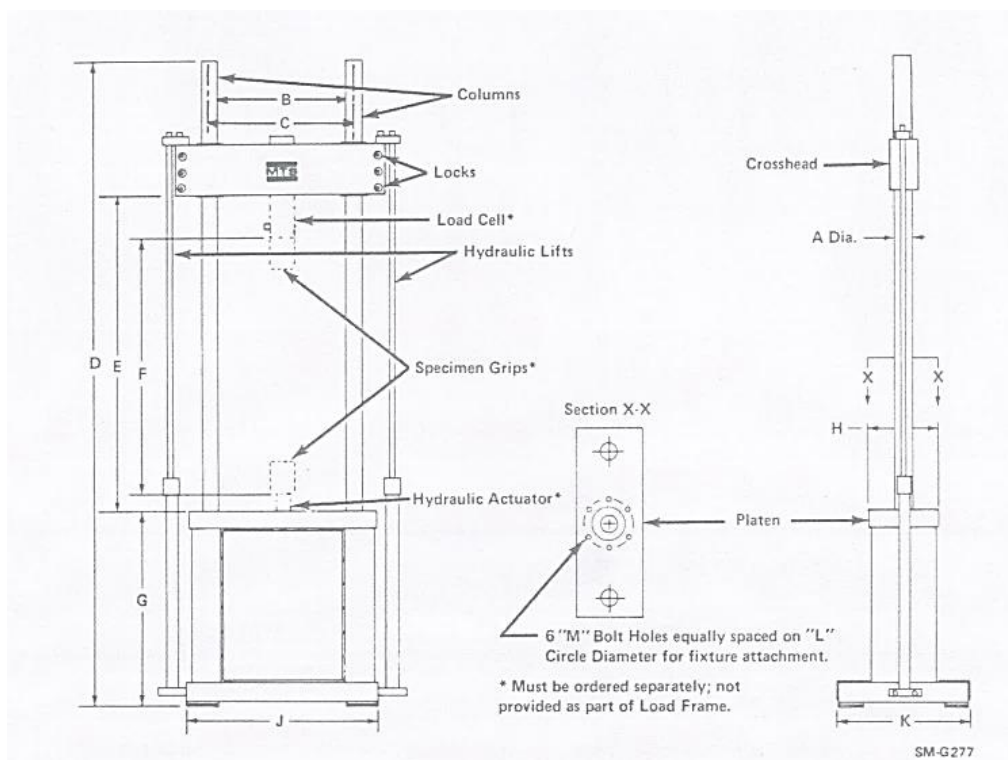


Figura 4.18 - Representação bidimensional da máquina de tração onde foram realizados os ensaios [23]

Os parâmetros do ensaio foram definidos previamente à atividade experimental através de uma metodologia concebida no *software* específico da máquina.

Assim, a velocidade do ensaio foi de 5 mm/min.

A parte experimental realizou-se com deslocamentos controlados, até à rotura de cada um dos provetes, medindo-se simultaneamente a deformação e a força aplicada ao longo do ensaio.

Cada ensaio foi repetido 3 vezes em cada conjunto de 8 provetes cujos parâmetros de produção foram os mesmos, para que se possa efetuar uma média de resultados, originando resultados com maior exatidão e aumentando a credibilidade de todo o ensaio. Por este motivo, foram realizados 24 ensaios de tração uniaxial no total, como pode ser verificado no capítulo 4.

# 5

## Resultados experimentais

### 5.1 Resultados obtidos e justificações

As tabelas que se seguem, apresentam o valor dos oito conjuntos (constituídos cada um por três provetes, totalizando 24) no que diz respeito:

- à sua avaliação dimensional antes e após a retificação;
- à medição da rugosidade;
- aos ensaios de dureza;
- aos ensaios de tração uniaxial.

Este último ensaio origina os resultados relativos à tensão de rotura, tensão de cedência e tensão de fratura para o aço inoxidável 316L.

Em cada ensaio ou medição, foi também apresentado o valor médio de cada conjunto de três provetes em cada propriedade mecânica estudada, sendo este o valor caracterizador de cada bloco e que, subsequentemente, foi utilizado no planeamento de experiências.

Com o objetivo de analisar a dispersão dos resultados, em cada ensaio ou medição foi calculado o desvio-padrão dos valores referentes aos oito conjuntos de três provetes. Apesar disso, dada a sua não adimensionalidade, foi ainda calculada a razão desvio-padrão/média.

#### 5.1.1 Resultados da avaliação dimensional antes da retificação

Como referido no capítulo 4, foi efetuada uma avaliação dimensional antes de ser efetuada a retificação dos provetes. Esta avaliação foi realizada utilizando um paquímetro digital da marca *Powerfix* cuja resolução mínima é de 0.01 mm. Os resultados referentes a essa avaliação encontram-se na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Avaliação dimensional dos provetes normalizados antes da retificação

Provete	Dimensões (mm)		
	Comprimento (L)	Largura de ensaio (W)	Espessura (T)
1	99,67	6,26	2,05
2	99,65	6,40	2,02
3	99,64	6,37	2,01
4	99,56	6,37	1,99
5	99,53	6,43	2,00
6	99,49	6,44	2,00
7	99,56	6,37	1,99
8	99,49	6,43	2,04
9	99,54	6,33	2,05
10	99,57	6,36	1,98
11	99,50	6,29	2,01
12	99,61	6,31	2,01
13	99,57	6,35	2,03
14	99,56	6,41	2,00
15	99,56	6,35	2,03
16	99,63	6,40	2,05
17	99,58	6,25	2,02
18	99,60	6,30	2,00
19	99,56	6,30	2,01
20	99,56	6,23	2,00
21	99,53	6,35	2,04
22	99,55	6,32	2,01
23	99,59	6,31	2,00
24	99,51	6,35	2,05

Na tabela 5.2 estão apresentados os valores referentes ao comprimento principal (L) obtidos para cada conjunto de três provetes.

Como se pode observar na tabela abaixo, a média total do comprimento principal (L) foi de 99,57 mm, o que profere um erro de 0,43% por defeito, por comparação com o valor nominal (100 mm).

Os valores dos desvios-padrão são também muito baixos.

Tabela 5.2 - Comprimento principal (L) de cada conjunto de 3 provetes normalizados

Conjunto	Comprimento principal (mm)					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	$\bar{x}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}/\bar{x}$
1	99,67	99,54	99,58	99,60	0,07	0,00
2	99,65	99,57	99,60	99,61	0,04	0,00
3	99,64	99,50	99,56	99,57	0,07	0,00
4	99,56	99,61	99,56	99,58	0,03	0,00
5	99,53	99,57	99,53	99,54	0,02	0,00
6	99,49	99,56	99,55	99,53	0,04	0,00
7	99,56	99,56	99,59	99,57	0,02	0,00
8	99,49	99,63	99,51	99,54	0,08	0,00
				<b>Média total</b>		
				99,57		

Na tabela 5.3 estão apresentados os valores referentes à largura de ensaio (W) obtidos para cada conjunto de três provetes.

Tabela 5.3 - Largura de ensaio (W) de cada conjunto de 3 provetes normalizados

Conjunto	Largura de ensaio (mm)					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	$\bar{x}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}/\bar{x}$
1	6,26	6,33	6,25	6,28	0,04	0,01
2	6,40	6,36	6,30	6,35	0,05	0,01
3	6,37	6,29	6,30	6,32	0,04	0,01
4	6,37	6,31	6,23	6,30	0,07	0,01
5	6,43	6,35	6,35	6,38	0,05	0,01
6	6,44	6,41	6,32	6,39	0,06	0,01
7	6,37	6,35	6,31	6,34	0,03	0,00
8	6,43	6,40	6,35	6,39	0,04	0,01
				<b>Média total</b>		
				6,34		

Como se pode observar a média total da largura de ensaio (W) foi de 6.34 mm, o que profere um erro de 5.66% por excesso, por comparação com o valor nominal (6 mm).

Na tabela 5.4 estão apresentados os valores referentes à espessura (T) obtidos para cada conjunto de três provetes.

Tabela 5.4 - Espessura (T) de cada conjunto de 3 provetes normalizados

Conjunto	Espessura (mm)					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	$\bar{x}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}/\bar{x}$
1	2,05	2,05	2,02	2,04	0,02	0,01
2	2,02	1,98	2,00	2,00	0,02	0,01
3	2,01	2,01	2,01	2,01	0,00	0,00
4	1,99	2,01	2,00	2,00	0,01	0,01
5	2,00	2,03	2,04	2,02	0,02	0,01
6	2,00	2,00	2,01	2,00	0,01	0,00
7	1,99	2,03	2,00	2,01	0,02	0,01
8	2,04	2,05	2,05	2,05	0,01	0,00
				<b>Média total</b>		
				2,01		

A análise dos resultados acima apresentados referentes à espessura (T) apresenta um valor de 2,01 mm, o que profere um erro de 0.5% por excesso, por comparação com o valor nominal (2 mm). Globalmente, pode-se considerar que as dimensões dos provetes produzidos pouco diferem em relação às cotas nominais; W tem um desvio de cerca de 5% e L e T têm desvios inexpressivos. A tabela 5.5, apresenta os resultados globais médios dos três parâmetros analisados referentes a cada um dos oito conjuntos de provetes normalizados.

Tabela 5.5 - Avaliação dimensional média de cada conjunto de três provetes

Conjunto	Dimensões (mm)		
	Comprimento principal	Largura de ensaio	Espessura
1	99,60	6,28	2,04
2	99,61	6,35	2,00
3	99,57	6,32	2,01
4	99,58	6,30	2,00
5	99,54	6,38	2,02
6	99,53	6,39	2,00
7	99,57	6,34	2,01
8	99,54	6,39	2,05

### 5.1.2 Medição da rugosidade dos provetes

A rugosidade foi medida antes da retificação dos provetes e na mesma zona (zona de maior largura e de fixação nas garras no ensaio de tração) em todos dos vinte e quatro provetes. A medição foi efetuada utilizando o rugosímetro da marca *Mahr*, modelo *MarSurf PS 10* e os resultados desta medição encontram-se na tabela 5.6.

De salientar que os restantes parâmetros de rugosidade para os vinte e quatro provetes bem como os gráficos de rugosidade obtidos podem ser consultados no anexo A1.

Tabela 5.6 - Rugosidade Média ( $R_a$ ) dos provetes normalizados

<b>Proвете</b>	<b>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>1</b>	8,61
<b>2</b>	8,81
<b>3</b>	8,25
<b>4</b>	8,09
<b>5</b>	10,28
<b>6</b>	8,43
<b>7</b>	8,28
<b>8</b>	8,69
<b>9</b>	8,77
<b>10</b>	7,64
<b>11</b>	10,21
<b>12</b>	8,11
<b>13</b>	9,59
<b>14</b>	10,00
<b>15</b>	10,27
<b>16</b>	10,51
<b>17</b>	7,69
<b>18</b>	8,54
<b>19</b>	7,80
<b>20</b>	8,38
<b>21</b>	11,44
<b>22</b>	10,29
<b>23</b>	9,01
<b>24</b>	9,24

Na tabela 5.7 estão apresentados os valores referentes à Rugosidade obtida para cada conjunto de três provetes.

Tabela 5.7 - Valores obtidos para a rugosidade de cada conjunto de 3 provetes

Conjunto	Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )					
	Provete1	Provete2	Provete3	$\bar{\chi}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}/\bar{\chi}$
1	8,61	8,77	7,69	8,36	0,58	0,07
2	8,81	7,64	8,54	8,33	0,61	0,07
3	8,25	10,21	7,80	8,76	1,28	0,15
4	8,09	8,11	8,38	8,19	0,16	0,02
5	10,28	9,59	11,44	10,44	0,93	0,09
6	8,43	10,00	10,29	9,57	1,00	0,10
7	8,28	10,27	9,01	9,19	1,00	0,11
8	8,69	10,51	9,24	9,48	0,93	0,10
				<b>Média total</b>		
				9,04		

Perante estes resultados e de acordo com a Tabela 4.1, é possível concluir que todos os provetes produzidos se encontram na classe N10.

### 5.1.3 Avaliação dimensional dos provetes após a retificação

Após a retificação dos provetes, as suas dimensões iniciais sofreram alterações. Estas alterações originaram os resultados que se encontram na tabela 5.8 no que diz respeito às dimensões fundamentais para o ensaio de tração. De realçar que os valores do comprimento total não foram alterados, permanecendo os mesmos da tabela 5.1 e por esse facto não são aqui apresentados.

Tabela 5.8 - Dimensões dos provetes após a retificação

Provete	Dimensões (mm)	
	Largura de ensaio	Espessura
1	5,03	1,80
2	5,46	1,82
3	5,11	1,82
4	5,23	1,82
5	5,11	1,82
6	5,42	1,82
7	5,29	1,81
8	4,72	1,80
9	5,05	1,81
10	5,58	1,82
11	4,71	1,82
12	5,37	1,79
13	5,15	1,83
14	5,32	1,79
15	5,62	1,81
16	4,77	1,78
17	5,11	1,81
18	5,53	1,79
19	5,15	1,80
20	5,47	1,82
21	5,53	1,80
22	4,98	1,77
23	5,05	1,82
24	4,84	1,82

Na tabela 5.9 estão apresentados os valores referentes à largura de ensaio (W) obtidos para cada conjunto de três provetes.

Como se pode observar na referida tabela (apresentada de seguida), a média total da largura de ensaio (W) foi de 5.19 mm, o que profere um erro de 13.5% por defeito (já expectável), por comparação com o valor nominal (6 mm).

Tabela 5.9 - Largura de ensaio (W) de cada conjunto de 3 provetes

Conjunto	Largura de ensaio (mm)					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	$\bar{\chi}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}/\bar{\chi}$
1	5,03	5,05	5,11	5,06	0,04	0,01
2	5,46	5,58	5,53	5,52	0,06	0,01
3	5,11	4,71	5,15	4,99	0,24	0,05
4	5,23	5,37	5,47	5,36	0,12	0,02
5	5,11	5,15	5,53	5,26	0,23	0,04
6	5,42	5,32	4,98	5,24	0,23	0,04
7	5,29	5,62	5,05	5,32	0,29	0,05
8	4,72	4,77	4,84	4,78	0,06	0,01
				<b>Média total:</b>		
				5,19		

Na tabela 5.10 estão apresentados os valores referentes à espessura (T) obtidos para cada conjunto de três provetes.

Tabela 5.10 - Espessura (T) de cada conjunto de 3 provetes

Conjunto	Espessura (mm)					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	$\bar{\chi}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}/\bar{\chi}$
1	1,80	1,81	1,81	1,81	0,01	0,00
2	1,82	1,82	1,79	1,81	0,02	0,01
3	1,82	1,82	1,80	1,81	0,01	0,01
4	1,82	1,79	1,82	1,81	0,02	0,01
5	1,82	1,83	1,80	1,82	0,02	0,01
6	1,82	1,79	1,77	1,79	0,03	0,01
7	1,81	1,81	1,82	1,81	0,01	0,00
8	1,80	1,78	1,82	1,80	0,02	0,01
				<b>Média total:</b>		
				1,81		

Como se pode observar a média total da espessura (T) foi de 1,81 mm, o que profere um erro de 9.5% por defeito (já expectável), por comparação com o valor nominal (2 mm).

Na tabela 5.11 estão apresentados os valores referentes à área obtidos para cada conjunto de três provetes.

Tabela 5.11 - Área da secção de ensaio de cada conjunto de 3 provetes

Conjunto	Área (mm <sup>2</sup> )					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	$\bar{\chi}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}/\bar{\chi}$
1	9,05	9,14	9,25	9,15	0,10	0,01
2	9,94	10,16	9,90	10,00	0,14	0,01
3	9,30	8,57	9,27	9,05	0,41	0,05
4	9,52	9,61	9,96	9,70	0,23	0,02
5	9,30	9,42	9,95	9,56	0,35	0,04
6	9,86	9,52	8,81	9,40	0,54	0,06
7	9,57	10,17	9,19	9,65	0,49	0,05
8	8,50	8,49	8,81	8,60	0,18	0,02
				<b>Média total:</b>		
				9,39		

Estes dados referentes à área da secção de ensaio foram apresentados porque foram utilizados para calcular as tensões de cedência, de rotura e de fratura.

A tabela 5.12, apresenta os resultados globais médios das duas dimensões analisadas referentes a cada um dos oito conjuntos de provetes.

Tabela 5.12 - Avaliação dimensional média de cada conjunto de três provetes.

Conjunto	Largura média	Espessura média
1	5,06	1,81
2	5,52	1,81
3	4,99	1,81
4	5,36	1,81
5	5,26	1,82
6	5,24	1,79
7	5,32	1,81
8	4,78	1,80

A partir da análise da tabela 5.12, foi possível verificar que os valores das dimensões finais dos provetes já não se encontram segundo a norma utilizada para o ensaio de tração (ASTM E08-01).

#### 5.1.4 Resultados dos ensaios de dureza

O ensaio de dureza foi realizado em apenas vinte e três provetes, uma vez que o provete número 15 foi tracionado antes de se ter efetuado a medição da sua dureza. Por esse motivo, a sua microestrutura foi modificada devido à quebra de ligação entre as camadas constituintes que

ocorre no ensaio de tração, alterando dessa forma a dureza média do provete. Os restantes resultados de dureza (em cinco pontos seguidos e na mesma zona) e a dureza média de cada provete encontram-se na tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Valores de dureza obtidos para os vinte e quatro provetes analisados

Provete	Dureza (HV)					
	Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	Dureza 4	Dureza 5	Dureza Média
1	265,40	244,10	232,40	251,80	258,50	250,44
2	236,20	253,90	241,80	249,50	248,10	245,90
3	249,20	255,70	151,60	167,70	260,80	217,00
4	203,50	202,40	211,30	209,60	205,00	206,36
5	246,90	266,30	257,10	256,90	266,40	258,72
6	251,90	231,80	248,90	261,30	235,60	245,90
7	275,40	180,30	288,90	259,10	254,80	251,70
8	247,70	246,40	240,80	246,40	253,90	247,04
9	235,10	239,90	242,00	235,90	248,40	240,26
10	234,80	239,90	235,90	206,00	149,90	213,30
11	257,40	289,60	292,70	278,00	282,60	280,06
12	249,20	269,40	167,50	255,90	240,50	236,50
13	247,80	215,50	240,60	249,00	254,40	241,46
14	245,70	225,40	245,90	274,50	261,60	250,62
15	-	-	-	-	-	-
16	262,30	257,40	252,00	254,40	245,10	254,24
17	244,60	251,00	216,40	239,60	254,40	241,20
18	254,40	242,50	231,90	240,40	241,40	242,12
19	238,20	248,10	233,80	235,30	218,60	234,80
20	269,90	275,00	275,10	263,60	263,40	269,40
21	265,70	241,20	256,80	276,40	255,70	259,16
22	264,60	240,60	246,10	258,90	252,00	252,44
23	270,50	259,50	262,40	276,70	271,30	268,08
24	256,70	256,10	250,10	241,80	247,80	250,50

Na tabela 5.14 estão apresentados os valores referentes à dureza obtida para cada conjunto de três provetes.

Tabela 5.14 - Valores de dureza médios para os oito conjuntos de provetes

Conjunto	Dureza (HV)					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	$\bar{\chi}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}/\bar{\chi}$
1	250,44	240,26	241,20	243,97	5,63	0,02
2	245,90	213,30	242,12	233,77	17,83	0,08
3	217,00	280,06	234,80	243,95	32,51	0,13
4	206,36	236,50	269,40	237,42	31,53	0,13
5	258,72	241,46	259,16	253,11	10,09	0,04
6	245,90	250,62	252,44	249,65	3,38	0,01
7	251,70	-	268,08	259,89	11,58	0,04
8	247,04	254,24	250,50	250,59	3,60	0,01
				<b>Média total:</b>		
				243,95		

Perante os resultados obtidos, é possível verificar que a dureza média obtida é superior à dureza tabelada (B79 ou 145 HV). A diferença entre o valor tabelado e o valor obtido foi de 40.56%.

Este resultado pode ser justificado pela equação de *Hall-Petch*. Esta equação pode ser ilustrada da seguinte forma [24]:

$$\sigma = \sigma_0 + f d^{-\frac{1}{2}} \quad (7.1)$$

Onde:

- $\sigma$  é a tensão de cedência;
- $\sigma_0$  é a tensão mínima para provocar deslocamentos de grão individuais;
- $f$  é uma constante;
- $d$  é o diâmetro médio do grão [24].

Analisando a equação de *Hall-Petch*, é possível inferir que o aumento da tensão de cedência de um material é inversamente proporcional ao aumento do diâmetro das partículas constituintes desse material.

Segundo *A.H. Chokshi*, a equação referida anteriormente, para além de ser válida para a tensão de cedência, é igualmente válida para a dureza dos materiais, desde que o diâmetro das partículas constituintes dos mesmos não seja inferior a 1  $\mu\text{m}$ , garantindo dessa forma uma proporcionalidade inversa entre a dureza de um material e o diâmetro das partículas constituintes [25].

As partículas constituintes de peças produzidas por SLM e utilizando o aço 316L apresentam diâmetros com valores compreendidos entre os 22.7  $\mu\text{m}$  e os 45.2  $\mu\text{m}$  (logo, são superiores a 1  $\mu\text{m}$ ), o que indica que a equação de *Hall-Petch* é válida para o aço utilizado na produção dos provetes estudados na presente dissertação [9].

A variação de valores que se verifica nos resultados experimentais para o cálculo da dureza dos provetes, vai de encontro à tendência enunciada por *Baicheng Zhang*. Segundo este autor, durante a produção de peças utilizando o método de impressão de SLM, estas são produzidas com um tamanho de grão mais fino do que os métodos de vazamento. A existência de grãos refinados na microestrutura de um material pode levar a tensões internas mais baixas e a excelentes propriedades mecânicas [26].

Assim sendo, utilizando o artigo de *Baicheng Zhang* que confirma a existência de grãos refinados em peças produzidas por impressão 3D de SLM e usando a equação de *Hall-Petch*, é possível concluir que os resultados experimentais obtidos no cálculo da dureza dos provetes vão de encontro com o esperado.

### **5.1.5 Resultados dos ensaios de tração uniaxial**

Após a medição da dureza dos provetes retificados, seguiu-se o ensaio de tração uniaxial. Este ensaio fornece uma curva de extensão em função da força, permitindo obter a tensão de rotura, a tensão de cedência e a tensão em que ocorre a fratura do material, a extensão nominal, entre outros.

Na tabela 5.15 encontram-se os resultados referentes às tensões referidas anteriormente. De referir que o provete número 9 foi tracionado, mas o seu gráfico de força por extensão não foi devidamente traçado, impossibilitando a utilização dos seus valores na presente dissertação. Por outro lado, o provete número 23 sofreu uma deformação por torção aquando da sua montagem nas amarras, torção esta que alterou os seus limites de grão e a sua microestrutura, impossibilitando dessa forma a utilização desse provete no ensaio de tração uniaxial.

De referir que os gráficos de alongamento (mm) – força (kN) podem ser consultados no anexo B.

Tabela 5.15 - Valores das tensões de rotura, fratura e cedência obtidos para os vinte e quatro provetes

Provete	Tensões (MPa)		
	Tensão de rotura	Tensão de fratura	Tensão de cedência
1	706,08	555,43	412,19
2	682,05	558,79	324,6
3	622,24	502,53	375,89
4	706,48	451,99	393,23
5	653,33	569,00	398,29
6	649,05	537,24	399,4
7	669,56	520,33	400,02
8	602,20	447,28	425,1
9	-	-	-
10	730,62	472,56	414,37
11	625,62	472,71	328,74
12	678,81	469,88	404,8
13	649,44	462,34	-
14	653,19	518,75	377,49
15	649,20	316,82	403,02
16	659,35	507,09	384,43
17	679,06	561,58	420,06
18	657,52	497,77	390
19	616,00	481,22	398,96
20	630,94	551,95	416
21	614,76	427,61	358,87
22	584,04	473,34	372,71
23	-	-	-
24	614,82	516,34	332,16

Na tabela 5.16 constam os resultados experimentais relativos à medição da tensão de rotura medida através de ensaios de tração uniaxial.

Como se pode verificar na tabela 5.16 (abaixo representada), a média total da tensão de rotura foi de 653,60 MPa, valor superior ao valor tabelado (558 MPa) para este material. Esta diferença é de +14.63%.

Tabela 5.16 - Resultados experimentais relativos à medição da tensão de rotura medida através de ensaios de tração uniaxial

Conjunto	Tensão de Rotura (MPa)					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	$\bar{\chi}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}/\bar{\chi}$
1	706,08	-	679,06	692,57	19,11	0,03
2	682,05	730,62	657,52	690,06	37,20	0,05
3	622,24	625,62	616,00	621,29	4,88	0,01
4	706,48	678,81	630,94	672,08	38,22	0,06
5	653,33	649,44	614,76	639,18	21,24	0,03
6	649,05	653,19	584,04	628,76	38,78	0,06
7	669,56	649,20	-	659,38	14,40	0,02
8	602,20	659,35	614,82	625,46	30,02	0,05
				<b>Média total:</b>		
				<b>653,60</b>		

A diferença de valores acima referida vai de encontro à tendência enunciada por *Baicheng Zhang* e descrita no subcapítulo 5.4. Para além do que está enunciado em 5.4, o autor também referiu que uma combinação de grãos refinados, baixa porosidade e altas temperaturas de pré-aquecimento podem induzir uma produção de amostras com uma alta resistência à tração uniaxial [26].

Na tabela 5.17 constam os resultados experimentais relativos à medição da tensão de fratura medida através de ensaios de tração uniaxial.

Os resultados obtidos para a tensão a que ocorre a fratura (que se encontram na tabela 5.17, representada de seguida) não foram objeto de comparação, uma vez que não existem valores tabelados para a resposta em causa.

