



RAFAELA ALEXANDRA PARREIRA CORREIA

Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS PRODUZIDAS POR FOTO POLIMERIZAÇÃO

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2022



ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS PRODUZIDAS POR FOTO POLIMERIZAÇÃO

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA

RAFAELA ALEXANDRA PARREIRA CORREIA

Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientador: Bruno Alexandre Rodrigues Simões Soares,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientadora: Carla Maria Moreira Machado,
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Análise da Rugosidade Superficial de Peças Produzidas por Foto Polimerização

Copyright © Rafaela Alexandra Parreira Correia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 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

A conclusão da presente dissertação constitui o culminar do meu percurso académico, nomeadamente, do mestrado integrado em Engenharia Mecânica na Universidade Nova de Lisboa, que evidentemente teve o apoio de algumas pessoas a quem agradeço.

Primeiramente, gostaria de agradecer o suporte dado pelo meu orientador e pela minha coorientadora Professor Doutor Bruno Soares e Professora Doutora Carla Machado, respetivamente. A sua disponibilidade, ajuda e apoio possibilitaram que este trabalho se tornasse enriquecedor.

Agradeço também ao Professor Doutor Ricardo Cláudio do Instituto Politécnico de Setúbal pela sua disponibilidade e ajuda no decorrer das medições inerentes ao trabalho experimental.

Seguidamente, agradeço ao Engenheiro Filipe Silvestre do FabLab pela disponibilidade e apoio na utilização da Prusa SL1S.

Em seguida, agradeço ao Pedro Rendas e ao Rui Gonçalves pelo apoio e conselhos durante o trabalho experimental.

Agradeço também aos meus pais, Ludovina e José, às minhas avós, Etelvina e Isidora, e ao meu avô, António, por me apoiarem incondicionalmente nos bons e maus momentos, pelos conselhos, apoio e amor. Tudo o que sou hoje devo-o sobretudo à minha família.

E como os amigos mudam a vida agradeço ao Diogo Matos, Edgar Belo, Laura Silva, Madalena Geraldo e Rui Silva pelo seu companheirismo, apoio e bons momentos que vivemos juntos durante os últimos 5 anos.

Agradeço ainda à docência do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica por todo o conhecimento partilhado.

Aos meus colegas de curso por todo o companheirismo e camaradagem.

Um profundo obrigado.

"Sê a mudança que queres ver no mundo." (Mahatma Gandhi).

RESUMO

Os materiais poliméricos são fundamentais na atualidade devido não só às suas características, das quais se destacam a versatilidade, durabilidade e eficiência energética e térmica, mas também pelo seu reduzido custo. Dentro destes os polímeros termoendurecíveis, utilizados na *vat polymerization* (VP), uma das variantes da Manufatura Aditiva (MA), contam com aplicações em diversas áreas das quais se destacam a engenharia, nomeadamente, a produção de equipamentos elétricos e mecânicos, tais como, disjuntores e componentes de motores, e as indústrias médicas e dentária. No entanto, a funcionalidade das peças produzidas por esta família de processos, da qual faz parte o *Digital Light Processing* (DLP), pode ser comprometida pela sua rugosidade superficial, por exemplo ao comprometer a sua resistência mecânica ou devido ao aumento da aderência de colónias de bactérias, surgindo assim a necessidade de a investigar em função dos parâmetros do processo.

Os objetivos fundamentais desta dissertação são: identificar os parâmetros potencialmente importantes para a rugosidade superficial de peças produzidas por DLP; aplicar os métodos de planeamento de experiências e Análise de Variância (ANOVA) para determinar os fatores que mais influenciam a rugosidade superficial de diversos materiais; utilizar a Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) para determinar o comportamento dos provetes impressos por DLP; estabelecer a análise e conclusão de resultados experimentais.

Recorrendo a métodos estatísticos de Planeamento de Experiências (DoE), foram impressos 97 provetes com três materiais distintos e duas impressoras. Foram realizadas no total 582 medições de rugosidade que, após serem sujeitas a uma análise estatística, permitiram avaliar a influência de cada fator em cada um dos 7 parâmetros de rugosidade analisados, a comparação dos resultados obtidos entre materiais e entre impressoras, a construção de um modelo empírico de resposta, recorrendo à Metodologia da Superfície de Resposta (RSM) e, nomeadamente, ao *Central Composite Design* (CCD), e a sua validação. Em suma, destacam-se as relações de proporcionalidade direta obtidas entre a rugosidade superficial dos provetes e os fatores orientação e espessura de camada e a relação inversamente proporcional com o fator tempo de exposição. Prevê-se, ainda, a influência da combinação material impressora na resposta estudada.

Palavras-chave: *Central Composite Design (CCD), Digital Light Processing (DLP) Materiais Poliméricos, Manufatura Aditiva (MA), Metodologia da Superfície de Resposta (RSM), Planejamento de Experiências (DoE), Rugosidade, vat polymerization (VP)*

ABSTRACT

Polymeric materials are crucial on today's society due to their characteristics and also their low cost. Within these polymeric materials there are thermosets, used in vat polymerization (VP), one of Additive Manufacturing (AM) technologies, have applications in lots of areas including engineering and medical and dental industry. However, the functionality of produced parts with these family of processes, within which is digital light processing (DLP), can be compromised by their superficial roughness, leading to the necessity of analysing in according to the process parameters.

The fundamental objectives of this thesis were identification of potential important parameters to superficial roughness of produced parts through DLP; applying design of experiments (DoE) methods and analysis of variance (ANOVA) to determine the most important factors to roughness of different materials, utilize surface response methodology (RSM) to predict the roughness response of parts produced by DLP; analyse and conclusion of results.

Using statistical methods of design of experiments (DoE), 97 parts were printed with 3 different materials and 2 different printers and 582 measures of roughness were made. These measures were statistical analyse to evaluate the influence of each factor on each of the 7 studied parameters, the comparison between diferent materials and printers, the construction of an empirical model of response, through Response Surface Methodology (RSM) and, namely, Central Composite Desing (CCD), and its validation.

Key-words: *Central Composite Design (CCD), Digital Light Processing (DLP), Polymeric materials, Additive Manufacturing (AM), Response Surface Methodology (RSM), Design of Experiments (DoE), Roughness, vat polymerization (VP)*

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	Motivação.....	2
1.2	História da Manufatura Aditiva.....	3
1.3	Objetivos Principais	5
2	ENQUADRAMENTO CIENTÍFICO	7
2.1	Vantagens da Manufatura Aditiva.....	7
2.2	Manufatura Aditiva	10
2.2.1	Tecnologias de Manufatura Aditiva	11
2.3	Vat Polymerization.....	18
2.3.1	Vantagens e Desvantagens	24
2.3.2	Parâmetros da Vat Polymerization	24
2.3.3	Principais limitações.....	29
2.3.4	Cuidados a ter	31
2.4	Etapas inerentes à Manufatura Aditiva.....	32
2.5	Materiais poliméricos	35
2.5.1	Materiais utilizados na <i>Vat Polymerization</i>	36
2.5.2	Aplicações dos materiais utilizados na <i>Vat Polymerization</i>	38
2.6	Rugosidade	39
2.7	Metodologia.....	44
2.8	Outros estudos sobre rugosidade em <i>Vat Polymerization</i>	45

2.9	Síntese do Capítulo.....	49
3	METODOLOGIA.....	50
3.1	<i>Design of Experiments</i>	50
3.2	Metodologia da Superfície de Resposta	51
3.3	<i>Central Composite Design</i>	52
3.4	Análise da Variância	56
4	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	59
4.1	Elaboração dos Provetes.....	59
4.1.1	Equipamentos Utilizados.....	61
4.2	Etapas do procedimento experimental.....	63
4.3	Planeamento de Experiências	64
4.3.1	Screening	64
4.3.2	Metodologia da Superfície de Resposta	67
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	70
5.1	Experiência de Screening	70
5.2	Metodologia da Superfície de Resposta	73
6	CONCLUSÕES	98
6.1	Conclusões	98
6.2	Propostas de trabalhos futuros.....	99
7	BIBLIOGRAFIA.....	100
	Anexo A	107
	Anexo B.....	109
	Anexo C.....	120
	Anexo D	128
	Anexo E.....	136
	Anexo F	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Custo do produto em função do tempo. Adaptado de [44].	9
Figura 2.2 - Informação disponível, custo e possibilidade de realizar alterações em função do tempo. Adaptado de [44].	9
Figura 2.3 - Representação esquemática das 7 famílias da Manufatura Aditiva. Adaptado de [28], [45].	11
Figura 2.4 - Representação esquemática do processo de <i>Laser Sintering</i> . Adaptado de [45].	11
Figura 2.5 - Representação esquemática do processo <i>Powder Bed Fusion</i> . Adaptado de [38].	12
Figura 2.6 - Representação do processo de <i>3D Printing</i> . Adaptado de [36].	14
Figura 2.7 - Representação esquemática do funcionamento da <i>Laminated Object Manufacturing</i> . Adaptado de [3].	15
Figura 2.8 - Representação do processo de <i>Fused Deposition Modelling</i> . Adaptado de [36].	16
Figura 2.9 - Representação esquemática de uma impressora <i>Polyjet</i> . Adaptado de [46].	17
Figura 2.10 - Representação esquemática do processo de <i>Digital Light Processing</i> . Adaptado de [3].	19
Figura 2.11 - Representação esquemática do processo de vat polymerization com 2 fotões. Adaptado de [3].	20
Figura 2.12 - Representação do processo de <i>stereolithography</i> bottom-up. Adaptado de [31].	22
Figura 2.13 - Representação do efeito da utilização do parâmetro anti-alising numa aresta. Adaptado de [58].	28
Figura 2.14 - Parâmetros de impressão em tecnologias de vat polymerization. Adaptado de [27].	29
Figura 2.15 - Orientação de uma peça para imprimir de cima para baixo e de baixo para cima, respetivamente. Adaptado de [18].	30
Figura 2.16 - Principais propriedades mecânicas em função da orientação em provetes impressos em SLA. Adaptado de [22].	31
Figura 2.17 - Representação esquemática do fenómeno de degrau de escada. A mesma geometria com: i espessura de camada de elevada, ii intermédia e iii fina. Adaptado de [53].	34
Figura 2.18 - Etapas gerais necessárias à produção de uma peça recorrendo a impressão 3D. Adaptado de [3].	35
Figura 2.19 - Etapas para a obtenção do Ra . Adaptado de [63].	40
Figura 2.20 - Ilustração de quatro perfis de rugosidade com o mesmo Ra e Rq . Adaptado de [64].	41
Figura 2.21 - Direção de medição de Ry . Adaptado de [23].	41
Figura 2.22 - Direção de medição de $R_{máxj}$. Adaptado de [23].	42
Figura 2.23 - Esquema representativo dos parâmetros Sk , Spk e Svk . Adaptado de [68].	43
Figura 2.24 - Representação esquemática de um sistema. Adaptado de [71].	44
Figura 3.1 - Representação dos pontos de CCD. Adaptado de [76].	52

Figura 3.2 – <i>Central Composite Design</i> para a otimização de: a) duas variáveis e b) três variáveis. Adaptado de [75].	53
Figura 4.1 - Representação 3D do provete projetado.	59
Figura 4.2 - Distribuição das faces medidas (A e B) em função da variação de inclinação.	60
Figura 4.3 - Impressora Photon Mono. Adaptado de [85].	61
Figura 4.4 - Impressora Prusa SL1S. Adaptado de [87].	62
Figura 4.5 - Mitutoyo SJ210. Adaptado de [90].	63
Figura 4.6 - Representação esquemática das 4 experiências de <i>screening</i> realizadas.	64
Figura 5.1- Faces dos provetes onde se efetuaram medidas durante os ensaios experimentais.	70
Figura 5.2 – Tabelas ANOVA para o parâmetro Ra para a face A e B, respetivamente.	74
Figura 5.3 - Gráficos de Pareto para o parâmetro Ra para a face A e B, respetivamente.	75
Figura 5.4 - Superfície de resposta para a rugosidade superficial Ra da face A em função da orientação e da espessura, considerando o tempo de exposição no nível 0.	76
Figura 5.5 - Superfície de resposta para a rugosidade superficial Ra da face B em função da orientação e da espessura, considerando o tempo de exposição no nível 0.	76
Figura 5.6 - Superfície de resposta para a rugosidade superficial Ra da face B em função do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.	77
Figura 5.7 - Superfície de resposta para a rugosidade superficial Ra da face B em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.	77
Figura 5.8 - Superfície de resposta para RkA em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.	78
Figura 5.9 - Superfície de resposta para RkA em função do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.	78
Figura 5.10 - Superfície de resposta para RkA em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.	79
Figura 5.11 - Superfície de resposta para RkB em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.	80
Figura 5.12 - Superfície de resposta para RkB em função do tempo do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.	80
Figura 5.13 - Superfície de resposta para RkB em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.	81
Figura 5.14 - Superfície de resposta para RqA em função do tempo da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.	82
Figura 5.15 - Superfície de resposta para RqA em função do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.	82
Figura 5.16 - Superfície de resposta para RqA em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.	83

Figura 5.17 - Superfície de resposta para RqB em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.	84
Figura 5.18 - Superfície de resposta para RqB em função do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.	84
Figura 5.19 - Superfície de resposta para RqB em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.	85
Figura 5.20 - Superfície de resposta para RskA em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.	86
Figura 5.21 - Superfície de resposta para RvkA em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.	86
Figura 5.22 - Superfície de resposta para RvkB em função da orientação e da espessura, considerando o tempo de exposição no nível 0.	87
Figura 5.23 - Superfície de resposta para RzA em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.	87
Figura 5.24 - Superfície de resposta para RzA em função do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.	88
Figura 5.25 - Superfície de resposta para RzA em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.	88
Figura 5.26 - Superfície de resposta para RzB em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.	89
Figura 5.27 - Superfície de resposta para RzB em função do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.	89
Figura 5.28 - Superfície de resposta para RzB em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.	90
Figura 5.29 - Comparação dos resultados obtidos por via analítica e empírica para o parâmetro Ra para a face A e B, respectivamente.	93
Figura 5.30 - Evolução do parâmetro Ra na face A e B, respectivamente, em função da variação da orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes.	94
Figura 5.31 - Evolução do parâmetro Ra na face A e B, respectivamente, em função da variação da espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes.	95
Figura 5.32 - Evolução do parâmetro Ra na face A e B, respectivamente, em função da variação do tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes.	97

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais vantagens e desvantagens do processo <i>Directed Energy Deposition</i>	12
Tabela 2.2 - Principais vantagens e desvantagens do processo de Powder Bed Fusion.....	13
Tabela 2.3 - Principais vantagens e desvantagens do <i>3D Printing</i>	14
Tabela 2.4 - Principais vantagens e desvantagens do processo de <i>Laminated Object Manufacturing</i> . .	15
Tabela 2.5 - Vantagens e desvantagens do processo <i>Fused Deposition Modelling</i>	17
Tabela 2.6 - Vantagens e desvantagens do Polyjet.....	18
Tabela 2.7 - Características principais das impressoras em função da orientação de impressão. Adaptado de [1], [18], [20].....	22
Tabela 2.8 - Caracterização dos principais tipos de resinas utilizadas na Vat Polymerization. Adaptado de [18, 20].....	37
Tabela 2.9 - Classes de rugosidades superficiais. Adaptado de [23].....	43
Tabela 3.1 - Tipos de <i>Central Composite Design</i> e respectivas características. Adaptado de [75, 76]. .	53
Tabela 3.2 - ANOVA para um modelo matemático ajustado aos dados experimentais usando regressão múltipla. Adaptado de [75].....	56
Tabela 4.1- Características da primeira resina utilizada. Adaptado de [79].	60
Tabela 4.2 - Características da resina Anycubic Grey. Adaptado de [80]–[82].	60
Tabela 4.3 - Características da resina Prusament Tough Orange. Adaptado de [83], [84].	60
Tabela 4.4 - Características da impressora Photon Mono. Adaptado de [85, 86].....	61
Tabela 4.5 - Características da impressora Prusa SL1S. Adaptado de [88, 89].....	62
Tabela 4.6 - Valores utilizados para cada um dos níveis de cada uma das variáveis utilizadas.....	66
Tabela 4.7 - Matriz de planeamento de experiências para um fatorial completo com 4 variáveis.	66
Tabela 4.8 - Valores utilizados para cada um dos níveis de cada uma das variáveis utilizadas.....	66
Tabela 4.9 - Matriz de planeamento de experiências para um fatorial completo com 3 variáveis.	67
Tabela 4.10 - Valores utilizados para cada um dos níveis de cada uma das variáveis utilizadas.....	67
Tabela 4.11 - Matriz de planeamento de experiências para um CCD com 3 variáveis.	68
Tabela 5.1 - Parâmetros influentes para as faces A e B com a resina 3DJAKE.....	71
Tabela 5.2 - Parâmetros influentes para as faces A e B com a resina Grey	71
Tabela 5.3 - Parâmetros influentes para as faces A e B com a resina Orange.....	72
Tabela 5.4 - Parâmetros influentes para as faces A e B com a resina Orange.....	73
Tabela 5.5 - Modelos matemáticos para prever as rugosidades nas faces A e B.	90
Tabela 5.6 - Testes realizados para a validação dos modelos empíricos obtidos.	91
Tabela 5.7 - Resultados do parâmetro Ra de rugosidade obtidos considerando a variação da orientação e a espessura e o tempo de exposição constantes.	93

Tabela 5.8 - Resultados do parâmetro Ra de rugosidade obtidos considerando a variação da espessura e a orientação e o tempo de exposição constantes.	95
Tabela 5.9 - Resultados do parâmetro Ra de rugosidade obtidos considerando a variação do tempo de exposição e a orientação e a espessura constantes.	96

SIGLAS E ACRÓNIMOS

3D	Tridimensional
3DP	<i>3D Printing</i>
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ANOVA	Análise da Variância
ASTM	<i>American Association for Testing Materials</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CCD	<i>Central Composite Design</i>
CDLP	<i>Continuous Direct Light Processing</i>
CLIP	<i>Continuous Liquid Interface</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
DDSW	<i>Diagonal Divergent STAR-WEAVE</i>
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
DFM	<i>Design for Manufacturing</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DMD	<i>Digital Micromirror Device</i>
DMD	<i>Direct Metal Deposition</i>
DoE	<i>Design of Experiments</i>
DPP	<i>Daylight Polymer Printing</i>
DSW	<i>Divergent STAR-WEAVE</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>

IPA	Álcool Isopropílico
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LENS	<i>Laser Engineered Net Shaping</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
MA	Manufatura Aditiva
MSLA	<i>Masked Stereolithography</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MSE	<i>Media of the Square of Residual</i>
MSR	Metodologia da Superfície de Resposta
MSR	<i>Media of the Square of Regression</i>
PC	<i>Polycarbonate</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
PP	<i>Polypropylene</i>
RP	<i>Rapid Prototyping</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
SSE	<i>Sum of Squares of the Residual</i>
SSR	<i>Sum of Squares due to the Regression</i>
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>
SW	<i>STAR-WEAVE</i>
UV	Ultravioleta
VP	<i>Vat Polymerization</i>

SÍMBOLOS

R_a	Desvio médio aritmético do perfil	$[\mu m]$
R_A^2	Coefficiente de correlação ajustado	
$R_{máx}$	Altura máxima das irregularidades do perfil	$[\mu m]$
R_q	Desvio quadrático médio do perfil avaliado	$[\mu m]$
R_t	Altura máxima do perfil	$[\mu m]$
R_z	Média das alturas máximas do perfil	$[\mu m]$
R^2	Coefficiente de correlação	
S_k	Profundidade do perfil reduzido	$[\mu m]$
S_{pk}	Altura dos picos eliminados	$[\mu m]$
S_{vk}	Profundidade dos vales eliminados	$[\mu m]$
c_p	Número de pontos centrais	
β_i	Coefficientes de regressão de primeira ordem	
β_{ii}	Coefficientes de regressão de segunda ordem	
β_{ij}	Coefficientes dos parâmetros de interação de variáveis	
k	Número de variáveis independentes	
p	Número de termos na equação	
ε	Fontes de incerteza	

INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicial apresenta-se uma contextualização da situação em estudo e os principais motivos para este estudo. Estabelecem-se os objetivos principais que direcionam a presente dissertação e a justificam.

1.1 Motivação

Existiram diversas revoluções industriais ao longo da história, sendo a revolução industrial atual conhecida como quarta revolução industrial ou indústria 4.0. Esta caracteriza-se pela sua intrínseca ligação com a tecnologia e o seu desenvolvimento, recorrendo ao aumento do uso da automação e de indústrias inteligentes, produzindo de modo mais eficaz e eficiente. Estes desenvolvimentos permitem uma maior flexibilidade nos processos, facilitando a resposta às necessidades do cliente e dando resposta à crescente customização em massa. Da indústria 4.0 faz parte a Manufatura Aditiva (MA) ou prototipagem rápida (RP), verificando-se que se relacionam intrinsecamente [1], [2].

Relativamente à MA, esta permite dar resposta à customização, podendo ir até à personalização em massa a um baixo custo e com qualidade, assegurando a produção de uma peça diretamente a partir do seu modelo digital [1], [3], [4]. Deste modo, a sua utilização tem sido cada vez mais difundida, contando com um crescimento de 7.5% ao ano, atingindo um valor de 12.8 mil milhões de dólares no ano de 2020 [5], [6]. Posto isto, abrange cada vez mais áreas, desempenhando um papel preponderante no dia-a-dia de engenheiros, arquitetos, designers, médicos e artistas [1], [4], [7]–[16].

De entre os diferentes processos de MA, a família da *Vat Polymerization* (VP) tem-se revelado promissora. Desta família faz parte o *Digital Light Processing* (DLP), que se caracteriza pela produção de uma peça 3D através da cura seletiva de resina no estado líquido mediante a projeção de uma imagem de comprimento de onda específico, permite a produção de peças com um bom acabamento superficial, elevada precisão e detalhes e baixo custo [17], [18].

Os materiais poliméricos são amplamente utilizados pelas suas características, que os tornam essenciais para a indústria, nomeadamente, a sua liberdade de design, duração e eficiência energética e térmica. Dentro desta classe de materiais encontram-se os polímeros termoendurecíveis, que ao ser aquecidos permitem uma primeira moldação, em que se desencadeia uma reação química irreversível,

unindo as estruturas cristalinas firme e permanentemente [19]. O constante desenvolvimento da engenharia e, nomeadamente, das ciências dos materiais permitiu a melhoria das propriedades de diversos polímeros termoendurecíveis nos últimos anos, com características distintas, o que aliado com o processo de *Masked Stereolithography* (MSLA) permitiu o impulsionamento desta tecnologia de MA que neste momento já conta com aplicações na joalheria, engenharia, prototipagem, medicina e medicina dentária [1], [20]–[22]. Em atividades de engenharia o MSLA constitui um método eficaz na produção de protótipos, essenciais não só no projeto, uma vez que permitem testar novos produtos e verificar o cumprimento dos requisitos funcionais, como também na sua produção. Na indústria médica e dentária conta, por exemplo, com aplicações odontológicas, na produção de equipamentos médicos personalizados e na produção de aparelhos auditivos [18], [21].

No entanto, como é evidente as peças produzidas não são perfeitas apresentando inevitavelmente desvios. Estes desvios dos quais faz parte a rugosidade superficial podem condicionar a aplicabilidade e funcionalidade das peças projetadas, nomeadamente a funcionalidade de protótipos funcionais e próteses dentárias [23]–[26].

Posto isto, o estudo da rugosidade superficial, dos parâmetros que mais a influenciam e, nomeadamente, a construção de um modelo de resposta em função dos principais parâmetros do processo adquire uma importância fulcral na atualidade [24], [27].

1.2 História da Manufatura Aditiva

Ainda que os materiais fotossensíveis remontem desde, pelo menos, o tempo dos egípcios, só muito tempo depois se ganhou consciência que era apenas a luz solar que alterava as propriedades destes materiais [28].

O surgimento da MA remonta ao final da década de 70 e ao início da década de 80 do século XX, em que se desenvolveram diversos estudos, aproximadamente ao mesmo tempo e de modo completamente independente [29], [30].