Tabela 5.17 - Resultados experimentais relativos à medição da tensão de fratura medida através de ensaios de tração uniaxial

Conjunto	Tensão de fratura (MPa)					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	$\bar{\chi}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}/\bar{\chi}$
1	555,43	-	561,58	558,50	4,35	0,01
2	558,79	472,56	497,77	509,71	44,34	0,09
3	502,53	472,71	481,22	485,49	15,36	0,03
4	451,99	469,88	551,95	491,27	53,30	0,11
5	569,00	462,34	427,61	486,32	73,68	0,15

<b>6</b>	537,24	518,75	473,34	509,78	32,88	0,06
<b>7</b>	520,33	316,82	-	418,57	143,90	0,34
<b>8</b>	447,28	507,09	516,34	490,24	37,49	0,08
				<b>Média total:</b>		
				<b>493,73</b>		

Na tabela 5.18 são apresentados os resultados experimentais relativos à medição da tensão de cedência medida através de ensaios de tração uniaxial.

Tabela 5.18 - Resultados experimentais relativos à medição da tensão de cedência medida através de ensaios de tração uniaxial

Conjunto	Tensão de cedência (MPa)					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	$\bar{\chi}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}/\bar{\chi}$
<b>1</b>	412,19	-	420,06	416,12	5,57	0,04
<b>2</b>	324,6	414,37	390	376,32	46,42	0,51
<b>3</b>	375,89	328,74	398,96	367,86	35,79	0,44
<b>4</b>	393,23	404,8	416	404,68	11,38	0,10
<b>5</b>	398,29	-	358,87	378,58	27,87	0,30
<b>6</b>	399,4	377,49	372,71	383,20	14,23	0,15
<b>7</b>	400,02	403,02	-	401,52	2,12	0,02
<b>8</b>	425,1	384,43	332,16	380,57	46,59	0,49
				<b>Média total:</b>		
				<b>388,60</b>		

O resultado médio para esta propriedade foi de 388.60 MPa. Este valor é superior ao valor tabelado (290 MPa), obtendo-se uma diferença de +74.62%.

Esta diferença significativa de valores pode ser justificada através da análise da equação de *Hall-Petch*. Após a análise da equação, é possível concluir que o aumento da tensão de cedência é inversamente proporcional ao aumento do diâmetro das partículas que constituem o grão. Uma vez que, utilizando a impressão 3D de SLM, o grão que constitui o material torna-se mais refinado (o que significa que o seu diâmetro é menor) e utilizando a equação de *Hall-Petch*, conclui-se que os resultados experimentais obtidos vão de encontro com o esperado, de acordo com as teorias referidas no subcapítulo 5.4 e no presente subcapítulo.

A tabela 5.19 apresenta os resultados da extensão verificada no extensómetro e da extensão nominal para os vinte e quatro provetes produzidos.

Tabela 5.19 - Extensão verificada no extensômetro em milímetros e extensão nominal em porcentagem para os vinte e quatro provetes

Provete	Extensões	
	Verificada (mm)	Nominal (%)
1	7,51	30,05
2	6,43	25,71
3	6,71	26,83
4	7,03	28,14
5	6,29	25,16
6	6,57	26,28
7	6,05	24,20
8	-	-
9	8,09	32,37
10	7,52	30,07
11	5,57	22,29
12	7,81	31,25
13	-	-
14	5,39	21,55
15	5,83	23,33
16	5,45	21,78
17	8,14	32,57
18	6,31	25,25
19	6,84	27,36
20	7,12	28,50
21	5,41	21,65
22	4,98	19,94
23	-	-
24	-	-

Os provetes 8, 13 e 24 não foram avaliados devido a um erro de fixação do extensômetro numa das faces do provete que foi tracionado. Por sua vez, o provete 23 não foi avaliado pela razão apresentada no início deste subcapítulo.

A tabela 5.20 apresenta os resultados referentes à extensão nominal para os oito conjuntos de três provetes.

Tabela 5.20 - Extensão nominal dos oito conjuntos de três provetes

Conjunto	Extensão Nominal					
	Provete 1	Provete 2	Provete 3	$\bar{\chi}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma}/\bar{\chi}$
1	30,05	32,37	32,57	31,67	1,40	0,04
2	25,71	30,07	25,25	27,01	2,66	0,10
3	26,83	22,29	27,36	25,49	2,78	0,11
4	28,14	31,25	28,50	29,29	1,70	0,06
5	25,16	-	21,65	23,40	2,48	0,11
6	26,28	21,55	19,94	22,59	3,30	0,15
7	24,20	23,33	-	23,76	0,62	0,03
8	-	21,78	-	21,78	-	-
				<b>Média total</b>		
				25,62		

A extensão nominal média total foi de 25.62%. Como se pode observar, este valor é inferior ao valor tabelado que era de 50%. Desta diferença significativa de valores resulta um erro de - 48.76%.

De acordo com *Niendorf* a microestrutura dos componentes produzidos por SLM do aço 316 L é caracterizada pela existência de diferentes orientações de grão que crescem em diferentes direções, influenciando desta forma as propriedades mecânicas do material [28].

Como o aço 316 L contém quantidades significativas de cromo em solução sólida e sendo um elemento com elevada afinidade com o azoto, a conjugação destes dois fatores poderá ter sido determinante para as propriedades mecânicas obtidas.

A existência de uma dispersão de uma fase dura no interior de uma matriz dúctil (austenite), contribuiu para aumentar a resistência mecânica e, conseqüentemente, levou à diminuição da ductilidade [29].

## 5.2 Tratamento estatístico dos resultados

Para uma melhor visualização das condições das experiências e dos resultados experimentais obtidos, apresenta-se de seguida a tabela 5.21 que resulta da combinação da tabela 3.4 com as tabelas 5.7, 5.14, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.20.

Tabela 5.21 - Plano de experiências e resultados obtidos

Bloco	Variáveis codificadas			Rug. (μ)	Dur. (HV)	Tensão cedência (Mpa)	Tensão rotura (Mpa)	Tensão Fratura (Mpa)	Ext. Nom (%)
	Pot. Laser	Vel. Laser	Esp. camada						
1	-1	-1	-1	8,36	243,97	416,12	692,57	558,50	31,67
2	-1	-1	1	8,33	233,77	376,32	690,06	509,71	27,01
3	-1	1	-1	8,76	243,95	367,86	621,29	485,49	25,49
4	-1	1	1	8,19	237,42	404,68	672,08	491,27	29,29
5	1	-1	-1	10,44	253,11	378,58	639,18	486,32	23,40
6	1	-1	1	9,57	249,65	383,20	628,76	509,78	22,59
7	1	1	-1	9,19	259,89	401,52	659,38	418,57	23,76
8	1	1	1	9,48	250,59	380,57	625,46	490,24	21,78

Procedeu-se de seguida ao tratamento estatístico dos resultados experimentais usando para o efeito o programa informático “STATISTICA”.

As tabelas que se seguem apresentam as tabelas ANOVA para cada uma das seis respostas em estudo (rugosidade, dureza, tensão de cedência, tensão de rotura, tensão a que ocorre a fratura e extensão nominal). Em cada tabela são apresentados os valores referentes às três variáveis e às oito interações possíveis entre cada uma das variáveis.

Sabendo que as variáveis estudadas são de primeira ordem, não faz sentido proceder ao cálculo das tabelas ANOVA inserindo as interações entre as três variáveis, uma vez que ao considerar as interações o erro seria obrigatoriamente 1, tornando muito difícil a existência de variáveis significativas.

Assim, a tabela ANOVA apresentada de seguida (tabela 5.22), apenas contém as influências diretas de cada uma das variáveis para a rugosidade.

Tabela 5.22 - Tabela ANOVA referente à rugosidade (retirada do programa STATISTICA)

ANOVA; Var.:Rugosidade; R-sqr=,82665; Adj:,69665; 2**(3-0) design; MS Residual=,1826216 DV: Rugosidade						
Factor	SS	df	MS	F	p	
(1)Potência do Laser	3,168903	1	3,168903	17,35229	0,014081	
(2)Velocidade do Laser	0,146611	1	0,146611	0,80281	0,420902	
(3)Espessura por camada	0,167910	1	0,167910	0,91944	0,391922	
Error	0,730486	4	0,182622			
Total SS	4,213911	7				

A tabela ANOVA apresentada na tabela 5.23, contém as influências diretas de cada uma das variáveis para a resposta dureza.

Tabela 5.23 - Tabela ANOVA referente à dureza (retirada do programa *STATISTICA*)

Factor	ANOVA; Var.:Dureza; R-sqr=,9686; Adj:,9450; 2**(3-0) design; MS Residual=3,979972 DV: Dureza				
	SS	df	MS	F	p
(1)Potência do Laser	366,3473	1	366,3473	92,04772	0,000660
(2)Velocidade do Laser	16,1028	1	16,1028	4,04596	0,114608
(3)Espessura por camada	108,6584	1	108,6584	27,30129	0,006405
Error	15,9199	4	3,9800		
Total SS	507,0284	7			

A tabela ANOVA apresentada na tabela 5.24, contém as influências diretas de cada uma das variáveis para a resposta tensão de rotura.

Tabela 5.24 - Tabela ANOVA referente à tensão de rotura (retirada do programa *STATISTICA*)

Factor	ANOVA; Var.:Tensão de rotura; R-sqr=,43412; Adj:,009; 2**(3-0) design; MS Residual=832,4267 DV: Tensão de rotura				
	SS	df	MS	F	p
(1)Potência do Laser	1897,990	1	1897,990	2,280068	0,205560
(2)Velocidade do Laser	654,455	1	654,455	0,786202	0,425345
(3)Espessura por camada	1,946	1	1,946	0,002338	0,963757
Error	3329,707	4	832,427		
Total SS	5884,098	7			

A tabela ANOVA apresentada na tabela 5.25, contém as influências diretas de cada uma das variáveis para a resposta tensão de cedência.

Tabela 5.25 - Tabela ANOVA referente à tensão de cedência (retirada do programa *STATISTICA*)

Factor	ANOVA; Var.:Tensão de cedência; R-sqr=,05234; Adj: 2**(3-0) design; MS Residual=463,8653 DV: Tensão de cedência				
	SS	df	MS	F	p
(1)Potência do Laser	55,790	1	55,7903	0,120273	0,746215
(2)Velocidade do Laser	0,021	1	0,0209	0,000045	0,994967
(3)Espessura por camada	46,660	1	46,6602	0,100590	0,766987
Error	1855,461	4	463,8653		
Total SS	1957,932	7			

A tabela ANOVA apresentada na tabela 5.26, contém as influências diretas de cada uma das variáveis para a resposta tensão a que ocorre a fratura.

Tabela 5.26 - Tabela ANOVA referente à tensão a que ocorre a fratura (retirada do programa *STATISTICA*)

ANOVA; Var.:Fratura; R-sqr=,64632; Adj:,38102** (3-0) design; MS Residual=928,2545 DV: Fratura					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Potência do Laser	2452,10	1	2452,100	2,641625	0,179423
(2)Velocidade do Laser	3993,50	1	3993,498	4,302159	0,106726
(3)Espessura por camada	339,56	1	339,562	0,365807	0,577932
Error	3713,02	4	928,254		
Total SS	10498,18	7			

A tabela ANOVA apresentada na tabela 5.27, contém as influências diretas de cada uma das variáveis para a resposta extensão nominal.

Tabela 5.27 - Tabela ANOVA referente à extensão nominal (retirada do programa *STATISTICA*)

ANOVA; Var.:Extensão Nominal; R-sqr=,76061; Adj:,581072** (3-0) design; MS Residual=5,045256 DV: Extensão Nominal					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Potência do Laser	60,10035	1	60,10035	11,91225	0,026021
(2)Velocidade do Laser	2,35925	1	2,35925	0,46762	0,531644
(3)Espessura por camada	1,66152	1	1,66152	0,32932	0,596783
Error	20,18102	4	5,04526		
Total SS	84,30215	7			

Todos os termos significativos encontram-se a vermelho (cor automática do programa para os termos significativos). Para saber se um termo é ou não significativo, é necessário saber qual o valor de  $F(p-1, N-p, \alpha)$ . Estes valores podem ser obtidos utilizando a tabela ANOVA, uma vez que:

- $p-1$ , corresponde ao valor de “df” (graus de liberdade) para as variáveis em estudo, sendo 1 em todos os casos em estudo;
- $N-p$ , corresponde ao valor de “df” indicado no resto ou *error*, sendo 4 em todos os casos;
- O valor de  $\alpha$ , neste caso foi de 5% ou 0.05.

Para que as variáveis sejam significativas, é necessário que as mesmas apresentem um valor de F superior ao valor apresentado na tabela da distribuição F de *Snedcor* para  $\alpha = 5\%$  (tabela 4) para valores de  $F(1,4,0.05)=7.71$ . O que significa que a probabilidade de  $F(1,4) \geq 7.71$  é igual a 5%, justificando dessa forma a adoção deste modelo de regressão.

Na simbologia do programa *STATISTICA*, “R-sqr” e “Adj” equivalem respetivamente a  $R^2$  e  $R_A^2$  conforme definidos nas equações 4.3 e 4.4.

Através da figura 5.1, foi efetuada a análise da normalidade dos resíduos para a rugosidade. Por sua vez, através da figura 5.2, foi efetuada a análise da normalidade dos resíduos para a dureza.

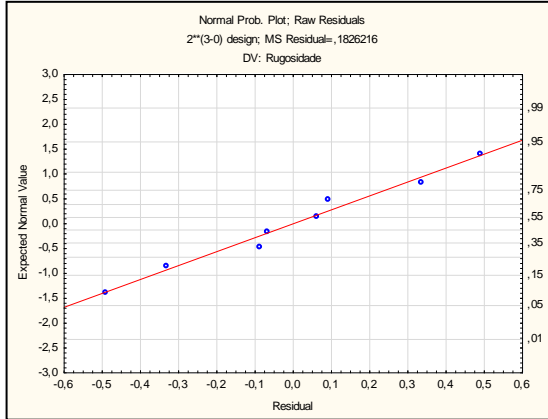


Figura 5.1 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta rugosidade

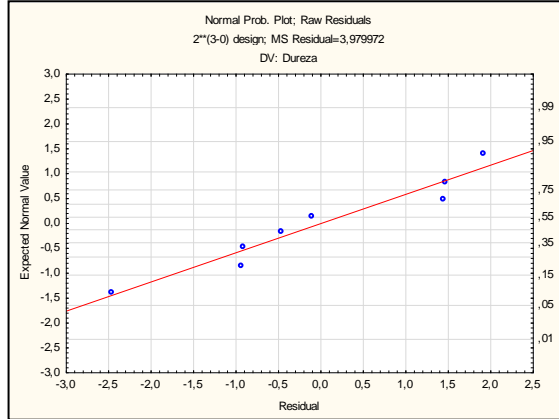


Figura 5.2 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta dureza

Através da figura 5.3, foi efetuada a análise da normalidade dos resíduos para a tensão de cedência. Além disso, através da figura 5.4, foi efetuada a análise da normalidade dos resíduos para a tensão de rotura.

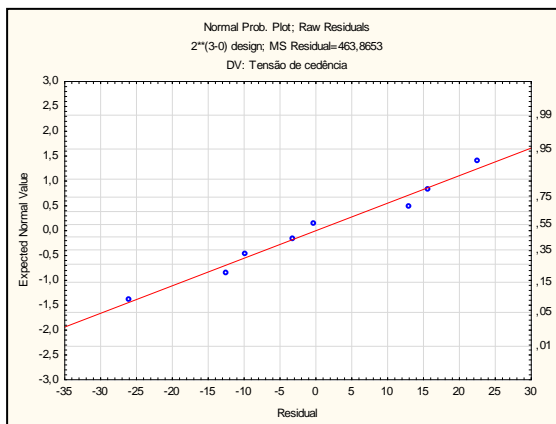


Figura 5.3 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta tensão de cedência

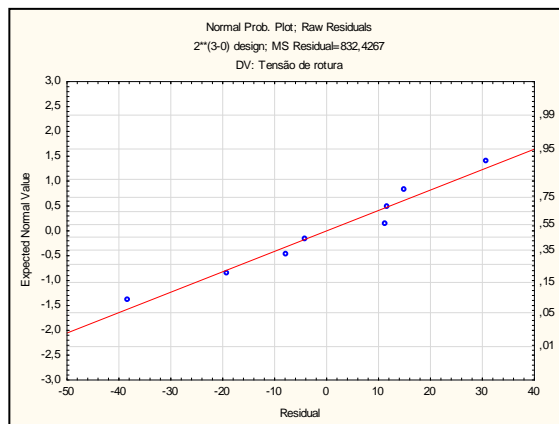


Figura 5.4 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta tensão de rotura

Através da figura 5.5, foi efetuada a análise da normalidade dos resíduos para a tensão a que ocorre a fratura. Já através da figura 5.6, foi efetuada a análise da normalidade dos resíduos para a extensão nominal.

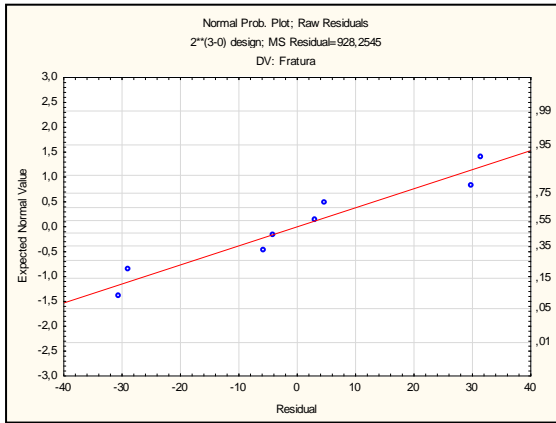


Figura 5.5 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta tensão a que ocorre a fratura

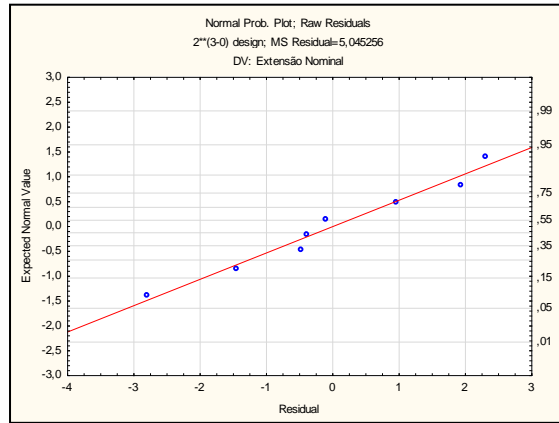


Figura 5.6 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente à resposta extensão nominal

Analisando as figuras acima, constatou-se que os resíduos se dispunham em torno da reta em todos os casos analisados, não indicando uma forte violação do pressuposto da normalidade.

A existência de uma distribuição normal permitiu admitir que não existiam quaisquer outros fatores que influenciassem a resposta.

A figura 5.7 apresenta o gráfico dos resíduos em função da ordem das experiências realizadas para a rugosidade. Por sua vez, a figura 5.8 apresenta o gráfico dos resíduos em função da ordem das experiências realizadas para a dureza.

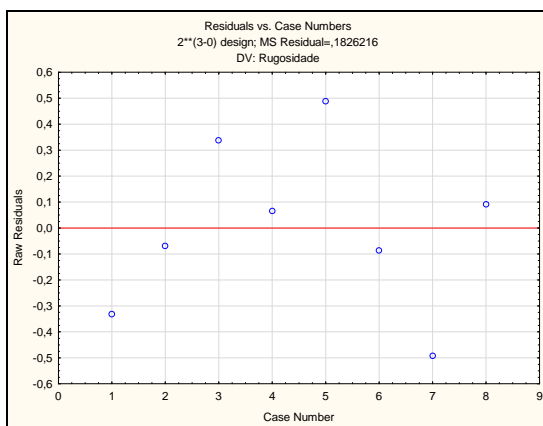


Figura 5.8 - Gráfico dos resíduos em função da ordem de experiências para a rugosidade

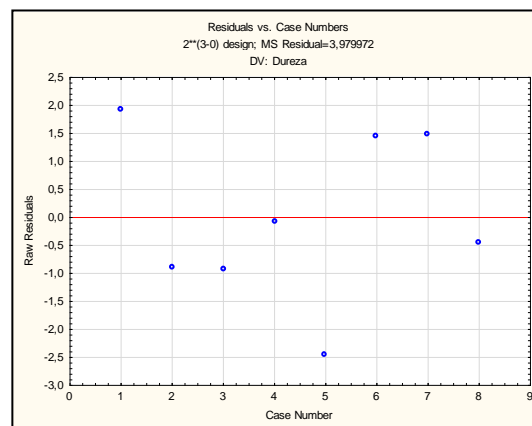


Figura 5.7 - Gráfico dos resíduos em função da ordem de experiências para a dureza

A figura 5.9 apresenta o gráfico dos resíduos em função da ordem das experiências realizadas para a tensão de cedência. Além disso, a figura 5.10 apresenta o gráfico dos resíduos em função da ordem das experiências realizadas para a tensão de rotura.

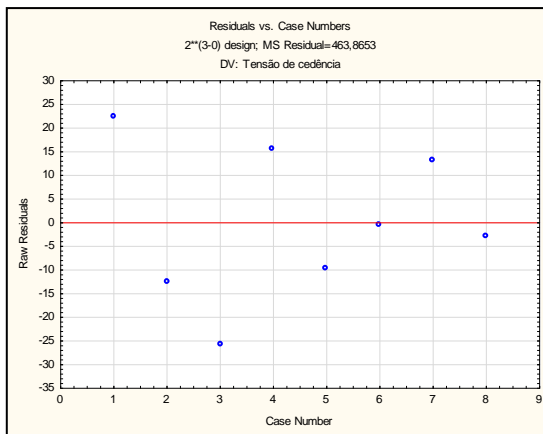


Figura 5.9 - Gráfico dos resíduos em função da ordem de experiências para a tensão de cedência

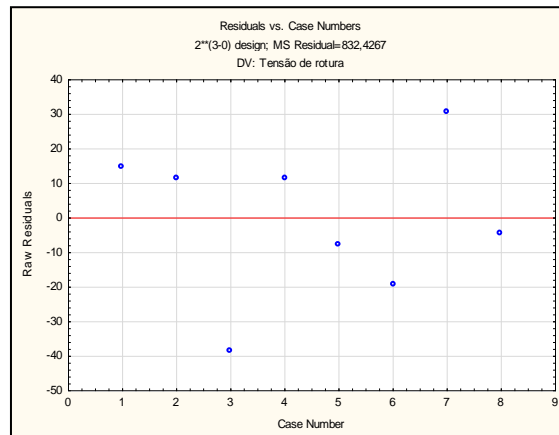


Figura 5.10 - Gráfico dos resíduos em função da ordem de experiências para a tensão de rotura

A figura 5.11 apresenta o gráfico dos resíduos em função da ordem das experiências realizadas para a tensão a que a fratura ocorre. Acresce ainda que a figura 5.12 apresenta o gráfico dos resíduos em função da ordem das experiências realizadas para a extensão nominal.

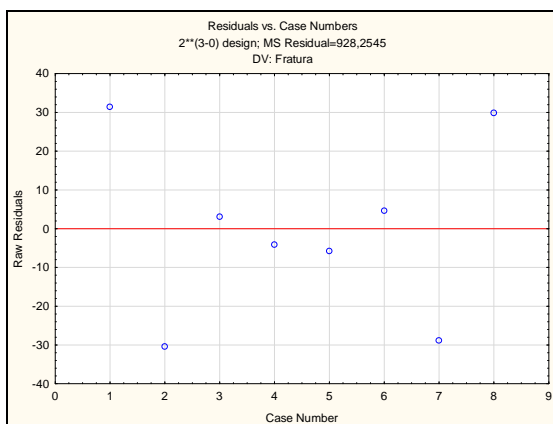


Figura 5.11 - Gráfico dos resíduos em função da ordem de experiências para a tensão a que ocorre a fratura

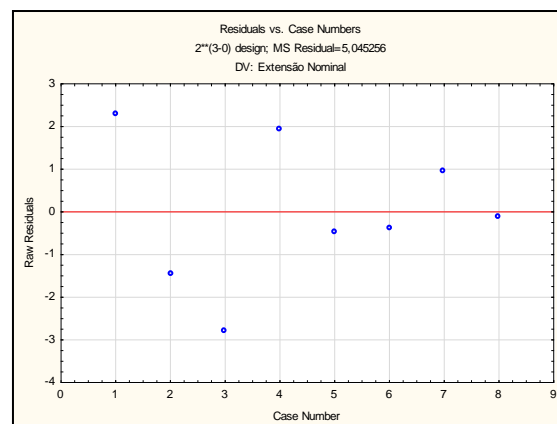


Figura 5.12 - Gráfico dos resíduos em função da ordem de experiências para a extensão nominal

Os gráficos acima representados apresentam os resíduos em função da ordem aleatória pela qual as experiências foram efetuadas. De referir que estes gráficos permitem avaliar a independência. Uma vez que os resíduos se dispuseram no gráfico de uma forma aleatória, não demonstrando qualquer tendência especial, é possível admitir que a hipótese da independência é razoavelmente satisfeita.

Os gráficos representados nas figuras que se seguem têm como função avaliar se a variância é ou não constante.

A figura 5.13 apresenta os resíduos dos valores observados face ao modelo previsto para a rugosidade. Na figura 5.14 são apresentados os resíduos dos valores observados face ao modelo previsto para a dureza.

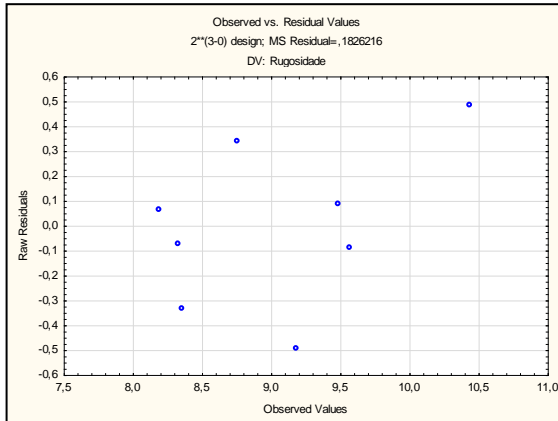


Figura 5.14 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a rugosidade

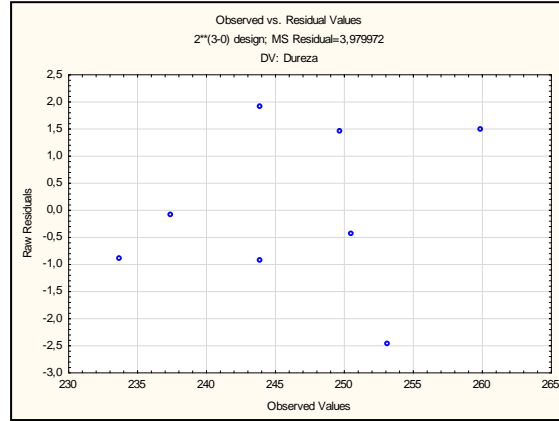


Figura 5.13 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a dureza

A figura 5.15 apresenta os resíduos dos valores observados face ao modelo previsto para a tensão de cedência. Já a figura 5.16 apresenta os resíduos dos valores observados face ao modelo previsto para a tensão de rotura.

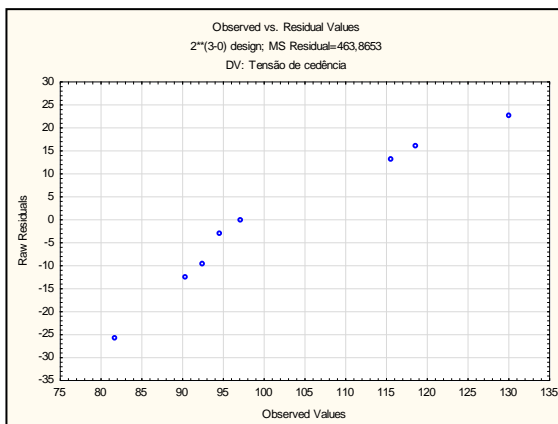


Figura 5.16 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a tensão de cedência

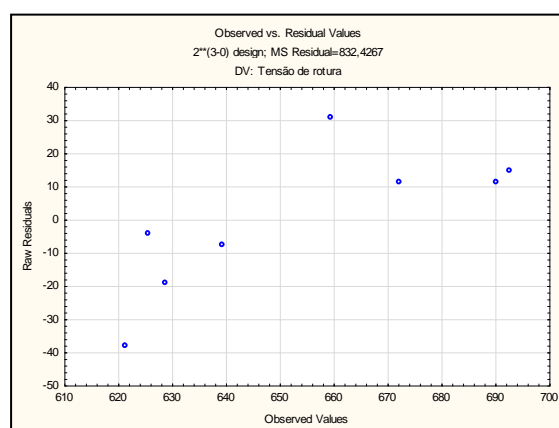


Figura 5.15 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a tensão de rotura

A figura 5.17 apresenta os resíduos dos valores observados face ao modelo previsto para a tensão a que ocorre a fratura. Por sua vez, a figura 5.18 apresenta os resíduos dos valores observados face ao modelo previsto para a extensão nominal.

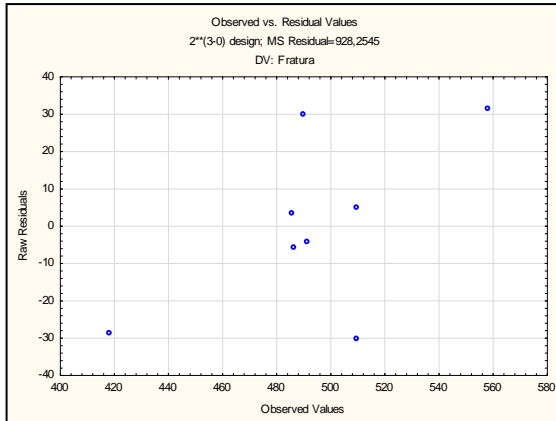


Figura 5.18 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a tensão de fratura

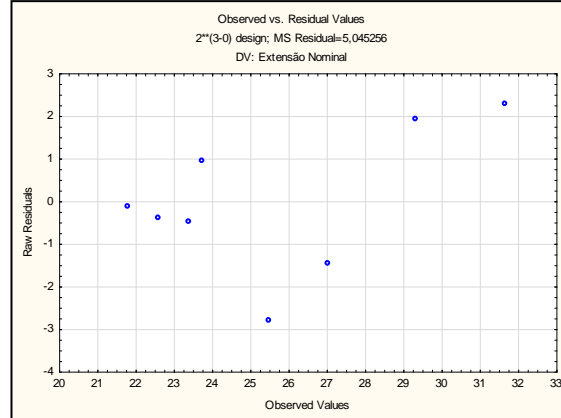


Figura 5.17 - Gráfico dos resíduos em função dos valores observados para a extensão nominal

Em todas as figuras acima representadas, foi possível constatar uma distribuição aleatória dos resíduos em torno da linha horizontal de valor zero. Logo, foi possível admitir que a variância é constante.

Nas figuras seguintes, a importância de cada variável e da sua interação com as outras, é evidenciada nos gráficos de *Pareto*. Nesses, cada efeito é apresentado em função do valor adimensional da função "t".

A figura 5.19 representa o gráfico de *Pareto* para a rugosidade.

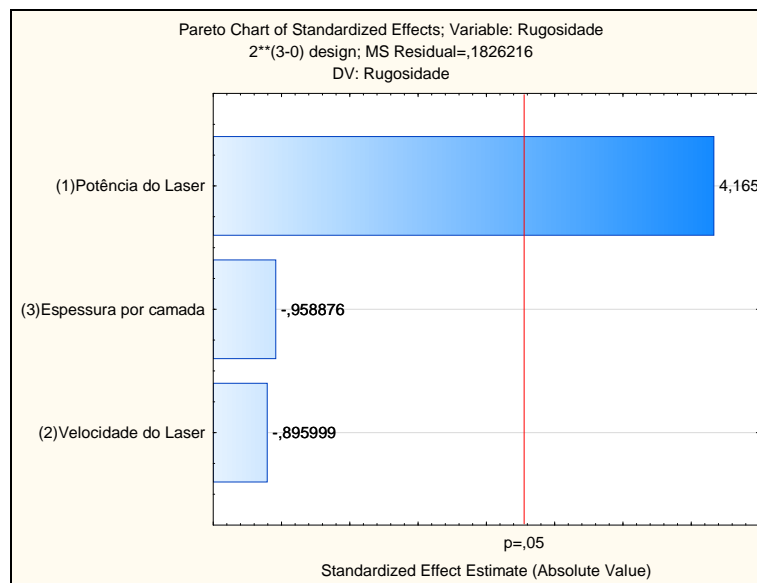


Figura 5.19 - Importância relativa das variáveis quanto à rugosidade

A figura 5.20 representa o gráfico de *Pareto* para a dureza.

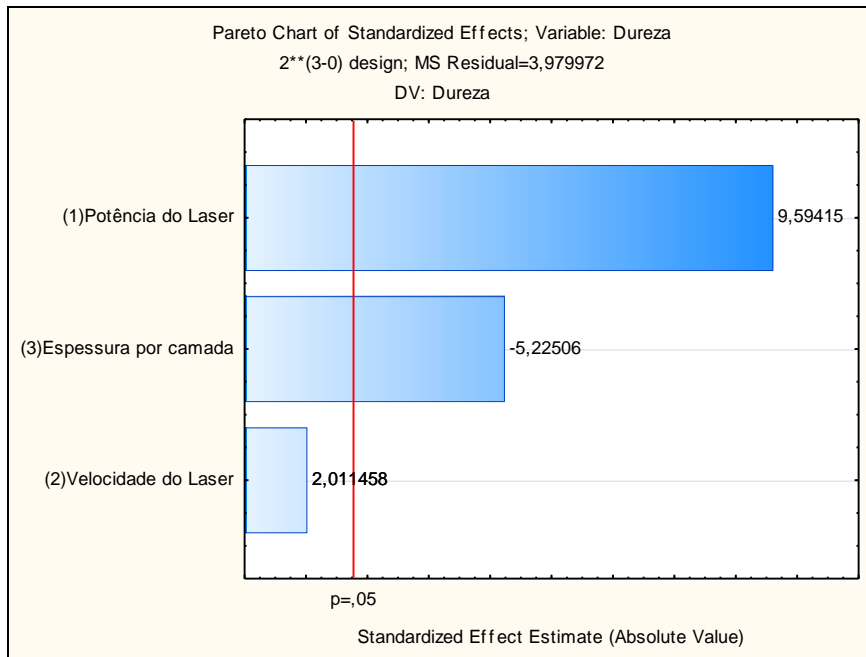


Figura 5.20 - Importância relativa das variáveis quanto à dureza

A figura 5.21 representa o gráfico de *Pareto* para a tensão de rotura.

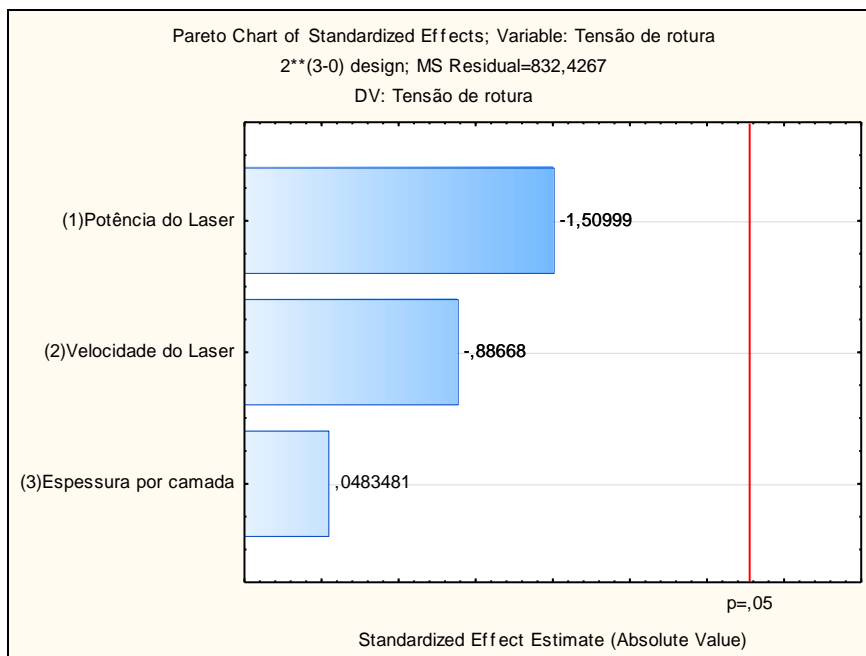


Figura 5.21 - Importância relativa das variáveis quanto à tensão de rotura

A figura 5.22 representa o gráfico de *Pareto* para a tensão de cedência.

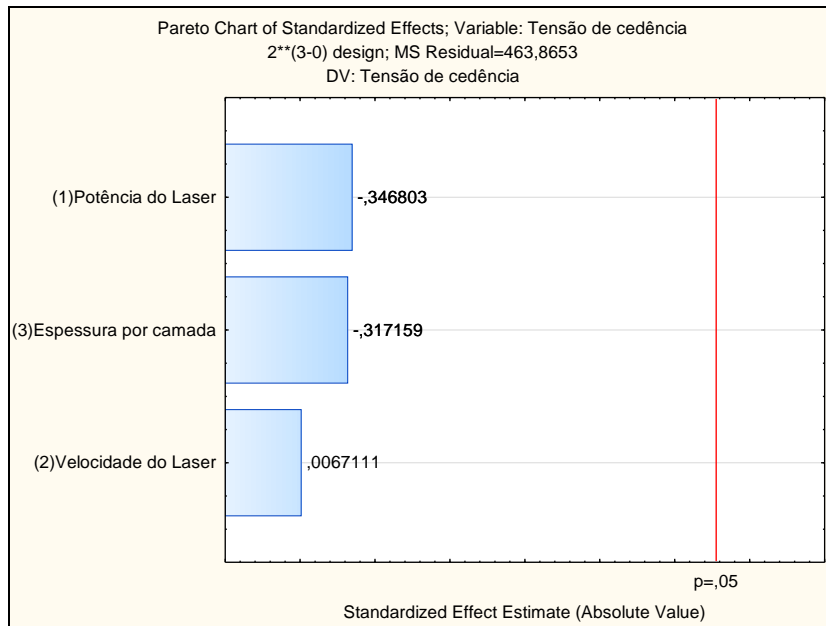


Figura 5.22 - Importância relativa das variáveis quanto à tensão de cedência

A figura 5.23 representa o gráfico de *Pareto* para a tensão de fratura.

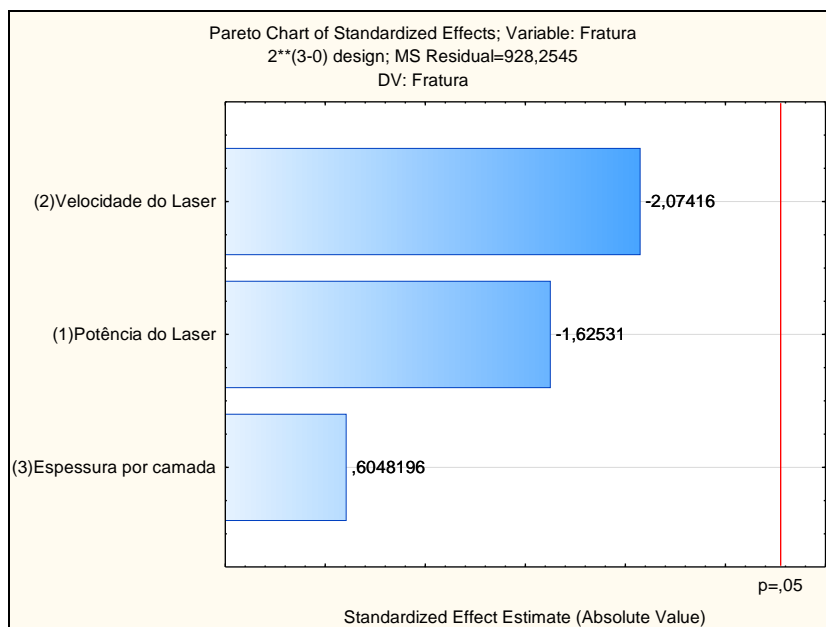


Figura 5.23 - Importância relativa das variáveis quanto à tensão a que ocorre a fratura

A figura 5.24 representa o gráfico de *Pareto* para a extensão nominal.

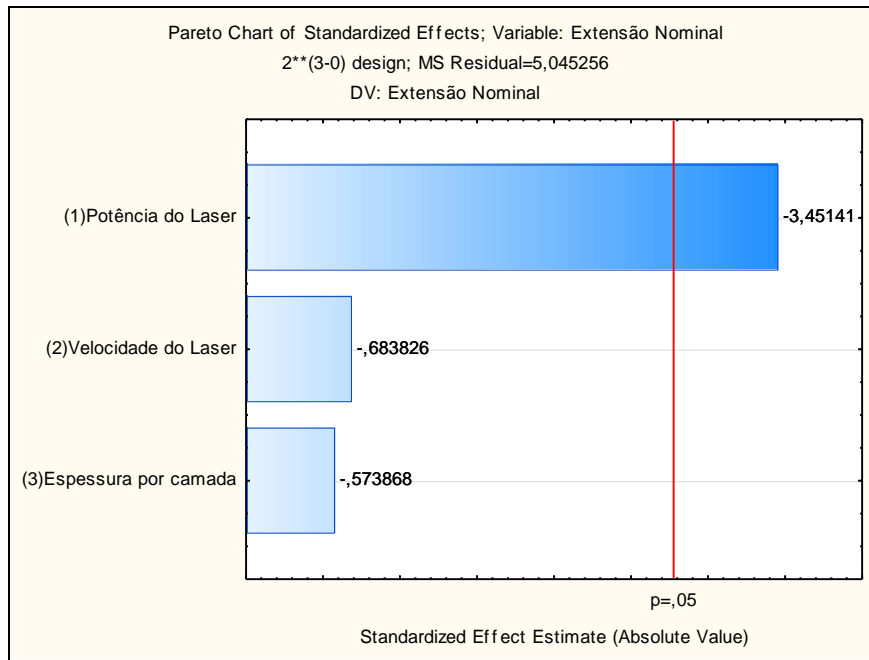


Figura 5.24 - Importância relativa das variáveis quanto à extensão nominal

Nas figuras acima representadas, é comum a existência de uma linha vertical que indica o ponto a partir do qual se verifica a relação  $|t| > 2.776$ , identificando assim os termos significativos da regressão com um intervalo de confiança de 95%. O sinal de  $t$  (positivo ou negativo) indica a forma como esse termo influencia a resposta, crescente ou decrescentemente.

Assim sendo, é possível admitir mais uma vez que nenhuma das três variáveis tem influência nos resultados referentes à tensão de cedência, à tensão de rotura e à tensão de fratura, uma vez que todas elas se encontram do lado esquerdo da linha vertical do gráfico de *Pareto*.

As figuras abaixo apresentadas correspondem a gráficos que representam a superfície de resposta tridimensional para cada conjunto de duas variáveis.

Estes gráficos permitem obter a melhor conjugação de valores para as duas variáveis representadas, permitindo dessa forma maximizar ou minimizar a resposta a ser estudada.

Apenas foram calculadas as superfícies de resposta para os casos em que pelo menos uma das duas variáveis era significativa, uma vez que, a superfície de resposta obtida para duas variáveis não significativas corresponde aproximadamente a um plano horizontal, ou seja, não se verifica qualquer relação entre as duas variáveis.

A figura 5.25 representa a superfície de resposta para a rugosidade em função das variáveis potência do laser e velocidade do laser.

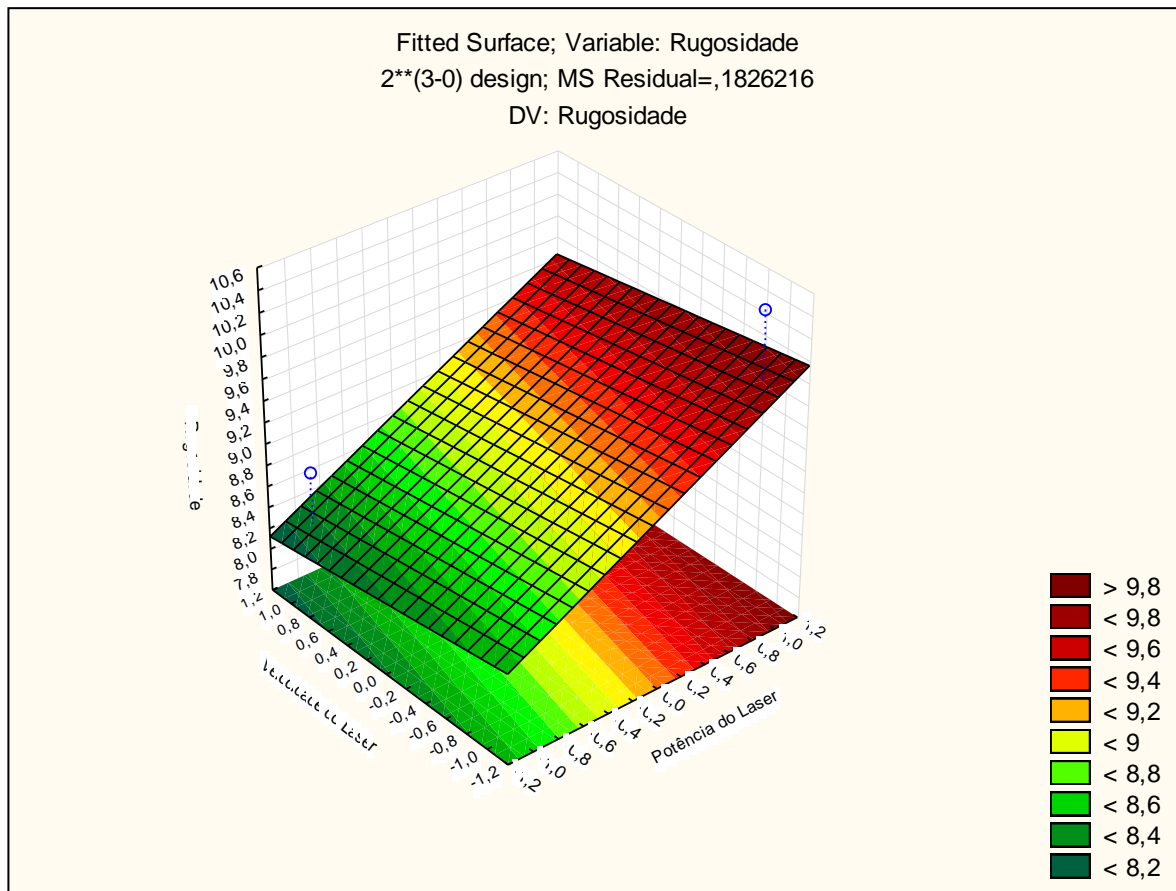


Figura 5.25 - Superfície de resposta para a rugosidade em função da potência do laser e da velocidade do laser

Ao observar a figura acima, é possível perceber qual a melhor conjugação de valores que origina valores de rugosidade máximos e mínimos. Assim, de acordo com o gráfico, a rugosidade máxima verifica-se quando a potência do laser é máxima e a velocidade do laser é mínima. Por sua vez, a rugosidade mínima, verifica-se quando a potência do laser é mínima e a velocidade do laser é máxima.

A figura 5.26 representa a superfície de resposta para a rugosidade em função das variáveis potência do laser e espessura por camada.

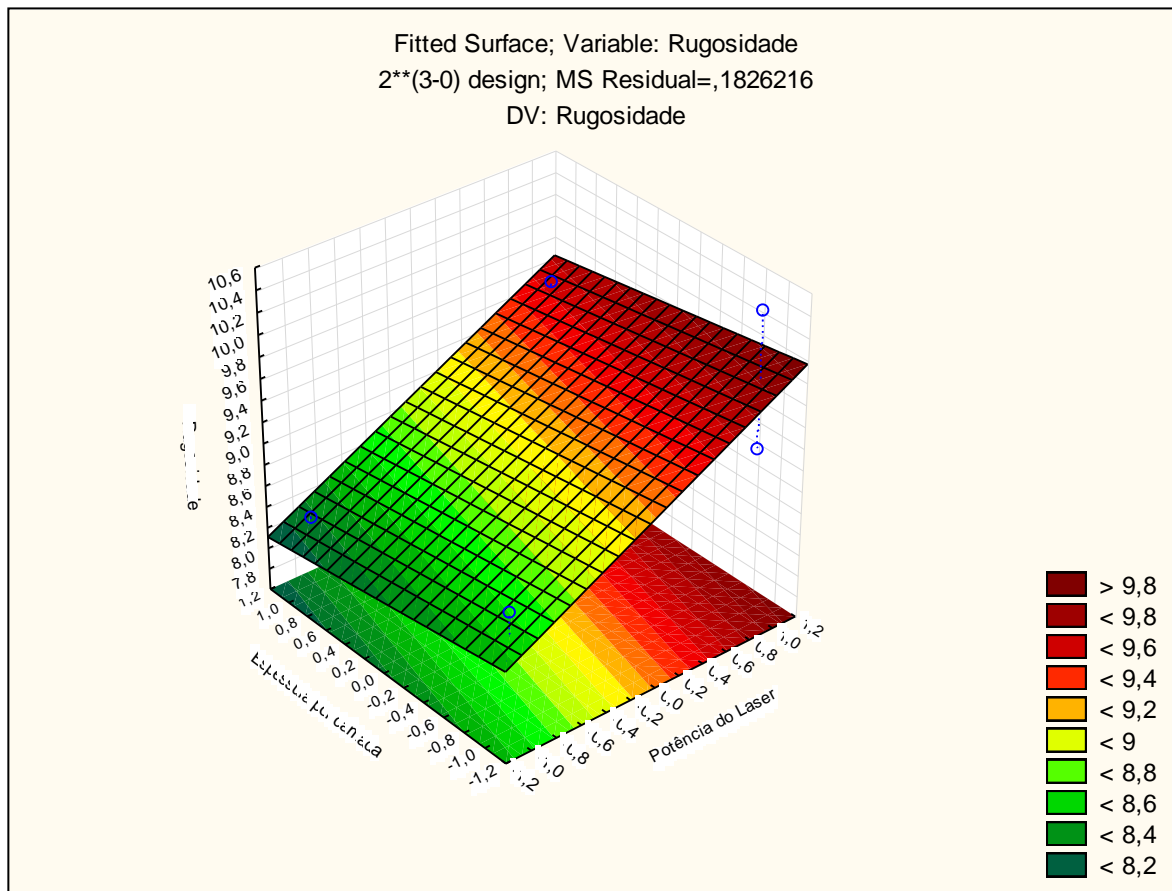


Figura 5.26 - Superfície de resposta para a rugosidade em função da potência do laser e da espessura por camada

A partir da análise do gráfico acima apresentado, é possível verificar que o valor de rugosidade máxima surge quando a potência do laser é máxima e a espessura por camada é mínima. Além disso, a rugosidade mínima obtém-se através da conjugação de uma potência de laser mínima e de uma espessura por camada máxima. A figura 5.27 representa a superfície de resposta para a dureza em função das variáveis potência do laser e velocidade do laser.