O primeiro passo para o surgimento da MA deu-se no início dos anos 70's, quando o investigador japonês Dr. Hideo Kodama inventou a abordagem moderna da estereolitografia, em que uma fonte de luz UV cura polímeros fotossensíveis [31], [32]. Por volta desta altura, em 1971, Swainson apresentou uma patente para um sistema em que dois raios produziam uma mudança de fase num material para produzir objetos 3D, no entanto esta ideia foi abandonada devido a problemas de financiamento, sem chegar a parâmetros ótimos, materiais adequados ou boa precisão das peças [15], [28], [32].

Posteriormente, em 1979, Ross Housholder submeteu um pedido de patente descrito como “A molding process for forming a three-dimensional article in layers”, que foi aprovada em 1981 e cujo aparato se assemelha às impressoras 3D atuais [33], [34].

Durante os anos 80's diversos trabalhos foram realizados de modo independente baseados nos conceitos de cura seletiva de uma camada superficial de um fotopolímero e na construção de objetos tridimensionais com camadas sucessivas, originando um conjunto de publicações de artigos em revistas científicas sobre o tema, bem como a submissão de diversas patentes, dos quais se destacam [15], [32], [33], [35]:

- Em 1984 Jean-Claude Andre em França submeteu uma patente intitulada "Apparatus for Fabricating a Model of an Industrial Part", envolvendo uma abordagem com um único raio laser;
- Em 1984 Charles Hull nos Estados Unidos submeteu uma patente intitulada "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography";
- Em 1984 Yoji Marutani no Japão desenvolveu e demonstrou um processo de estereolitografia, que submeteu a patente intitulando-o "Optical Molding Method";
- Em 1982, Alan Herbert publicou um artigo intitulado "Solid Object Generation", em que descrevia um sistema que direcionava um raio de laser na superfície de um foto polímero através de um espelho, permitindo criar diversas peças pequenas e geometrias simples.

Com estas descobertas determinaram-se os conceitos básicos para o desenvolvimento da técnica de SLA, bem como para o surgimento das restantes tecnologias de MA. Os anos que se seguiram foram de profunda descoberta surgindo diversos processos e reconhecendo-se os principais problemas como a identificação dos modos de distorção, o estabelecimento dos requerimentos de pós processamento, bem como a criação do primeiro software de *slicing* [15], [29].

Salienta-se que, ainda que tenham existido trabalhos anteriores e diversas outras publicações, se considera que a MA surgiu em 1987 quando a patente de Charles Hull foi aprovada e este criou a primeira empresa para comercializar a sua tecnologia a 3D Systems [1], [3], [7], [15], [36].

Relativamente aos restantes processos destaca-se que [1], [3], [15], [33], [37]:

- O *Selective Laser Sintering* (SLS), conhecido normalmente apenas pela sigla, foi inventado na Universidade do Texas pelos investigadores Carl Deckard e Joseph Beaman, sendo patenteado em 1986;
- O *Fused Deposition Modeling* (FDM), o processo mais conhecido atualmente, foi inventado por Scott Crump que criou uma companhia com esta tecnologia, a Stratasys, sendo patenteado em 1989;
- O *3D Printing* (3DP) foi inventado por um estudante do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) Paul Williams e o seu orientador Professor Eli Sachs, sendo patenteado em 1989;

- O *Polyjet* foi desenvolvido em 2000 por uma companhia israelita chamada *Objet Geometries*, tendo sido um dos primeiros processos de deposição de camadas.

Com o desenvolvimento de diversas áreas tecnológicas e o expirar das primeiras patentes nesta área, a MA tem-se tornado cada vez mais popular, pelo que nos últimos anos tem sido cada vez mais estudada e utilizada nas áreas científica e tecnológica [1], [7], [29], [30].

1.3 Objetivos Principais

Esta investigação pretende contribuir para o desenvolvimento da tecnologia de DLP, nomeadamente, no que diz respeito à rugosidade superficial. Assim, pretende-se a elaboração de um modelo empírico que permita prever a influência dos parâmetros de impressão na rugosidade superficial de provetes produzidos nas impressoras Photon Mono da empresa Anycubic e SL1S da Prusa, através do cumprimento dos seguintes objetivos:

- Identificação dos parâmetros potencialmente importantes;
- Aplicação de métodos de planeamento de experiências e Análise de Variância (ANOVA) para determinar os fatores mais importantes;
- Utilização da MSR (Metodologia da Superfície de Resposta) para determinar o comportamento dos provetes impressos em impressão tridimensional (3D);
- Análise e conclusão de resultados experimentais.

ENQUADRAMENTO CIENTÍFICO

Ao longo do presente capítulo apresentam-se os conceitos envolvidos nesta dissertação, incluindo-se a sua explicação e contextualização a nível histórico, possibilitando a perceção da sua relevância na atualidade. Por fim, apresenta-se a revisão bibliográfica em que se destacam os principais estudos anteriores desenvolvidos nesta área.

2.1 Vantagens da Manufatura Aditiva

É evidente que cada uma das tecnologias de MA tem as suas vantagens e desvantagens, introduzindo alterações positivas na indústria atual. No entanto, de modo geral podem salientar-se as seguintes vantagens comuns a todos os processos de MA:

Menos desperdício por produto: como a impressão 3D produz os objetos na sua forma final, utilizando apenas o material necessário, reduz significativamente as operações de acabamento necessárias nos processos convencionais, o que induz uma redução no desperdício de material. A redução do desperdício é também assegurada por alguns processos de MA que permitem reutilizar a matéria-prima utilizada [2], [8], [37]–[40].

Zero lead time: o recurso a impressoras 3D permite que o produto seja produzido no local e quando é pedido, seguindo assim uma produção *just-in-time*, que permite uma redução significativa nos tempos de aprovisionamento e custos de stock, nomeadamente custos associados ao armazenamento e transporte, o que a torna mais consciente a nível ambiental [2], [13], [37].

Otimização do design: a impressão 3D permite uma nova abordagem ao *design for manufacturing* (DFM), essencial na manufatura convencional, que se caracteriza por projetar as peças tendo em conta a capacidade produtiva dos processos. Tendo em conta a intrínseca relação entre MA e a utilização de meios digitais é ainda possível projetar peças otimizadas topologicamente, reduzindo assim o material utilizado e a sua massa [2], [4], [9], [15], [37]–[39], [41].

Complexidade das peças produzidas: na manufatura convencional, a produção de uma única peça pode requerer sucessivas etapas que aumentam drasticamente em função do aumento da complexidade da peça, implicando inevitavelmente um maior custo de produção. No caso da impressão 3D, o seu funcionamento, caracterizado por um reduzido número de processos e recursos necessários para a produção de uma peça, torna possível produzir geometrias complexas sem um incremento significativo do custo [1], [4], [7], [10], [13], [30], [37], [39], [40], [42].

Eliminação do processo de montagem: a impressão 3D possibilita a criação de peças já interligadas, reduzindo deste modo não só o número de componentes, como também os tempos de montagem. Alguns processos permitem ainda parar o processo de impressão de modo a juntar peças exteriores, tais como sensores ou motores, suprimindo processos de montagem posteriores [15], [37], [41].

Versatilidade: dado o funcionamento característico da MA é possível produzir objetos diferentes ou iguais de modo praticamente automatizado, sem necessidade de recorrer a técnicos especializados. Assim, é possível produzir uma vasta gama de objetos sem um aumento significativo do custo, o que permite dar resposta à customização em massa [4], [7], [10], [14], [15], [37], [38], [41]–[43].

Capacidade de utilizar diversos materiais: com o desenvolvimento da impressão 3D alguns processos passaram a permitir misturar diferentes tipos de matérias-primas, surgindo a impressão 3D multimaterial, que permite combinar materiais em função das propriedades mecânicas requeridas, tais como, dureza e flexibilidade [41], [42].

Não necessita de operários especializados: os processos tradicionais, como o torneamento, requerem técnicos especializados que demoram anos até dominar totalmente um processo. No caso da MA, o processo fica praticamente definido através da informação fornecida no código G gerado, sendo apenas necessário garantir, por exemplo, o fornecimento do material necessário [30], [37], [40].

Reduzidas dimensões das impressoras: considerando a capacidade do processo de fabricar peças tão grandes quanto o tamanho da sua plataforma de impressão, torna-o competitivo face aos processos convencionais e permite que seja facilmente colocado em qualquer local, por exemplo, num escritório. As reduzidas dimensões das impressoras permitem ainda mudar facilmente a sua localização, possibilitando que sejam colocadas junto do cliente [37].

No que toca ao desenvolvimento de produtos, a MA desempenha também um papel fundamental. Tal como se observa no gráfico representado na Figura 2.1, estima-se que cerca de 70 a 90% do custo de um produto seja estabelecido antes da sua produção. Deste modo, as maiores reduções no custo do produto dependem das alterações realizadas durante o seu projeto. O gráfico da Figura 2.2

permite inferir que ainda que numa fase inicial exista maior disponibilidade para efetuar alterações, sendo o seu custo inferior, a informação sobre o produto é escassa. Verifica-se, portanto, que à medida que o desenvolvimento avança aumentam não só os custos das alterações, como a informação sobre o produto e diminui a possibilidade de as efetuar. Torna-se assim fundamental proceder às alterações necessárias com a maior brevidade possível, e construir modelos que ilustrem toda a informação disponível [1], [44].

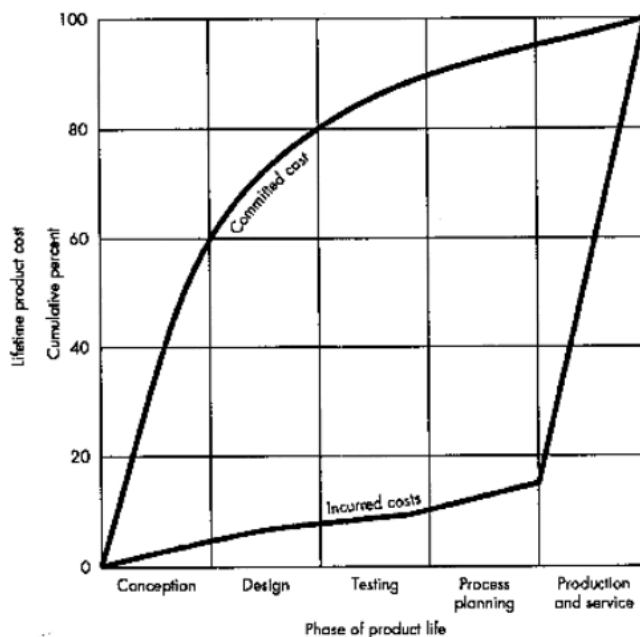


Figura 2.1 - Custo do produto em função do tempo. Adaptado de [44].

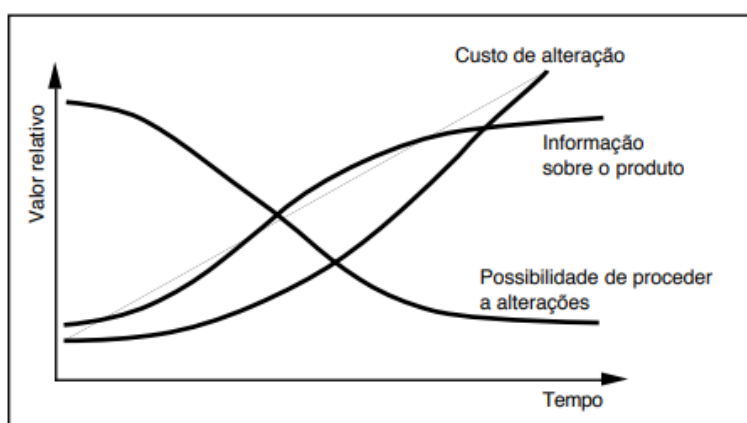


Figura 2.2 - Informação disponível, custo e possibilidade de realizar alterações em função do tempo. Adaptado de [44].

Sabe-se que a RP, intrinsecamente relacionada com a MA e o desenvolvimento tecnológico, permite a produção de um protótipo rapidamente e a um custo reduzido, tendo por base um modelo

digital. Deste modo, o protótipo ilustra a maioria da informação e facilita a comunicação entre os diversos departamentos dentro de uma instituição, assegurando não só a visualização da ideia como também a sua testagem. Recorrendo a um protótipo é possível verificar não só o dimensionamento, como a correta montagem e funcionalidade do produto final e proceder às alterações necessárias numa fase inicial, sem necessidade de despendere demasiado tempo e dinheiro [1], [8], [9], [13], [15], [17], [26], [30], [38], [40].

2.2 Manufatura Aditiva

A *American Association for Testing Materials* (ASTM) define a MA como o processo de unir materiais para fabricar objetos a partir de um modelo 3D normalmente camada a camada, como oposição às metodologias de fabrico subtrativo [17].

A sua vasta gama de utilizadores e o seu elevado número de peças produzidas, associados às diversas aplicações e vantagens deste processo, assim como a sua capacidade para dar resposta a alguns problemas originam o seu crescimento exponencial [3]. Em consequência, surgiu a necessidade de definir uma terminologia adequada e de agrupar as tecnologias que fazem parte da MA em famílias, o que levou ao surgimento do subcomité F42 da ASTM que as dividiu em 7 famílias, que se representam na Figura 2.3 [17].

Primeiramente, apresenta-se sucintamente cada uma destas famílias exceto a *vat polymerization* (VP) que é aprofundada em seguida, dada a sua intrínseca relação com a presente dissertação. Expõem-se também as vantagens e as etapas inerentes à MA.

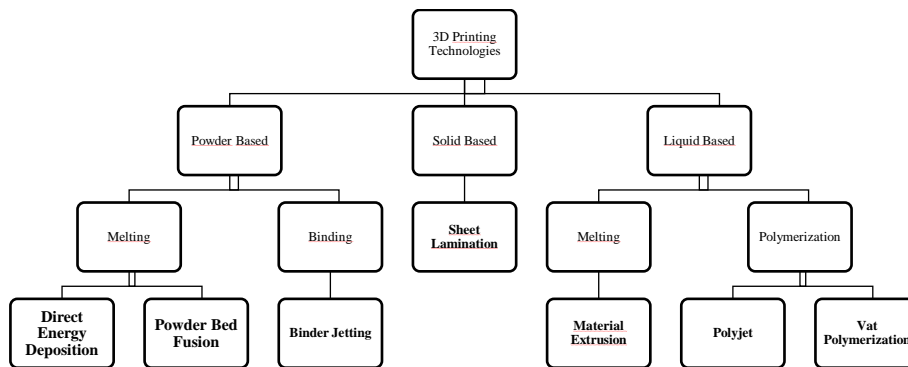


Figura 2.3 - Representação esquemática das 7 famílias da Manufatura Aditiva. Adaptado de [28], [45].

2.2.1 Tecnologias de Manufatura Aditiva

2.2.1.1 Directed Energy Deposition

Processo de MA em que energia térmica concentrada é usada para fundir materiais, derretendo-os à medida que vão sendo depositados [17]. Em função da fonte de energia térmica utilizada o processo divide-se em:

- *Laser Sintering* (LS) que usa um laser para fundir o material [17];
- *Electron Beam Additive Manufacturing* (EBAM) que usa um feixe laser de alta potência para fundir um metal;
- *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) usa um laser para derreter o material fornecido pela extrusora.

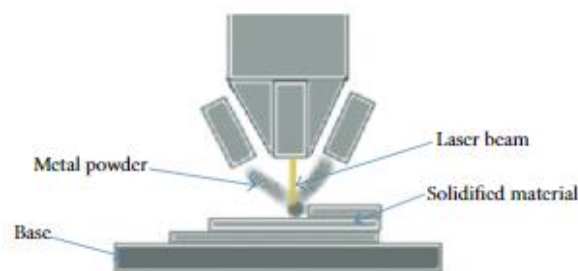


FIGURE 9: Laser engineered net shaping.

Figura 2.4 - Representação esquemática do processo de *Laser Sintering*. Adaptado de [45].

Funcionamento:

No DED as partículas são derretidas à medida que são depositadas através de um raio de alta potência cuidadosamente guiado. Assim, estas partículas de pó assim que atingem o foco do laser fundem-se instantaneamente e ligam-se à peça que se encontra na plataforma de impressão. Deste modo, à medida que o processo avança dá-se a construção de um objeto camada a camada. Salienta-se que este processo permite trabalhar com metais duros como o titânio e o aço inoxidável, pelo que suscitou o

interesse das indústrias aeroespacial e automóvel pela MA. Como mais do que uma cabeça de extrusão pode soprar pó ao mesmo tempo, podem ser usados diversos materiais de base em simultâneo [3], [37], [45].

Na Tabela 2.1 representam-se as principais vantagens e desvantagens deste processo.

Tabela 2.1 - Principais vantagens e desvantagens do processo *Directed Energy Deposition*.

Vantagens	Desvantagens
Capaz de construir formas quase densas	Elevado custo
Permite obter peças com propriedades mecânicas quase tão boas ou melhores do que por processos tradicionais	As partículas finas de material podem proporcionar um ambiente de trabalho perigoso pelo que surge a necessidade de trabalhar em ambientes controlados
Pode utilizar-se para revestir peças maquinadas por processos tradicionais	Necessidade de colocar suportes em estruturas mais complexas

2.2.1.2 Powder Bed Fusion

Esta tecnologia, representada na Figura 2.5, engloba 3 processos distintos o SLS (*Selective Laser Sintering*), o SLM (*Selective Laser Melting*) e o EBM (*Electron Beam Melting*). Todos estes processos de MA utilizam energia térmica para fundir regiões previamente selecionadas da camada de pó. A principal diferença entre eles reside no modo como a energia é fornecida. Enquanto no SLS e no SLM a energia térmica é fornecida através de lasers de alta potência, no EBM é fornecida através de um feixe de eletrões [4], [18], [45].

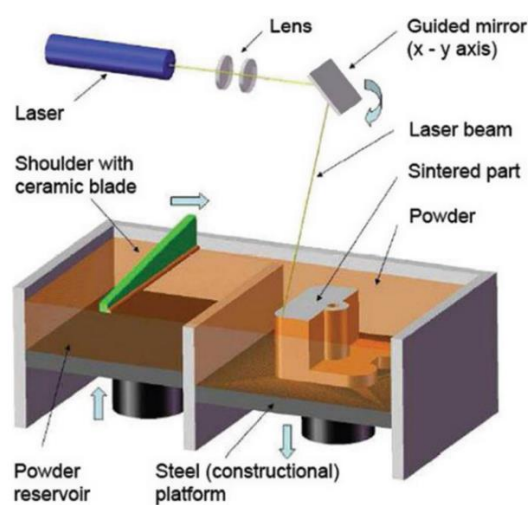


Figura 2.5 - Representação esquemática do processo *Powder Bed Fusion*. Adaptado de [38].

Funcionamento:

O *Powder Bed Fusion* é um processo que se inicia com a deposição de uma camada de material, em pó, sob uma plataforma. Em seguida, recorrendo a um ou mais lasers os grãos são fundidos seletivamente, obtendo-se assim a primeira camada. Posteriormente, a plataforma desce, voltando novamente a ser coberta de material em pó. O processo repete-se camada-a-camada, dentro de uma câmara fechada, até obter a geometria final pretendida. Salienta-se que o excedente de material, que não foi fundido, pode ser reutilizado [1], [3], [4], [17], [18], [37].

Na Tabela 2.2 representam-se as suas principais vantagens e desvantagens.

Tabela 2.2 - Principais vantagens e desvantagens do processo de Powder Bed Fusion.

Vantagens	Desvantagens
Como o material é impresso a partir de pó é menos provável de colapsar, visto que o restante pó, não fundido, atua como suporte da peça	Não é recomendado utilizar este tipo de impressoras em casa ou num escritório, dada a necessidade de a impressora estar colocada numa câmara selada, cheia de nitrogénio, para evitar a oxidação do material utilizado
Maior versatilidade devido à vasta gama de matérias-primas que podem ser transformadas em pó	Este processo trabalha a temperaturas elevadas, pelo que os tempos de aquecimento e arrefecimento são bastante elevados
Possível reutilização do pó	A superfície das peças produzidas é normalmente porosa
Permite produzir peças de geometrias complexas	Necessidade de grande investimento inicial

2.2.1.3 Binder Jetting – 3D Printing

Este processo de MA, que se representa na Figura 2.6, funciona de modo semelhante ao *Powder Bed Fusion*, iniciando-se com a deposição de uma camada em pó na plataforma de construção. No entanto, em vez de recorrer a um laser para fundir o material deposita uma pasta em cada camada, que une o pó, o que permite formar a peça, camada a camada [1], [17], [18], [36], [38].

Esta tecnologia permite trabalhar com uma vasta gama de materiais, tais como polímeros, cerâmicos, areias de fundição e metais, nomeadamente, aço inoxidável e bronze [1], [3], [37]. Salienta-se que é possível reutilizar a totalidade do material não usado [1], [18].

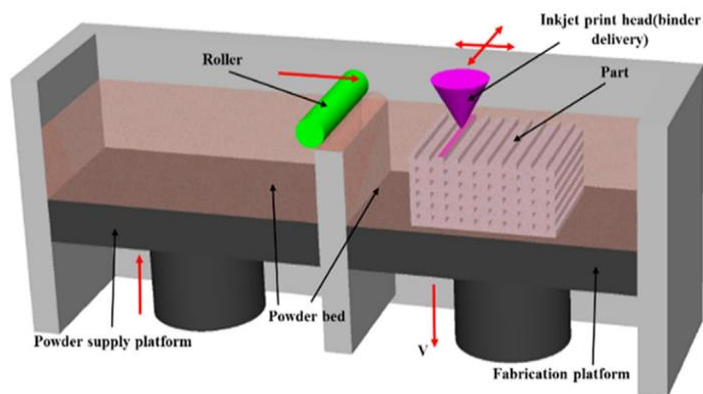


Figura 2.6 - Representação do processo de *3D Printing*. Adaptado de [36].

Funcionamento:

O seu funcionamento é bastante idêntico ao do *Powder Bed Fusion*, diferindo no elemento de ligação utilizado. Enquanto este processo recorre a um elemento de ligação líquido, o *Powder Bed Fusion* utiliza uma fonte de energia [1], [17].

Na Tabela 2.3 apresentam-se as suas principais vantagens e desvantagens.

Tabela 2.3 - Principais vantagens e desvantagens do *3D Printing*.

Vantagens	Desvantagens
<p>Ampla gama de materiais disponíveis</p> <p>Permite imprimir a cores</p> <p>Como o processo não envolve aquecimento as peças não apresentam tensões residuais</p> <p>Capacidade de produzir peças complexas e de dimensões consideráveis a custo relativamente baixo</p> <p>Tal como no Powder Bed Fusion, não é necessário colocar suportes</p>	<p>Peças obtidas são relativamente frágeis</p> <p>Peças com superfícies rugosas</p> <p>Peças podem tornar-se dispendiosas não só pelo tempo como pelo custo, dada a necessidade de pós processamento</p>

2.2.1.4 Sheet Lamination

A *Laminated Object Manufacturing* (LOM), representada na Figura 2.7, é um processo de MA que se caracteriza pela junção de folhas finas de material para formar um objeto [1], [17]. Este processo distingue-se dos restantes por combinar técnicas de manufatura aditiva e subtrativa [1], [45].

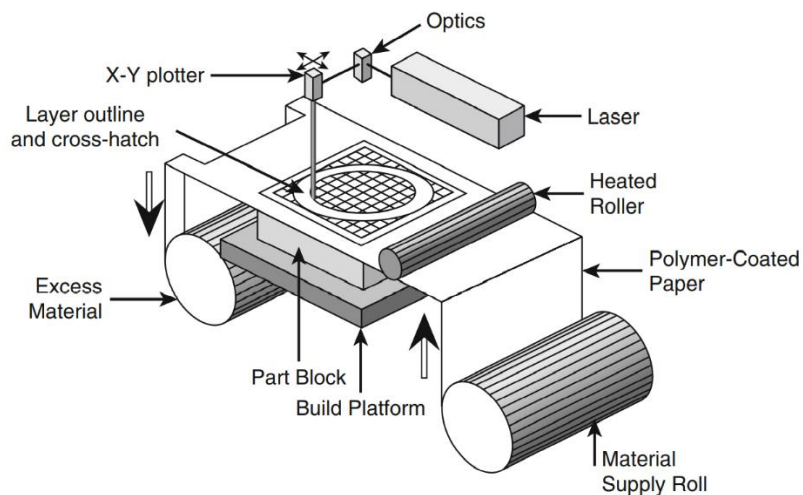


Figura 2.7 - Representação esquemática do funcionamento da *Laminated Object Manufacturing*. Adaptado de [3].