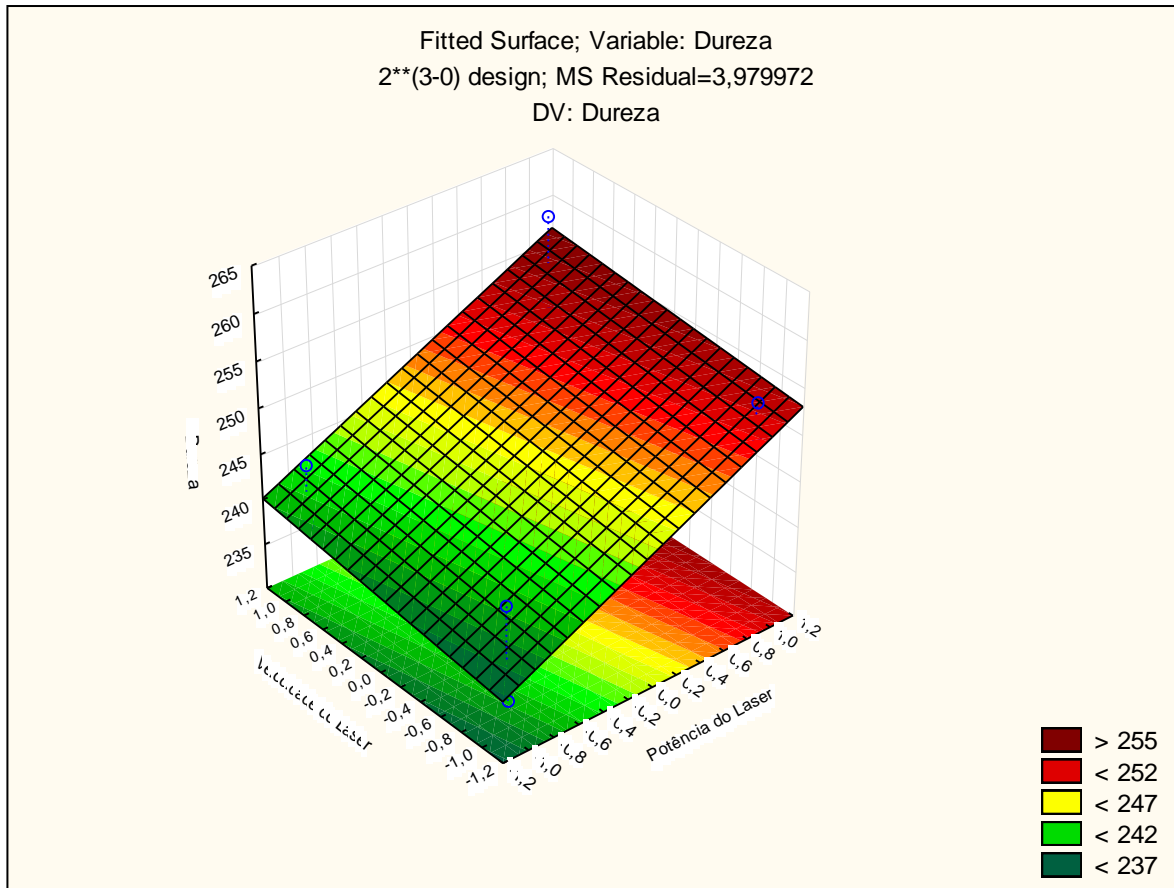


Figura 5.27 - Superfície de resposta para a dureza em função da potência do laser e da velocidade do laser

Analisando a figura acima ilustrada, conclui-se que a dureza máxima ocorre quando a potência do laser é máxima e quando a velocidade do laser é igualmente máxima. Para que se obtenha a dureza mínima, são necessárias velocidades do laser e potências do laser mínimas.

A figura 5.28 representa a superfície de resposta para a dureza em função das variáveis potência do laser e espessura por camada.

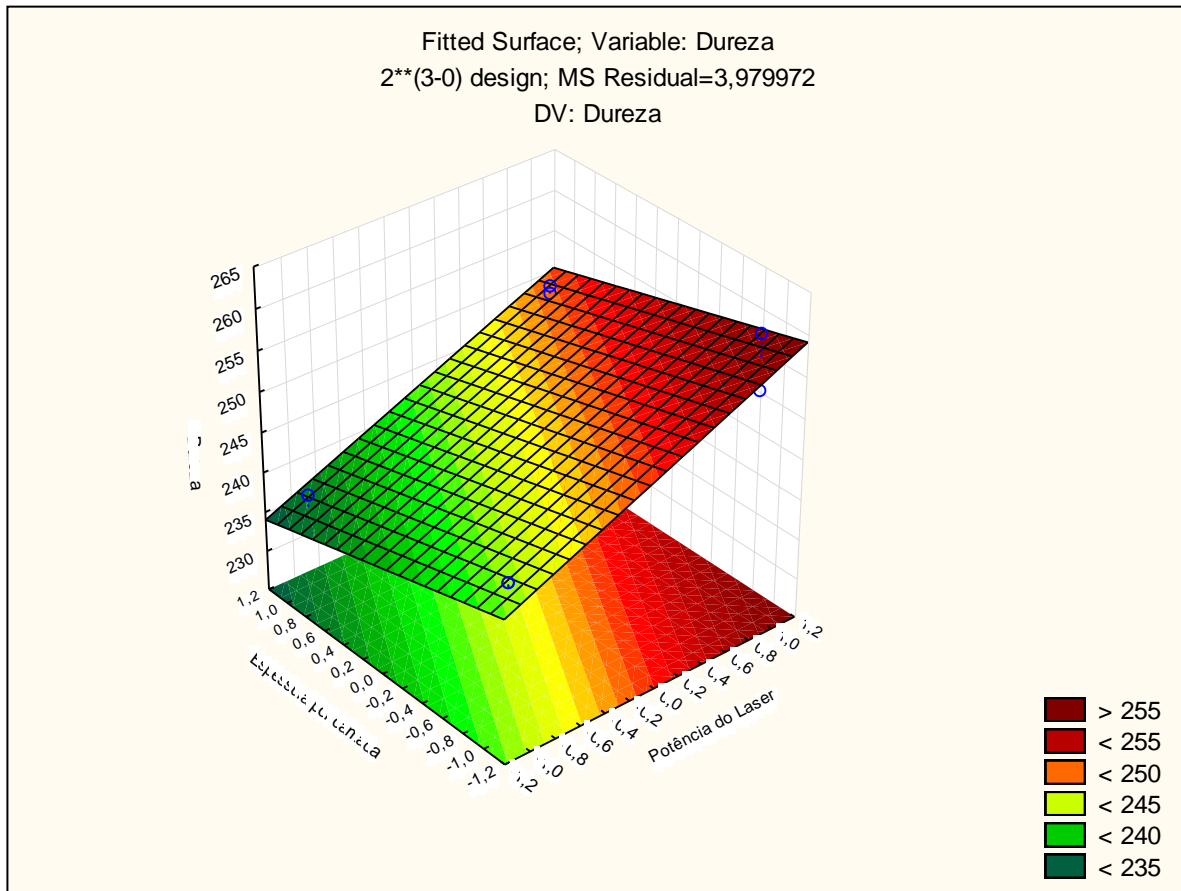


Figura 5.28 - Superfície de resposta para a dureza em função da potência do laser e da espessura por camada

Analisando o gráfico representado acima, conclui-se que para que se obtenha uma dureza máxima, é necessária uma conjugação de uma potência máxima e de uma espessura por camada mínima. Por outro lado, para se obter uma dureza mínima, a potência do laser tem de ter o menor valor possível e a espessura por camada tem de ter o maior valor possível.

A figura 5.29 representa a superfície de resposta para a dureza em função das variáveis espessura por camada e da velocidade do laser.

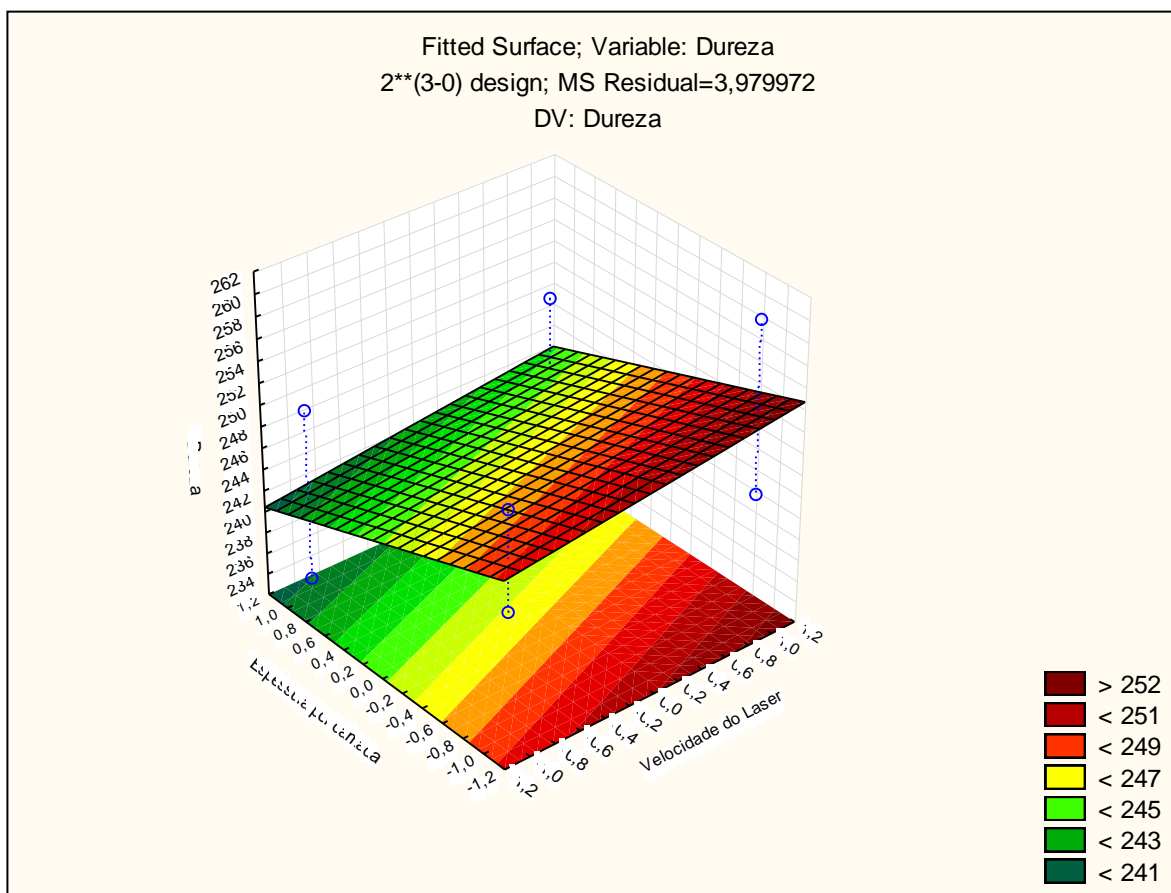


Figura 5.29 - Superfície de resposta para a dureza em função da espessura por camada e da velocidade do laser

O gráfico acima ilustrado, traduz a melhor conjugação das variáveis espessura por camada e velocidade do laser que permitem maximizar e minimizar a resposta dureza. Sendo assim, para maximizar a dureza, a velocidade do laser tem de ser máxima e a espessura por camada tem de ser mínima. Por sua vez, para minimizar a dureza, a velocidade do laser tem de ser mínima e a espessura por camada tem de ser máxima.

A figura 5.30 representa a superfície de resposta para a extensão nominal em função das variáveis potência do laser e da velocidade do laser.

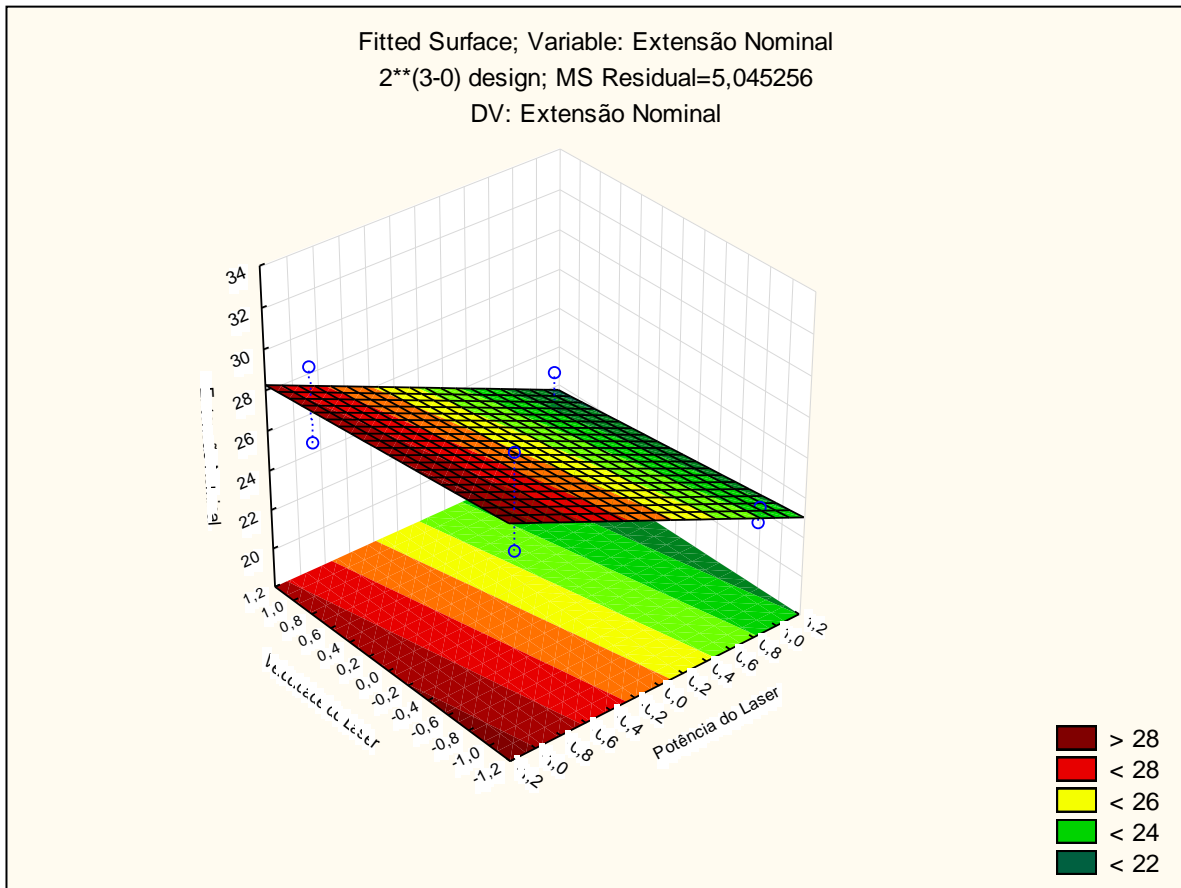


Figura 5.30 - Superfície de resposta para a extensão nominal em função da potência do laser e da velocidade do laser

A figura acima representada traduz a relação entre as variáveis velocidade do laser e potência do laser, permitindo obter uma maior ou menor extensão nominal. Assim, para se obter uma extensão nominal máxima, a velocidade do laser tem de ter um valor mínimo assim como a potência do laser. Por outro lado, caso o objetivo seja minimizar a extensão nominal, a melhor conjugação de variáveis corresponde a uma velocidade do laser máxima e a uma potência do laser máxima. A figura 5.31 representa a superfície de resposta para a extensão nominal em função das variáveis potência do laser e da espessura por camada.

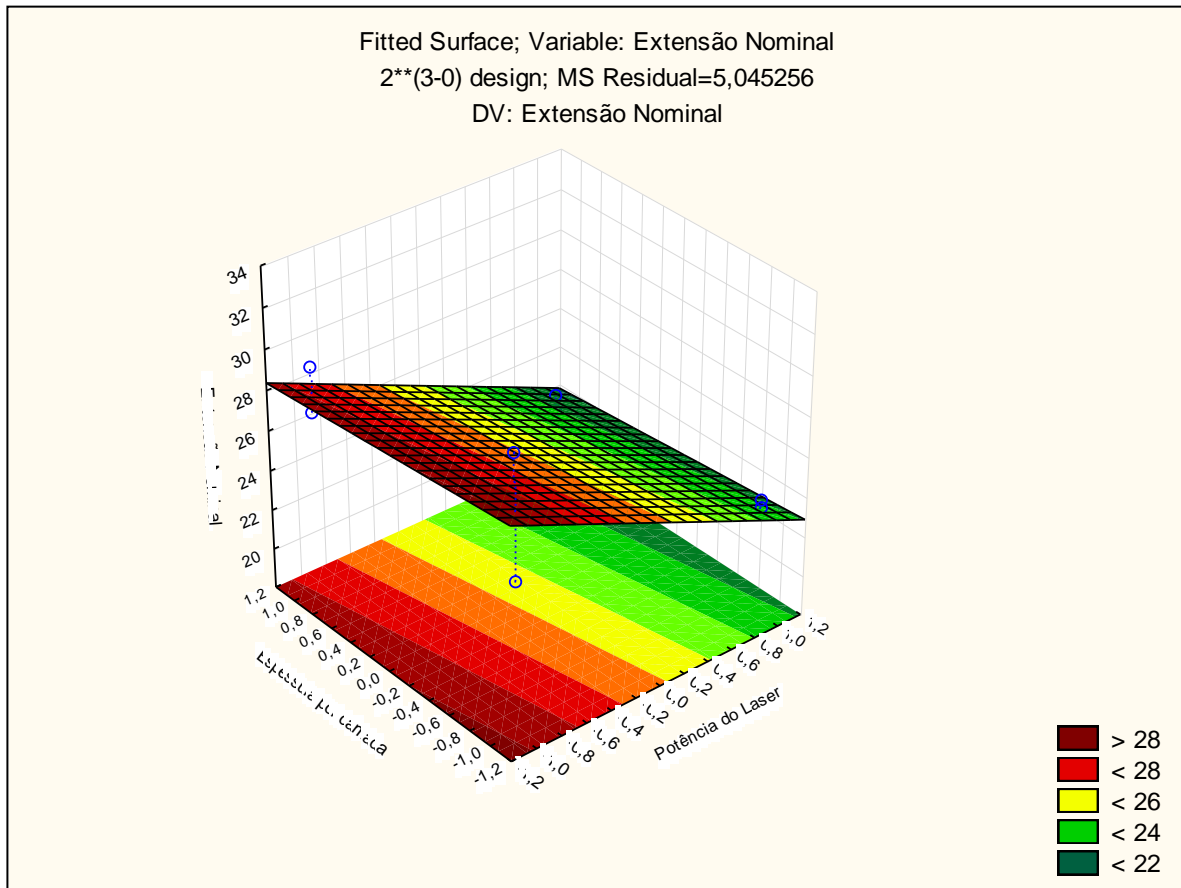


Figura 5.31 - Superfície de resposta para a extensão nominal em função da potência do laser e da espessura por camada

Analisando o gráfico da superfície de resposta acima representado, é possível concluir que a extensão nominal máxima ocorre quando a potência do laser e a espessura por camada são mínimos. Por sua vez, a extensão nominal mínima ocorre quando a potência do laser e a espessura por camada são máximos.

Uma vez testada a significância do modelo matemático e feita a análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico, está-se então em condições de proceder à interpretação dos resultados experimentais.

### 5.3 Interpretação de resultados

Tendo em conta que o modelo experimental usado, visava essencialmente permitir identificar quais as principais variáveis (de entre as estudadas) que influenciavam as seis respostas em estudo, a análise efetuada aos resultados experimentais permite retirar as seguintes conclusões com um grau de confiança de 95%.

- Potência do laser ( $X_1$ ), é a variável mais importante quanto à rugosidade, quanto à dureza e quanto à extensão nominal. Quanto maior a potência do laser, maior é a rugosidade, maior é a dureza e menor é a extensão nominal dos provetes. A potência do laser não tem influência na tensão de cedência, na tensão de rotura e na tensão de fratura.
- A velocidade do laser ( $X_2$ ), não tem influência em qualquer uma das respostas estudadas.
- Espessura por camada ( $X_3$ ), apenas tem influência na dureza do provete, embora apresente uma influência menor do que a potência do laser. Quanto maior a espessura por camada, menor é a dureza do material. A espessura por camada não tem influência na rugosidade, na tensão de cedência, na tensão de rotura, na tensão de fratura e na extensão nominal.

Estas conclusões qualitativas apresentam-se sistematizadas na tabela 5.28.

Tabela 5.28 - Resultados qualitativos das respostas estudadas face ao aumento do valor das variáveis

Sentido da variável	Resposta estudada					
	Rugosidade	Dureza	Tensão de cedência	Tensão de rotura	Tensão de fratura	Extensão nominal
<b>Aumento da Potência do laser</b>	Aumenta	Aumenta	-	-	-	Diminui
<b>Aumento da Espessura por camada</b>	-	Diminui	-	-	-	-
<b>Aumento da Velocidade do laser</b>	-	-	-	-	-	-

Após a análise dos resultados obtidos e apresentados na tabela 5.28, foi possível verificar que a rugosidade aumenta com o aumento da potência do laser.

Como se sabe, a rugosidade aumenta com o aumento do diâmetro das partículas que constituem as camadas do material. Uma vez que na presente dissertação, a dimensão das partículas foi a mesma em todos os provetes analisados, este fator não pode ser considerado.

Sendo assim, o aumento da rugosidade que se verifica deve-se à instabilidade do banho de fusão que aumenta com o aumento da potência do laser, originando dessa forma uma rugosidade superior para provetes produzidos com altas potências de laser [30].

Quanto à dureza, é possível verificar um aumento da dureza com o aumento da potência do laser. Segundo *Tsopanos* [31], ao diminuir a potência do laser no processo de impressão por SLM, as peças obtidas apresentam uma porosidade superior, uma vez que a fusão dos pós que constituem as camadas das mesmas pode ser incompleta. Assim, pode concluir-se que o aumento da porosidade está diretamente relacionado com a diminuição da dureza.

Também foi possível verificar uma diminuição da dureza com o aumento da espessura por camada que constitui a peça.

Este facto foi justificado segundo *Guan* [27], uma vez que, segundo o autor, quando a espessura por camada aumenta, é necessária uma potência de laser mais elevada para que ocorra uma fusão completa dos póis que constituem essa camada. Se a potência do laser não for suficientemente elevada, a porosidade média do material aumenta, diminuindo dessa forma a dureza do material.

Outra alteração que foi observada foi a diminuição da extensão nominal com o aumento da potência do laser.

*Wysisk* [32] concluiu que a ductilidade das peças produzidas por SLM diminui com o aumento da potência do laser. Esse aumento é responsável por maiores gradientes de temperatura, que originam uma microestrutura acicular muito fina das peças, provocando uma diminuição da ductilidade e conseqüentemente da extensão nominal das mesmas.



# 6

## Conclusão

### 6.1 Conclusões

Após a análise dos resultados obtidos para as diferentes respostas (rugosidade, dureza, tensão de cedência, tensão de rotura, tensão a que ocorre a fratura e extensão nominal), foi possível inferir sobre a conjugação de parâmetros que confere melhores propriedades mecânicas às peças produzidas na impressora 3D M1 *Cusing*.

Assim:

- A conjugação de parâmetros que apresenta melhores resultados para a resposta rugosidade é a aplicação de uma potência de laser mínima, reduzindo desta forma a rugosidade da peça produzida, o tempo de produção da mesma e, por consequência, os custos associados à produção.  
No entanto, caso haja interesse em produzir peças com uma maior rugosidade, a melhor conjugação de parâmetros será a oposta à referida anteriormente.
- Apesar dos resultados obtidos na medição da dureza serem superiores aos tabelados para o aço 316L, a melhor conjugação de variáveis de produção que possibilitam a impressão de peças com dureza máxima pressupõe a aplicação de uma potência de laser máxima e de uma espessura por camada mínima.  
Se o objetivo for produzir peças com uma dureza reduzida, a melhor conjugação de parâmetros será também a oposta à referida anteriormente.
- Os resultados obtidos para a tensão de cedência e para a tensão de rotura foram superiores aos tabelados. No entanto, as tensões obtidas no ensaio de tração uniaxial (tensão de cedência, tensão de rotura e tensão a que ocorre a fratura) não são influenciadas pela alteração das variáveis estudadas na presente dissertação (potência do laser, espessura por camada e velocidade do laser).
- Apesar da extensão nominal calculada ter apresentados resultados inferiores aos tabelados, a única variável que afeta a extensão nominal é a potência do laser. A maior extensão nominal corresponde uma potência de laser mínima.

Por sua vez, se se pretender produzir peças com uma menor extensão nominal, deve ser usada uma potência do laser máxima.

Quando se pretende produzir peças com as melhores características mecânicas possíveis, ou seja, com uma dureza máxima e com uma rugosidade mínima, é necessário utilizar uma potência de laser máxima e uma espessura por camada mínima. Quanto à velocidade do laser, uma vez que não tem influências significativas nas respostas estudadas, pode ser a máxima possível, diminuindo dessa forma o tempo de produção de cada peça.

Todas estas conclusões estão devidamente fundamentadas e ilustradas ao longo do capítulo 5. Esclarece-se ainda que a justificação científica das conclusões referidas anteriormente encontra-se no subcapítulo 5.3.

Após o desenvolvimento da dissertação, foi possível concluir que as peças produzidas por impressão 3D, nomeadamente em SLM e utilizando o aço 316L, apresentaram desvios dimensionais mínimos (sendo por isso um aspeto a valorizar) e propriedades mecânicas (dureza, tensão de cedência e tensão de rotura) superiores aos valores tabelados (o que revela que o processo de impressão 3D é bastante aceitável e viável).

Contudo, em relação à extensão nominal, as peças apresentaram valores inferiores aos tabelados, (o que pode ser considerado como uma limitação deste processo). Outro aspeto menos positivo deste processo de produção foi a elevada rugosidade que as peças apresentaram.

Apesar disso, foi possível concluir também que o processo de produção de peças por impressão 3D é mais adequado para a produção de peças que apresentem uma geometria muito complexa, uma vez que o tempo de produção e os custos associados são os mesmos que os exigidos para a produção de uma peça simples.

## **6.2 Trabalhos futuros**

Neste estudo foram alterados alguns parâmetros de produção na impressora 3D M1 *Cusing*, sendo eles a potência do laser, a velocidade do laser e a espessura por camadas e foram testadas várias conjugações dos mesmos, com o objetivo de otimizar a produção de peças na impressora 3D referida anteriormente.

Em estudos futuros, seria importante e interessante quantificar o tempo de produção de cada peça ou provete produzido, com o objetivo de gerar e minimizar a função do custo de produção para cada uma delas. Este estudo estava inicialmente previsto, contudo a impressora utilizada não permite essa quantificação, sendo este um aspeto que poderá ser melhorado.

Em relação às propriedades mecânicas obtidas, a rugosidade das peças produzidas foi a resposta que apresentou mais limitações, sendo por isso um aspeto que esta tecnologia de produção terá de melhorar. Além disso, devido aos níveis elevados de rugosidade que as peças apresentam, há necessidade de aumentar a dimensão das mesmas para que possam ser retificadas, desperdiçando

desta forma material, mão de obra e energia o que leva a custos de produção mais elevados do que os necessários.

Considera-se ainda relevante que em estudos futuros sejam estudadas outras variáveis e outras respostas, uma vez que as impressoras 3D para a produção de peças metálicas possuem dezenas de parâmetros que podem ser programados e alterados. Desta forma, poderá ser otimizado todo o processo de impressão 3D, processo que apresenta uma grande margem de progressão, muita viabilidade, podendo ser utilizado, num futuro próximo, de forma massiva na produção industrial de peças metálicas.



## Referências Bibliográficas

- [1] Takagaki, L. K. (2013). Tecnologia de impressão 3D. *RIT-REVISTA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA*, 2(2).
- [2] Abreu, S. A. C. (2015). Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo (Tese de Mestrado, FEUP).
- [3] Standard, A. S. T. M. (2012). F2792. 2012. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. *West Conshohocken, PA: ASTM International*. Disponível em: *www.astm.Org* (doi: 10.1520/F2792-12).
- [4] Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442-458.
- [5] Zarbakhsh, J., Iravani, A., & Amin-Akhlaghi, Z. (2015). Sub-modeling Finite Element Analysis of 3D printed structures. *Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 2015 16th International Conference on IEEE*. (pp. 1-4).
- [6] Yang, H., Kong, Z., & Sarder, M. D. Additive Manufacturing: A New Paradigm for Manufacturing. In *Proceedings of the 2016 Industrial and Systems Engineering Research Conference, Availability, Development* (Vol. 14, p. 102).
- [7] Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.
- [8] Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012.
- [9] Machado, A. C. (2014). Influência das condições de processamento da fusão seletiva por laser (SLM) nas propriedades mecânicas do aço 316 L (Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra).
- [10] Tang, L., Wu, C., Zhang, Z., Shang, J., & Yan, C. (2016). A Lightweight Structure Redesign Method Based on Selective Laser Melting. *Metals*, 6(11), 280.
- [11] Attar, E. (2011). *Simulation of selective electron beam melting processes* Ph. D. thesis, University of Erlangen-Nurnberg, Erlangen and Nuremberg, Germany.
- [12] Germarovich, André Alexei, (2011), “Establishing a Benchmark Part analyze the capabilities of selective laser melting systems”, *Materials Engineering* from the Federal University of Santa Catarina Brazil.
- [13] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 238). New York: Springer.

- [14] Concept-laser.de. (2017). Concept Laser - 3D-Metalldrucker für Bauteile. [online]. Disponível em: <https://www.concept-laser.de/home.html> [acedido em 4 abril. 2017].
- [15] Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escalera, L. A. (2008). *Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry*, *Talanta*, 76(5), 965-977.
- [16] Pereira, Z. L., & Requeijo, J. G. (2008). Qualidade: Planeamento e controlo estatístico de processos. *Fundamentos do Desenho de Experiências, 1a edição, Prefácio, Caparica*.
- [17] Standard, A. S. T. M. E8-01 2001 Standard test methods for tension testing of metallic materials. *Annual book of ASTM standards*, 3.
- [18] Steel, A. K. (2007). Product Data Sheet: 316/316L Stainless Steel. AK Steel, 7100-0096.
- [19] Guedes, D. E. (2014). Análise metrológica de acabamento de superfícies aplicada a componentes mecânicos (Tese de Mestrado, Universidade NOVA).
- [20] Rodrigues, J., & Martins, P. (2005). Tecnologia mecânica. Tecnologia da Deformação Plástica, 1.
- [21] Me.aut.ac.ir. (2017). Hardness Test. [online] disponível em: <http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Hardness%20Test.htm> [acedido em 15 agosto. 2017].
- [22] Davis, J. R. (Ed.). (2004). *Tensile testing*. ASM international.
- [23] Mts.com. (2017). MTS | Testing systems, mechanical testing and sensing solutions. [online]. Disponível em: <http://www.mts.com/en/index.htm> [acedido em 11 maio 2017].
- [24] Hall, E. O. (1951). The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 64(9), 747.
- [25] Chokshi, A. H., Rosen, A., Karch, J., & Gleiter, H. (1989). On the validity of the hall-petch relationship in nanocrystalline materials. *Scripta Metallurgica*, 23(10), 1679-1683.
- [26] Zhang, B., Dembinski, L., & Coddet, C. (2013). The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder. *Materials Science and Engineering: A*, 584, 21-31.
- [27] Guan, K., Wang, Z., Gao, M., Li, X., & Zeng, X. (2013). Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel. *Materials & Design*, 50, 581-586.
- [28] Niendorf, T., Leuders, S., Riemer, A., Richard, H. A., Tröster, T., & Schwarze, D. (2013). Highly anisotropic steel processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 44(4), 794-796.
- [29] Li, R., Shi, Y., Wang, Z., Wang, L., Liu, J., & Jiang, W. (2010). Densification behavior of gas and water atomized 316L stainless steel powder during selective laser melting. *Applied surface science*, 256(13), 4350-4356.

- [30] Vandenbroucke, B., & Kruth, J. P. (2007). Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*, 13(4), 196-203.
- [31] Tsopanos, S., Mines, R. A. W., McKown, S., Shen, Y., Cantwell, W. J., Brooks, W., & Sutcliffe, C. J. (2010). The influence of processing parameters on the mechanical properties of selectively laser melted stainless steel microlattice structures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132(4), 041011.
- [32] Wycisk, E., Emmelmann, C., Siddique, S., & Walther, F. (2013). High cycle fatigue (HCF) performance of Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. In *Advanced materials research* (Vol. 816, pp. 134-139). Trans Tech Publications.