Funcionamento:

Neste processo o material chega na forma de uma folha que corresponde a uma camada da secção transversal da peça. As camadas são unidas através da aplicação de calor e pressão por forma a obter um modelo 3D sólido. Em seguida, um laser de dióxido de carbono ou uma lamina corta as folhas de material, que podem ser de papel, compósitos, plástico ou metal, por forma a obter a geometria final pretendida. Dado o funcionamento do processo tanto se pode dar o corte e a junção das camadas como a junção e só depois o corte. Relativamente à junção das camadas pode dar-se por colagem, colagem térmica, fixação ou soldadura ultrassónica [1], [3], [37], [38], [45].

Na Tabela 2.4 apresentam-se as suas principais vantagens e desvantagens.

Tabela 2.4 - Principais vantagens e desvantagens do processo de *Laminated Object Manufacturing*.

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de matérias-primas, máquina e processo	Dificuldade de produzir cavidades internas complexas
Vasta gamas de materiais disponíveis	Desperdício de material
Processo relativamente rápido	Baixa definição superficial
Permite produzir peças de dimensões consideráveis	
Não necessita de suportes	

2.2.1.5 Material Extrusion

O FDM (*Fused Deposition Modelling*), também designado FFF (*Fused Filament Fabrication*), que se representa esquematicamente na Figura 2.8, caracteriza-se pela extrusão de material termoplástico no estado sólido, sob a forma de filamento, através de uma cabeça de extrusão que normalmente se desloca no plano x-y. Salienta-se que também existem impressoras FDM em que a cabeça de extrusão se move no plano x-z e a plataforma de impressão se desloca na direção do eixo y. De modo semelhante ao que acontece num *Computer Numerical Control* (CNC) de 3 eixos, o movimento dá-se numa trajetória precisa, sendo a principal diferença a adição de material em vez da remoção [1], [3], [7], [18].

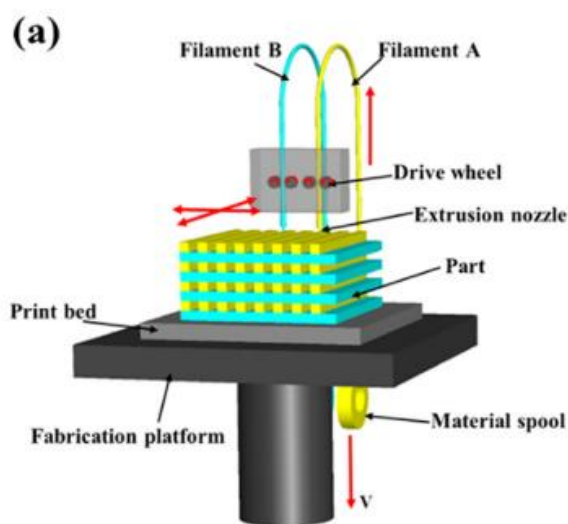


Figura 2.8 - Representação do processo de *Fused Deposition Modelling*. Adaptado de [36].

Relativamente aos materiais mais utilizados salientam-se o PC (*polycarbonate*), o PLA (*polylactic acid*) e o ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*) [7], [12], [18], [36].

Funcionamento:

Neste processo o filamento é colocado no interior da impressora e alimenta uma cabeça de extrusão. Quando esta atinge a temperatura desejada, derrete o material e desloca-se, depositando-o numa localização previamente definida e de modo controlado sob a plataforma de impressão, que pode ou não estar aquecida, formando uma camada. Ao arrefecer, o material solidifica. Após completar uma camada, a plataforma desce e o processo repete-se, sendo o material depositado camada a camada. O processo termina quando se obtém a geometria final pretendida [3], [18], [37].

A Tabela 2.5 apresenta as principais vantagens e desvantagens deste processo.

Tabela 2.5 - Vantagens e desvantagens do processo *Fused Deposition Modelling*.

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de matéria-prima e máquinas	Necessidade de colocar suportes, o que origina desperdício de material
Ampla gama de materiais disponíveis	Anisotropia das peças produzidas
Capacidade de trabalhar com materiais diferentes em simultâneo utilizando múltiplas cabeças de extrusão	Podem ocorrer distorções devido às tensões internas causadas pela impressão camada a camada
Velocidade elevada	Baixo acabamento superficial da peça produzida
Impressoras de dimensões reduzidas	

2.2.1.6 Polyjet

Este processo de MA, que se representa na Figura 2.9, recorre a um jato de resina fotossensível para produzir modelos físicos [1], [45].

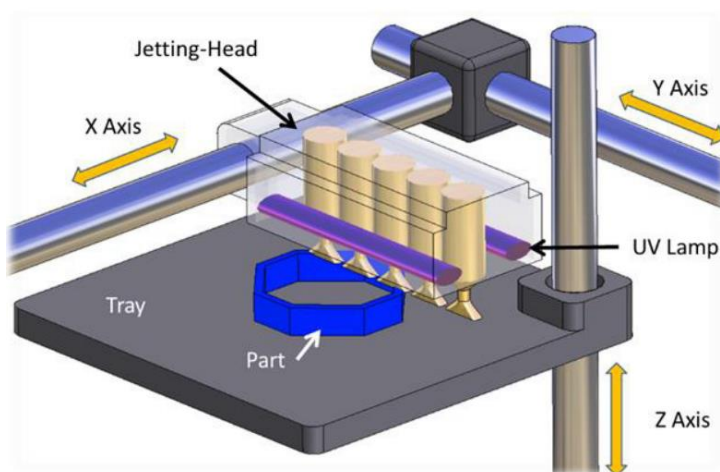


Figura 2.9 - Representação esquemática de uma impressora *Polyjet*. Adaptado de [46].

Funcionamento:

A cabeça de impressão move-se nos planos x e y, depositando uma camada de foto-polímero, na forma de gotículas, sob uma plataforma. Após a deposição de cada camada, o material é curado mediante o efeito de radiação ultravioleta. Em seguida, a plataforma desloca-se segundo a direção do

eixo z, descendo e posteriormente dá-se a deposição de uma nova camada. O processo repete-se sucessivamente até à obtenção da geometria final pretendida [1], [3], [36]–[38], [46].

As principais vantagens e desvantagens deste processo apresentam-se na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Vantagens e desvantagens do Polyjet.

Vantagens	Desvantagens
A espessura da camada é de 16 μm , pelo que as peças produzidas apresentam elevada resolução	Como só pode utilizar foto polímeros, que são relativamente frágeis, a sua gama de aplicação fica limitada
É possível utilizar diferentes materiais na produção de uma única peça recorrendo a diversas cabeças de impressão	Elevado custo dos foto-polímeros utilizados
É possível produzir peças com múltiplas cores	

2.3 Vat Polymerization

Este tipo de tecnologia é utilizado para produzir peças a partir de um foto-polímero no estado líquido que é curado seletivamente através de radiação UV [1], [4], [10], [17], [28], [32], [35]. A reação química que permite a mudança da resina do estado líquido ao estado sólido mediante o recurso a radiação UV de um comprimento de onda específico, que constitui o catalisador da reação, designa-se por foto polimerização [3], [27].

Quanto ao tipo de fonte luminosa esta tecnologia pode dividir-se em:

- Laser: Existem diversas tecnologias com base neste princípio desde a mais conhecida o SLA (*stereolithography*) até à 2 fotões. Este tipo de abordagem utiliza um laser UV para polimerizar a resina, traçando a secção transversal do objeto na superfície da resina [7], [10], [18], [27];
- Projeção de uma imagem: Existe ainda um conjunto de processos como o DLP (*Digital Light Processing* ou *Direct Light Processing*), o LCD (*Liquid Crystal Display*) ou DPP (*Daylight Polymer Printing*) e o CLIP (*Continuous Liquid Interface Production*) que utiliza uma máscara ou projeção de imagem para curar a resina. Neste tipo de processo o polímero é exposto a um projetor ou dispositivo digital de micro espelho (DMD) para projetar uma imagem de luz recorrendo a um ecrã LED ou a uma lâmpada UV que

polimeriza toda a camada de resina ao mesmo tempo. Dentro deste tipo de tecnologia existe ainda uma subdivisão em contínuo ou estático [4], [10], [27].

- O tipo de DLP mais conhecido é o CLIP (*Continuous Liquid Interface*) ou CDLP (*Continuous Direct Light Processing*). Este baseia-se no movimento contínuo da plataforma de impressão na direção z e usa um DMD para polimerizar a resina através de uma janela permeável ao oxigénio, feita de fluoro polímero, que cria uma zona onde a polimerização é inibida entre a janela e a parte polimerizada [7], [27], [32], [43].
- O MSLA estático projeta uma imagem 2D, em seguida dá-se a subida da plataforma e, posteriormente, projeta uma segunda imagem e assim sucessivamente até à conclusão da peça. Neste caso, a zona em que a polimerização ocorre é uma consequência da projeção [14].

Relativamente à variante em que se utilizam 2 fotões, representada na Figura 2.10, a polimerização dá-se na interseção dos 2 raios lasers e permite as maiores resoluções, o que a torna promissora nos campos da micro/nanoóptica, microfluidico e dos implantes biomédicos. No entanto caracteriza-se por velocidades bastante baixas pelo que ainda está sob investigação [1], [14], [18], [32]. Têm surgido outras variantes, por exemplo, uma em que se utilizam 8 fotões.

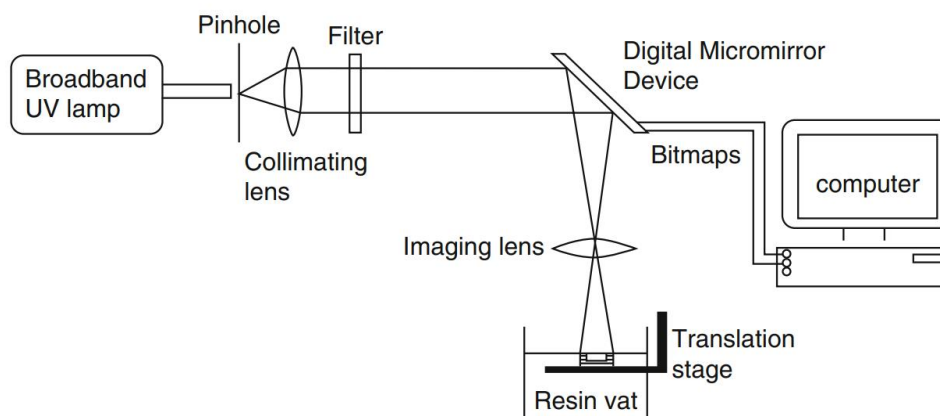


Figura 2.10 - Representação esquemática do processo de *Digital Light Processing*. Adaptado de [3].

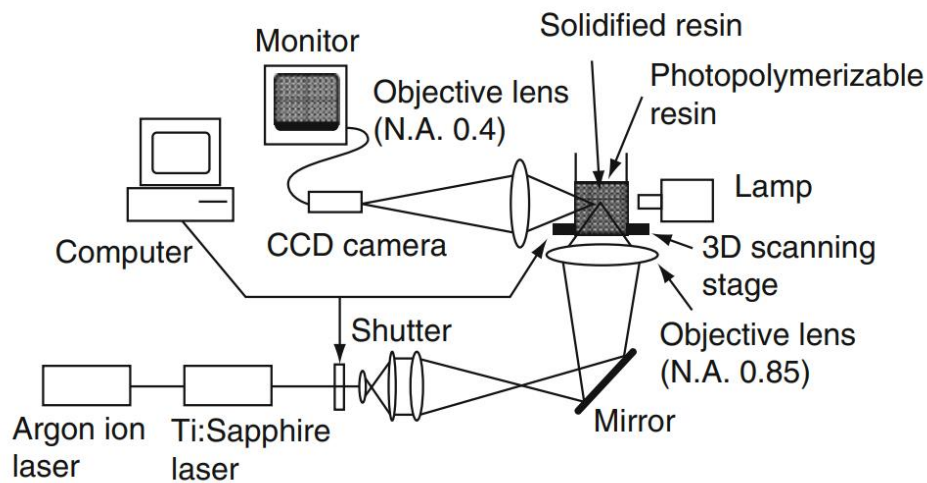


Figura 2.11 – Representação esquemática do processo de vat polymerization com 2 fotões. Adaptado de [3].

Funcionamento:

- SLA

O processo de SLA usa espelhos, designados galvanómetros ou galvos, um no eixo x e outro no eixo y, para rapidamente orientar um feixe de luz através de um reservatório, que constitui a área de impressão. Neste reservatório está submersa a plataforma de impressão na resina no estado líquido, que vai curando e solidificando mediante a incidência do feixe de laser, formando as camadas. Após a formação de uma camada a plataforma sobe ou desce, seguindo-se a formação da camada seguinte. Este processo forma a geometria pretendida camada a camada, através de uma série de pontos e linhas cujas coordenadas são dadas aos galvanómetros. A maioria das impressoras de SLA usa um laser no estado sólido para curar as peças [1], [7], [11], [18], [28], [30], [32], [35], [37].

Após a impressão do objeto, este é retirado do banho de resina fotossensível, em seguida remove-se o excesso de resina, emergindo-o em álcool isopropílico (IPA). Posteriormente é colocado no interior de uma câmara de radiação UV para assegurar a sua cura completa. Por fim dá-se a remoção dos suportes [1], [4], [7], [31], [47].

Posto isto, a resolução da peça no SLA é determinada pelo diâmetro do feixe de laser e pela precisão do galvanómetro que o orienta na plataforma de impressão [32].

Existem 2 tipos principais de orientações numa máquina SLA: a orientação de cima para baixo ou a orientação de baixo para cima, que se caracterizam por [1], [18], [20], [32]:

- *Top-down*: A fonte de laser está colocada acima do reservatório e a peça é construída virada para cima. A plataforma de construção começa no topo do reservatório de resina com uma fina camada de resina revestindo-a. Em seguida, a fonte de luz cura esta fina camada de resina. Quando esta camada está curada, a plataforma de construção desce a espessura de uma camada,

a resina recobre a resina previamente curada e o processo repete-se. À medida que o processo avança, a plataforma de construção vai descendo dentro do reservatório até que a peça esteja completa. Quando a peça está completa, a plataforma sobe até sair do reservatório de resina e a peça é removida. Neste tipo de impressoras é essencial que uma camada uniforme de resina cubra a plataforma, isto é conseguido controlando a viscosidade da resina, pelo que as impressoras têm materiais recomendados [18], [32].

- *Bottom-up*: Nestas impressoras a fonte de luz é colocada por baixo do reservatório de resina que tem o fundo transparente e a peça é construída com o seu topo virado para baixo. Inicialmente a plataforma de construção é posicionada de modo que haja apenas uma espessura de camada entre a base do reservatório e a plataforma. Em seguida, a fonte de luz cura a fina camada de resina, solidificando-a. Evidencia-se que através de um revestimento especial de silicone se impede que a resina fique colada à base do reservatório, mas garante-se a passagem do laser. Salienta-se a importância da substituição gradual deste revestimento para garantir que a impressora funcione normalmente. Com a primeira camada curada e colada à plataforma de construção, a impressora executa um passo de separação, separando a primeira camada curada da base do reservatório e subindo uma espessura de camada. Consoante a impressora esta etapa pode envolver *peeling*, deslizar, rodar ou agitar o reservatório. No entanto, normalmente esta fase designa-se *peeling*. Para uma impressão bem-sucedida, é essencial reduzir as forças nas camadas recém impressas na etapa de *peeling*, este problema aborda-se no subcapítulo 2.3.3.[18].

Em ambos os processos a primeira camada é sempre a mais crítica, dada a necessidade desta camada aderir totalmente à plataforma.

A orientação *bottom-up*, representada na Figura 2.12 é a mais utilizada em impressoras de escritórios, como as da marca FormLabs e Anycubic, associadas a facilidade de fabrico e operação, no entanto estas impressoras têm um tamanho limitado. Enquanto as impressoras *top-down* são utilizadas em ambiente industrial, permitindo a impressão de peças de dimensões consideráveis sem grande perda de precisão, o que implica um custo mais elevado [1], [20].

Na Figura 2.12 representa-se esquematicamente uma impressora *bottom-up* que será o tipo de impressora utilizado.



Figura 2.12 – Representação do processo de *stereolithography* bottom-up. Adaptado de [31].

Na Tabela 2.7 estabelecem-se as principais características de cada um destes tipos de impressoras.

Tabela 2.7 - Características principais das impressoras em função da orientação de impressão. Adaptado de [1], [18], [20].

	<i>Bottom-up</i>	<i>Top-down</i>
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> + Menor custo + Facilmente disponível + Requer pouca resina porque a peça é retirada da cuba ao longo do processo, deste modo a impressora pode ser menor + Fácil de controlar a espessura de cada camada 	<ul style="list-style-type: none"> + Elevado tamanho de construção + Maior rapidez de construção, uma vez que não é necessário separar a peça da plataforma à medida que cada camada é impressa + Menores forças na peça + Menor material utilizado nos suportes, já que as peças não precisam de ser impressas inclinadas + As impressoras são geralmente consideradas mais confiáveis
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Pequeno tamanho de impressão - Menor gama de materiais - Requer maiores operações de pós-processamento devido ao maior uso de suportes 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo elevado - Requer um operador especializado - Mudar de material é difícil e envolve esvaziar o tanque completamente - Máquinas muito maiores o que implica mais resina necessária

	<ul style="list-style-type: none"> - O reservatório deve ser trocado regularmente para manter as condições ótimas de impressão - Aumento da tendência para falhas de impressão devido à etapa de <i>peeling</i> e às forças da gravidade - As peças devem ser impressas inclinadas o que aumenta o seu tempo e custo 	- A espessura da resina entre a superfície e o topo da peça deve ser monitorizada constantemente
Altura de camada típica	25 a 100 μm	25 a 150 μm
Precisão dimensional	$\pm 0.5\%$ (limite inferior: $\pm 0.010 - 0.250 mm$)	$\pm 0.15\%$ (limite inferior: $\pm 0.010 - 0.300 mm$)

- DLP

O DLP é um processo do tipo bottom-up e assenta nos mesmos princípios do SLA. No entanto, em vez de usar um ponto de laser para curar a camada, usa um projetor ou dispositivo digital de micro espelho (DMD) que projeta a imagem da área de secção transversal no reservatório o que permite curar cada uma das camadas toda de uma vez, tornando-o mais rápido do que o SLA. A plataforma de impressão está então imersa na resina e sobe à medida que a luz projetada cura uma secção transversal da peça. Para tal a luz tem de passar pelo topo do reservatório e em seguida pelo próprio material. Dada a propriedade foto curável do material torna-se assim essencial a existência de uma zona de inibição de foto polimerização. Tal como no SLA é necessária a cura para garantir que as propriedades ótimas do material são atingidas. Destaca-se que como o projetor é um ecrã digital, a imagem de cada camada é obtida por pixéis quadrados, originando uma camada tridimensional formada por pequenos cubos designados voxels. Deste modo, as resoluções obtidas dependem do tamanho mínimo dos pixéis da imagem projetada [1], [3], [7], [11], [14], [32], [43], [47], [48]. Salienta-se que neste tipo de impressoras é possível mudar a lente do projetor para produzir peças de dimensões mais reduzidas, com detalhes mais finos e em menos tempo [18].

Tal como no DLP, no CLIP e no DPP a resolução está dependente do tamanho dos pixéis do projetor ou ecrã LCD [27].

A resolução ao longo do eixo z é determinada pela espessura da camada que pode ser modificada em função da impressora e do material escolhidos [27].

Salienta-se que o DLP, nomeadamente, a sua abordagem LCD, na variante MSLA, se tem tornado promissor no fabrico de cerâmicos de engenharia de elevado desempenho, membranas cerâmicas de alto fluxo e compósitos [42], [49].

Existem outras tecnologias, nomeadamente, a *Projection Micro Stereolithography* (P μ SLA) que apesar de recentes se revelam bastante promissoras. Este processo caracteriza-se por permitir o fabrico de peças poliméricas com elevada precisão dimensional devido à sua capacidade de capturar detalhes mais finos das peças comparativamente aos outros processos de microesterolitografia. A P μ SLA apresenta uma resolução de até 2 μm e uma altura de camada de 5 – 40 μm [14], [32], [50], [51].

2.3.1 Vantagens e Desvantagens

Os principais benefícios dos processos da família VP são a produção de peças com elevado nível de detalhe, acabamento superficial liso, detalhes com elevada precisão, ou seja, resolução elevada, quase isotrópicas e estanques, a rapidez do processo e o baixo custo [7], [10], [11], [18], [20], [22], [24], [32], [37], [39], [42], [50], [52].

No que toca às limitações destes processos, destacam-se a baixa resistência e rigidez, o que as torna pouco adequadas para protótipos funcionais, a necessidade de colocar suportes, a toxicidade das resinas utilizadas, a necessidade de cura para garantir a integridade estrutural das peças [18], [20], [22], [24], [37], [52]. Todos estes problemas e os modos de os contornar são abordados nos subcapítulos 2.3.2 e 2.3.3.

2.3.2 Parâmetros Comuns da Vat Polymerization

Relativamente aos parâmetros que influenciam as peças produzidas por VP podem dividir-se em 4 classes principais:

- Parâmetros de impressão
- Parâmetros dos suportes
- Procedimento de *slicing*
- Procedimento de pós-processamento

1. Parâmetros de impressão

Os principais parâmetros de impressão em tecnologias de VP, dos quais alguns se representam na Figura 2.14, são [53]–[55]:

Espessura de camada é a espessura de camada especificada na qual o modelo é fatiado no eixo z, ou seja, é a profundidade de uma camada ou a região que solidifica na mesma elevação.

Orientação é o modo como o modelo está colocado na plataforma de impressão no que diz respeito aos ângulos e rotações utilizados.

A adaptação destes parâmetros vai influir a foto polimerização da resina selecionada, pretendendo-se uma polimerização controlada [27].

2. Parâmetros dos suportes

Os parâmetros dos suportes incluem a orientação da impressão, posição na plataforma e determinação da quantidade, tamanho e localização dos suportes estruturais. A definição destes fatores desempenha um papel fundamental dada a importância dos suportes abordada no subcapítulo 2.3.3

3. Métodos de *slicing*

Durante a etapa comumente designada por *slicing* definem-se instruções específicas de como orientar a peça, incluindo a posição na plataforma de impressão, orientação de impressão e geração de estruturas de suporte. Todos estes fatores condicionam os objetos impressos e constituem por isso princípios relevantes.

4. Procedimentos de pós-processamento

Ainda que em alguns casos as peças produzidas por VP se considerem prontas quando saem da plataforma de impressão, quando se pretende melhor acabamento superficial ou propriedades mecânicas singulares é necessário um procedimento de acabamento que torna as peças adequadas para uma ampla gama de aplicações. De um modo geral as etapas de pós-processamento podem então dividir-se em 4 etapas principais [13], [56]:

Lavagem

Antes de pintar, alisar ou polir as peças impressas, estas devem ser lavadas para remover a resina não curada da superfície. Para tal a FormLabs recomenda lavar as peças com IPA.

Cura

Quando as peças acabam de ser impressas a reação de polimerização pode não estar concluída, assim a pós-cura, em que as peças são expostas à luz e ao calor, ajuda a solidificar as propriedades ótimas, atingindo o seu valor ideal. O tempo de exposição ao processo de cura depende de cada material. Salienta-se que para resinas comuns a pós cura é opcional, no entanto noutras resinas é necessária. Relativamente à caixa em que o processo de cura se dá, esta pode ser produzida manualmente ou adquirida às empresas de impressoras 3D como no caso da *Form Cure* ou da *Wash and Cure Machine* disponibilizada pela Anycubic.

Lixar

Lixar as peças é sempre o melhor método para suavizar arestas, remover manchas ou retirar as marcas de suportes remanescentes. Este procedimento inicia-se com uma lixa mais grossa e, em seguida, podem utilizar-se lixas mais finas até obter o acabamento pretendido. Quando o processo estiver concluído, um pano de microfibras é suficiente para remover os vestígios de pó.