# **Anexos**



# Anexo A

## Rugosidade dos vinte e quatro provetes

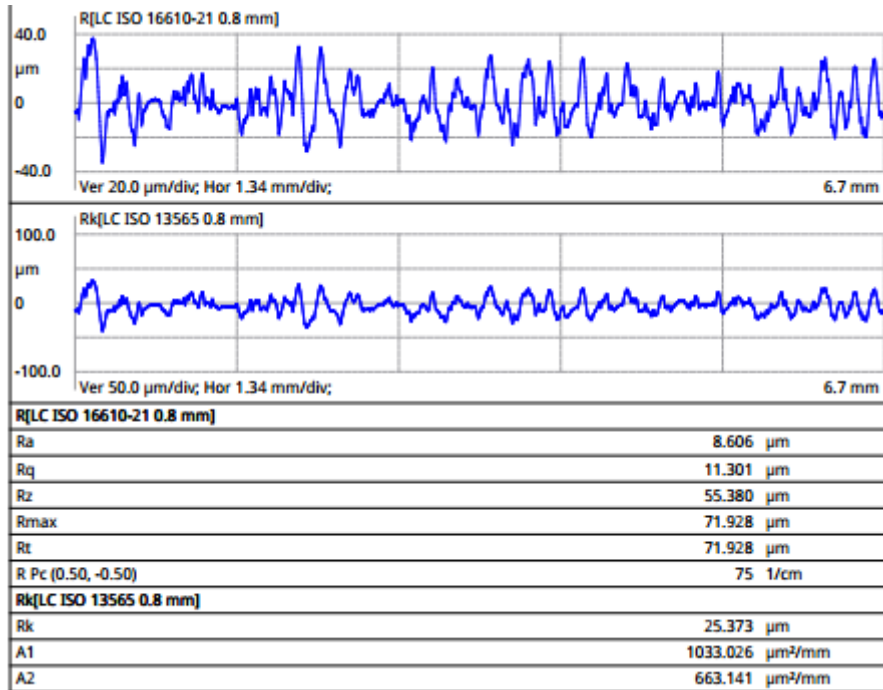


Figura A. 1– Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 1

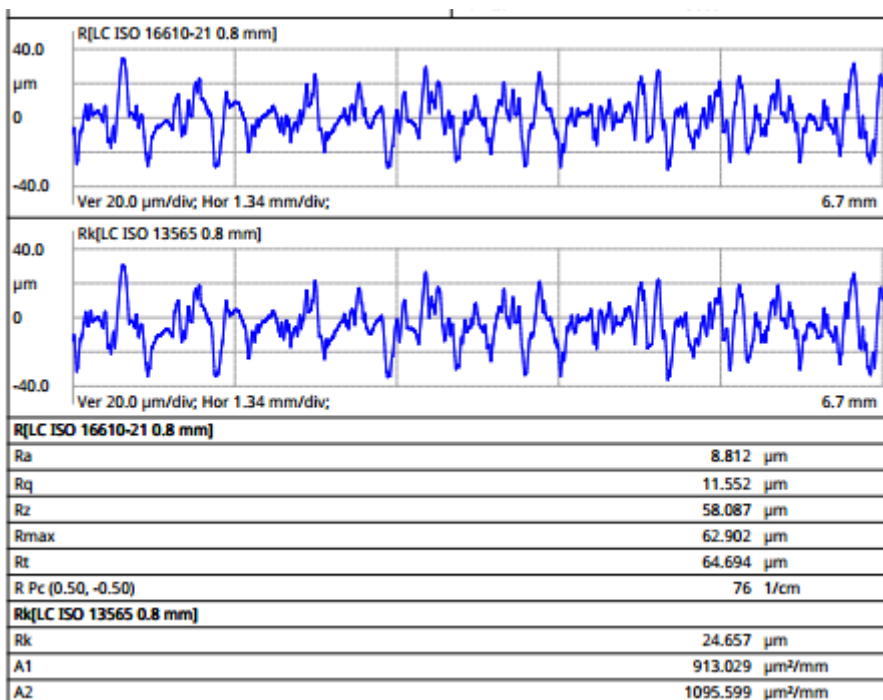


Figura A.2 - Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 2

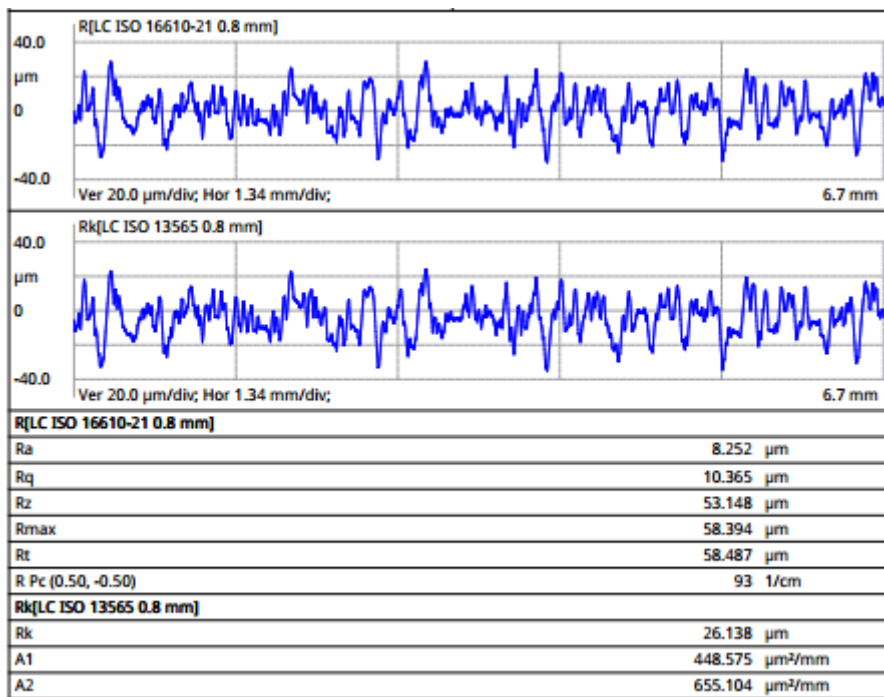


Figura A.3 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 3

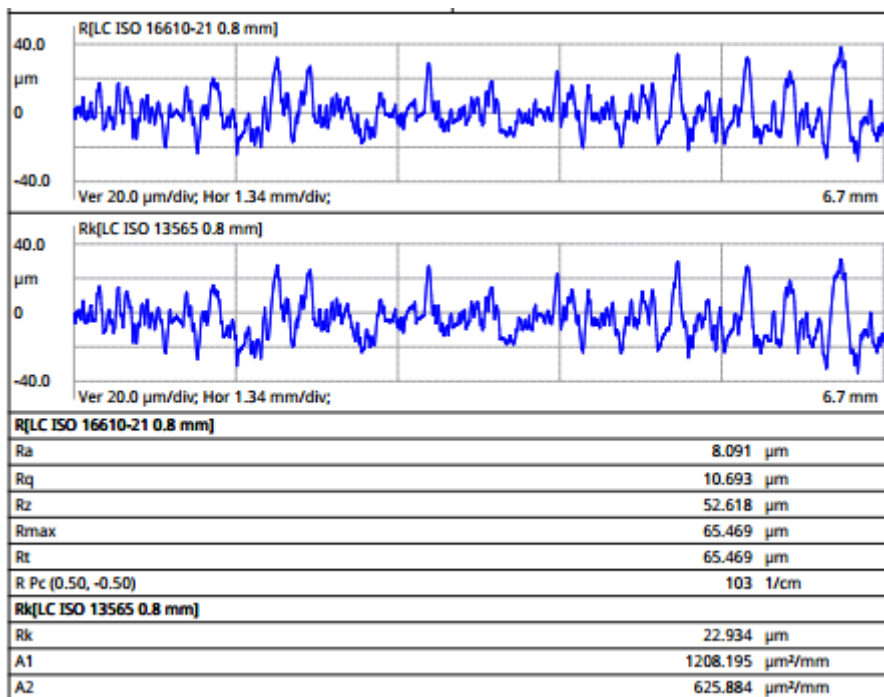


Figura A.4 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 4

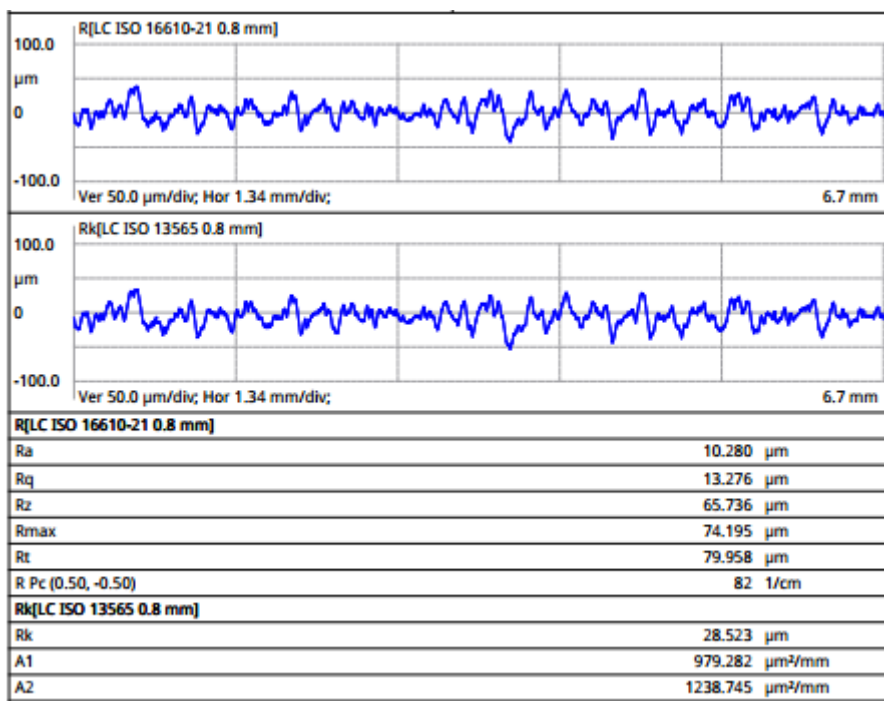


Figura A.5 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 5

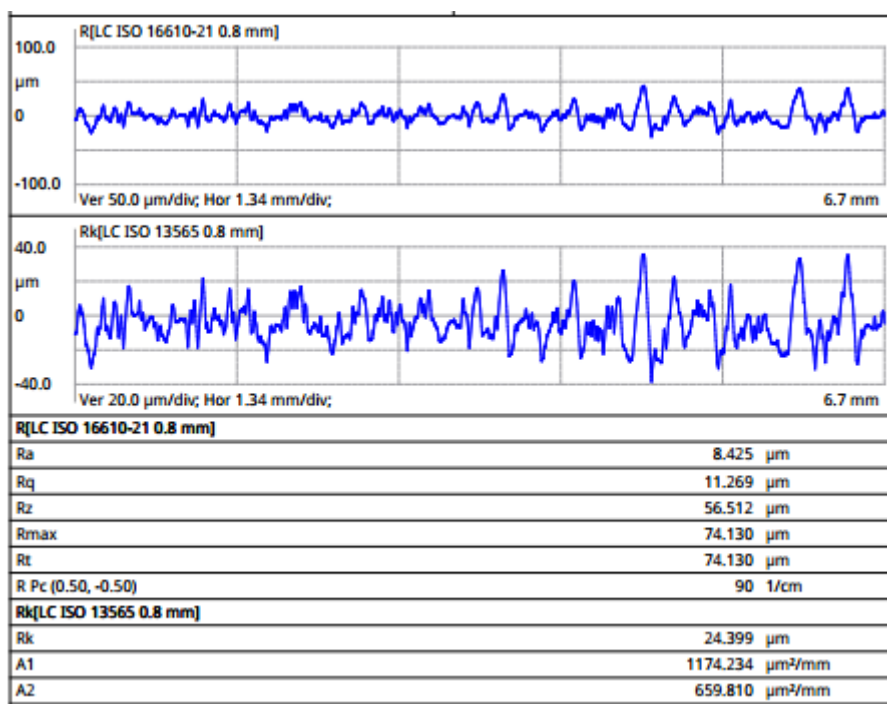


Figura A.6 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 6

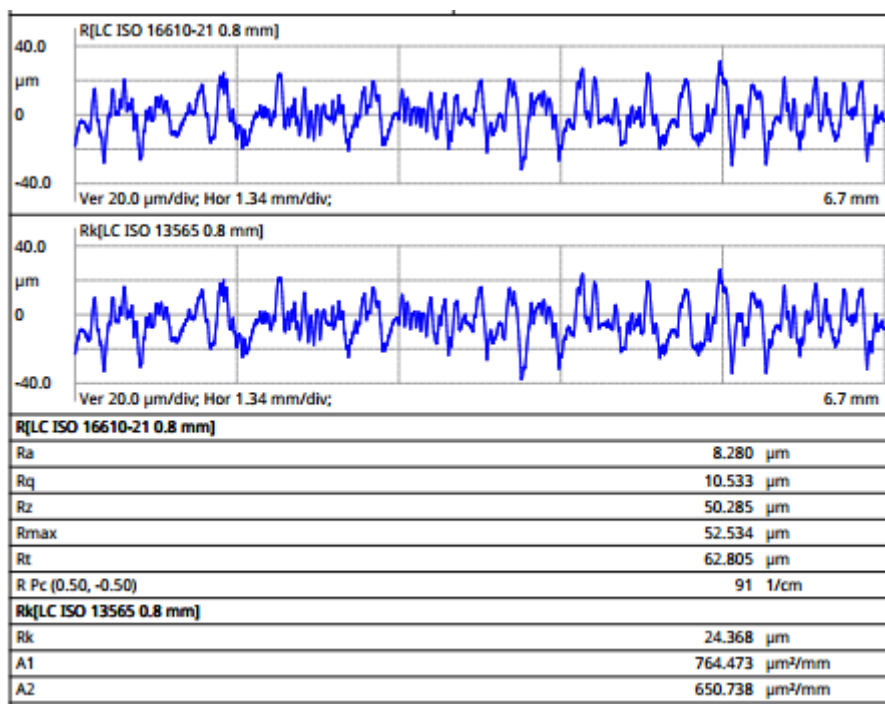


Figura A.7 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 7

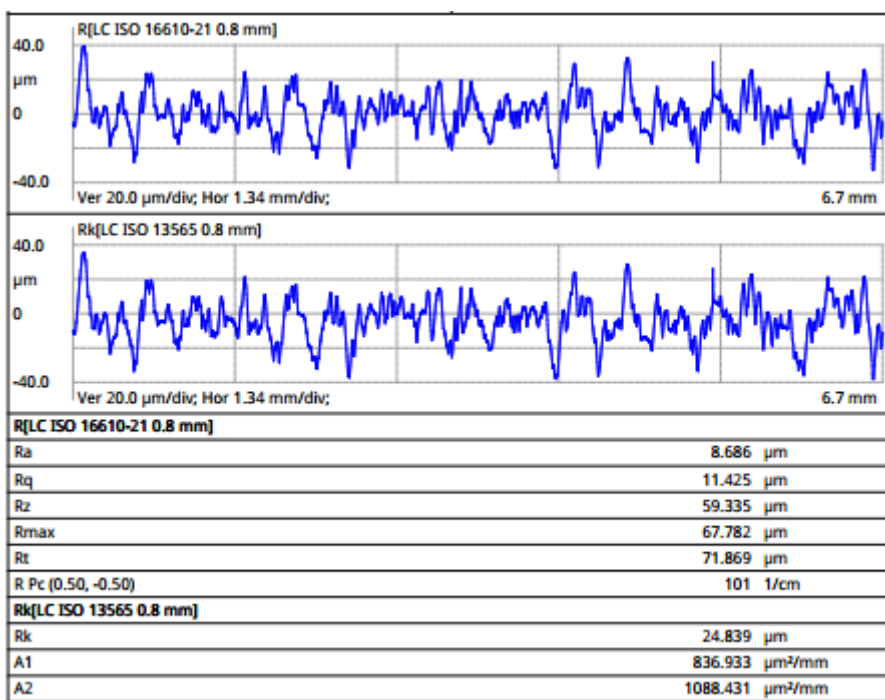


Figura A.8 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 8

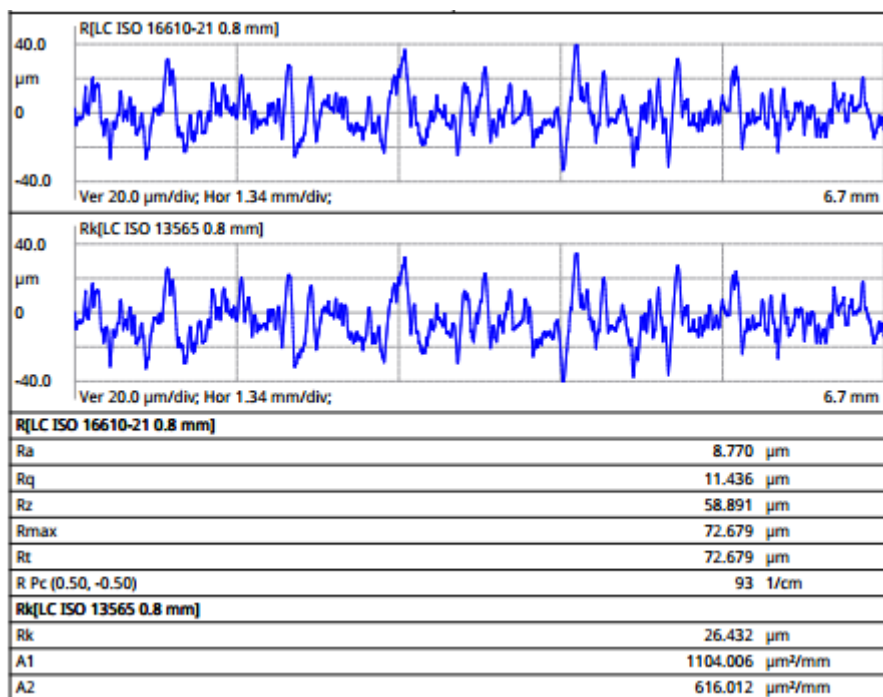


Figura A.9 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 9

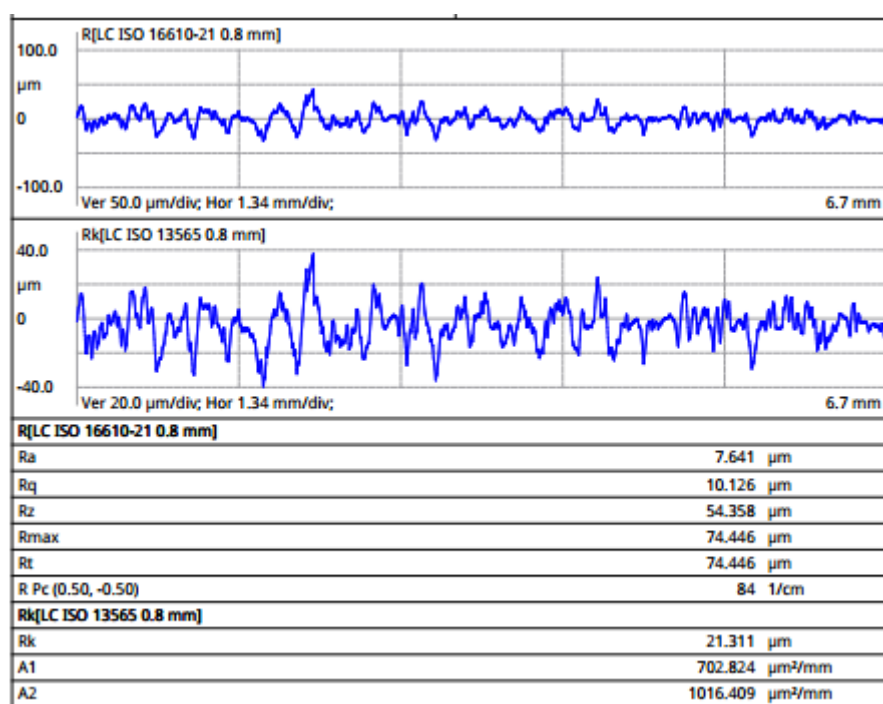


Figura A.10 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 10

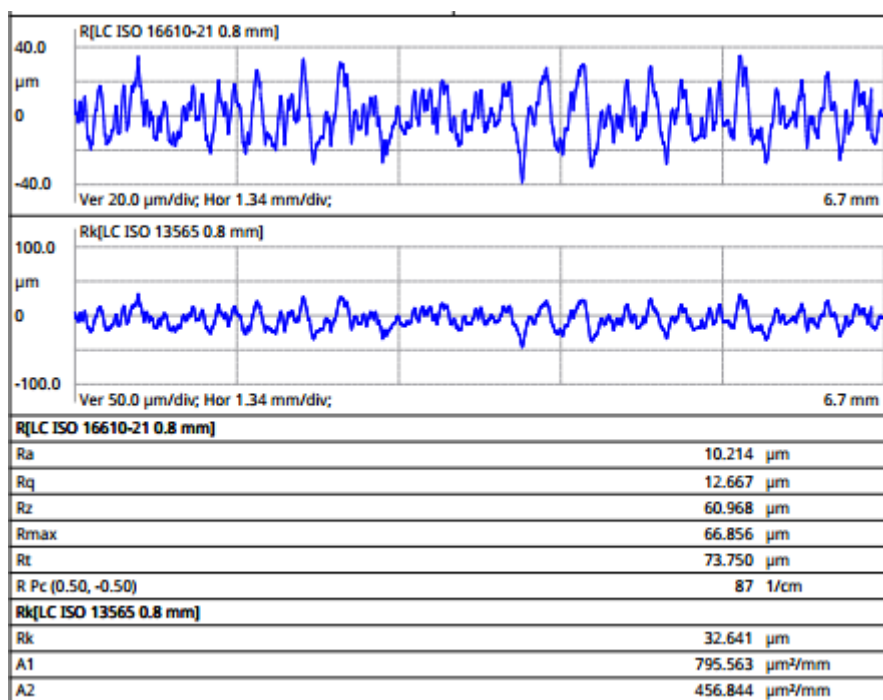


Figura A.11 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 11

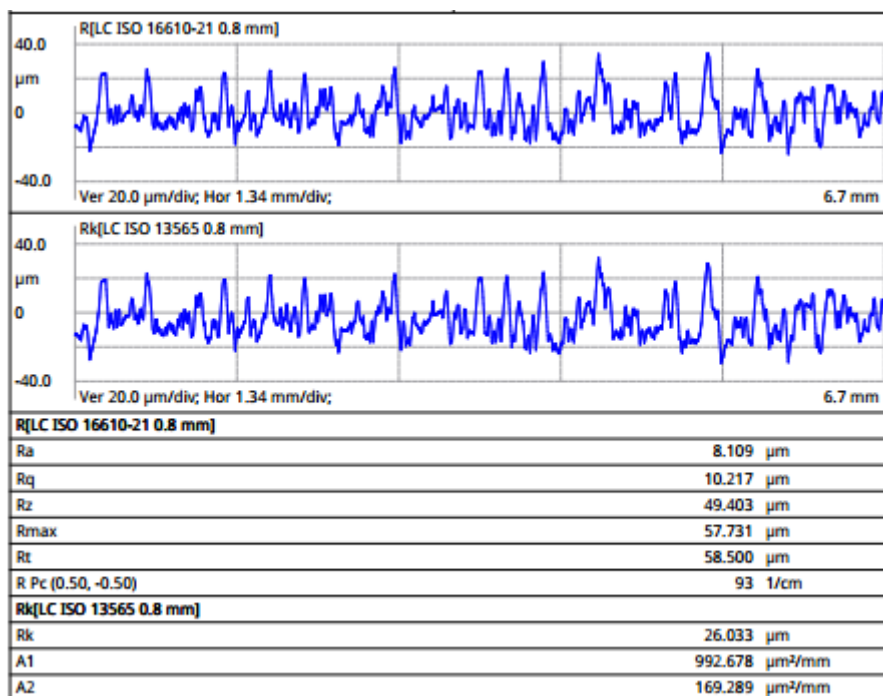


Figura A.12 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 12

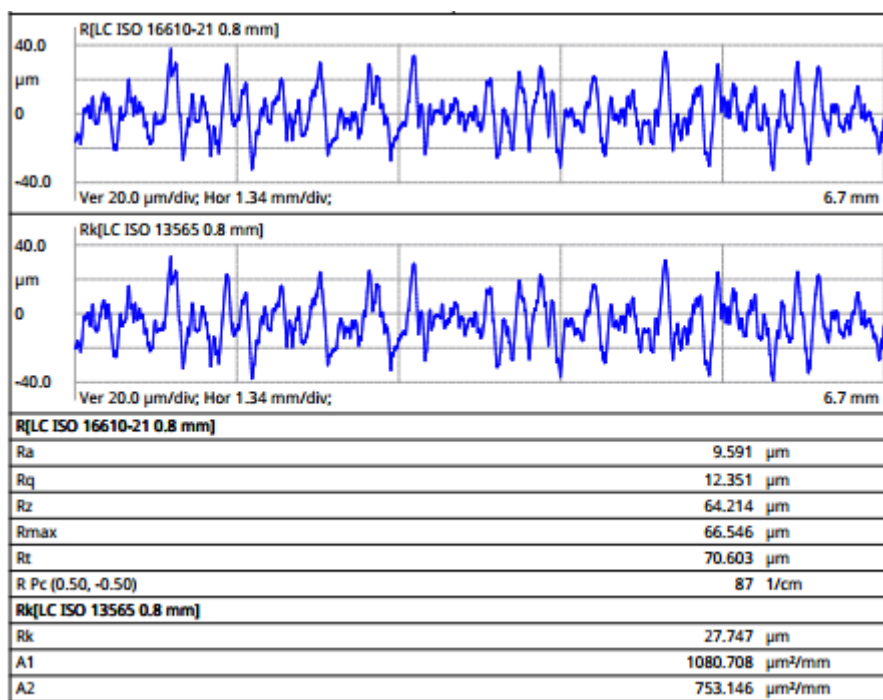


Figura A.13 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 13

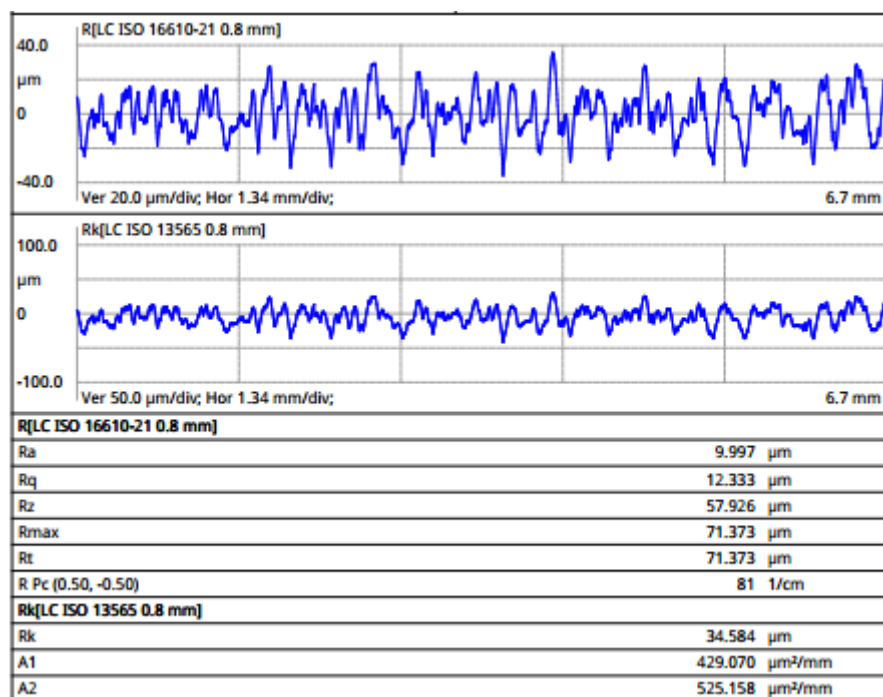


Figura A.14 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 14

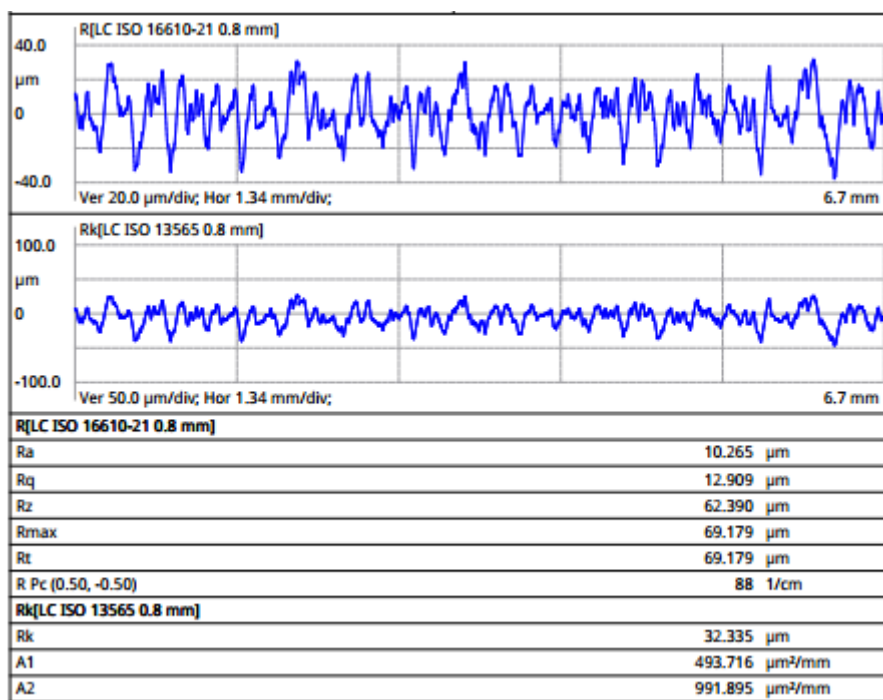


Figura A.15 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 15

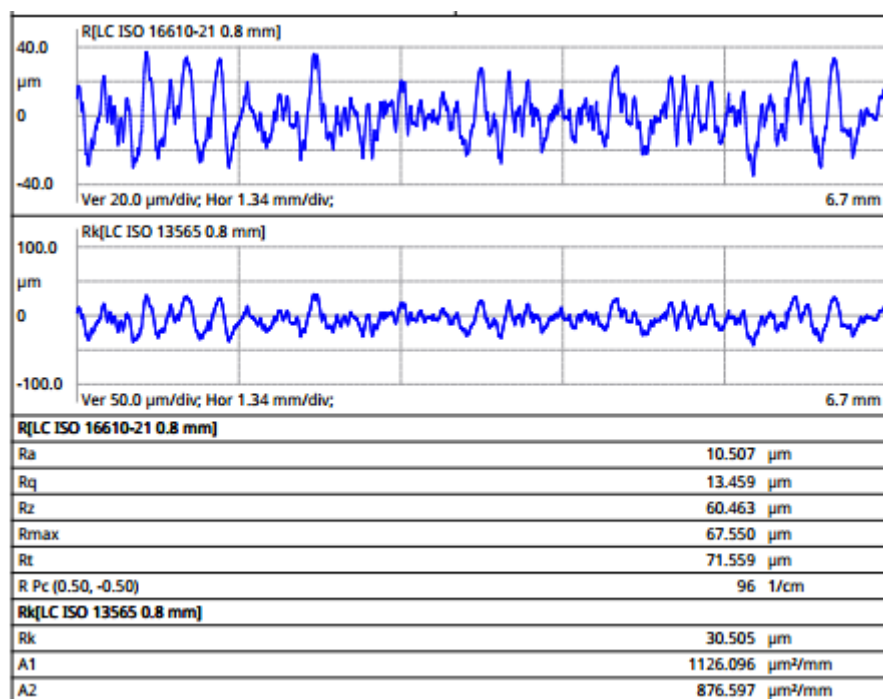


Figura A.16 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 16

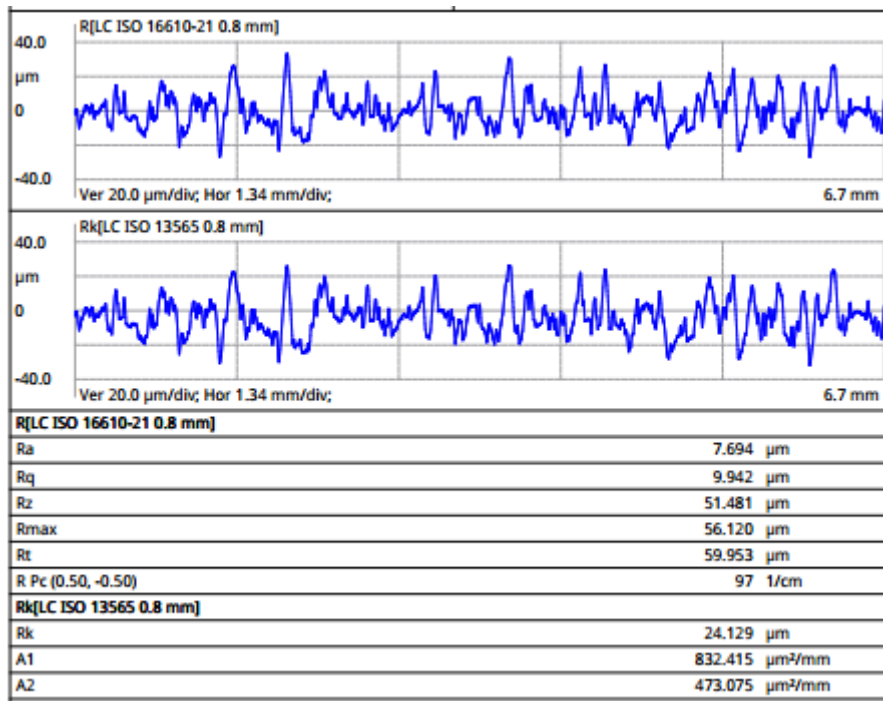


Figura A.17 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 17

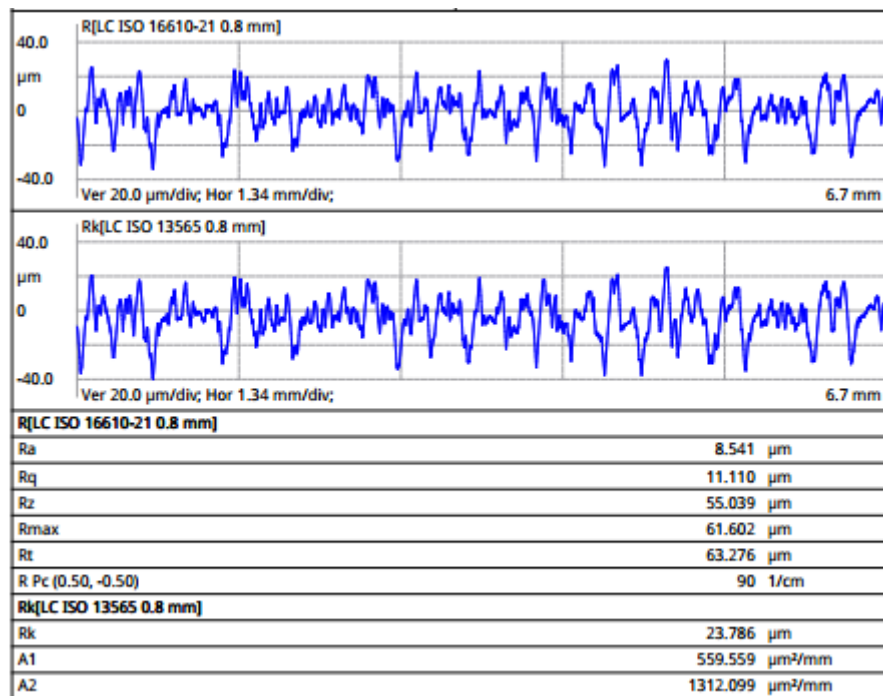


Figura A.18 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 18

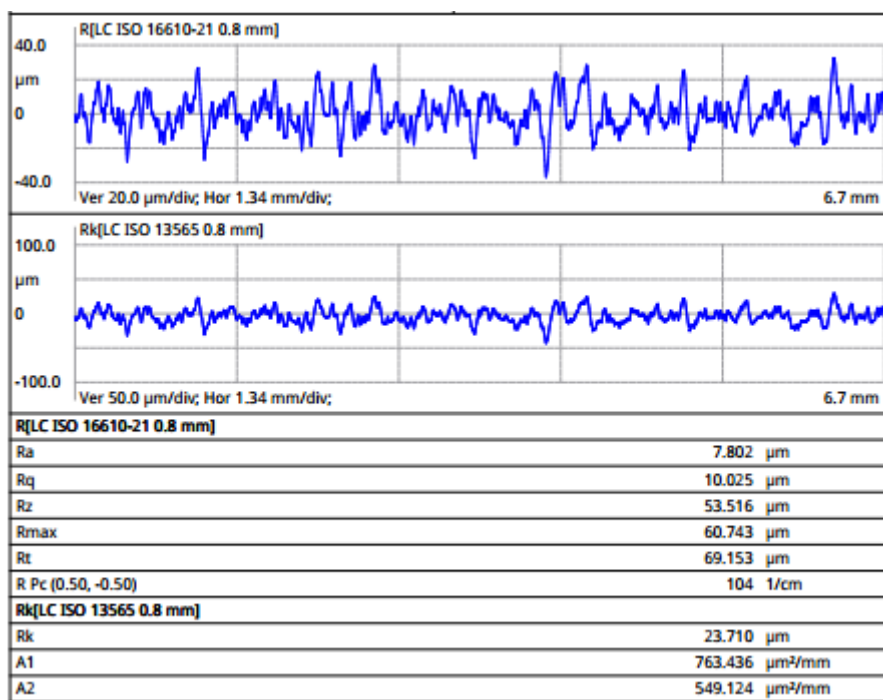


Figura A.19 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 19

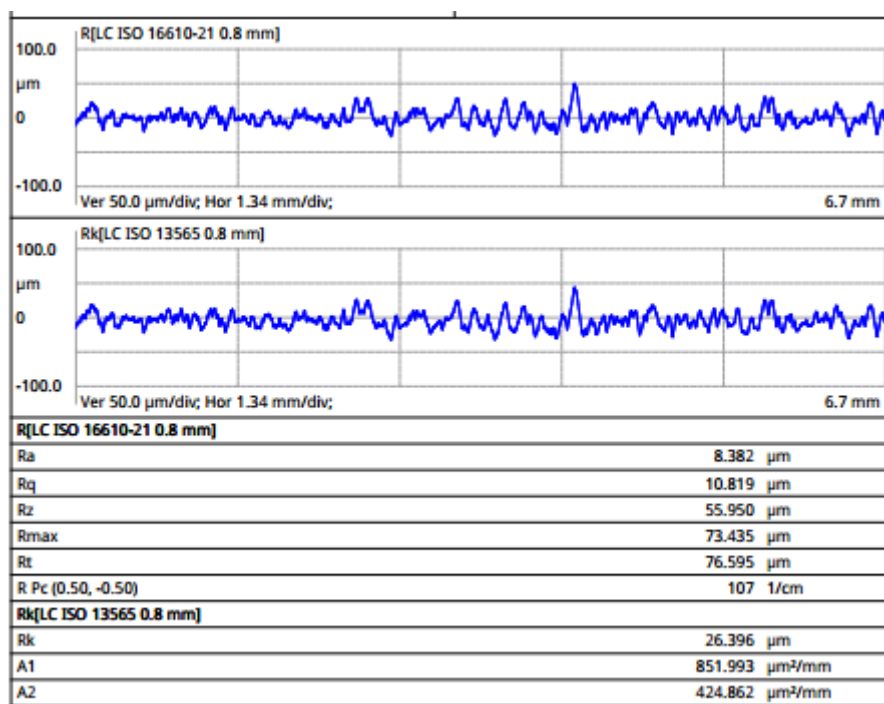


Figura A.20 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 20

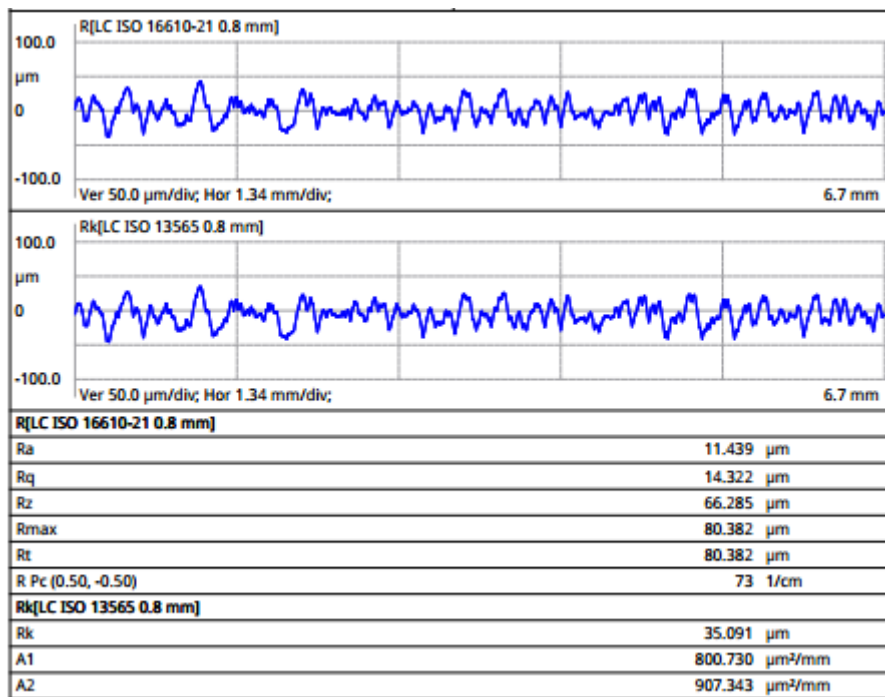


Figura A.21 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 21

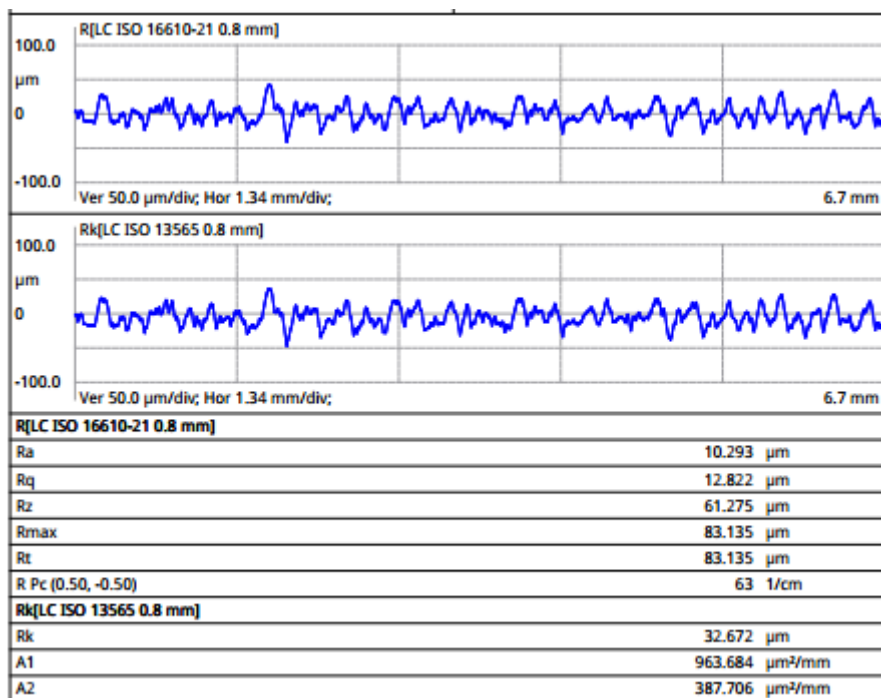


Figura A.22 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 22

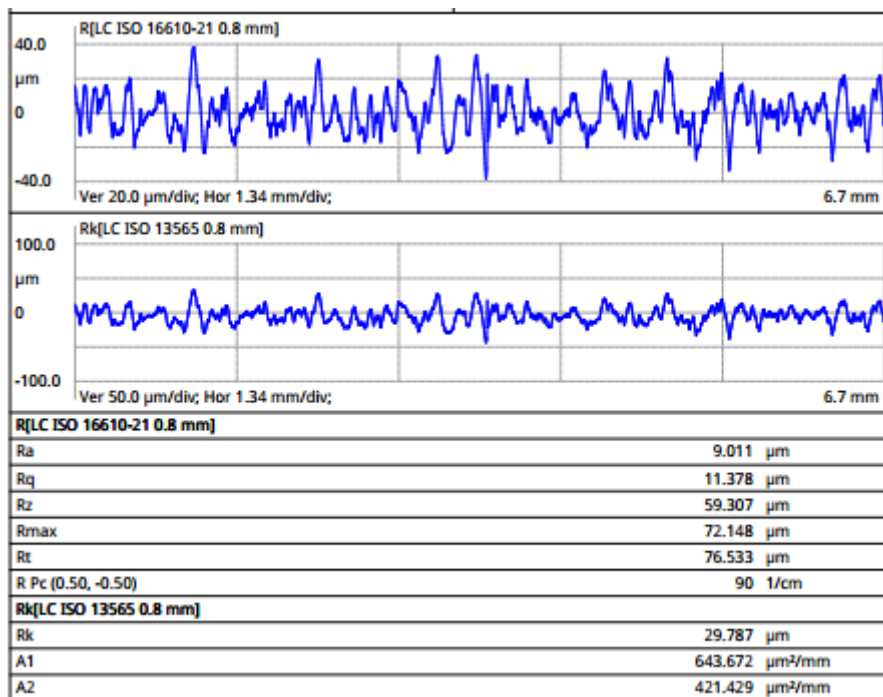


Figura A.23 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 23

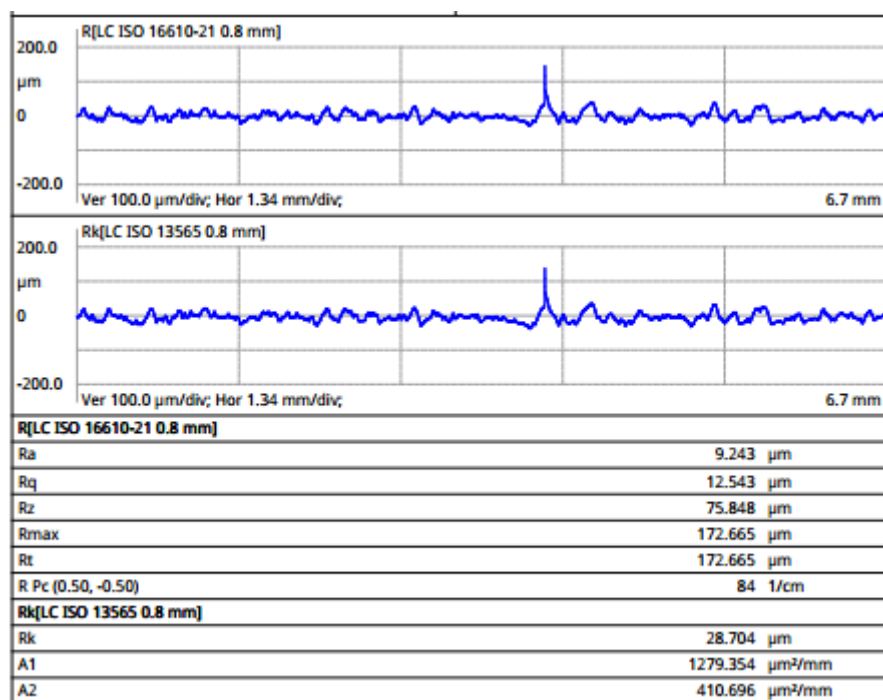


Figura A.24 – Gráficos referentes à rugosidade superficial e representação dos restantes valores da rugosidade para o provete 24