Pintar

- Pode optar-se por imprimir com resina tingida em que se mistura a resina clara com tinta álcool para criar a cor personalizada. Seguidamente, coloca-se a resina na impressora e a peça é impressa normalmente.
- Tingir após imprimir.
- Pintar com acrílico.
- Pintar com spray. Neste caso, os sprays só podem ser aplicados após a peça ter sido meticulosamente lixada.
- *Electroplating*. Um dos processos que pode abrir novos caminhos é galvanizar as peças para alterar e melhorar a sua usabilidade. Ao optar por esta técnica um processo eletroquímico deposita iões metálicos na superfície da peça, fortalecendo significativamente as peças subjacentes e melhorando a resistência do material ao desgaste, exposição de UV e corrosão [56].

Toda esta vastidão de parâmetros pode provocar alterações nas peças produzidas, não só ao nível da sua rugosidade superficial, como da sua precisão dimensional e propriedades mecânicas [57]. Assim, há que determinar a influência que um reduzido número tem em determinadas características das peças impressas.

2.3.2.1 Parâmetros específicos do SLA

No caso do processo de SLA, a maioria dos parâmetros de impressão são fixados pelo software da impressora e não podem ser mudados. Assim, normalmente, os únicos inputs são o material, a altura da camada e a orientação da peça, sendo que esta última determina a orientação dos suportes [18], [20]. Salienta-se que a maioria das impressoras usa opções de auto ajuste em função do tipo de material utilizado [18].

2.3.2.2 Parâmetros específicos do DLP

Relativamente ao DLP existe um número bastante mais significativo de parâmetros que podem ser configurados, tais como, altura e velocidade de elevação, tempo de exposição, número de camadas e *anti-aliasing*. No entanto, as opções dependem essencialmente do software utilizado.

Destacam-se como parâmetros específicos do DLP:

Tempo de exposição determina a duração de exposição à luz de uma única camada [27], [54], [55].

Tempo de exposição de base é o tempo de exposição das camadas de base, ou seja, das primeiras camadas impressas. Estas camadas são essenciais uma vez que suportam toda a impressão, deste modo a sua correta adesão é fundamental [54].

Bottom layer count é o número de camadas de base, isto é, as que serão expostas ao tempo de exposição de base [54].

Altura de elevação é a altura atingida pela plataforma de impressão após a polimerização de cada camada [27].

Altura de elevação em z é a altura entre o modelo e a plataforma de impressão [54].

Velocidade de elevação é a velocidade a que a plataforma sobe após a polimerização de cada camada [54].

Velocidade de descida é a velocidade a que a plataforma se move em direção ao reservatório [27].

Atraso é o tempo necessário entre a polimerização das camadas [27].

Anti-aliasing é um parâmetro que permite combater o problema do efeito de escada, alisando as arestas e os cantos de uma peça através da utilização de uma escala de cinza ao nível dos pixéis em vez de apenas preto e branco. Na Figura 2.13 representa-se um exemplo da sua influência na impressão de uma aresta [54], [58].

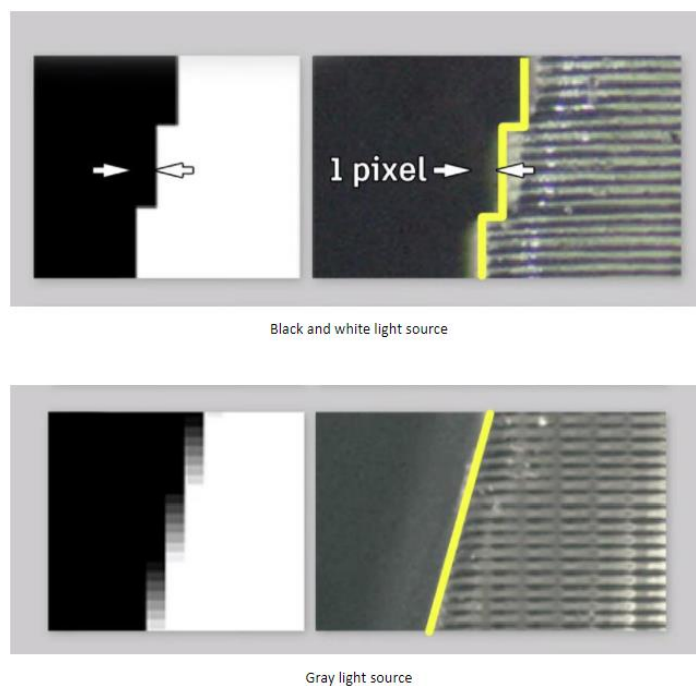


Figura 2.13 - Representação do efeito da utilização do parâmetro anti-aliasing numa aresta. Adaptado de [58].

Na Figura 2.14 apresentam-se os principais parâmetros de impressão de peças produzidas por DLP [53]–[55]:

Hatch spacing é a distância entre duas camadas adjacentes. Se esta distância for muito pequena as camadas sobrepõem-se, originando uma camada completamente sólida. Se for muito grande permite que o polímero líquido fique preso na peça, sendo solidificado na operação de pós-cura [53].

Fill spacing é a resina não curada localizada no espaço entre camadas adjacentes.

(Hatch) Fill cure depth é a profundidade das camadas ou a profundidade de cura da camada se o cordão estiver na superfície superior ou inferior. Este fator permite reter o líquido remanescente dentro da peça para cura posterior [53].

Hatch overcure é a profundidade de contacto de uma camada curada com a camada curada adjacente inferior, mantendo as camadas juntas de modo a formar uma peça completa [53].

Border overcure é a sobre cura localizada nos limites laterais da peça.

Hatch style é o modo de solidificar a secção transversal de uma camada do modelo a ser construído. Num estudo relacionado conclui-se que o tipo de impressão afeta a sequência e a quantidade de solidificação do polímero da peça e, portanto, as suas propriedades físicas e tensões internas. Vários estilos foram desenvolvidos para os processos de PR: TRI-HATCH, WEAVE, STAR-WEAVE, ACES e QuickCast [53].

Preenchimento permite remover o material interior de um modelo, tornando-o uma casca oca.

Espessura da parede é a espessura da casca de uma peça, em milímetros, caso seja definida como oca.

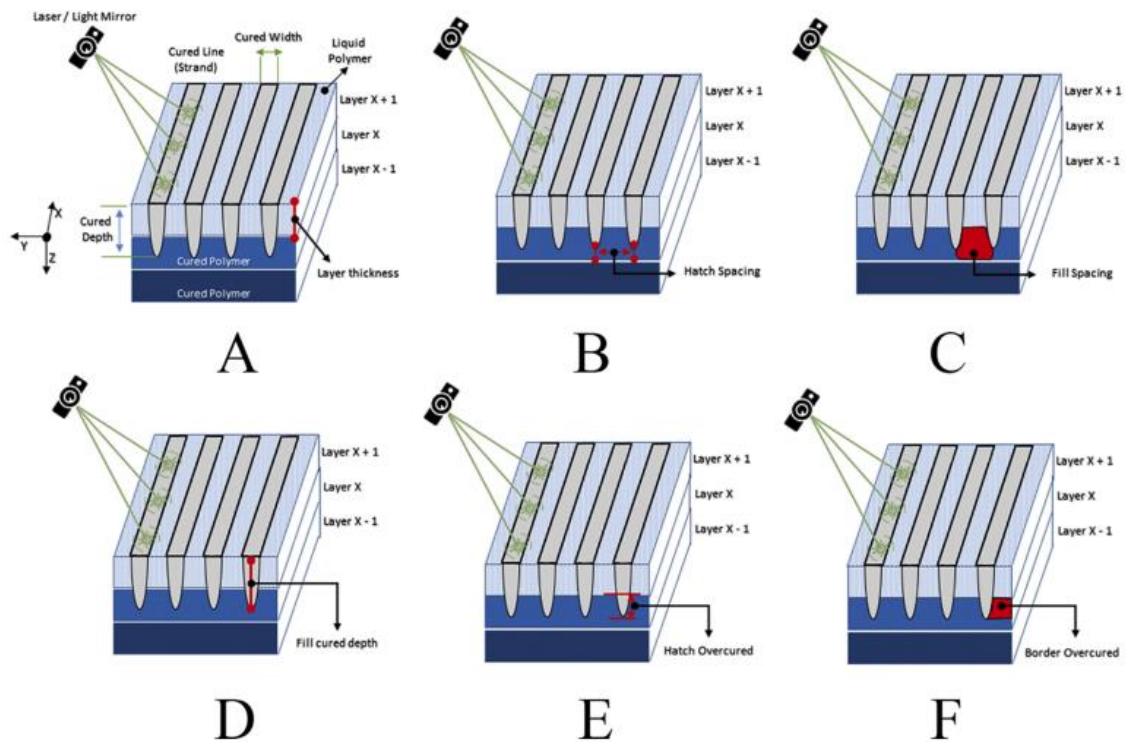


Figura 2.14 - Parâmetros de impressão em tecnologias de vat polymerization. Adaptado de [27].

2.3.3 Principais limitações

As principais limitações que necessitam de uma atenção especial aquando de uma impressão 3D por VP são a distorção, a necessidade de suportes e a adesão da camada, que se descrevem em seguida [20].

Distorção

Um dos maiores problemas relacionados com a precisão das peças produzidas por VP é a distorção [18]. Este ocorre devido ao encolhimento que a resina sofre após a exposição à radiação durante o processo de cura. Quando a resina encolhe consideravelmente, geram-se grandes tensões internas entre a nova camada e o material previamente solidificado o que resulta no fenómeno de distorção [18].

Uma das formas de combater este fenómeno é mediante a colocação de suportes, uma vez que o suporte ajuda a ancorar as secções de risco à plataforma de construção e mitigar este problema. Outros fatores de relevância são a orientação das peças e a limitação de grandes camadas planas. Há ainda a considerar que a cura excessiva, por exemplo, colocar a peça diretamente à luz solar durante o processo de cura, também pode causar distorção. Podem também ocorrer discrepâncias dimensionais resultantes

da fase de separação usada por impressoras de baixo para cima. As forças durante esta etapa podem levar a curvar, o que se pode acumular à medida que cada camada é construída [18].

Relativamente ao fenómeno de *warping*, este observa-se em apenas algumas resinas, especificamente, nas mais flexíveis e praticamente só ocorre na fase de pós-processamento, pelo que em algumas aplicações de precisão elevada este fator deve ser tido em conta [18], [22].

Suportes

A colocação de suportes é sempre necessária quer no SLA quer no DLP, sendo impressos no mesmo material da peça e removidos manualmente. Recomenda-se que as peças sejam impressas de modo que faces visualmente críticas não estejam em contacto com os suportes, por forma a que as suas características, tais como, o acabamento superficial, não sejam influenciadas pela colocação dos suportes [1], [9], [18], [20]. A colocação de suportes relaciona-se com a orientação de impressão. Em consequência, tem-se:

Impressoras de *top-down*: Neste tipo de impressoras, à semelhança do que acontece no FDM, a colocação de suportes é necessária para imprimir saliências e pontes, sendo o ângulo crítico geralmente de 30° [1], [18]. A peça pode ser orientada em qualquer posição, preferindo-se normalmente a horizontal para diminuir a quantidade de suporte e o número total de camadas [20].

Impressoras de *bottom-up*: Neste caso, a necessidade de suportes pode ser mais complexa [18], [20]. Ainda que as saliências e as pontes continuem a ter de ser suportadas, o critério mais crítico é a minimização da área da secção transversal de cada camada. Isto deve-se à força aplicada ao imprimir o contorno que pode levar a que se separe da plataforma de impressão. Como as forças são proporcionais à área de secção transversal de cada camada, as peças são impressas com uma inclinação [1], [18], [20].

Na Figura 2.15 representa-se a orientação de uma peça e os respetivos suportes para impressão *top-down* e *bottom-up*, respetivamente.



Figura 2.15 - Orientação de uma peça para imprimir de cima para baixo e de baixo para cima, respetivamente. Adaptado de [18].

Adesão entre as camadas da peça

As peças impressas por VP têm propriedades mecânicas quase isotrópicas, tal como se pode observar no gráfico da Figura 2.16, que ilustra as propriedades principais em função das diferentes orientações de impressão de peças produzidas por SLA. Isto deve-se à solidificação gradual das camadas quer durante o próprio processo quer durante o pós-processamento [22].

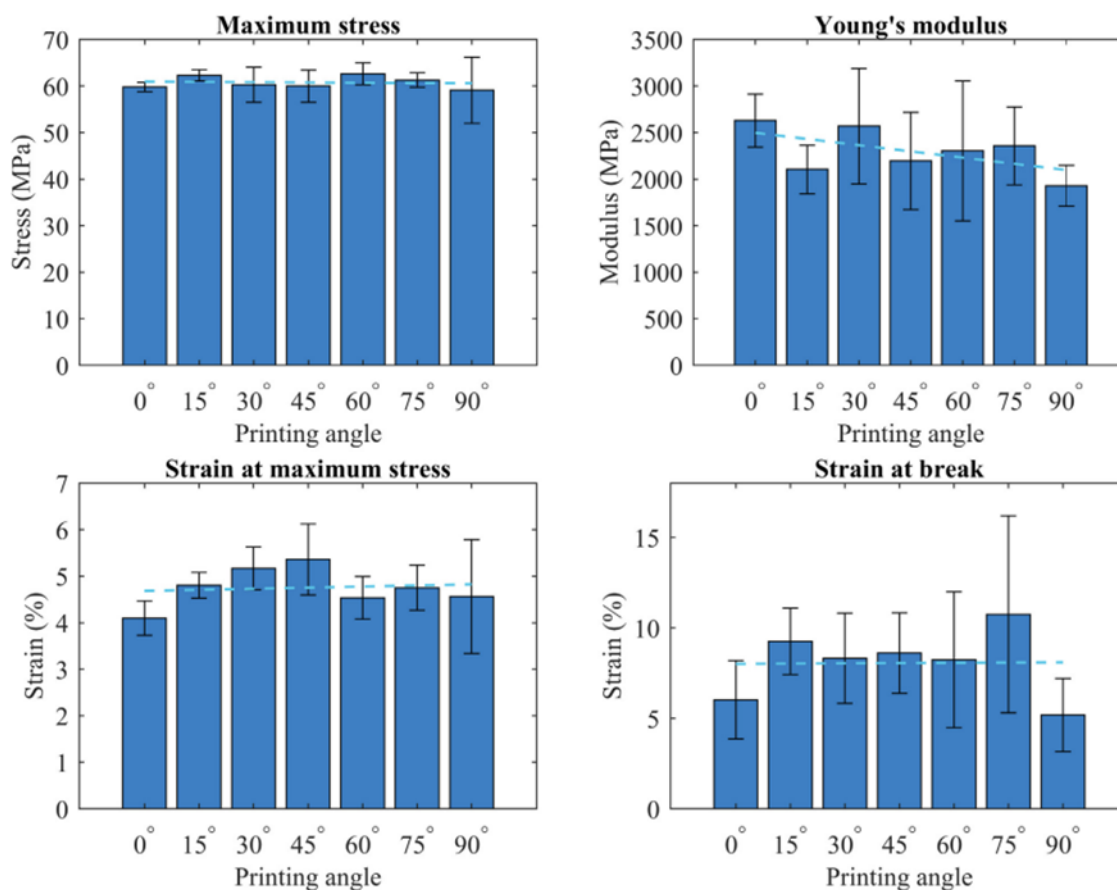


Figura 2.16 - Principais propriedades mecânicas em função da orientação em provetes impressos em SLA. Adaptado de [22].

No caso de se requerer melhores propriedades mecânicas, as peças produzidas por SLA devem ser colocadas numa caixa sujeita a luz UV intensa e às vezes a temperaturas elevadas, o que aumenta imenso a dureza e resistência à temperatura das peças produzidas por SLA e, como tal, a adesão entre as camadas da peça, mas torna-as mais frágeis [20].

2.3.4 Cuidados a ter

Tal como em todos os processos, é necessário ter alguns cuidados ao trabalhar com este tipo de tecnologias. Dadas as propriedades dos materiais que utiliza e o próprio funcionamento dos processos de VP, a resina e os fumos por ela emitidos libertam irritantes e poluentes que podem causar dermatites,

irritar o sistema respiratório e causar danos permanentes no organismo. A nível ambiental, a sua toxicidade também é alarmante uma vez que ao decompor-se originam nanomoléculas e entram no ecossistema aquático, acabando por matar peixes e outros animais aquáticos [59].

Posto isto, há que seguir determinadas medidas de modo a combater a sua toxicidade, tais como [59]:

1. **Usar óculos de proteção e luvas de nitrilo sempre que se trabalha com este tipo de processos.** Esta é a forma mais barata e simples de impedir o contacto com químicos irritantes, uma vez que permite criar uma barreira física.
2. **Trabalhar numa área ventilada.** Ao trabalhar sob ou junto a um sistema de ventilação ou perto de uma janela é possível mitigar a toxicidade dos fumos emitidos pelas resinas.
3. **Ler todas as instruções de uso e de segurança.** As embalagens de resinas contêm todos os detalhes e recomendações necessárias como, por exemplo, o modo mais eficaz de as manusear e armazenar.
4. **Curar a resina antes de a descartar.** Ao colocá-la sob radiação UV ou solar até que solidifique é possível contornar os problemas relacionados com a sua toxicidade.
5. **Limpar a área de trabalho.** Isto permite limitar a toxicidade tanto para o operador como para o ambiente. Primeiramente, deve utilizar-se água e sabão e, em seguida, IPA.
6. **Usar a resina com o melhor aproveitamento possível.** Deste modo, combate-se não só o desperdício, como os problemas que dele advêm relacionados com a toxicidade da resina.
7. **Tratar a resina como tão perigosa quanto esta é.** Os químicos que a constituem têm propriedades tóxicas pelo que ao contactar com outros objetos estes passam a estar contaminados, devendo ser tratados também como resíduos tóxicos.
8. **Usar resinas mais conscientes ambientalmente.** Diversas empresas criaram resinas para imprimir em VP à base de plantas que são menos tóxicas. Deste modo, deve dar-se preferência à sua utilização.

2.4 Etapas inerentes à Manufatura Aditiva

Ainda que cada método de impressão 3D produza as peças de modo diferente, todos seguem as seguintes etapas:

1ª Etapa: Produzir um ficheiro 3D (CAD)

O primeiro passo é a produção de um modelo 3D recorrendo a diversos softwares CAD como o SolidWorks, CATIA, entre outros. Outra opção é recorrer a engenharia inversa para gerar o modelo 3D através da digitalização 3D recorrendo a um scanner [3, 13, 15].

2ª Etapa: Conversão para um ficheiro STL

Em seguida, o ficheiro CAD tem de ser convertido num formato *STereoLitography* (STL) para que a impressora o consiga ler. Este formato de ficheiro foi criado em 1987 pela 3D Systems Inc. quando desenvolveram a estereolitografia (SLA), sendo também designado *Standard Triangle Language* ou *Standard Tessellation Language* [7, 9, 13, 15, 18, 45].

Este tipo de ficheiro gera uma malha formada por elementos triangulares para descrever a geometria do objeto, simplificando o complexo modelo CAD efetuado. Cada triângulo é definido pela posição de cada um dos seus três vértices, ou seja, pelas suas coordenadas x, y e z, e pelo vetor normal à superfície do triângulo. O tamanho do ficheiro STL é afetado pela tolerância de triangulação: quanto menor a tolerância de triangulação, mais pequenos são os triângulos utilizados, melhor é a aproximação e maior é o tamanho do ficheiro STL [13, 18, 28, 45, 53].

3ª Etapa: Manipulação do ficheiro STL

Após a geração do ficheiro STL, este é importado para um programa de slicing, que divide a geometria nas camadas que serão utilizadas para produzir a peça. Assim, cada uma das camadas vai corresponder a uma secção transversal da peça final. Salienta-se que este processo vai originar imprecisão, uma vez que contornos contínuos são discretizados em degraus, originando o fenómeno de degrau de escada, que se pode observar na Figura 2.17. Tal como é evidente ao diminuir a espessura da camada utilizada o problema reduz-se, no entanto isto leva ao aumento do número de camadas e, conseqüentemente, do tempo de processamento e de impressão. Uma outra alternativa para contornar este fenómeno é seguir uma divisão em camadas adaptada, em que se varia a espessura da camada em função da geometria do modelo CAD. Surge assim a necessidade de relacionar a influência dos parâmetros de impressão com a resolução das peças obtidas [9, 13, 26, 28, 48, 53].

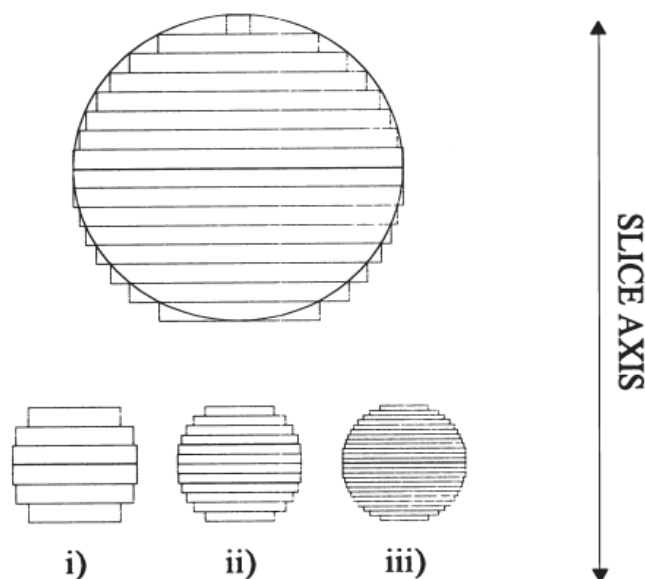


Figura 2.17 - Representação esquemática do fenômeno de degrau de escada. A mesma geometria com: i espessura de camada de elevada, ii intermédia e iii fina. Adaptado de [53].

Nesta etapa definem-se também os parâmetros de impressão através da especificação da localização dos suportes, altura da camada e orientação da peça. A orientação da peça desempenha um papel essencial na qualidade da peça produzida, dado que influencia não só o fenômeno de degrau de escada, como também o tempo de impressão. Por um lado, ao imprimir paralelamente ao plano utilizado aquando do *slicing*, o fenômeno de degrau de escada é ultrapassado. Por outro, ainda que o tempo de impressão dependa fundamentalmente do número de camadas, o que se relaciona também com a orientação da peça, esta também está associada com a ocorrência de distorção. Em suma, a escolha da orientação deve ser cuidadosamente ponderada.

Nesta etapa e, consoante o processo utilizado, pode dar-se também a geração dos suportes mais adequados para garantir a impressão de geometrias mais complexas.

Por fim gera-se um novo ficheiro em código G [3].

4ª Etapa: Impressão

Cada um dos processos, abordados no subcapítulo **2.2.1**, tem um modo de impressão distinto. No entanto, em todas as tecnologias esta etapa é fundamentalmente automatizada, utilizando microcontroladores e sensores, não sendo necessária supervisão. A única monitorização necessária é para garantir que não existiu nenhum erro, tais como falhas de eletricidade ou na alimentação de material [3, 13, 37].

5ª Etapa: Remoção da impressão

Enquanto em alguns processos de impressão 3D a remoção da impressão consiste apenas na separação da peça produzida da plataforma de impressão. Em ambiente industrial, alguns destes

métodos requerem operadores especializados e procedimentos rigorosos, bem como a utilização de equipamentos de segurança e ambientes controlados.

6ª Etapa: Pós-processamento

Em função da complexidade do objeto produzido, do material de que é feito e do acabamento pretendido podem ser necessárias diversas tarefas aquando do pós-processamento. Assim, alguns objetos podem ser lixados, pintados ou soldados com outros objetos em função da sua finalidade [13, 15, 29, 37].

De modo geral, esta etapa segue tipicamente dois métodos em função do processo utilizado. O mais comum é apenas a remoção dos apoios utilizados. No entanto, em processos como o SLA é necessária a cura recorrendo a uma câmara ultravioleta (UV) para completar o processo de polimerização e aumentar a resistência mecânica dos protótipos, bem como a remoção dos apoios impressos [13, 29, 31].

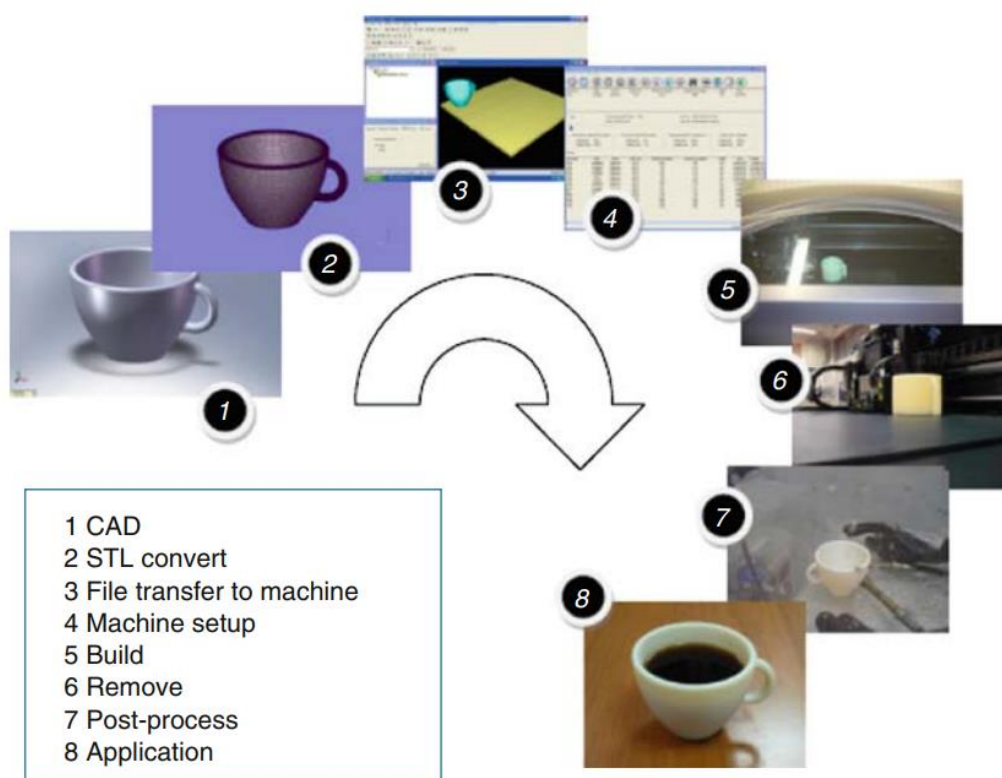


Figura 2.18 - Etapas gerais necessárias à produção de uma peça recorrendo a impressão 3D. Adaptado de [3].

2.5 Materiais poliméricos

Existem diversos materiais poliméricos, tendo cada um deles propriedades específicas. No entanto, de modo geral os polímeros podem dividir-se em duas classes: os naturais e os artificiais. Os

naturais encontram-se na natureza enquanto os artificiais são feitos a partir de substâncias químicas. Destes os mais utilizados nos dias de hoje são os artificiais [19].

Quanto à sua constituição, todos os polímeros são produzidos recorrendo a um polímero essencial misturado com uma mistura complexa de materiais que coletivamente são conhecidos como aditivos. Estes aditivos permitem que os polímeros tenham as características que lhes associamos, tornando-os, por exemplo, mais limpos e coloridos. Assim, estes materiais tornam-se essenciais para a indústria pelas suas propriedades, das quais se destacam a sua liberdade de design, duração e eficiência energética e térmica [19].

Normalmente, os polímeros são sólidos e estáveis a temperaturas normais. No entanto, a um dado ponto do processo produtivo adaptam-se através da aplicação de calor ou pressão à sua forma final. O comportamento do material ao ser aquecido é o que distingue as duas classes de polímeros em termopolímeros e polímeros termoendurecíveis. Enquanto os termopolímeros podem ser aquecidos sucessivas vezes e adquirir diversas formas, os termoendurecíveis embora amolecam quando são aquecidos a primeira vez e possam ser moldados, tornam-se mais rígidos e duros com o aquecimento adicional. Assim, no decorrer do processo de aquecimento os termoendurecíveis passam por um processo designado por cura, caracterizado por uma reação química que une as estruturas na forma de uma cadeia longa, juntando-as firme e permanentemente [1, 19].

2.5.1 Materiais utilizados na *Vat Polymerization*

Os materiais tipicamente utilizados nos processos de VP são epoxy, ácido acrílico ou um polímero fotossensível [12]. Dentro destes materiais os polímeros termoendurecíveis fotossensíveis no estado líquido são normalmente conhecidos como resinas [18, 21]. Tal como no caso dos polímeros, ao variar os componentes de uma resina, por exemplo através de diferentes combinações de monómeros, oligómeros e fotoindicadores e diversos outros aditivos obtêm-se materiais com diferentes propriedades [1, 21, 32]. Deste modo, ao considerar as propriedades pretendidas é possível escolher as resinas de acordo com o uso final da peça. Consequentemente, o preço das resinas varia significativamente em função das propriedades requeridas [18, 20]. Destaca-se que os materiais utilizados têm a ativação do catalizador a 405 nm de comprimento de onda [12, 16, 50].

No que toca à gama de materiais disponíveis, normalmente os sistemas industriais oferecem uma maior diversidade do que as impressoras de dimensões reduzidas, o que permite controlar mais facilmente as propriedades mecânicas das peças impressas [20].

De modo geral, as características comuns a todos os materiais utilizados nas tecnologias da família VP são [1, 21]:

- Acabamento superficial liso, como num molde de injeção;
- Acabamentos finos e elevado nível de detalhe;

- Elevada rigidez;
- Relativamente quebradiço, baixo alongamento na rutura;
- Não é adequado para uso exterior, isto é, para exposição à radiação solar, uma vez que a luz UV altera as propriedades do material ao longo do tempo;
- Suscetível à deformação.

A Tabela 2.8 representa as propriedades mais importantes de cada uma destas resinas.

Tabela 2.8 - Caracterização dos principais tipos de resinas utilizadas na Vat Polymerization. Adaptado de [18, 20].

Material	Características
Resinas comuns	+ Acabamento superficial liso - Relativamente frágil
Resinas de alto detalhe	+ Maior precisão dimensional - Preço mais alto
Resinas claras	+ Material transparente - Requer pós-processamento para um acabamento muito claro
Resinas fundíveis	+ Usado para criar padrões de moldes + Baixa percentagem de cinza após a queima
Resinas duras ou duráveis	+ Propriedades mecânicas semelhante a ABS ou PP - Baixa resistência térmica
Resinas de elevada temperatura	+ Resistência à temperatura + Usado para ferramentas e moldes para moldação
Resinas dentárias	+ Biocompatível + Elevada resistência à abrasão - Custo elevado
Resinas flexíveis	+ Material tipo borracha - Menor precisão dimensional

As resinas de engenharia dividem-se ainda em resinas resistentes, duráveis, resistentes ao calor, flexíveis e rígidas [21].

Tal como referido anteriormente o tempo e a temperatura de pós-cura são específicos para cada resina e normalmente recomendados pelo fabricante [60].

2.5.2 Aplicações dos materiais utilizados na *Vat Polymerization*

O processo de VP tem diversas aplicações, das quais se destacam aplicações visuais e protótipos em que superfícies lisas e com grande precisão são necessárias [18]. Posto isto, apresentam-se as principais aplicações deste processo.

Dadas as características inerentes ao processo de VP e às resinas comuns, especificamente, a produção de peças com elevada rigidez e resolução, um acabamento suave e a baixo custo, empresas como a Chrysler Corporation, Jeep and Truck Engineering Divison, AMP Incorporated utilizam este processo para [18], [21], [29], [45]:

- **Prototipagem geral;**
- **Prototipagem rápida;**
- **Modelagem de conceito;**
- **Modelagem do tipo por injeção;**
- **Modelos de arte.**

Deste modo, permite facilitar a comunicação entre os diversos departamentos envolvidos no desenvolvimento de um produto, agilizando este processo.

Evidencia-se que a cor deste tipo de resina se relaciona com as suas propriedades: resinas brancas são mais adequadas para peças com superfícies bastante lisas e cinzas para peças com detalhes finos [21].

As propriedades das resinas transparentes, semelhantes às das resinas comuns, mas passíveis de um pós-processamento que as torna praticamente transparentes levam à sua utilização em peças produzidas por VP para [21]:

- **mostrar equipamentos interiores**, por exemplo, em cápsulas para leds e equipamentos fluídicos.

Tendo em consideração as propriedades das resinas de engenharia, nomeadamente, propriedades mecânicas e térmicas específicas atingidas após a pós-cura, que permitem simular uma diversidade de polímeros utilizados em injeção plástica, fornecendo uma ampla gama de propriedades mecânicas aos engenheiros para aplicações como [21]:

- **prototipagem;**
- **teste;**
- **fabricação.**

As resinas médicas e dentárias que têm certificados de biocompatibilidade, caracterizadas por elevada resistência ao desgaste e à fratura, a capacidade do processo para produzir peças com grande nível de precisão e detalhe e o baixo custo tornam esta tecnologia disruptiva dentro da indústria médica

e dentária. Ao permitirem a sua esterilização a vapor em autoclave podem ser usadas diretamente em cirurgia, permitindo o fabrico de **equipamentos médicos personalizados**. As de longa duração, com alta resistência à fratura e ao desgaste utilizam-se em **aplicações ortodônticas**. Destas aplicações salientam-se o fabrico de [7–11, 15, 16, 18, 21, 30, 32, 43, 45, 57, 61]:

- **coroas;**
- **pontes;**
- **próteses dentárias provisórias ou definitivas;**
- **modelos dentários;**
- **próteses;**
- **estruturas reticuladas;**
- **aparelhos auditivos.**

A utilização de aparelhos auditivos produzidos por VP tem sido um sucesso, existindo já cerca de 10 000 000 pessoas a utilizá-los, estimando-se que, aproximadamente, 97% dos aparelhos auditivos sejam produzidos por tecnologias desta família [15, 18].

O teor nulo de cinzas após a queima, bem como os detalhes nítidos e acabamento suave associados às resinas fundíveis e ao processo de VP levam a que esta combinação seja bastante utilizada em [21]:

- **joalheria;**
- **produção de objetos pequenos e complexos.**

Posto isto, facilmente se infere que dada a vasta gama de aplicações, em especial, médicas e dentárias, estes materiais adquirem uma importância primordial na sociedade atual.

2.6 Rugosidade

As superfícies maquinadas nunca são absolutamente perfeitas, apresentando inevitavelmente desvios em relação à superfície teórica [19, 23]. Assim, por forma a garantir o correto desempenho das peças projetadas, surge a necessidade de definir os valores máximos admissíveis dos desvios para uma determinada superfície. Deste modo, é essencial conhecer a capacidade de cada processo de fabrico, nomeadamente, a sua aptidão de assegurar um determinado acabamento superficial. Este conhecimento releva-se fulcral não só na produção como no projeto, uma vez que permite não só escolher o processo mais adequado, como os parâmetros que o mesmo deve ter com vista a assegurar o acabamento pretendido [23].

Estes desvios podem ser geométricos, ondulação ou rugosidade, em função da respetiva ordem de grandeza. No que toca à rugosidade, a norma ISO 4287/1-1984, define três conjuntos de parâmetros: os associados com as propriedades de irregularidade na direção da altura do perfil, os associados com

as propriedades de irregularidade na direção do comprimento do perfil e os associados com as irregularidades de forma [62].

A rugosidade superficial de uma superfície divide-se numa série de parâmetros, dos quais os mais preponderantes e comumente utilizados são [23, 50, 63]:

- R_a - Desvio médio aritmético do perfil

Este fator representa a média da rugosidade e é o mais utilizado na medição do acabamento de uma superfície. Para o visualizar determina-se a média das alturas do perfil medidas acima da linha média original, tal como se observa na Figura 2.19 [19, 50, 61, 63]:

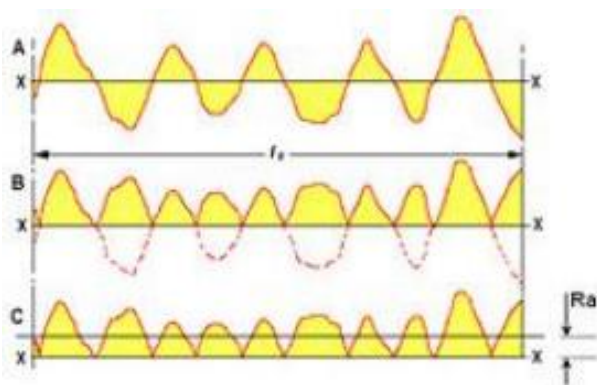


Figura 2.19 - Etapas para a obtenção do R_a . Adaptado de [63].

A sua vasta utilização deve-se à capacidade de comparar superfícies do mesmo tipo produzidas através de processos semelhantes, permitindo a sua utilização como critério de avaliação da capacidade do processo para produzir superfícies com determinadas características [23].

Salienta-se como principal limitação a possibilidade de obter o mesmo valor de R_a em perfis de rugosidade totalmente diferentes, tal como se representa na Figura 2.20 [64]:

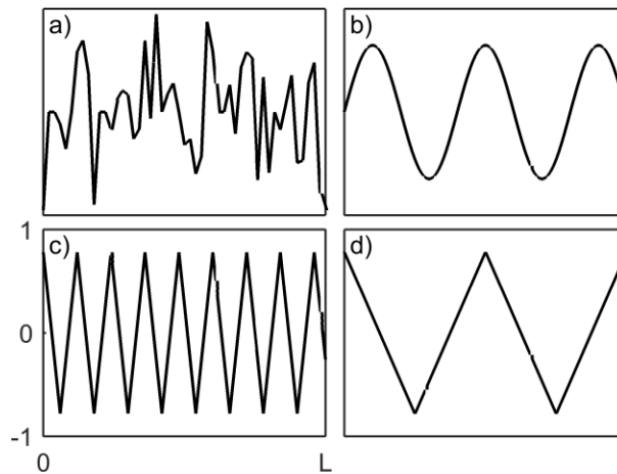


Figura 2.20 - Ilustração de quatro perfis de rugosidade com o mesmo R_a e R_q . Adaptado de [64].

- R_q - Desvio quadrático médio do perfil avaliado

Este parâmetro é utilizado em superfícies cujo acabamento apresenta marcas de maquinagem bem definidas e em superfícies em que o parâmetro R_a apresente pouca resolução [66].

No entanto, tal como o parâmetro R_a não define a forma das irregularidades, pelo que deve ser complementado com o parâmetro R_t . Evidencia-se ainda a dificuldade de o obter graficamente [63].

- R_t - Altura máxima do perfil

Este parâmetro é facilmente obtido nos instrumentos de medição utilizados na atualidade, sendo dado pela soma da maior das alturas de pico do perfil com a maior das profundidades de vale do perfil, determinando-se então pela equação (2.1) [23, 61–63]:

$$R_t = \text{máx}(R_y) \quad (2.1)$$

sendo R_y obtido tal como se observa na Figura 2.21.

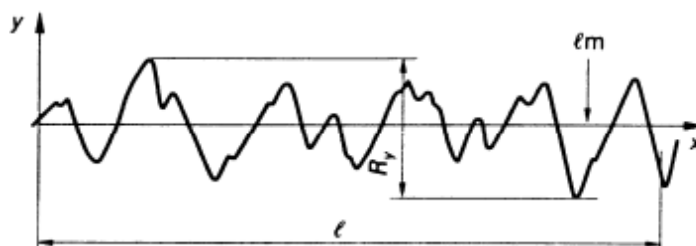


Figura 2.21 - Direção de medição de R_y . Adaptado de [23].

- $R_{m\acute{a}x}$ - Altura máxima das irregularidades do perfil

Este parâmetro  dado pela diferença de alturas entre o pico mais alto e o vale mais baixo, sendo expresso pela equaao (2.2) [23, 65].

$$R_{m\acute{a}x} = m\acute{a}x(R_{m\acute{a}xj}) \quad (2.2)$$

sendo $R_{m\acute{a}xj}$ obtido tal como se representa na Figura 2.22.

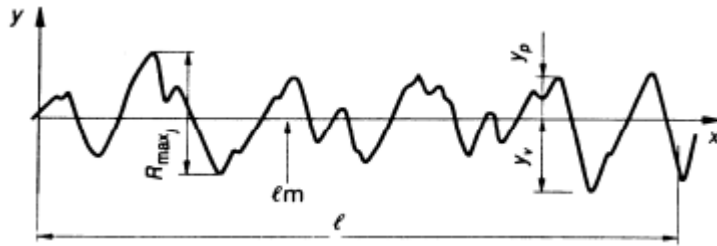


Figura 2.22 - Direao de mediao de $R_{m\acute{a}xj}$. Adaptado de [23].

, portanto, imediato que a condiao expressa pela equaao (2.3) tem de ser respeitada em qualquer perfil [62].

$$R_t \geq R_{m\acute{a}x} \quad (2.3)$$

- R_z – Média das alturas máximas do perfil

Este fator  dado pela média das alturas máximas, $R_{m\acute{a}xj}$, medidas em 5 pontos diferentes do perfil, pelo que se define pela equaao (2.4) [23, 50, 62]:

$$R_z = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_{m\acute{a}xj} \quad (2.4)$$

sendo n o número de pontos diferentes.

- R_{sk} – Assimetria do perfil avaliado

Este fator  a medida da assimetria do perfil relativamente  linha média calculada ao longo do comprimento do perfil [50, 62, 63].

Existem determinadas situaoes em que estes parâmetros de rugosidade 2D, mais usuais, não são suficientes para caracterizar a rugosidade superficial das peças estudadas. Entre estas situaoes

encontram-se os perfis de rugosidade de materiais poliméricos, cuja replicação de microredes se baseia num perfil simétrico. Nestas situações torna-se necessário determinar parâmetros complementares.

Recorrendo à curva da taxa do comprimento de sustentação, mais conhecida como curva de Abbott-Firestone, podem definir-se um conjunto de parâmetros que definem as características funcionais da rugosidade das superfícies [62, 66]. Estes parâmetros, representados na Figura 2.23, adquirem extrema importância em superfícies fortemente carregadas, destacando-se [50, 62, 67]:

- S_k – Profundidade do perfil reduzido
- S_{pk} – Altura dos picos eliminados
- S_{vk} – Profundidade dos vales eliminados

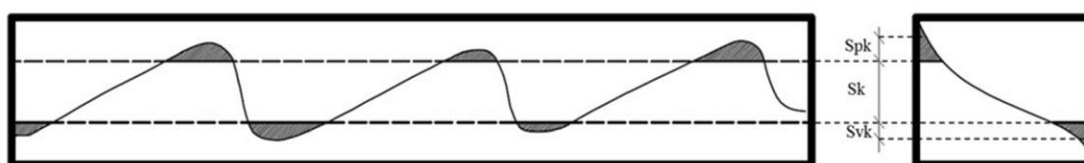


Figura 2.23 - Esquema representativo dos parâmetros S_k , S_{pk} e S_{vk} . Adaptado de [68].

Estes fatores permitem descrever a configuração da curva da taxa do comprimento de sustentação através da subdivisão do perfil em três zonas [62]:

- **Zona dos picos**, associada a comportamentos iniciais em serviço, tais como o desgaste.
- **Zona do perfil reduzido**, relacionada com a capacidade de carga, o comportamento funcional, etc.
- **Zona dos vales**, ligada à lubrificação, retenção de óleo, entre outros.

Destaca-se que a soma dos parâmetros S_k , S_{pk} e S_{vk} não tem significado físico, mas ao compará-la com a do molde, para um perfil repetido e regular, permite avaliar a forma do perfil. Obviamente este método não é indicado para comparar perfis aleatórios, uma vez que a soma de perfis com formas diferentes pode dar o mesmo valor [68].

A medição da rugosidade pode fazer-se através de instrumentos sofisticados, instrumentos mais simples ou até com recurso a amostras de comparação da rugosidade da superfície [19].

Os valores obtidos de rugosidade mais comuns, nomeadamente, R_t e R_a encontram-se tabelados em função de classes de rugosidade, representadas na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Classes de rugosidades superficiais. Adaptado de [23].

		Números da classe de rugosidade											
		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
Valores de Rugosidade	R_a [μm]	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25	50

2.7 Metodologia

Uma experiência consiste num conjunto de testes nos quais se efetuam mudanças nas variáveis independentes, designadas inputs ou fatores, de modo a identificar as razões de alterações nas variáveis dependentes, denominadas outputs, tal como se representa na Figura 2.24, [69, 70].

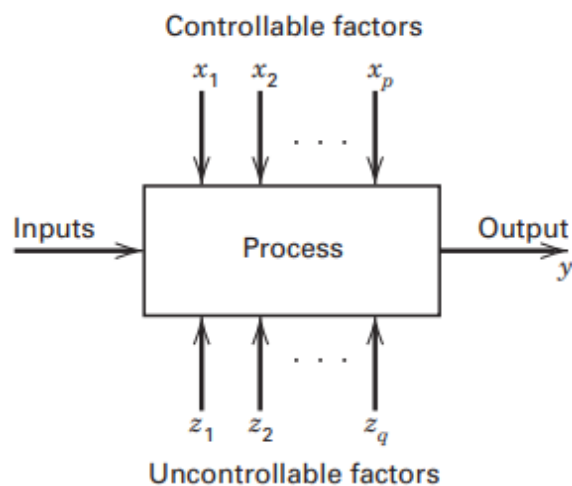


Figura 2.24 - Representação esquemática de um sistema. Adaptado de [71]

Recorrendo aos dados de entrada e saída obtidos experimentalmente e, nomeadamente, à sua análise e tratamento segundo modelos matemáticos e/ou estatísticos é possível estudar, desenvolver ou otimizar uma grande variedade de sistemas [69]. Deste modo, potencia-se o desenvolvimento de áreas como a engenharia, permitindo não só o estudo de processos produtivos, como também o projeto de novos produtos [71].

Nos últimos anos, tem-se assistido ao incremento da utilização de métodos multifatoriais, que permitem avaliar a interação entre diferentes variáveis na resposta, utilizando um reduzido número de ensaios, contrariamente aos métodos mais tradicionais de otimização que só analisavam uma variável de cada vez e não tinham em atenção as interações entre elas. Posto isto, os métodos multifatoriais são promissores por permitirem resultados mais rápidos, precisos e económicos [69].

Nesta dissertação opta-se pelo uso do *Design of Experiments* (DoE), abordado no subcapítulo 3.1, que fornece uma metodologia capaz de analisar a influência de diversas variáveis aleatórias, bem como a construção de um modelo matemático que preveja a resposta em função de qualquer combinação de fatores.

2.8 Outros estudos sobre rugosidade em *Vat Polymerization*

Diversos estudos tanto teóricos como empíricos que visam analisar a rugosidade superficial de peças produzidas por MA têm sido desenvolvidos [26]. No entanto, dada a importância dos processos da família de VP e a sua intrínseca relação com a presente dissertação abordar-se-ão apenas as investigações neste âmbito. Destes a maioria é da área da odontologia, visando perceber os parâmetros que mais impactam a rugosidade obtida, os que não a influenciam de todo ou a influência que a variação de determinados parâmetros ou até da sua combinação tem na rugosidade superficial das peças analisadas. Por conseguinte, salientam-se os aspetos mais pertinentes de cada um dos estudos analisados.

Primeiramente, analisou-se um estudo que visava investigar a altura da camada, posicionamento e alinhamento do modelo, tipo e número de estruturas de suporte e tipo de corpo da estrutura alvo na qualidade superficial de modelos dentários impressos em SLA. Os modelos foram produzidos com a impressora Form 2 e com a resina cinza V3 da marca FormLabs. As medições realizaram-se nas direções x, y e z, tendo-se medido o parâmetro R_a [24].

Nesta investigação observou-se que [24]:

- Os modelos inclinados a 15° mostraram uma maior rugosidade na direção z para todas as velocidades.
- A rugosidade nas direções x e y para 0° apresentaram maiores valores e diferenças significativas.
- Relativamente às impressas a 15° , observaram-se diferenças significativas entre x e y e entre x e z, apresentando maior rugosidade na direção x, especialmente a uma velocidade de impressão maior. A velocidade de impressão apresentou a menor influência na direção y. Contrariamente, as medidas em x e z mostraram-se bastante dependentes da velocidade de impressão.
- Existiram diferenças significativas na direção x em provetes com e sem suportes, sendo que as amostras com suportes apresentaram valores de rugosidade maiores. Na direção y e z a influência dos suportes foi menos relevante.
- Na direção z observou-se a maior rugosidade para 15° e $100 \mu m$.
- Ao examinar o efeito do preenchimento do modelo (sólido ou oco) concluiu-se que não existiam diferenças significativas na rugosidade.
- Comparou-se também a orientação e a rugosidade correspondente em amostras com orientação diferente, tendo-se observado diferenças significativas.
- Ao estudar o posicionamento das amostras na base da impressora não se notaram diferenças significativas.