## Anexo B

### Gráficos obtidos no ensaio de tração uniaxial



Figura B. 1– Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 1

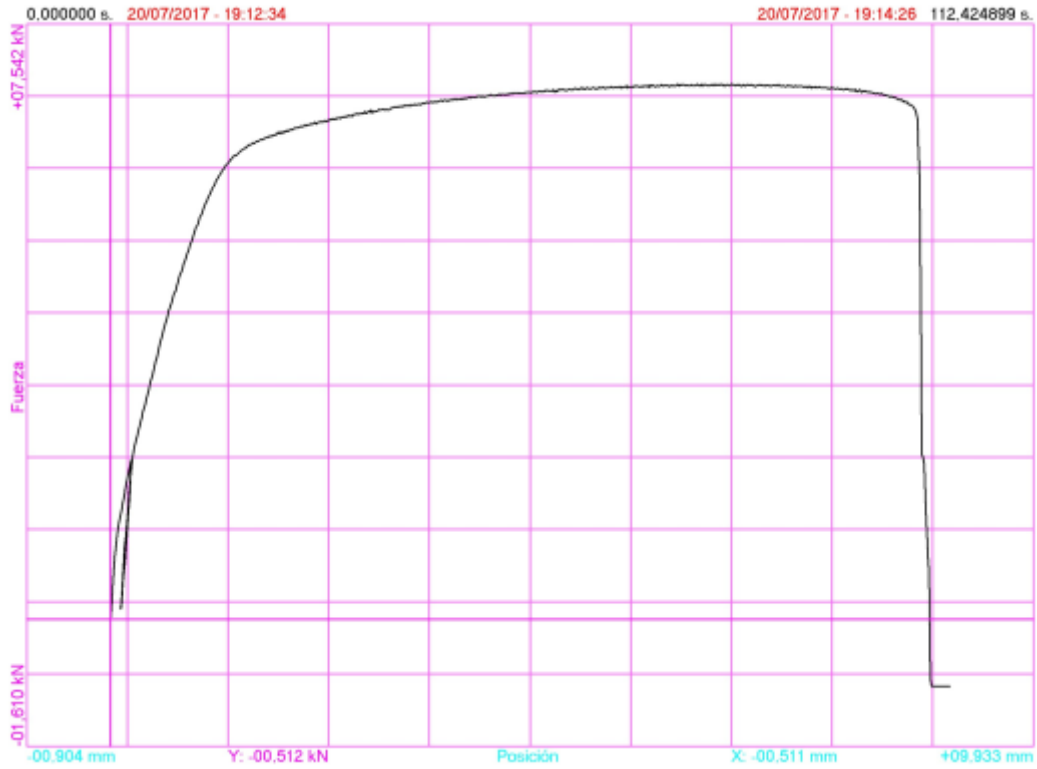


Figura B. 2– Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 2

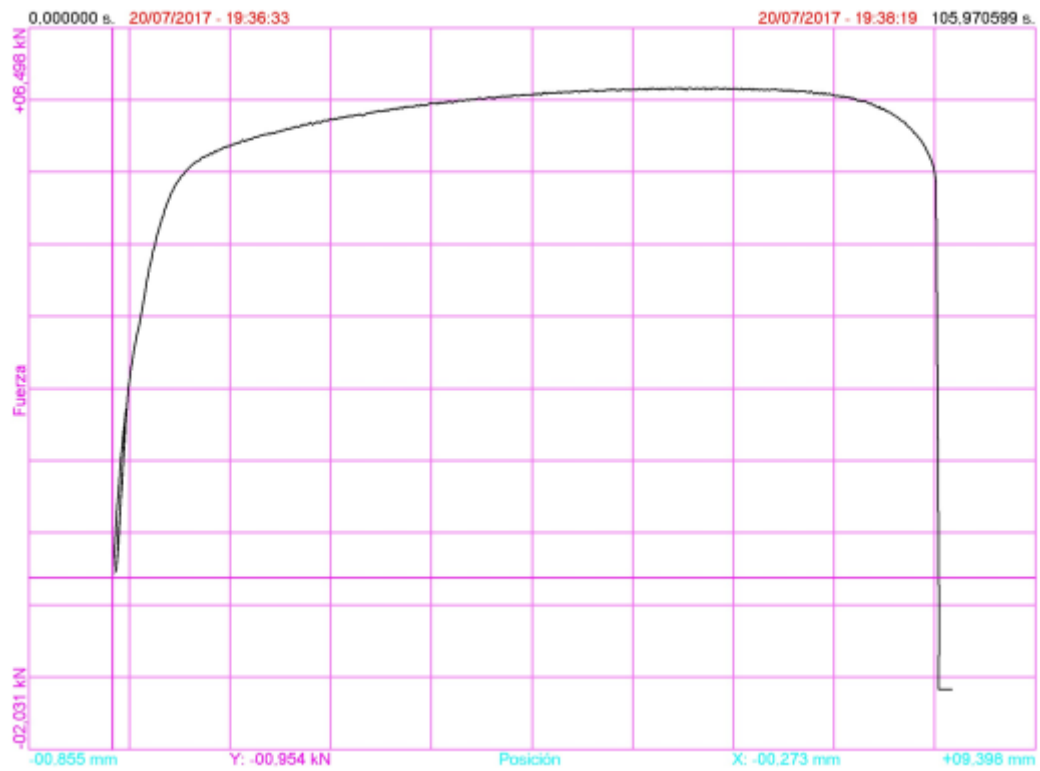


Figura B. 1 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 3

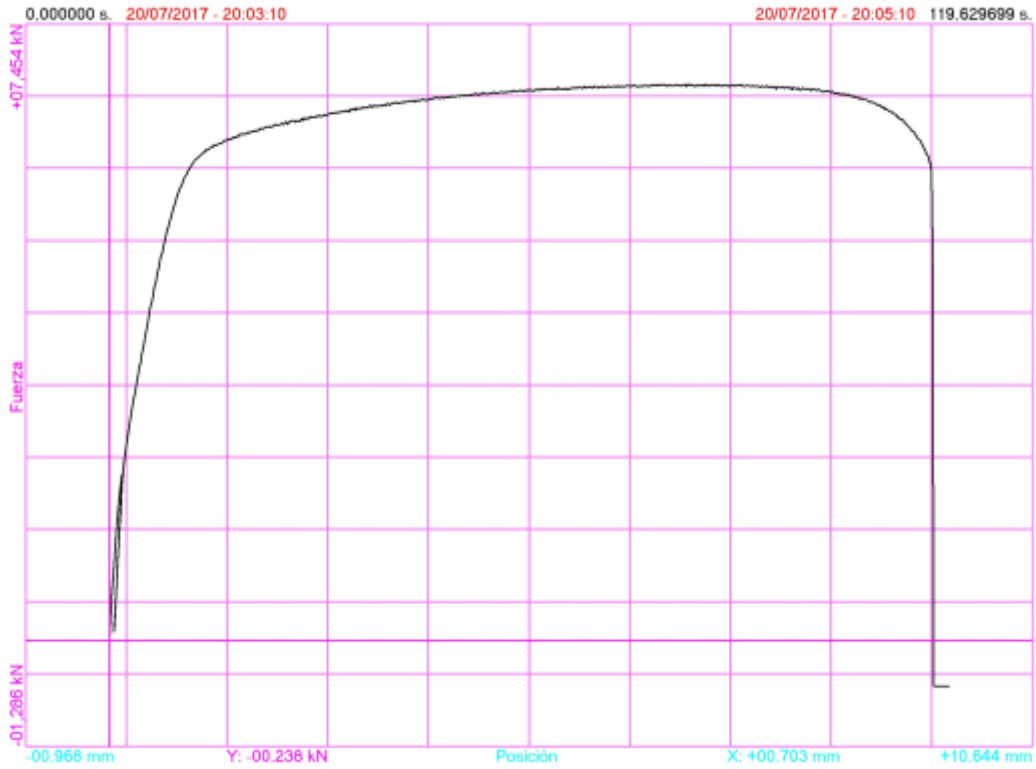


Figura B. 2 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 4

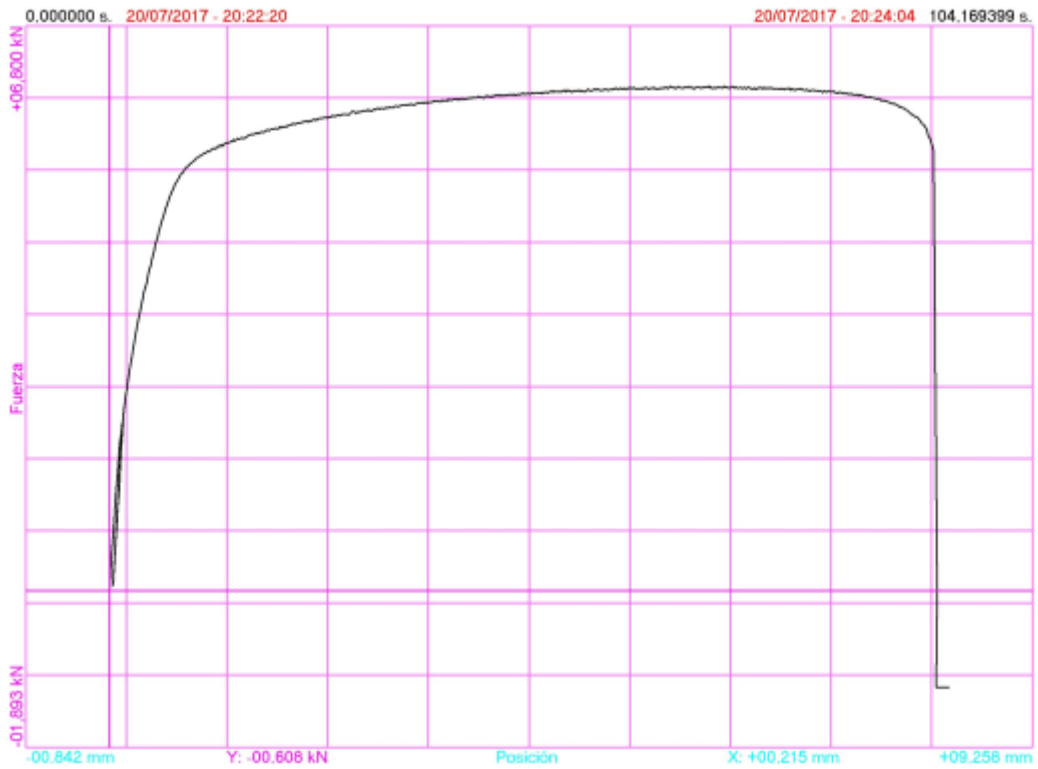


Figura B. 3 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 5

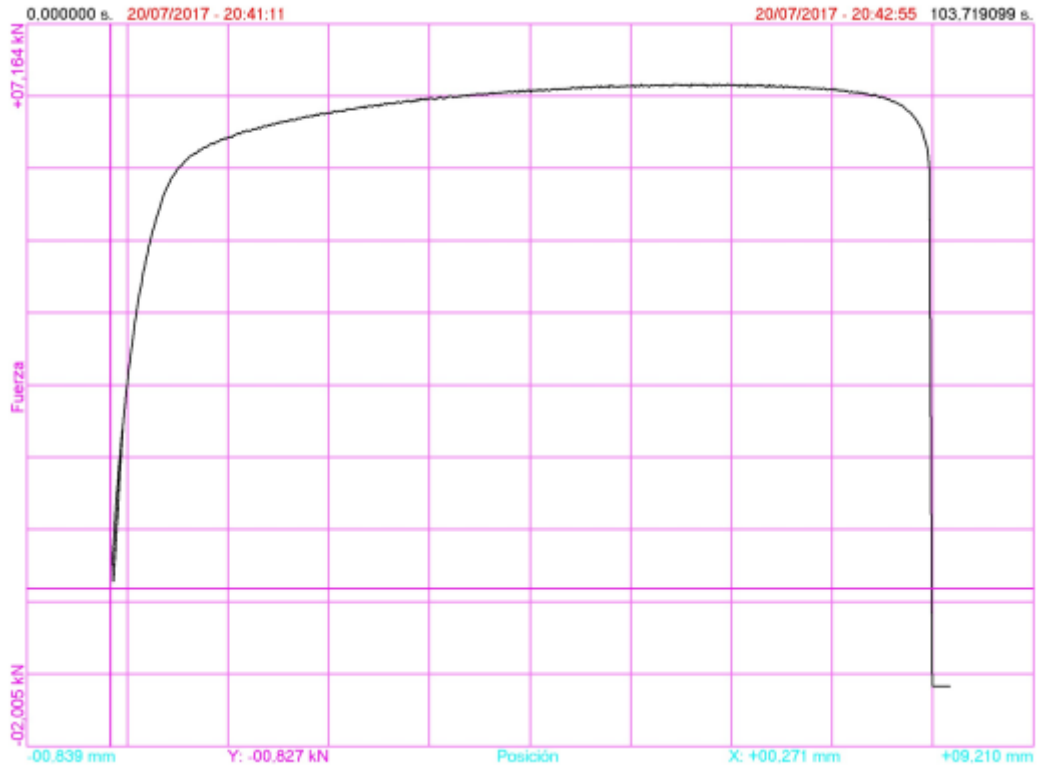


Figura B. 4 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 6

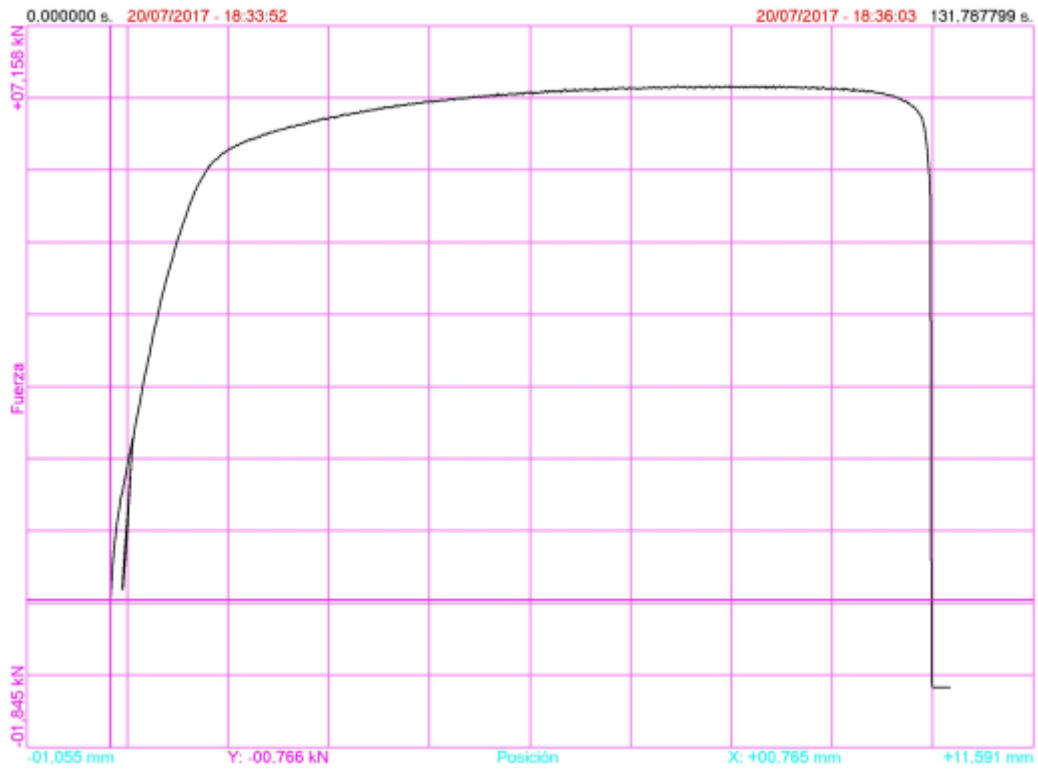


Figura A2. 5 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 7

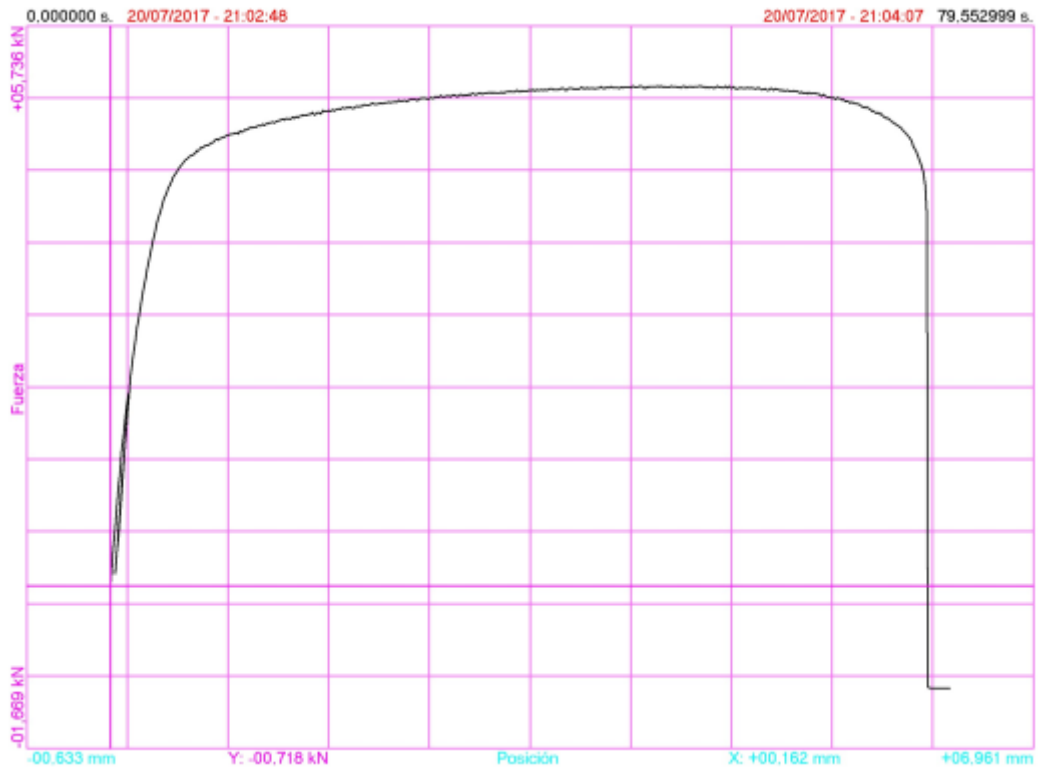


Figura B. 6 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 8

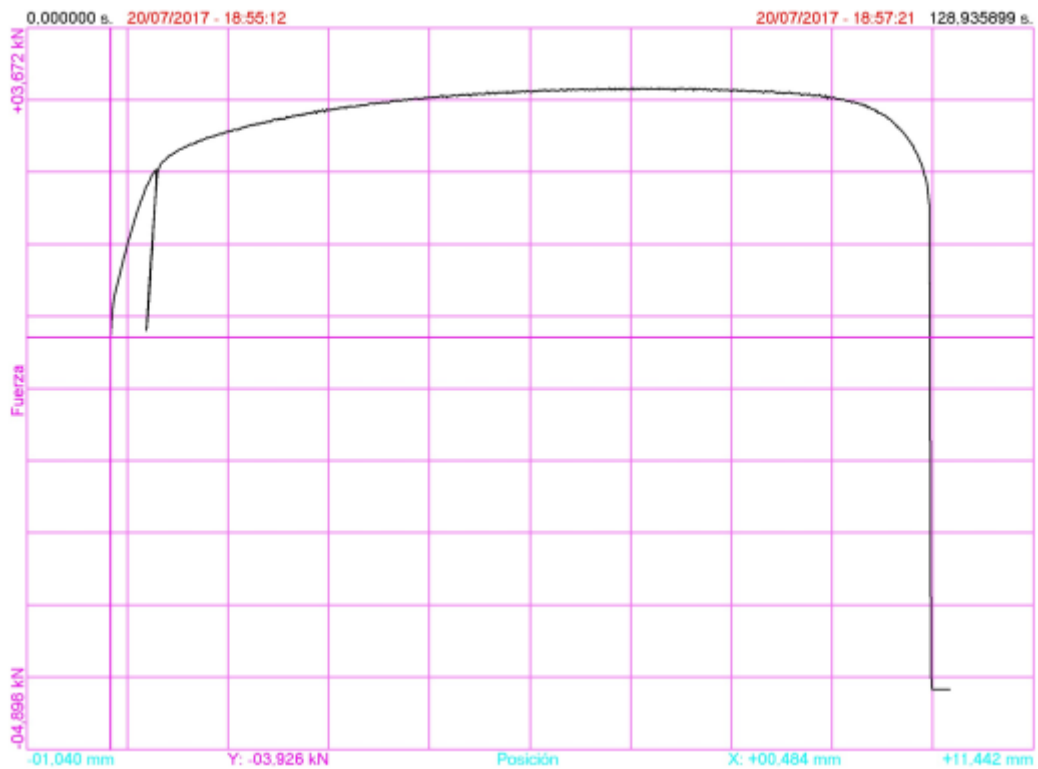


Figura B. 7 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 9

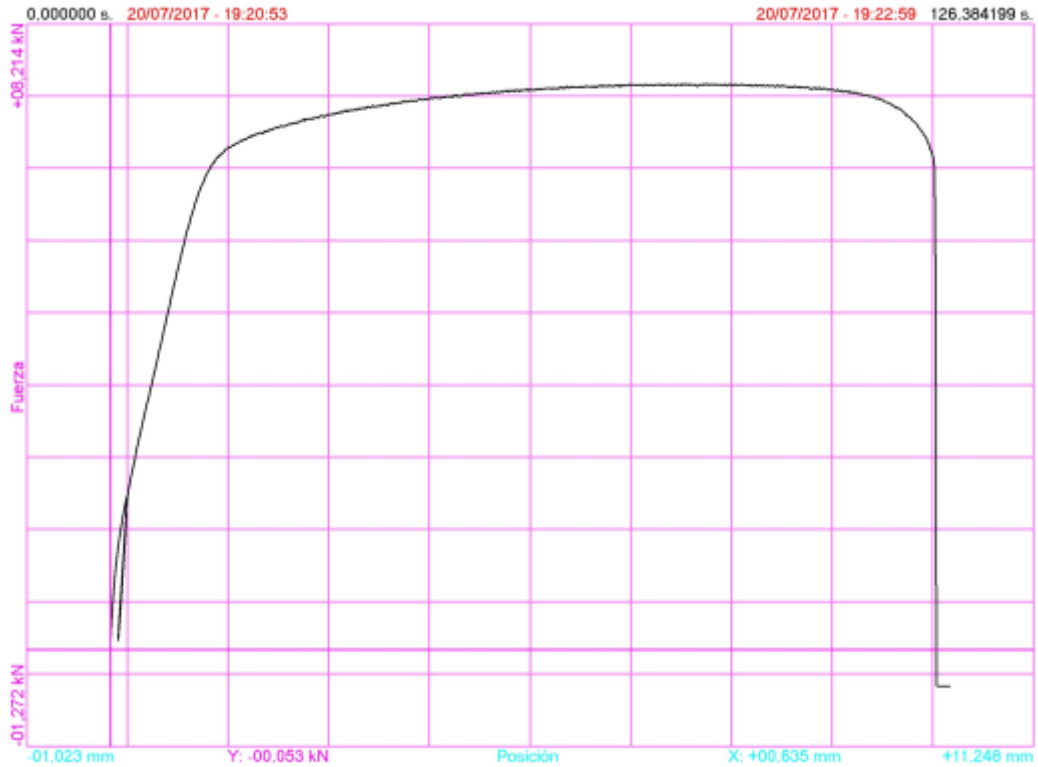


Figura B. 8 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 10

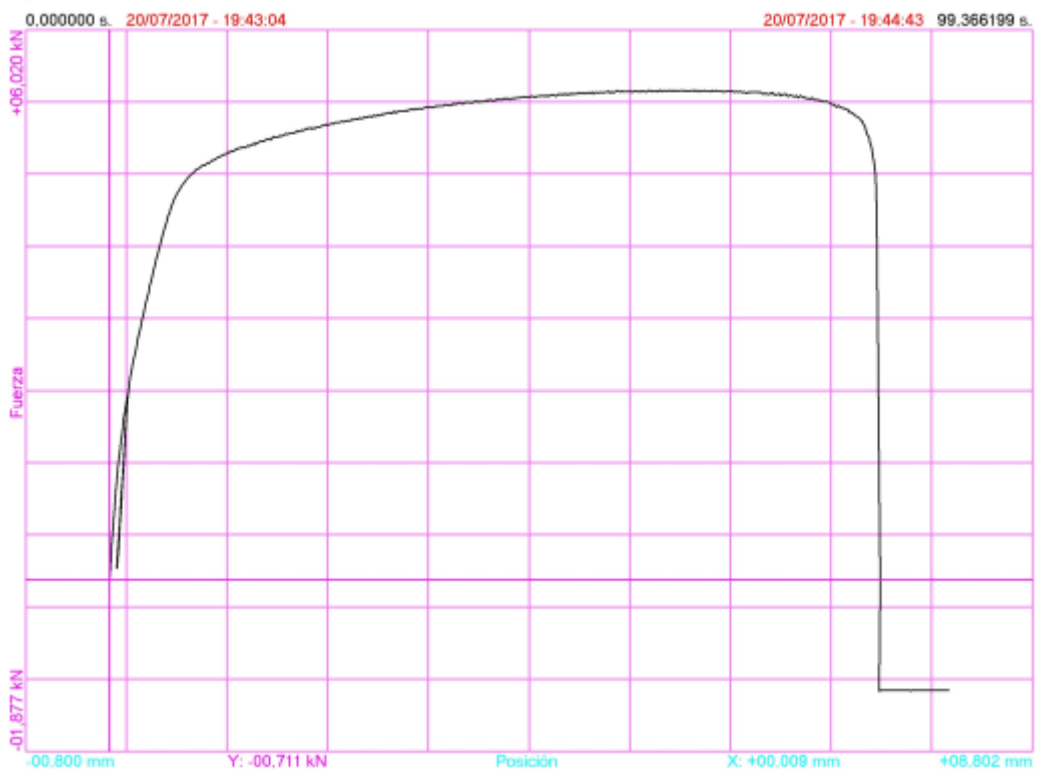


Figura B. 9 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 11