Em suma, o posicionamento na plataforma e o preenchimento das amostras não afetam a rugosidade superficial. As amostras com orientação de 15° mostraram o valor mais alto de rugosidade na direção x, particularmente com uma resolução de impressão de 100 μm . A sua observação microscópica indicou que este fenómeno era provocado pelo efeito de escada, podendo estabelecer-se que quanto maior a inclinação, menor o efeito de escada que ocorre [24].

Sabe-se que a rugosidade superficial depende bastante da altura de camada, especialmente para camadas inclinadas, devido ao efeito de escada [22].

A altura da camada e resolução da fonte de luz determinam o acabamento superficial e precisão de uma peça [18].

Um outro estudo mostrou que ao combinar a espessura de camada com a orientação das peças impressas é possível obter superfícies bastante lisas, reduzindo-se também o efeito de escada [72].

Analisou-se um estudo que visava avaliar o efeito da orientação de impressão na precisão dimensional, características de superfície, resistência à flexão e resposta ao *C. albicans* de uma resina de base dentária. Nesta investigação para a medição das características da superfície e resposta a *C. albicans* utilizaram-se discos de 10 mm de diâmetro e 2 mm de altura, material PMMA comercialmente disponível para o fabrico de próteses dentárias, uma espessura de camada de 10 μm e pós processamento segundo as instruções do fabricante. Utilizou-se ainda uma impressora Form 2 para produzir 3 provetes a 0, 45 e 90° de orientação. Para a medição da rugosidade média foi usado um rugosímetro TR200 da Time Group Inc. Relativamente à rugosidade observada as principais características deste estudo foram [73]:

- O grupo de orientação de 45° apresentou maiores valores de rugosidade em comparação com os outros, mas não foi observada diferença estatisticamente significativa entre os 0 e os 90°.
- O grupo de orientação 90° mostrou superfícies irregulares que combinavam formas amorfas e redondas.
- A superfície derivada de orientação 0° exibiu vales de vários tamanhos e o grupo de 45° picos oblíquos repetidos na superfície.
- As características da superfície afetam a estabilidade da cor, a fixação microbiana e a capacidade de limpeza da base da prótese, sendo ainda essenciais para a manutenção adequadas das próteses removíveis.

Em seguida, analisou-se um estudo que avaliava o efeito dos seguintes parâmetros na rugosidade superficial medida em camadas horizontais [53]:

- Espessura de camada
- *Hatch style*
- *Hatch spacing*
- *Hatch overcure*
- *Hatch fill cure depth*

Foi utilizada uma impressora StereoLithography Apparatus SLA - 250 series 40 da marca 3D Systems bem como *STAR-WEAVE* (SW), *Divergent STAR-WEAVE* (DSW) e *Diagonal Divergent STAR-WEAVE* (DDSW) [53].

Concluindo-se que [53]:

- A espessura de camada afeta a rugosidade superficial da experiência, observando-se o maior valor de rugosidade para uma espessura de 250 μm e o menor para 190 μm .
- Os valores mais reduzidos de rugosidade foram obtidos para 190 μm e para DDSW.
- Os fatores *hatch spacing* e *hatch fill cure depth* afetam significativamente a rugosidade superficial, apresentando uma contribuição percentual superior no DDSW.
- O fator *hatch cure depth* influi a rugosidade superficial e é mais apropriado no estilo DDSW que dá o valor mínimo de R_a . Isto ocorre porque como o preenchimento é feito na diagonal e paralelamente ao eixo x e y, todos os vales e picos ficam preenchidos. No caso de o preenchimento ser feito ao longo do mesmo eixo pode acontecer que apenas os vales fiquem preenchidos. Assim, explica-se o efeito do fator *hatch fill cure depth* influir significativamente o acabamento superficial no estilo de preenchimento DDSW que tem maior contribuição percentual de todos os três fatores em todos os estilos de preenchimento.
- Considerando todos os estilos de preenchimento a espessura de 190 μm dá o mínimo efeito de escada.
- Para a rugosidade na diagonal e nas direções x e y, parece que quanto maior a espessura melhor o acabamento superficial, dado que o valor mínimo de R_a é para a camada de maior espessura. Além disso, os valores de R_a para a camada 250 μm são geralmente menores do que para 125 μm e 190 μm . Assim, combinando uma espessura de 190 μm com DDSW pode obter-se um valor aceitável de limite de tolerância para acabamento superficial para produção de ferramentas.
- Recorrendo a uma experiência de confirmação em que se utilizou o método de Taguchi e os fatores de controlo foram *hatch spacing*, *hatch cure depth* e *hatch fill cure depth*,

conclui-se que o fator que afeta significativamente a média é o estilo de preenchimento DDSW para as três espessuras de camada estudadas.

Em suma, foi possível verificar que o acabamento superficial das peças produzidas em resina acrílica por SLA pode ser significativamente melhorado ao escolher uma combinação ótima dos fatores mais significativos [53].

Analisou-se um estudo que visava avaliar o efeito da orientação de impressão na rugosidade superficial, topografia e resistência ao cisalhamento de restaurações provisórias produzidas por DLP com resina do tipo compósito. Neste âmbito, produziram-se 60 discos circulares de 20 mm de diâmetro e de 10 mm de altura, utilizando o material E-Dent 400 C&B e a impressora Envisiontec VIDA HD. Estes discos foram agrupados em 3 grupos em função da sua orientação de impressão ser 0, 45 ou 90°. Os discos foram limpos com IPA e pós-polimerizados de acordo com as instruções do fabricante numa unidade de cura convencional, a PCA 100, também da EnvisionTEC. O grupo de controlo foi impresso utilizando moldagem por injeção com um molde de silicone e uma resina compósita comum, a Protemp 4. Os parâmetros R_a e R_z foram medidos recorrendo a um software de observação o VK-H1XV2E da KEYENC com uma ampliação de 20x [61].

No que toca à rugosidade destacam-se como principais conclusões [61]:

- O grupo de controlo e 45° mostrou o maior valor de R_z , enquanto os 0 e 90° o menor.
- O grupo impresso a 45° mostrou o maior valor de R_a e o grupo 0° o menor.
- A grande diferença entre os valores de R_a e R_z revelaram a presença de picos elevados e vales profundos na superfície de todos os grupos.
- A rugosidade pode ter sido provocada pelo efeito de escada entre camadas, uma vez que as impressas a 45° mostraram superfícies mais rugosas do que as outras orientações de impressão.
- O grupo de orientação 90° mostrou superfícies irregulares que combinavam formas amorfas e redondas.
- A superfície derivada de orientação 0° exibiu vales de vários tamanhos e o grupo de 45° picos oblíquos repetidos na superfície.
- O grupo impresso a 45° teve a maior rugosidade superficial, seguindo-se o de 90 e 0°;

Em suma, a rugosidade superficial foi fortemente influenciada pela orientação de impressão [61].

Procedeu-se ainda há análise de um estudo semelhante ao anterior que utilizava a resina Nextdent Ortho IBT da 3D systems e o profilometro ótico WYKO NT9100 Optical Profilometer da Veeco com uma ampliação de 20x. Tal como observado nos estudos anteriores conclui-se que a orientação de impressão influencia significativamente a rugosidade superficial, sendo o menor valor observado para

uma orientação de 0° e os maiores para 45° e não se observaram diferenças significativas entre os grupos a 25° e 45° [57].

Assim sendo, continuam a ser essenciais estudos que permitam um melhor conhecimento dos parâmetros do processo e, nomeadamente, da sua influência na rugosidade superficial de peças produzidas por SLA. Pelo que, estudos que permitam prever o comportamento da rugosidade superficial em função dos parâmetros utilizados adquirem uma elevada pertinência.

2.9 Síntese do Capítulo

A MA desempenha um papel fundamental nos dias de hoje, permitindo, por exemplo, uma produção *just-in-time*, a produção de geometrias complexas sem um incremento do custo, facilitando a comunicação dentro dos diversos departamentos de uma empresa aquando do desenvolvimento de um produto e dando resposta à crescente customização [7, 37, 44, 53, 64].

Relativamente aos processos da família VP, ainda que o SLA tenha sido o primeiro processo a surgir e não tenha tido um impacto significativo na altura, em grande parte devido ao fraco desenvolvimento das ciências dos materiais que tornava os termoendurecíveis caros e com propriedades pouco desejáveis, têm-se tornado cada vez mais promissores. Dada a capacidade dos processos desta família de produzir peças com um bom acabamento superficial e precisão dimensional, a baixo custo e as propriedades específicas de cada uma das resinas que utilizam têm tido uma aplicação crescente em diversas áreas, das quais se salientam a medicina e a odontologia [7, 8, 18, 28, 45, 61].

No que toca à rugosidade, é evidente que as superfícies não são absolutamente perfeitas, apresentando desvios em relação à superfície projetada [19, 23]. Estes desvios têm uma gama de valores admissíveis para cada peça, normalmente definida pelo projetista, que determina se esta é aceite ou rejeitada. Posto isto, para garantir não só o cumprimento dos requisitos funcionais definidos para determinado componente, por exemplo, a funcionalidade das próteses dentárias; como também o conhecimento da capacidade produtiva do processo de DLP torna-se fundamental aprofundar o conhecimento da rugosidade de peças produzidas por este processo [23, 25, 30, 52, 73]. Assim, surge a necessidade de determinar os principais parâmetros que a influem e como a sua variação afeta a qualidade superficial das peças produzidas.

METODOLOGIA

Ao longo do presente capítulo apresentam-se os conceitos teóricos subjacentes à análise estatística dos dados experimentais obtidos nesta dissertação, incluindo-se a sua explicação e relevância na atualidade, bem como as suas principais etapas.

3.1 *Design of Experiments*

O *Design of Experiments* (DoE) refere-se ao processo de planejar uma experiência por forma a que os dados recolhidos sejam adequados e que a sua análise através de métodos estatísticos produza conclusões válidas e objetivas [71]. Ao selecionar os pontos mais importantes em toda a região de interesse, permite fornecer tanta informação quanto possível, utilizando um reduzido número de experiências. Deste modo, esta metodologia pode ter um impacto significativo na precisão da aproximação e no custo de construir a superfície de resposta [69].

O DoE divide-se em três categorias: uma experiência fatorial completa, uma experiência fatorial fracionada e uma experiência de superfície de resposta [74].

Segundo Montgomery Douglas, o DoE assenta em três princípios básicos [70, 71]:

- Aleatoriedade: a variável experimental e a respetiva resposta são aleatórias por forma a que o impacto de fatores externos, tais como a temperatura ambiente, possa ser distribuído ao longo dos fatores e por isso desprezado;
- Replicabilidade: ao realizar um conjunto de testes independentes e repetidos para cada combinação de fatores, ou seja, ao garantir a utilização de réplicas, assegura-se a replicabilidade que reflete fontes de variabilidade entre execuções e potencialmente dentro de execuções;
- Divisão em blocos: a divisão em blocos usa-se para tornar a experiência mais homogénea, já que se presume que é mais fácil uniformizar um número mais reduzido de ensaios do que o todo.

Como principais etapas do DoE destacam-se [71]:

1. Reconhecimento e estabelecimento do problema
2. Seleção das variáveis de resposta
3. Escolha dos fatores, níveis e alcance

4. Escolha do design da experiência
5. Realização da experiência
6. Análise estatística dos dados
7. Conclusões e recomendações

Salienta-se que as etapas 2 e 3 podem ser efetuadas simultaneamente ou em ordem inversa [71].

Note-se que quando não se tem muita informação sobre o sistema em estudo ou quando existem numerosas variáveis que influenciam a resposta pode ser necessário efetuar uma experiência de *screening* inicial para identificar os fatores mais importantes [71].

3.2 Metodologia da Superfície de Resposta

Uma das técnicas mais relevantes para modelar e analisar problemas em que uma resposta ou um conjunto de respostas de interesse é influenciado por diversas variáveis aleatórias é a Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) [69, 70, 75]. Esta consiste num conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas baseada no ajuste de uma equação polinomial a dados experimentais, que deve descrever o comportamento dos dados de modo a fazer previsões estatísticas. O objetivo é otimizar os níveis destas variáveis para obter o melhor desempenho do sistema [69, 71, 75]. Por conseguinte, a MSR é uma ferramenta de grande utilidade no desenvolvimento, melhoria e otimização de processos [69].

Evidencia-se que como o domínio experimental é definido pelos limites máximos e mínimos das variáveis experimentais estudadas, os resultados obtidos só são fiáveis dentro deste intervalo [75]. Deste modo, a correta escolha do domínio experimental adquire uma importância fundamental.

O procedimento para a aplicação de RSM como uma técnica de otimização tem como etapas [75]:

1. Selecionar as variáveis independentes que mais impactam os sistemas através de estudos de *screening* e da delimitação do domínio experimental, de acordo com os objetivos do estudo e a experiência
2. Escolher o modelo experimental e desenvolver as experiências segundo a matriz experimental definida
3. Realizar o tratamento matemático-experimental dos dados obtidos experimentalmente através do ajuste da função polinomial
4. Avaliar o ajuste do modelo
5. Verificar se é necessário ou possível desenvolver um deslocamento em direção à região ótima
6. Obter os valores ótimos para cada variável em estudo

Destas etapas as que adquirem uma importância preponderante são a definição da função de aproximação e do planeamento das experiências [69].

3.3 *Central Composite Design*

Existem diversos modelos para ajustar um modelo de segunda ordem, sendo o mais utilizado o *Central Composite Design* (CCD). Este modelo, representado na Figura 3.1, é composto por: pontos fatoriais, centrais e axiais [69].

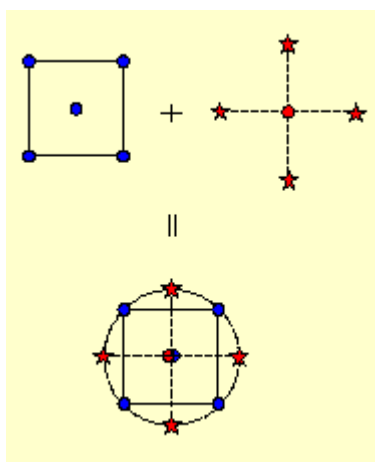


Figura 3.1 - Representação dos pontos de CCD. Adaptado de [76].

Considerando k o número de fatores, ou seja, variáveis independentes, o modelo é constituído por 2^k pontos fatoriais, representados a azul, $2k$ axiais, simbolizados pelas estrelas vermelhas, e c_p pontos centrais, que se localizam no centro tal como o nome indica. Salienta-se que os pontos axiais são também designados pontos estrela e representam os pontos máximo e mínimo para cada fator do modelo [76]. Quanto aos pontos centrais, relacionam-se com a curvatura: se a curvatura é significativa a adição de pontos centrais permite um ajuste mais eficiente dos termos quadráticos [69, 70].

O número total de pontos, isto é, de experiências realizadas para fatorial completo é dado pela equação (3.1) [75].

$$N = 2^k + 2k + c_p \quad (3.1)$$

Na Tabela 3.1 apresentam-se os 3 tipos distintos de CCD, bem como as respetivas características.

Tabela 3.1 - Tipos de *Central Composite Design* e respectivas características. Adaptado de [75, 76].

Tipo de CCD	Esquema	Terminologia	Breve descrição
Circunscrito		CCC	Modelo original. Os pontos axiais encontram-se a uma distância α do centro consoante as propriedades definidas e o número de fatores e, cumprem as propriedades de rotatabilidade e ortogonalidade. Este modelo requiere 5 níveis de cada fator, ou seja, $-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$.
Face Centrada		CCF	Neste modelo os pontos estrela estão no centro de cada uma das faces do espaço fatorial, por isso $\alpha = \pm 1$. Esta variedade requiere 3 níveis de cada fator.
Inscrito		CCI	Este modelo usa os pontos limites como pontos estrela e cria um fatorial ou fracional dentro desses limites. Este modelo também requiere 5 níveis de cada fator.

Na Figura 3.2 observa-se o CCD do tipo circunscrito para duas e três variáveis, respetivamente.

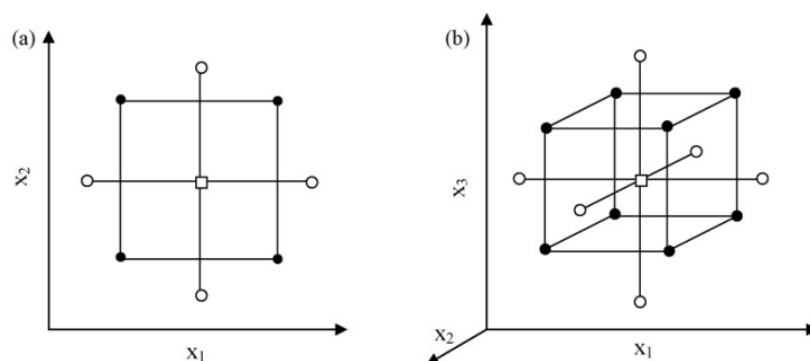


Figura 3.2 – *Central Composite Design* para a otimização de: a) duas variáveis e b) três variáveis. Adaptado de [75].

Evidencia-se não só que o CCC explora o maior domínio do espaço e o CCI o menor, como também que o CCC e o CCI são modelos que apresentam rotatabilidade, contrariamente ao CCF [76].

Considerando as características inerentes ao modelo CCC optou-se pela sua utilização durante a presente dissertação.

É importante que o modelo de segunda ordem forneça boas previsões na região de interesse, o que se mede através da sua rotatabilidade [71]. Um modelo com rotatabilidade mantém a variância de y imutável para pontos equidistantes do centro [71]. Para manter a rotatabilidade tem-se o valor de α , que depende do número de experiências na zona fatorial do modelo CCD e, para um fatorial completo, é dado pela equação (3.2) [71, 76, 77]:

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \quad (3.2)$$

Ao considerar as capacidades do software da impressora existem três fatores na presente dissertação: a orientação, a espessura da camada e o tempo de exposição. Posto isto, a expressão anterior para $k = 3$ e admitindo 4 pontos centrais, ou seja, $c_p = 4$, tem-se então [75]:

$$\alpha = 1.682$$

$$N = 2^3 + 2 \times 3 + 4 = 18$$

Modelo de Segunda Ordem

Quando existem termos quadráticos o modelo de segunda ordem é o mais adequado, uma vez que inclui todos os termos do modelo de primeira ordem mais os termos quadráticos e todas as interações entre os de primeira ordem e os quadráticos, sendo dado pela equação (3.3).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.3)$$

Em que y é a resposta que se pretende analisar, k o número de fatores em estudo, β_i são os coeficientes de regressão de primeira ordem, β_{ii} representa os coeficientes dos termos quadráticos, β_{ij} são os coeficientes dos parâmetros de interação entre variáveis e ε representa fontes de incerteza, tais como, erros de medição.

Num modelo CCD com k variáveis existem 3 conjuntos de pontos distintos, tal como mencionado anteriormente:

- 2^k pontos fatoriais

$$(x_1, x_2, \dots, x_k) = (\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$$

- $2k$ pontos axiais

$$(x_1, x_2, \dots, x_k) = \{(\pm\alpha, 0, \dots, 0); (0, \pm\alpha, \dots, 0); (0, 0, \dots, \pm\alpha)\}$$

- c_p pontos centrais

$$(x_1, x_2, \dots, x_k) = (0, 0, \dots, 0)$$

Assim, para $k = 3$ o modelo CCD tem:

- 8 pontos fatoriais, cujas coordenadas são $\{(-1, -1, -1); (-1, -1 + 1); (-1, +1, +1); (-1, +1, -1); (+1, -1, -1); (+1, +1, -1); (+1, -1, +1); (+1, +1, +1)\}$
- 6 pontos axiais, cujas coordenadas são $\{(-\alpha, 0, 0); (+\alpha, 0, 0); (0, 0, +\alpha); (0, 0, -\alpha); (0, -\alpha, 0), (0, +\alpha, 0)\}$
- 4 pontos centrais de coordenadas $\{(0, 0); (0, 0); (0, 0); (0, 0)\}$

O número de termos na equação (3.3) designa-se p e é calculado através da equação (3.4).

$$p = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (3.4)$$

A estimativa dos valores b_0, b_i, b_{ii} e b_{ij} dos respetivos coeficientes $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$ e β_{ij} são calculadas através de:

$$b_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{u=1}^M x_{ui} x_{uj} Y_u \quad 1 \leq i < j \leq k \quad (3.5)$$

$$b_0 = \frac{2\alpha^2(\alpha^2-k)}{D} \sum_{u=1}^M Y_u + \frac{M(k-\alpha^2)}{D} \sum_{u=M+1}^{M+2k} Y_u + \frac{(2\alpha^4+Mk)}{D} \sum_{u=M+2k+1}^N Y_u \quad (3.6)$$

$$b_i = \frac{1}{(M+2\alpha^2)} \sum_{u=1}^M x_{ui} Y_u + \frac{\alpha}{(M+2\alpha^2)} (Y_{M+2i} - Y_{M+2i-1}) \quad 1 \leq i \leq k \quad (3.7)$$

Onde N é o número total de experiências, $D = (2\alpha^4 + Mk)N - (M + 2\alpha^2)^2 k$ e para um modelo com rotatibilidade $\alpha = \sqrt[4]{M}$.

Posto isto, as fórmulas anteriores podem ser simplificadas para:

$$\sum_{u=1}^M Y_u + \frac{M(k-\sqrt{M})}{D^*} \sum_{u=M+1}^{M+2k} Y_u + \frac{(k+2)}{D^*} \sum_{u=M+2k+1}^N Y_u \quad (3.8)$$

$$b_i = \frac{1}{H^*} \sum_{u=1}^M x_{ui} Y_u + \frac{\sqrt[4]{M}}{H^*} (Y_{M+2i} - Y_{M+2i-1}) \quad 1 \leq i \leq k \quad (3.9)$$

$$b_{ii} = \frac{(N - M - 2\sqrt{M})}{MD^*} \sum_{u=1}^N Y_u + \frac{(M + 2\sqrt{M} - N)}{2\sqrt{M}D^*} \sum_{u=M+1}^{M+2k} Y_u - \frac{1 + \frac{2}{\sqrt{M}}}{D^*} \sum_{u=M+2k+1}^N Y_u + \frac{1}{2\sqrt{M}} (Y_{M+2i} + Y_{M+2i-1}) \quad (3.10)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{u=1}^M x_{ui}x_{uj}Y_u \quad 1 \leq i < j \leq k \quad (3.11)$$

Em que N é o número total de experiências, $D^* = N(k + 2) - (2 + \sqrt{M})^2k$ e $H^* = M + 2\sqrt{M}$.

3.4 Análise da Variância

A Análise da Variância (ANOVA) é um método estatístico que tanto permite analisar a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes, como verificar a qualidade do ajuste de um modelo matemático aos dados experimentais [75, 78].

A sua ideia central consiste na comparação da variação devido à mudança na combinação das variáveis com a alteração originada por erros aleatórios inerentes à medição das respostas geradas. Mediante esta comparação é possível avaliar a capacidade da regressão para prever respostas considerando as fontes de variância experimental [75].

A Tabela 3.2 representa a ANOVA, bem como os parâmetros que utiliza.

Tabela 3.2 - ANOVA para um modelo matemático ajustado aos dados experimentais usando regressão múltipla. Adaptado de [75].

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos quadrados	F
Regressão	SSR	$p - 1$	$MSR = \frac{SSR}{p - 1}$	$\frac{MSR}{MSE}$
Resíduos	SSE	$N - p$	$MSE = \frac{SSE}{N - p}$	
Total	SST	$N - 1$		

Em que n_i representa o número de observações, m o número total de nível no modelo, p o número de parâmetros do modelo, \hat{y}_i o valor estimado pelo modelo para cada nível, \bar{y} o valor médio, y_{ij} o valor obtido experimentalmente para cada nível e \bar{y}_i a média dos resultados obtidos nas mesmas condições experimentais.

As siglas representadas na tabela representam [75]:

- *Total Sum of Squares (SST)*, denominada Soma Total dos Desvios Quadráticos.

$$SST = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (3.12)$$

- *Sum of Squares due to the Regression (SSR)* que é a soma dos desvios quadráticos devido à regressão.

$$SSR = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.13)$$

- *Sum of Squares of the Residual (SSE)*, designada Variação Residual ou Erro.

$$SSE = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (3.14)$$

- *Media of the Square of Regression (MSR)* que é a média de *SSR*.
- *Media of the Square of Residual (MSE)* que constitui a média de *SSE*.

O parâmetro F permite calcular a significância da regressão [75]. Mediante a utilização do teste de hipótese nula H_0 , que considera todos os β 's nulos, com exceção de β_0 , verifica-se a hipótese nula, considerando uma distribuição normal dos erros. Se H_0 se verifica, F segue uma distribuição de Fisher, cujos valores se encontram tabelados, e que é função dos graus de liberdade de regressão e das variações dos resíduos, respetivamente, $p - 1$ e $N - p$.

Seguidamente, calcula-se F e compara-se o valor obtido com o valor tabelado de $F_{(p-1, N-p, \alpha)}$, sendo α o nível de significância adotado. Se o valor de F calculado for superior ao de F tabelado rejeita-se H_0 , pelo que nem todos os restantes coeficientes β serão nulos. Deste modo, conclui-se que a variação associada ao modelo é bastante superior do que a considerada pelo que o modelo é aceite.

Nesta dissertação optou-se por um valor de $\alpha = 0.05$ que corresponde a um intervalo de confiança de 95%.

Pode ainda destacar-se um outro modo de verificar a adequação de um modelo e garantir que este aproxima adequadamente o sistema analisado. Este passa por verificar se a distribuição normal de probabilidade pode ser aproximada por uma linha reta e por determinar o coeficiente de correlação, R^2 , e o coeficiente de correlação ajustado, R_A^2 , [69].

As expressões que permitem calcular R^2 e R_A^2 representam-se, respetivamente, na equação (3.15) e na equação (3.16) [70].

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{SSr}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3.15)$$

$$R_A^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) (1 - R^2) \quad (3.16)$$

O coeficiente de determinação R^2 é a medida mais comum de adequação de um modelo, representando a percentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo. Deste modo, um valor de $R^2 = 1$ indica que a maioria da variabilidade em y é aproximada por um modelo de regressão [72]. No entanto, apresenta algumas limitações provocadas pela sua sensibilidade ao aumento de termos que provoca um incremento substancial do valor de R^2 , aproximando-o de 1, ainda que a variável adicionada não seja estatisticamente significativa [71], [77].

Relativamente ao valor do coeficiente de determinação ajustado, designado R_A^2 , considera o número p de variáveis incluídas no modelo, podendo observar-se que diminui quando p aumenta, ou seja, o seu valor não aumenta sempre que se adicionam variáveis, verificando-se que de facto até diminui quando estas são desnecessárias. Posto isto, é o mais apropriado para comparar modelos com quantidades diferentes de termos [69–71, 77].

Em suma, um bom modelo apresenta os valores de R^2 e R_A^2 próximos um do outro e de 1 [69].

4

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental descrito no presente capítulo pretende apresentar detalhadamente os materiais, equipamentos, métodos e parâmetros utilizados na elaboração da presente investigação.

4.1 Elaboração dos Provetes

Ao considerar a necessidade de medir a rugosidade superficial dimensionaram-se provetes cúbicos de 10 mm de aresta, tais como o representado na Figura 4.1, por forma a estabelecer a sua análise.

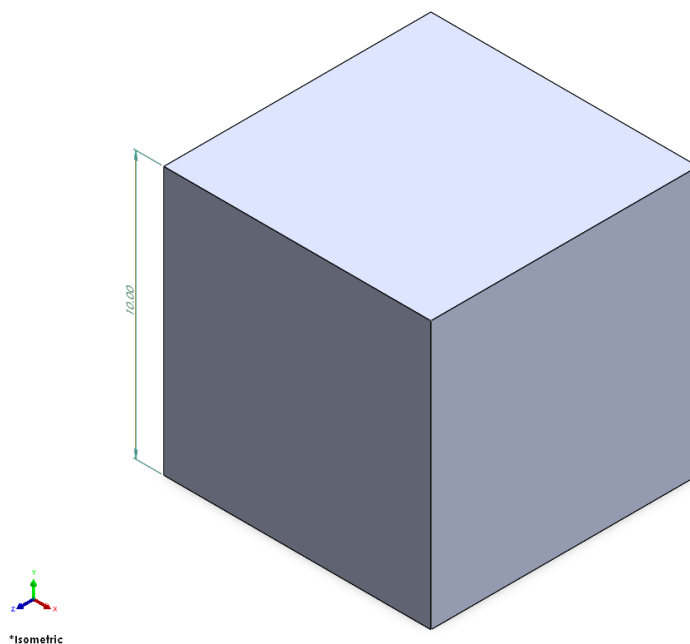


Figura 4.1 - Representação 3D do provete projetado.

Com este tipo de provetes possibilita-se a medição das rugosidades em duas faces perpendiculares entre si, o que aumenta a gama de dados considerados e de valores de inclinação medidos, mantendo um reduzido número de provetes. Na Figura 4.2 representa-se a distribuição das faces A e B medidas em função da variação da inclinação.

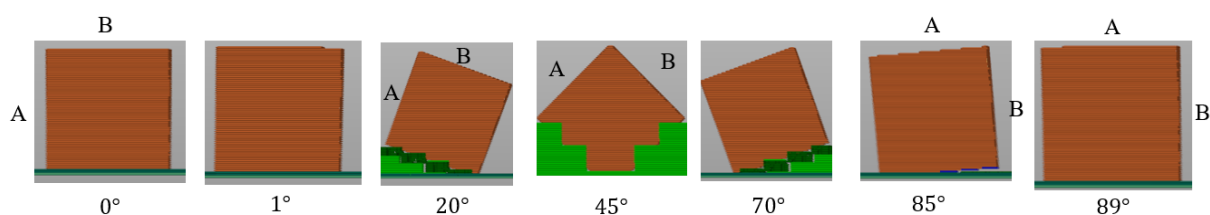


Figura 4.2 - Distribuição das faces medidas (A e B) em função da variação de inclinação.

No decorrer do desenvolvimento experimental trabalharam-se com três materiais distintos, cujas características se representam nas Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3, e portanto com diferentes propriedades por forma a estudar seu impacto no estudo da rugosidade. Assim, selecionaram-se materiais com diferentes tonalidades, dado que a opacidade do material pode afetar a dispersão da luz no seu interior e, conseqüentemente, a sua solidificação. Optaram-se por tensões de cedência e temperaturas de fusão distintas dada a influência destas propriedades, respetivamente, na resistência e cura das resinas.

Tabela 4.1- Características da primeira resina utilizada. Adaptado de [79].

Descrição	Valor típico
Densidade	1.18 g/cm³
Tensão de cedência	74.4 MPa
Temperatura de fusão	121°C
Temperatura de fusão vítrea	74°C
Espessura da camada recomendada	50 μm

Tabela 4.2 - Características da resina Anycubic Grey. Adaptado de [80]–[82].

Descrição	Valor típico
Densidade	1.08 g/cm³
Tensão de cedência XY	61 MPa
Temperatura de fusão	77.5°C
Temperatura de fusão vítrea	62.4°C
Espessura da camada recomendada	50 μm

Tabela 4.3 - Características da resina Prusament Tough Orange. Adaptado de [83], [84].

Descrição	Valor típico
Densidade	1.09 g/cm³

Tensão de cedência XY	41.6 MPa
Temperatura de fusão	55°C
Temperatura de fusão vítrea	42.5°C
Espessura da camada recomendada	50 μm

4.1.1 Equipamentos Utilizados

Para a impressão dos provetes utilizaram-se duas impressoras de MSLA e para a medição das respetivas rugosidades um rugosímetro, cujas características se apresentam. As impressoras utilizadas encontram-se disponíveis no Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) e no FabLab, respetivamente, e o rugosímetro foi facultado pelo Instituto Politécnico de Setúbal.

4.1.1.1 Impressoras

Na Figura 4.3 representa-se a impressora Photon Mono da Anycubic. Na Tabela 4.3 apresentam-se as suas características. Na Figura 4.4 representa-se a impressora Prusa SLS1S e na Tabela 4.4 apresentam-se as suas características.



Figura 4.3 - Impressora Photon Mono. Adaptado de [85].

Tabela 4.4 - Características da impressora Photon Mono. Adaptado de [85, 86].

Características específicas da impressora	
Dimensões da impressora	383 × 227 × 222 mm

Peso da impressora	4.3 <i>kg</i>
Propriedades de Impressão	
Tecnologia	LCD
Tipo de resina utilizada	Resina plástica no estado líquido
Volume de impressão	165 × 132 × 80 <i>mm</i>
Resolução típica das camadas	10 – 150 μm
Resolução XY	51 μm
Precisão no eixo Z	10 μm
Comprimento de onda da fonte de luz utilizada	405 <i>nm</i>



Figura 4.4 - Impressora Prusa SL1S. Adaptado de [87]

Tabela 4.5 - Características da impressora Prusa SL1S. Adaptado de [88, 89].

Características específicas da impressora	
Dimensões da impressora	225 × 237 × 400 <i>mm</i>
Propriedades de Impressão	
Tecnologia	LCD
Tipo de resina utilizada	Resina plástica no estado líquido
Volume de impressão	127 × 80 × 150 <i>mm</i>
Resolução típica das camadas	25 – 100 μm
Resolução XY	49 μm
Precisão no eixo Z	10 μm
Comprimento de onda da fonte de luz utilizada	405 <i>nm</i>

4.1.1.2 Rugosímetro

Para realizar o procedimento experimental recorreu-se a um rugosímetro da marca Mitutoyo modelo SJ210, que se representa na Figura 4.5.



Figura 4.5 - Mitutoyo SJ210. Adaptado de [90].

Este equipamento caracteriza-se pela facilidade de operação, flexibilidade de utilização, possibilidade de verificar a calibração a qualquer instante, capacidade de medir diversos parâmetros de medição, dentre os quais os principais parâmetros de rugosidade, e diversas opções de memória desde memória integrada para armazenamento, possibilidade de utilização de cartão de memória ou até de ligação USB a um computador [90].

4.2 Etapas do procedimento experimental

Relativamente às principais etapas do procedimento experimental estabeleceram-se:

- A impressão dos provetes para a experiência de *screening*
- A medição da rugosidade dos provetes
- O tratamento estatístico dos dados obtidos
- A impressão dos provetes para a MSR
- A medição das rugosidades dos provetes
- O tratamento estatístico segundo o *Central Composite Design*

Evidencia-se que antes da impressão dos provetes se realizou o planeamento das experiências, estabelecendo-se não só as características dos provetes como o seu número por forma a que representassem o domínio em estudo. Após a impressão de cada provete este foi devidamente identificado.

4.3 Planeamento de Experiências

No que toca ao planeamento de experiências, numa fase inicial realizou-se uma experiência de *screening* que permitiu identificar as variáveis potencialmente importantes. Em seguida, aplicou-se a MSR para estabelecer o número de ensaios necessários.

4.3.1 Screening

Quando um processo ou sistema é novo ou o conhecimento sobre o sistema em estudo é reduzido torna-se importante determinar quais os fatores que mais influenciam a resposta. Assim, realiza-se uma experiência inicial designada por *screening* em que se utiliza um baixo nível de fatores e uma região de interesse mais larga, para que a gama em que os fatores variem seja extensa [71].

Neste tipo de experiências é comum recorrer a estratégias em que se usa apenas uma réplica em cada ensaio dado o elevado número de fatores e um fatorial completo, considerando uma dependência linear entre a resposta e os fatores. Salienta-se que para evitar a existência de ruído se distribuem os valores dos fatores utilizados aumentando a distância entre níveis [71].

Posto isto, os fatores determinados como mais importantes são depois utilizados nas experiências seguintes [71].

No decorrer da presente dissertação foram realizadas no total 4 experiências de *screening* tal como se observa na . Em seguida, serão apresentadas detalhadamente as características de cada uma delas.

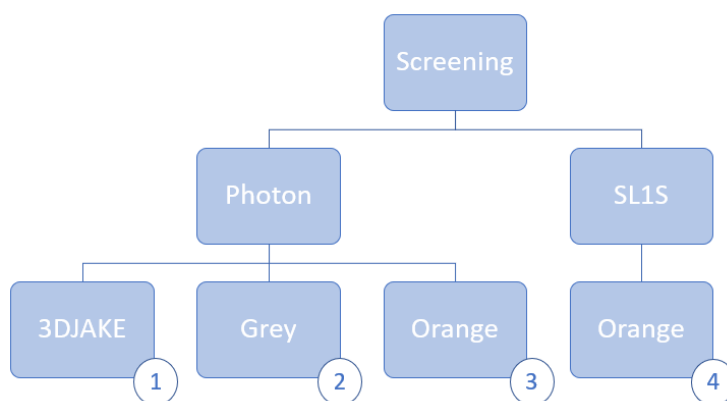


Figura 4.6 - Representação esquemática das 4 experiências de *screening* realizadas.

Nesta investigação, o elevado número de variáveis implicou a necessidade de realizar uma experiência de *screening* inicial com 4 fatores e com as seguintes características:

- Os níveis -1 e +1 correspondem a um desvio percentual em relação ao valor nominal correspondente ao 0;
- Os intervalos de variação estabelecidos para cada variável são:
 - Orientação: $[-5^{\circ}; 95^{\circ}]$
 - Espessura da camada: $[10; 100]$

- Tempo de exposição: [4; 8]
- Anti-aliasing: [2; 8]
- Cada provete foi impresso apenas uma vez, dado que não era necessário garantir a robustez do modelo;
- Todos os ensaios foram realizados aleatoriamente para colmatar a influência de fatores externos como, por exemplo, o aquecimento da impressora.

Todos os ensaios realizados durante a primeira experiência de *screening* com 4 fatores, ou seja, a experiência em que se utilizou a impressora Anycubic Photo Mono e a resina da 3DJake, tiveram ainda como parâmetros [91]–[94]:

- Tempo de lavagem: 10 min
- Tempo de cura: 30 min
- Distância de elevação em z: 6 mm
- Velocidade de elevação em z: 4 mm/s
- Velocidade de descida em z: 6 mm/s
- Número de camadas de base: 6
- Tempo de exposição de camadas de base: 40 s

Em seguida, realizaram-se duas experiências de *screening* com 3 fatores em que se utilizaram a resina Anycubic Grey e a resina Prusament Tough Orange, respetivamente, e a impressora Photon Mono. Em ambas as experiências os únicos parâmetros alterados foram o intervalo de variação do tempo de exposição e os tempos de cura e secagem, respetivamente, de:

- Tempo de exposição: [2; 6]
- Tempo de lavagem: 5 min
- Tempo de cura: 6 min

Posteriormente, realizou-se uma experiência de *screening* com a impressora Prusa SL1S e a resina Prusament Tough Orange em que se mantiveram os parâmetros da segunda experiência de *screening*, tendo-se apenas alterado os seguintes fatores [83]:

- Tempo de lavagem: 5 min
- Tempo de secagem a 45°: 3 min
- Tempo de cura: 3 min
- Tempo de exposição de camadas de base: 50 s

Salienta-se que os fatores foram escolhidos com base na opinião de especialistas na área.

Na Tabela 4.6 apresentam-se os parâmetros influentes para a realização da primeira experiência, bem como os valores codificados respetivos para cada um dos três níveis.

Tabela 4.6 - Valores utilizados para cada um dos níveis de cada uma das variáveis utilizadas.

Fator	Nível		
	-1	0	1
Orientação [°]	20	45	70
Espessura de camada [μm]	32.5	55	77.5
Tempo de Exposição [s]	5	6	7
<i>Anti-aliasing</i>	2	5	8

Assim, a Tabela 4.7 apresenta a matriz que define os parâmetros para cada um dos ensaios realizados para a experiência de *screening* com 4 variáveis, bem como a respectiva ordem.

Tabela 4.7 - Matriz de planejamento de experiências para um fatorial completo com 4 variáveis.

Ensaio n°	Orientação	Espessura	Tempo de exposição	<i>Anti-aliasing</i>
16	1	1	1	1
7	-1	1	1	-1
10	1	-1	-1	1
12	1	1	-1	1
3	-1	1	-1	-1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
11	-1	1	-1	1
8	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
15	-1	1	1	1
9	-1	-1	-1	1
2	1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
6	1	-1	1	-1

Na Tabela 4.8 apresentam-se os parâmetros influentes para a realização da segunda experiência, bem como os valores codificados respectivos para cada um dos três níveis.

Tabela 4.8 - Valores utilizados para cada um dos níveis de cada uma das variáveis utilizadas.

Fator	Nível		
	-1	0	1
Orientação [°]	20	45	70
Espessura de camada [μm]	32.5	55	77.5
Tempo de Exposição [s]	3	4	5

Assim, a Tabela 4.9 apresenta a matriz que define os parâmetros para cada um dos ensaios realizados para a experiência de *screening* com 3 variáveis, bem como a respectiva ordem.

Tabela 4.9 - Matriz de planeamento de experiências para um fatorial completo com 3 variáveis.

Ensaio nº	Orientação	Espessura	Tempo de exposição
4	1	1	-1
3	-1	1	-1
1	-1	-1	-1
8	1	1	1
2	1	-1	-1
6	1	-1	1
5	-1	-1	1
7	-1	1	1

4.3.2 Metodologia da Superfície de Resposta

Ao considerar os resultados da experiência de *screening* realizada, estabeleceu-se uma experiência para prever a rugosidade superficial em função da variação dos fatores escolhidos.

Estudo das Rugosidades

Na Tabela 4.10 apresentam-se os parâmetros influentes para determinar a rugosidade bem como os valores codificados respetivos para cada um dos cinco níveis. Salienta-se que os restantes parâmetros utilizados foram coincidentes com os da experiência de *screening* com 3 fatores realizada com a impressora SL1S e a resina Prusament Tough Orange

Tabela 4.10 - Valores utilizados para cada um dos níveis de cada uma das variáveis utilizadas.

Fator	Nível				
	-1.682	-1	0	1	1.682
Orientação [°]	-5	20	45	70	95
Espessura de Camada [μm]	10	32.5	55	77.5	100
Tempo de Exposição [s]	2	3	4	5	6

Assim, a Tabela 4.11, **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** apresenta a matriz que define os parâmetros para cada um dos ensaios realizados para um CCD com 3 variáveis, bem como a ordem de realização dos ensaios.

Tabela 4.11 - Matriz de planeamento de experiências para um CCD com 3 variáveis.

Réplica nº	Ensaio nº	Orientação	Espessura da Camada	Tempo de Exposição
2	34 (C)	0	0	0
1	10	1.682	0	0
1	3	-1	1	-1
3	47	0	-1.682	0
2	25	1	1	-1
2	21	-1	1	-1
1	14	0	0	1.682
3	44	1	1	1
1	12	0	1.682	0
1	4	-1	1	1
3	54(C)	0	0	0
1	2	-1	-1	1
3	45	-1.682	0	0
2	35(C)	0	0	0
2	20	-1	-1	1
3	46	1.682	0	0
3	42	1	-1	1
3	37	-1	-1	-1
3	48	0	1.682	0
1	1	-1	-1	-1
3	41	1	-1	-1
1	7	1	1	-1
3	53(C)	0	0	0
2	30	0	1.682	0
3	39	-1	1	-1
3	38	-1	-1	1
1	11	0	-1.682	0
1	16(C)	0	0	0
3	49	0	0	-1.682
1	8	1	1	1
2	26	1	1	1
2	31	0	0	-1.682
2	19	-1	-1	-1
1	9	-1.682	0	0
1	18(C)	0	0	0
2	23	1	-1	-1
3	52(C)	0	0	0
3	43	1	1	-1

2	28	1.682	0	0
2	36(C)	0	0	0
3	50	0	0	1.682
2	24	1	-1	1
2	33(C)	0	0	0
3	51(C)	0	0	0
1	17(C)	0	0	0
1	15(C)	0	0	0
2	22	-1	1	1
2	27	-1.682	0	0
1	5	1	-1	-1
2	32	0	0	1.682
1	13	0	0	-1.682
2	29	0	-1.682	0
1	6	1	-1	1
3	40	-1	1	1

ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O presente capítulo visa apresentar a análise detalhada de cada uma das experiências efetuadas, bem como os conceitos estatísticos subjacentes à sua interpretação que não foram previamente apresentados.

5.1 Experiência de Screening

Após a impressão dos 16 provetes iniciais, efetuaram-se as medições da sua rugosidade superficial. Mediram-se 3 valores de rugosidade em cada uma das duas faces escolhidas que se representam na Figura 5.1, perfazendo um total de 96 medições.



Figura 5.1- Faces dos provetes onde se efetuaram medidas durante os ensaios experimentais.

Os resultados decorrentes da análise estatística dos dados obtidos recorrendo ao software *Statistica* encontram-se no Anexo A.

Ao considerar a análise estatística desenvolvida em que se observou a influência de cada um dos fatores nos principais parâmetros de rugosidade da face A e da face B, cuja tabela resumo se representa na Tabela 5.1, surgiu a necessidade de efetuar uma segunda experiência de *screening* mudando o material. Isto deveu-se por um lado aos valores reduzidos dos coeficientes de correlação na face A, o que pode indicar que as variáveis consideradas não eram as mais influentes ou a ausência de outros fatores influentes, por outro lado à disparidade dos resultados obtidos na face A e B, que se pode associar com a presença de valores de rugosidade estatisticamente insignificativos para a combinação impressora resina considerada.

Tabela 5.1 - Parâmetros influentes para as faces A e B com a resina 3DJAKE.

	R_{aA}	R_{qA}	R_{zA}	R_{skA}	R_{kA}	R_{pkA}	R_{vkA}	R_{aB}	R_{qB}	R_{zB}	R_{skB}	R_{kB}	R_{pkB}	R_{vkB}
Orientação (1)														
Espessura (2)								x	x	x		x	x	x
Tempo de Exposição (3)						x								
Anti-alising (4)								x	x		x			
1 by 2														
1 by 3						x								
1 by 4														
2 by 3														
2 by 4														
3 by 4														

Na segunda experiência de *screening* realizada foram impressos 8 provetes e seguindo o mesmo procedimento da primeira experiência foram efetuadas 48 medições.

Os resultados da análise estatística dos dados obtidos, nomeadamente, as tabelas ANOVA para cada um dos parâmetros estudados representam-se no Anexo B. Na Tabela 5.2 apresentam-se os fatores influentes para cada um dos parâmetros de rugosidade. Recorrendo à observação das tabelas ANOVA obtidas verifica-se um melhor ajuste dos valores obtidos e dos fatores considerados influentes para esta resina, o que é evidenciado pelos valores dos coeficientes de correlação quase unitários. Observa-se um predomínio dos fatores influentes para os parâmetros medidos na face B, o que se associa com o menor efeito de escada e, portanto, com valores estatisticamente mais significativos de rugosidade.

Tabela 5.2 - Parâmetros influentes para as faces A e B com a resina Grey

	R_{aA}	R_{qA}	R_{zA}	R_{skA}	R_{kA}	R_{pkA}	R_{vkA}	R_{aB}	R_{qB}	R_{zB}	R_{skB}	R_{kB}	R_{pkB}	R_{vkB}
Orientação (1)													x	x
Espessura (2)								x	x					x
Tempo de Exposição (3)													x	
1 by 2													x	x
1 by 3													x	x
2 by 3											x			x

Considerando os resultados obtidos e a disparidade entre os fatores estatisticamente significativos obtidos para as faces A e B, optou-se por realizar uma terceira experiência de *screening* com a resina Prusament Tough Orange.

No anexo C disponibilizam-se as respectivas tabelas ANOVA para cada um dos parâmetros de rugosidade investigados. A Tabela 5.3 resume os parâmetros influentes para cada variável analisada. Da observação das tabelas ANOVA verifica-se que a maioria dos coeficientes de correlação se mantêm próximos da unidade, pelo que existe um bom ajuste dos resultados obtidos. Tal como se observa na Tabela 5.3, verifica-se a maior expressividade dos fatores influentes para a face A.

Tabela 5.3 - Parâmetros influentes para as faces A e B com a resina Orange

	R_{aA}	R_{qA}	R_{zA}	R_{skA}	R_{kA}	R_{pkA}	R_{vkA}	R_{aB}	R_{qB}	R_{zB}	R_{skB}	R_{kB}	R_{pkB}	R_{vkB}
Orientação (1)	x	x	x		x		x							
Espessura (2)	x				x		x							
Tempo de Exposição (3)														
1 by 2							x							
1 by 3														
2 by 3														

Na quarta experiência de *screening* realizada com a Prusa SL1S e a Prusament Tough Orange foram impressos 8 provetes e seguindo o mesmo procedimento da primeira experiência foram efetuadas 48 medições.