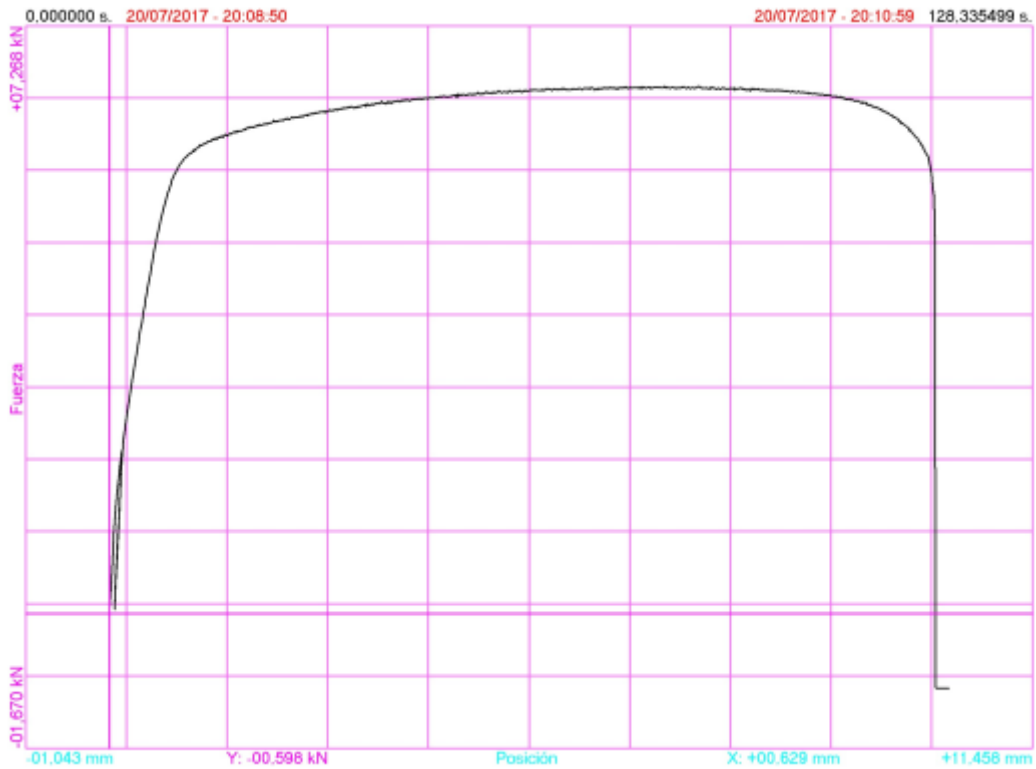


Figura B. 10 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 12

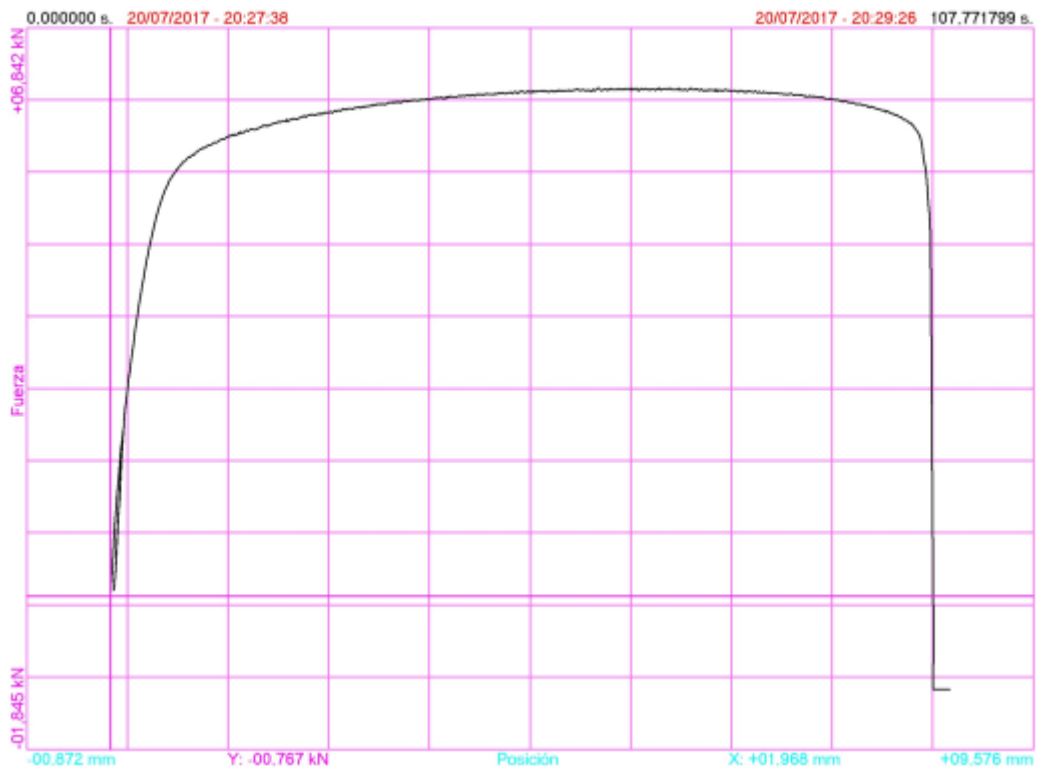


Figura B. 11 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 13



Figura B. 12 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 14

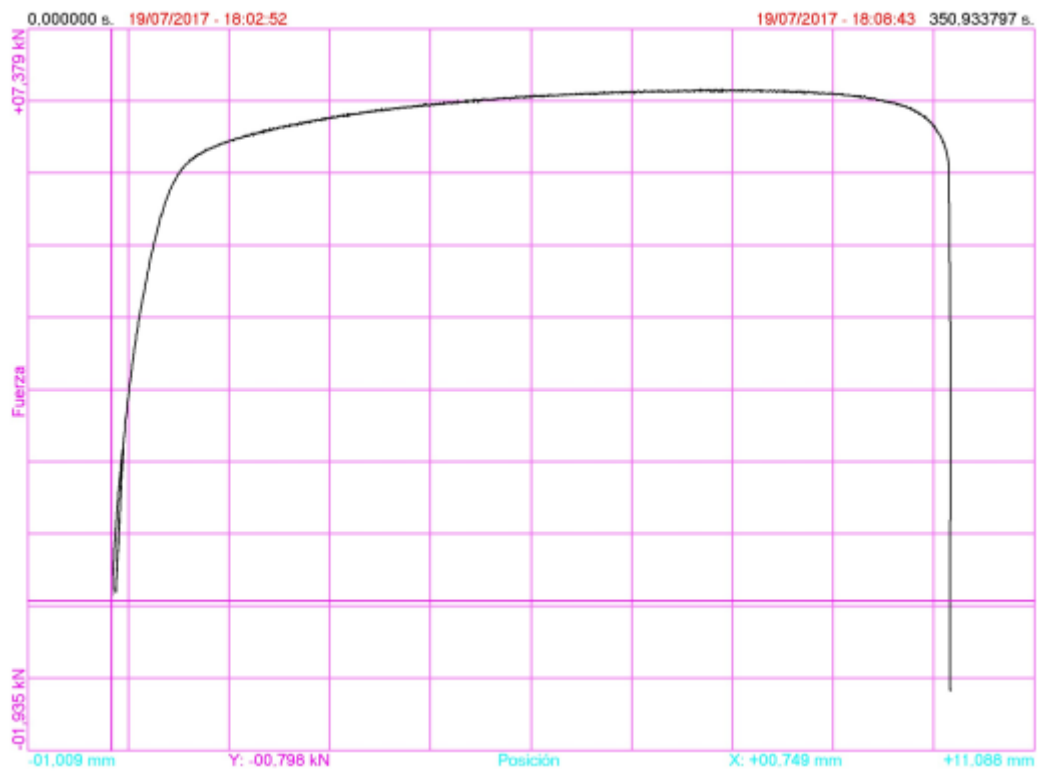


Figura B. 13 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 15

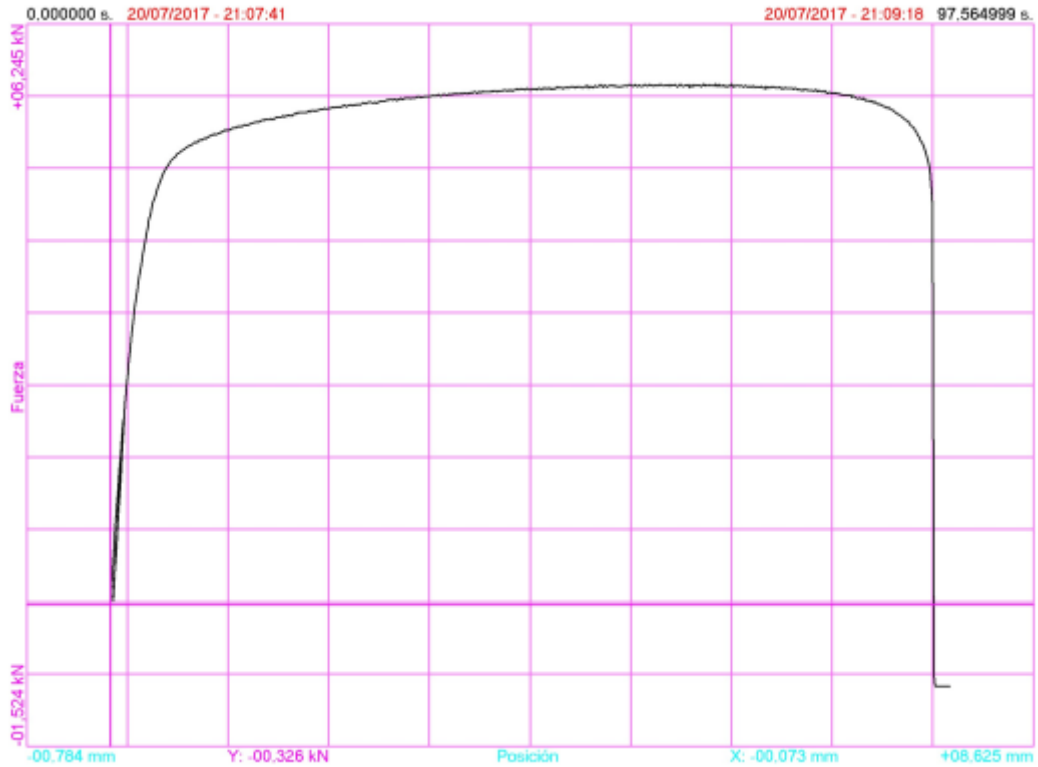


Figura A2. 14 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 16

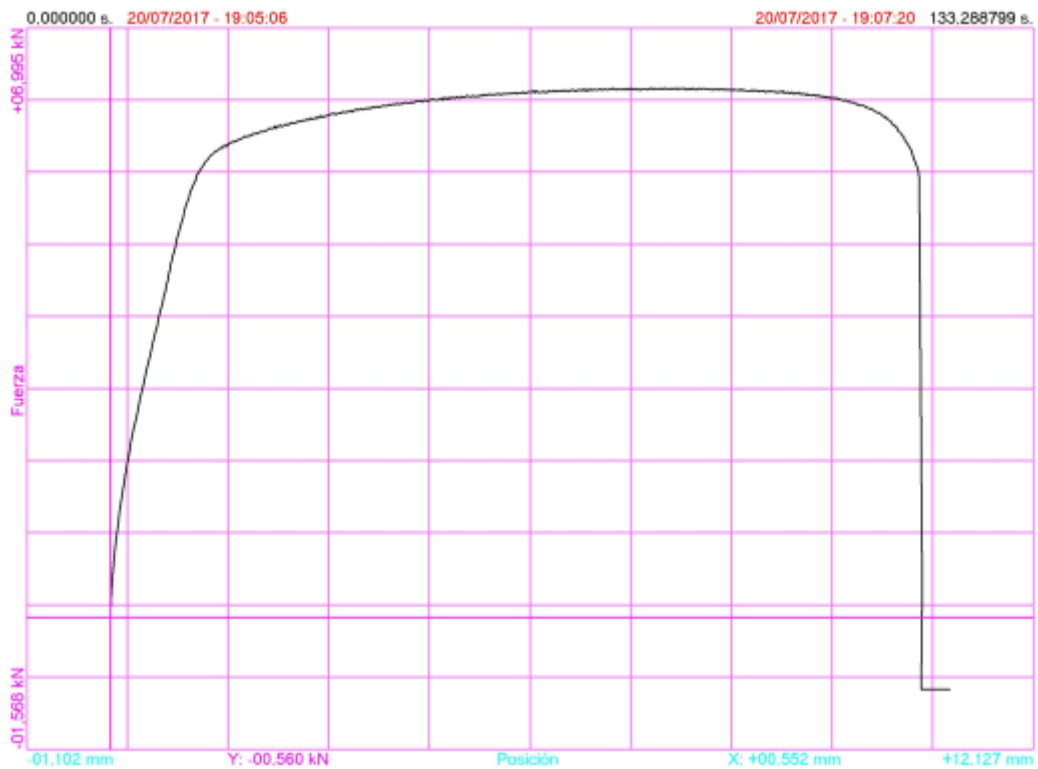


Figura B. 15 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 17



Figura B. 16 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 18

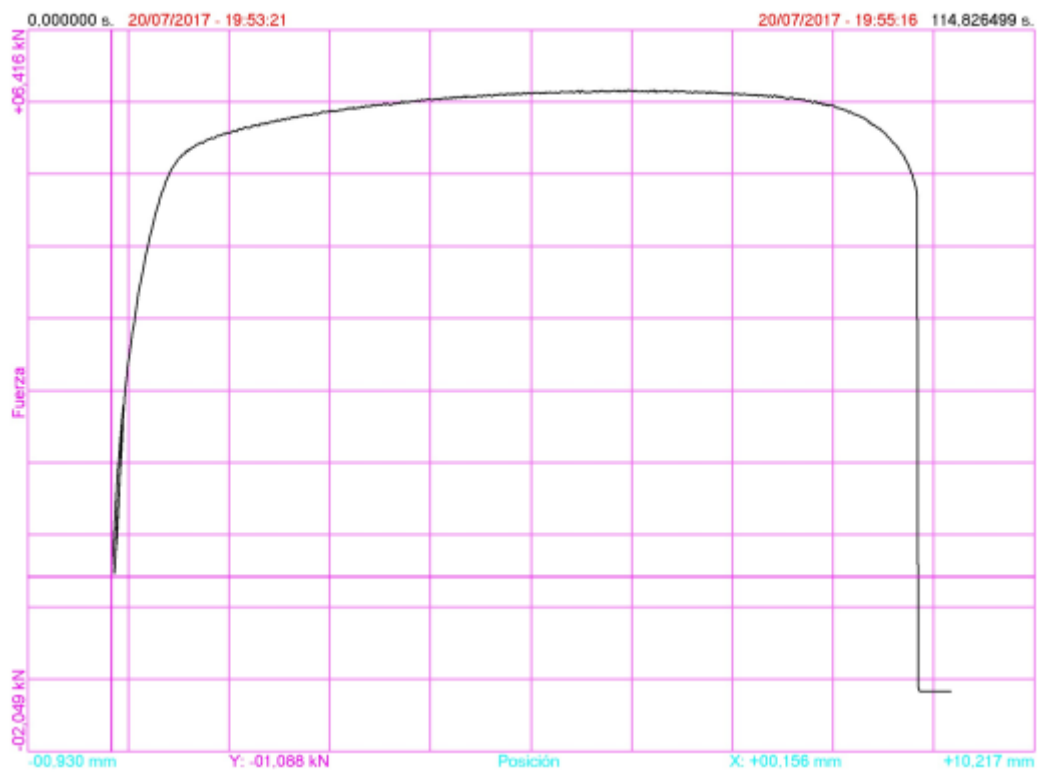


Figura B. 17 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 19

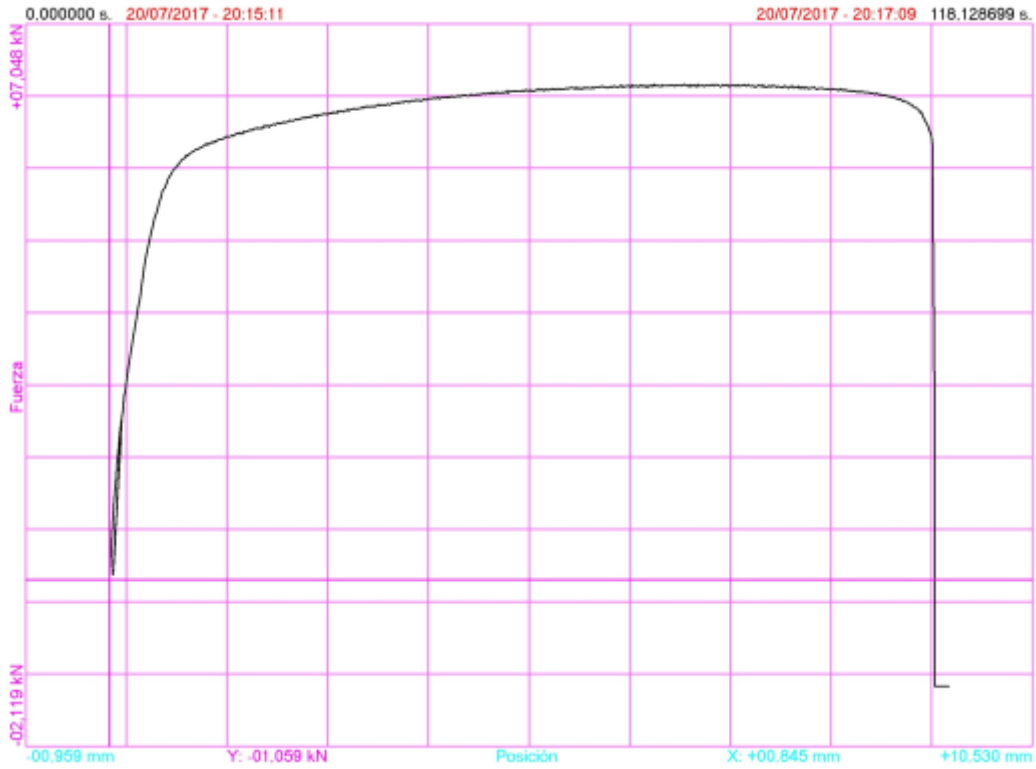


Figura B. 18 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 20



Figura B. 19 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 21

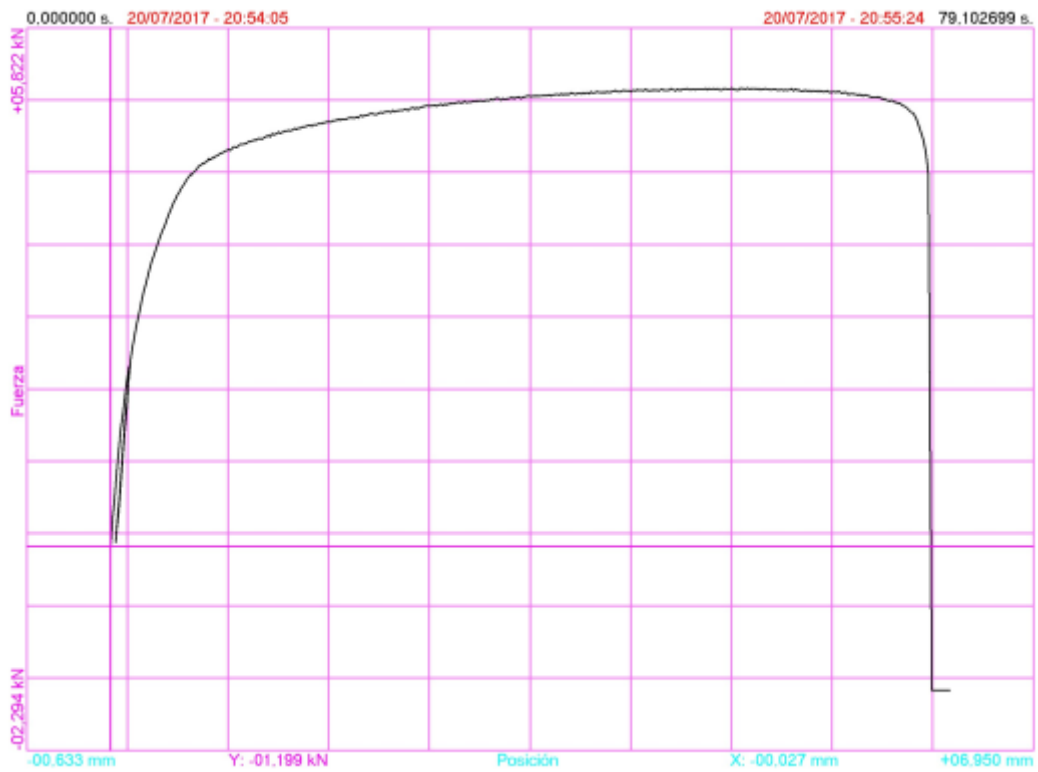


Figura B. 20 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 22

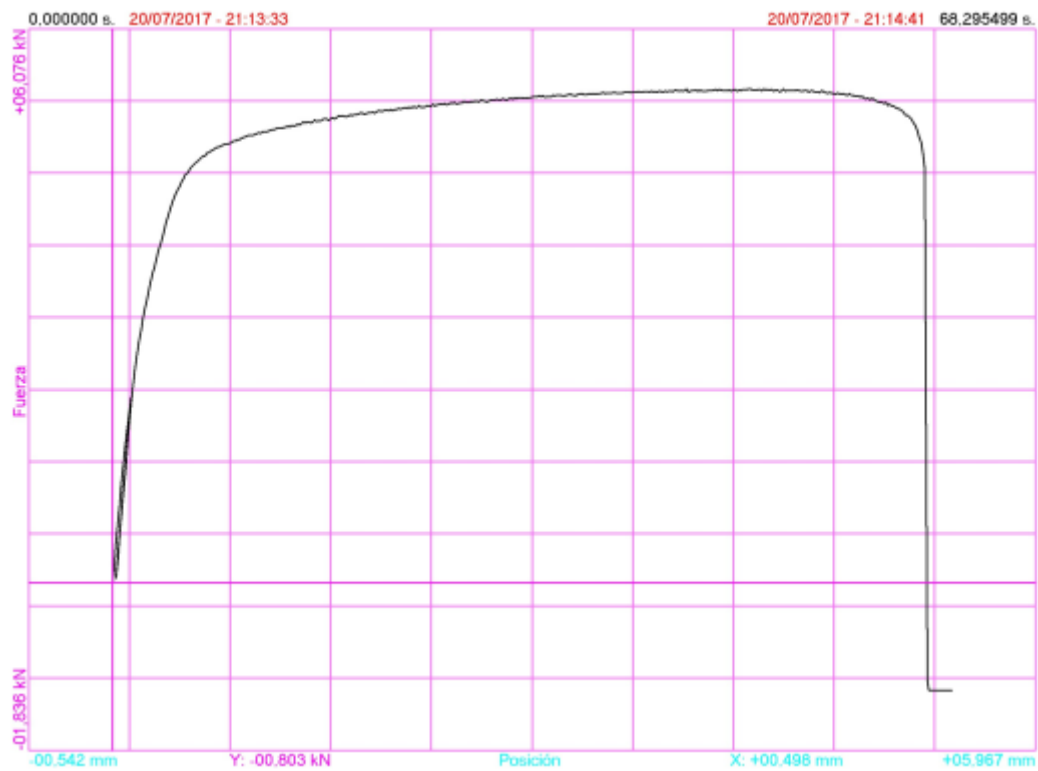


Figura B. 21 – Gráfico da força (kN) – extensão (mm) obtido no ensaio de tração uniaxial do provete 24