No anexo D encontram-se as tabelas ANOVA obtidas apartir da análise estatística. Na Tabela 5.4 representa-se uma tabela resumo com os fatores influentes obtidos para cada parâmetro de rugosidade. Recorrendo à sua observação verificam-se bons coeficientes de correlação para a maioria dos parâmetros, o que indica um bom ajuste dos resultados e, tal como na experiência de *screening* anterior, verifica-se um predomínio dos fatores influentes para os diversos parâmetros de rugosidade para a face A. Isto indica que a maior incidência de fatores influentes na face A comparativamente à da face B pode estar associada com a resina estudada, nomeadamente com as suas propriedades, tais como, a sua viscosidade.

Tabela 5.4 - Parâmetros influentes para as faces A e B com a resina Orange

	R_{aA}	R_{qA}	R_{zA}	R_{skA}	R_{kA}	R_{pkA}	R_{vkA}	R_{aB}	R_{qB}	R_{zB}	R_{skB}	R_{kB}	R_{pkB}	R_{vkB}
Espessura (1)	x	x	x		x		x							
Orientação (2)	x	x	x		x		x						x	x
Tempo de Exposição (3)			x		x									
1 by 2		x	x		x		x							
1 by 3					x									
2 by 3					x									

Considerando os fatores influentes comuns aos diversos parâmetros de rugosidade analisados para a experiência de *screening* com a Prusa SL1S e a resina Prusament Tough Orange selecionaram-se todos os fatores inicialmente considerados como estatisticamente significativos. Assim, todos os 3 fatores foram utilizados para o estudo da MSR.

Comparação dos resultados obtidos nas duas impressoras com a resina Orange

Considerando as experiências de *screening* de 3 fatores realizadas com a resina Prusament Orange Tough e as impressoras Prusa SL1S e Anycubic Photon Mono, cujos resultados se apresentam nos anexos C e D, é previsível que a rugosidade dependa não só da resina selecionada como da impressora. Tal hipótese deriva da utilização da mesma resina com parâmetros de impressão bastante semelhantes e da diferença de fatores significativos obtidos para as experiências realizadas com impressoras diferentes.

5.2 Metodologia da Superfície de Resposta

Após a seleção das variáveis significativas, efetuou-se o plano experimental para a realização da metodologia da superfície de resposta, em que se estabeleceu a impressão de 18 provetes, replicados 2 vezes o que perfaz um total de 54 provetes. De forma análoga ao procedimento seguido na experiência de *screening* foram realizadas 3 medições por cada uma das duas faces analisadas, perfazendo um total de 324 medições.

Na Figura 5.2 ilustram-se as tabelas ANOVA obtidas para o parâmetro Ra para a face A e B, respetivamente. No anexo E representam-se as restantes tabelas ANOVA obtidas apartir da análise estatística dos dados para os diferentes parâmetros de rugosidade analisados. As tabelas com os resultados experimentais e a análise residual também se encontram disponibilizados no anexo E.

ANOVA; Var.:RaA; R-sqr=.80592; Adj.:.76622 3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=1 DV: RaA						ANOVA; Var.:RaB; R-sqr=.94326; Adj.:.93165 3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=1 DV: RaB					
Factor	SS	df	MS	F	p	Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	65.4587	1	65.4587	35.3349	0.000000	(1)Orientação(L)	2.5657	1	2.5657	2.0627	0.158013
Orientação(Q)	7.1233	1	7.1233	3.8452	0.056238	Orientação(Q)	78.5632	1	78.5632	63.1621	0.000000
(2)Espessura(L)	202.9862	1	202.9862	109.5728	0.000000	(2)Espessura(L)	737.8436	1	737.8436	593.2006	0.000000
Espessura(Q)	13.4233	1	13.4233	7.2460	0.010011	Espessura(Q)	55.9557	1	55.9557	44.9864	0.000000
(3)Texposição(L)	0.3144	1	0.3144	0.1697	0.682378	(3)Texposição(L)	18.0746	1	18.0746	14.5314	0.000425
Texposição(Q)	6.6784	1	6.6784	3.6050	0.064176	Texposição(Q)	0.4114	1	0.4114	0.3308	0.568125
1L by 2L	35.4464	1	35.4464	19.1341	0.000074	1L by 2L	3.0327	1	3.0327	2.4381	0.125581
1L by 3L	0.4221	1	0.4221	0.2279	0.635466	1L by 3L	0.9702	1	0.9702	0.7800	0.381949
2L by 3L	2.0360	1	2.0360	1.0991	0.300198	2L by 3L	22.6398	1	22.6398	18.2016	0.000104
Error	81.5111	44	1.8525			Error	54.7287	44	1.2438		
Total SS	419.9885	53				Total SS	964.4941	53			

Figura 5.2 – Tabelas ANOVA para o parâmetro Ra para a face A e B, respetivamente.

As tabelas retiradas do software STATISTICA apresentam a vermelho as variáveis consideradas influentes para a resposta analisada. Salienta-se que estas variáveis são tidas como significativas em função do valor de F proveniente da tabela representada no Anexo A, que é função dos graus de liberdade de regressão, das variações dos resíduos e do intervalo de confiança adotado associados, respetivamente, a $p - 1$ e $N - p$ e α , tal como referido no subcapítulo 3.4. Estes valores podem ser retirados das tabelas ANOVA, dado que $p - 1$ figura nestas tabelas como “df” para cada uma das variáveis estudada, $N - p$ corresponde ao valor de “df” associado ao resto, ou seja, ao “Error” e o valor de α foi considerado 0.05 para que o intervalo de confiança fosse de 95%. Salienta-se que o valor de F é obtido utilizando “df” como entrada nas colunas da tabela F de Fisher do Anexo A e o valor de “Error” nas linhas.

Assim, tal como referido no capítulo 3.4 a hipótese nula é rejeitada, isto é, uma variável é estatisticamente significativa se o seu valor de F for superior ao valor de F tabelado para o valor de α estabelecido.

Destaca-se ainda que os valores dos coeficientes de correlação e do coeficiente de correlação ajustado, respetivamente, R^2 e R_A^2 , apresentados no subcapítulo 3.4, também se encontram nas tabelas ANOVA supramencionadas.

Assim, pode concluir-se que as variáveis influentes para o parâmetro Ra para a face A são a orientação (linear), a espessura (linear e quadrática) e a influência da orientação pela espessura. Quanto à face B tem como fatores influentes a orientação (quadrática), a espessura (linear e quadrática), o tempo de exposição (linear) e a influência da espessura pelo tempo de exposição.

Na Figura 5.3 representam-se os gráficos de Pareto para o parâmetro Ra para a face A e para a face B.

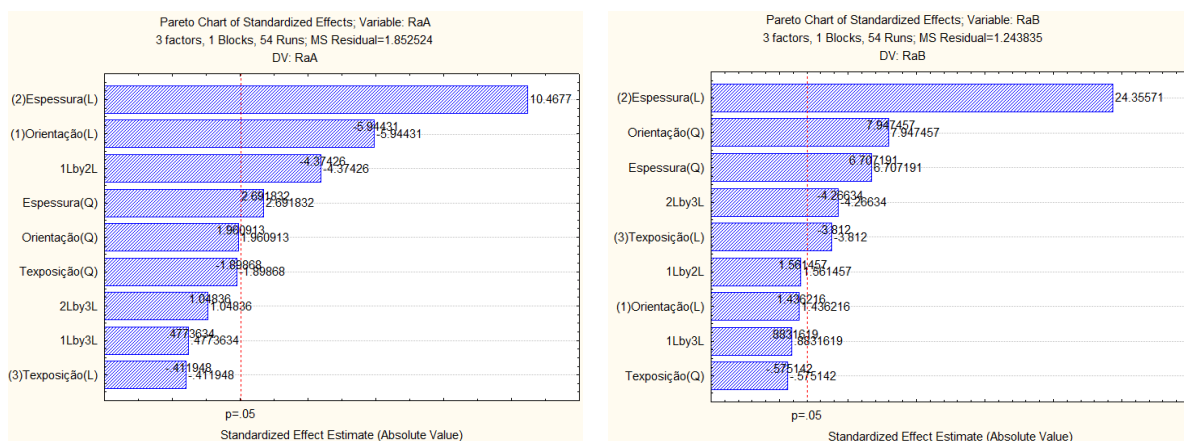


Figura 5.3 - Gráficos de Pareto para o parâmetro Ra para a face A e B, respetivamente.

No anexo E representam-se os gráficos de Pareto para cada um dos parâmetros de rugosidade estudados por forma a que a análise da significância de cada fator seja melhor percecionada. Destaca-se que nestes gráficos se pode observar não só a importância relativa de cada variável independente como também a importância do cruzamento de fatores, imprescindível num método multifatorial. Deste modo, a linha vertical vermelha representada em cada um dos gráficos indica a região apartir da qual o valor do teste “t” tabelado ultrapassa o correspondente valor calculado, ou seja, a região apartir da qual as variáveis passam a ser estatisticamente significativas.

A determinação das variáveis significativas faz-se recorrendo ao teste “t”. O valor calculado de t obtém-se através do quociente do coeficiente de correlação e do respetivo erro. Em seguida, este valor é comparado com o valor tabelado da distribuição “t-student”. Caso o valor determinado for superior ao tabelado o fator é tido como significativo. Salienta-se que o valor de t pode ser negativo indicando neste caso uma influência decrescente na resposta.

No Anexo A representa-se a tabela “t-student”.

Seguidamente, analisaram-se as superfícies de resposta para cada variável. Estas superfícies adquirem uma importância fundamental neste tipo de análise estatística, uma vez que permitem inferir a influência na resposta de qualquer combinação de dois fatores. Destaca-se que se considerou o terceiro fator, que não consta nos gráficos das superfícies de resposta obtidos, no nível 0. Salienta-se que os valores da legenda das figuras representam a rugosidade medida em μm .

Na Figura 5.4 representa-se a superfície de resposta para a rugosidade Ra da face A em função da espessura e da orientação, dado serem as variáveis obtidas como significativas.

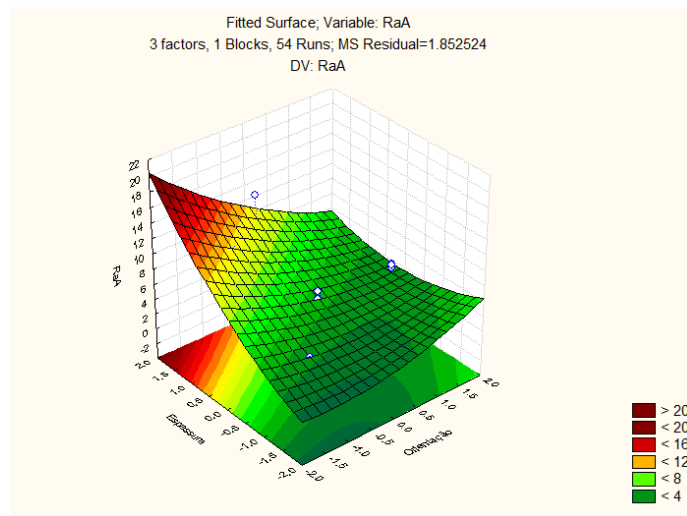


Figura 5.4 - Superfície de resposta para a rugosidade superficial Ra da face A em função da orientação e da espessura, considerando o tempo de exposição no nível 0.

Ao analisar a superfície observa-se que a rugosidade máxima ocorre quando a espessura é máxima e a orientação é mínima, o que coincide com a face praticamente perpendicular à plataforma de impressão. Quanto à rugosidade mínima obtém-se para a espessura mínima e valores de orientação reduzidos, ou seja, inferiores a 45°.

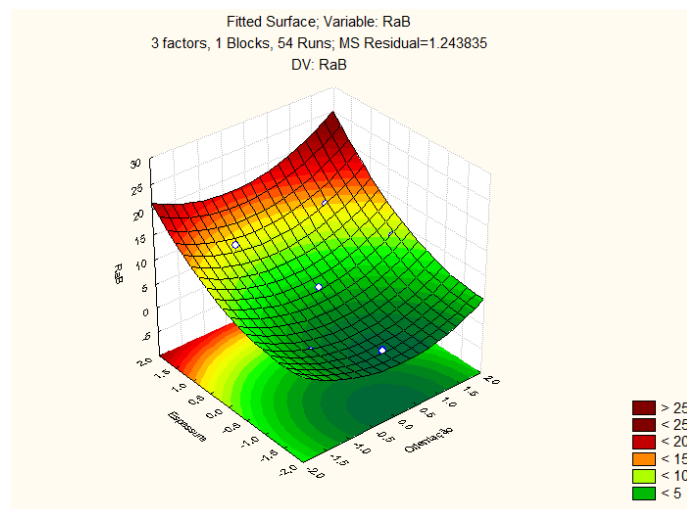


Figura 5.5 - Superfície de resposta para a rugosidade superficial Ra da face B em função da orientação e da espessura, considerando o tempo de exposição no nível 0.

Apartir da observação da superfície de resposta, representada na Figura 5.5, conclui-se que a rugosidade máxima se observa para os maiores valores de espessura de camada e os maiores valores de orientação, o que corresponde a uma posição da face praticamente perpendicular à plataforma de impressão, a que se associa a um maior efeito de escada. Relativamente aos menores obtém-se para os menores valores de espessura e orientação em torno dos 45°.

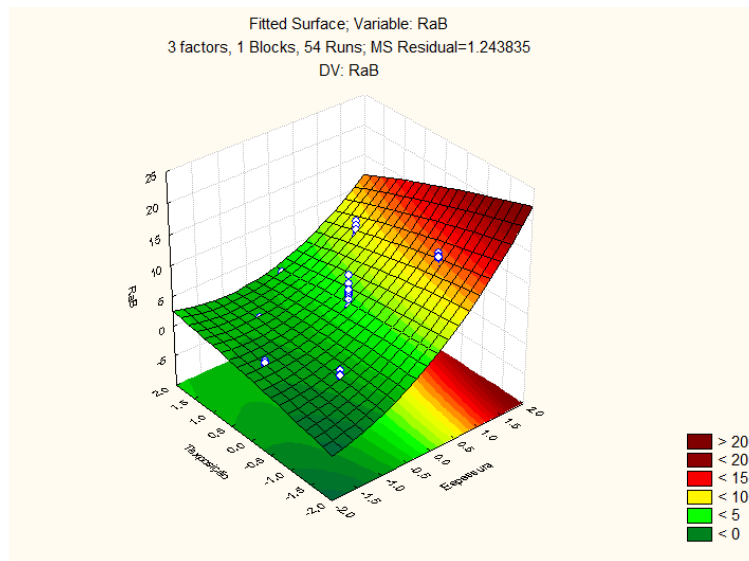


Figura 5.6 - Superfície de resposta para a rugosidade superficial Ra da face B em função do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.

Apartir da observação da superfície de resposta, representada na Figura 5.6, conclui-se que a rugosidade máxima se observa para os maiores valores de espessura de camada e os menores valores de tempo de exposição. Relativamente aos menores obtêm-se para os menores valores de tempo de exposição e de espessura de camada. Estas observações são consistentes com a influência predominante da espessura de camada relativamente ao tempo de exposição.

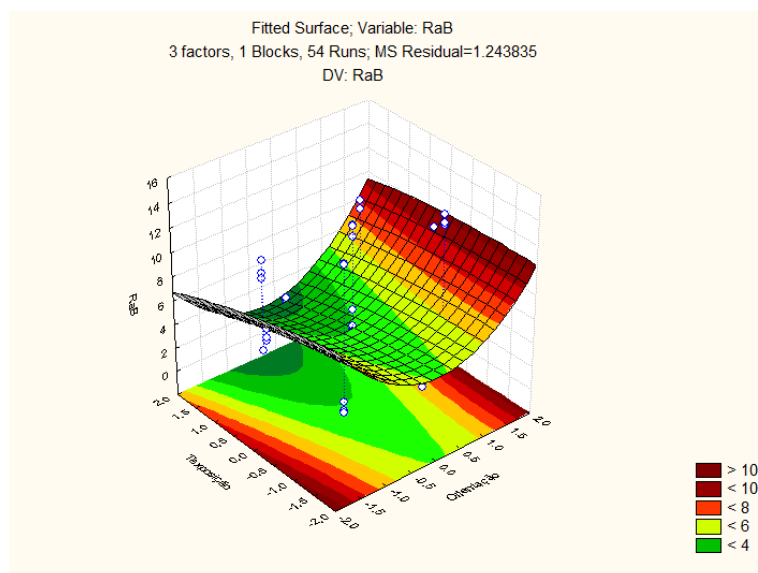


Figura 5.7 - Superfície de resposta para a rugosidade superficial Ra da face B em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.

Recorrendo à observação da superfície de resposta da Figura 5.7 verifica-se que os maiores valores de rugosidade se associam com o menor tempo de exposição e a menor orientação e com o menor tempo de exposição e a maior orientação, correspondendo às situações em que a face B se encontra praticamente horizontal ou praticamente vertical. Na primeira situação a maior rugosidade

pode estar associada com alguns riscos existentes na base do reservatório de impressão inerentes ao desgaste da impressora. A segunda pode dever-se ao efeito de escada mais intenso nas superfícies quase perpendiculares à plataforma de impressão.

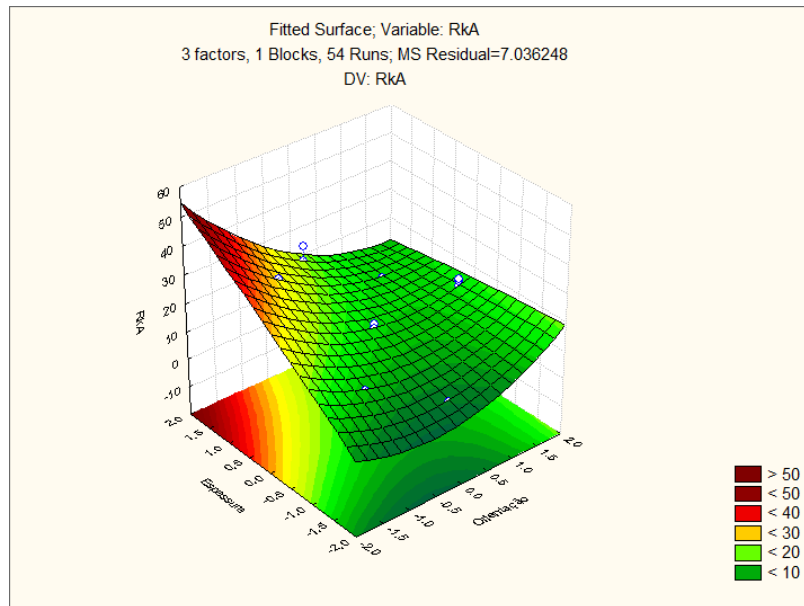


Figura 5.8 - Superfície de resposta para RkA em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.

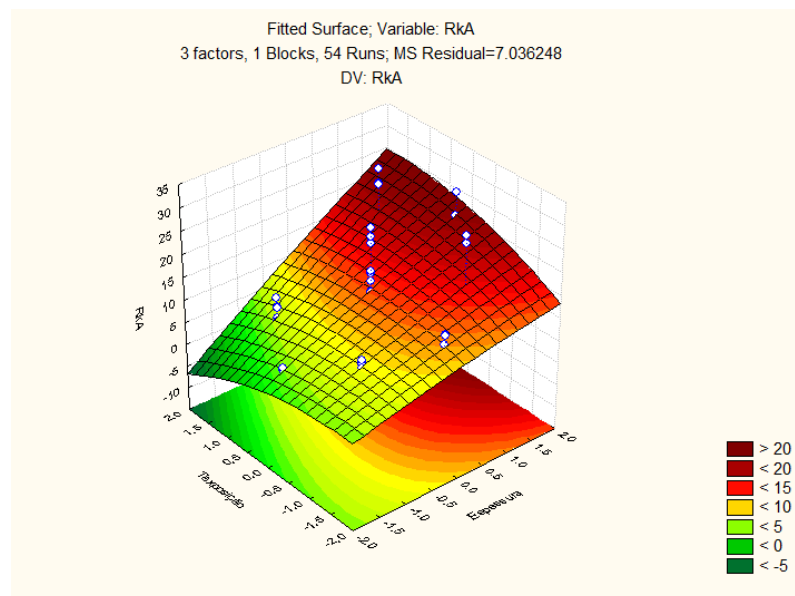


Figura 5.9 - Superfície de resposta para RkA em função do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.

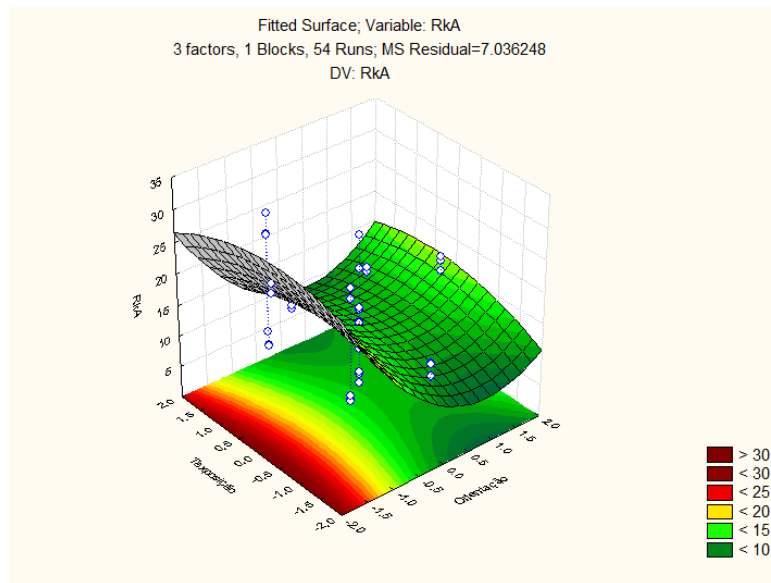


Figura 5.10 - Superfície de resposta para RkA em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.

Recorrendo à análise das superfícies de resposta para o parâmetro RkA, representada na Figura 5.8, verifica-se que a maior rugosidade se associa com a maior espessura e a menor orientação e a menor com a menor espessura e uma orientação média. Considerando a superfície obtida em função do tempo de exposição e da espessura, representada na Figura 5.9, infere-se que a maior rugosidade se obtém para os valores de tempo de exposição mais elevados e a maior espessura e a menor para o maior tempo de exposição e a menor espessura. Relativamente à superfície obtida em função da orientação e do tempo de exposição, representada na Figura 5.10, verifica-se que a maior rugosidade se obtém para a menor orientação e os valores de tempo de exposição mais reduzidos e a menor tanto para o maior como para o menor tempo de exposição e os valores de orientação mais elevados.

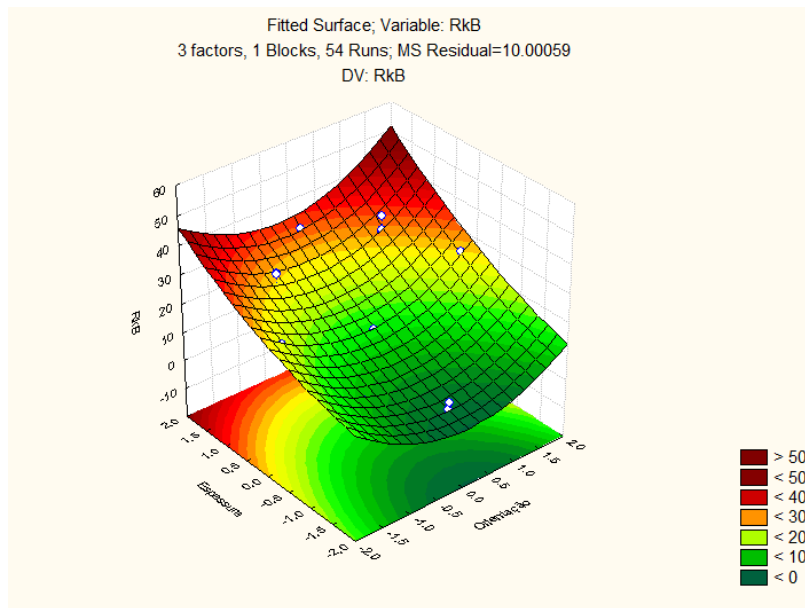


Figura 5.11 - Superfície de resposta para RkB em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.

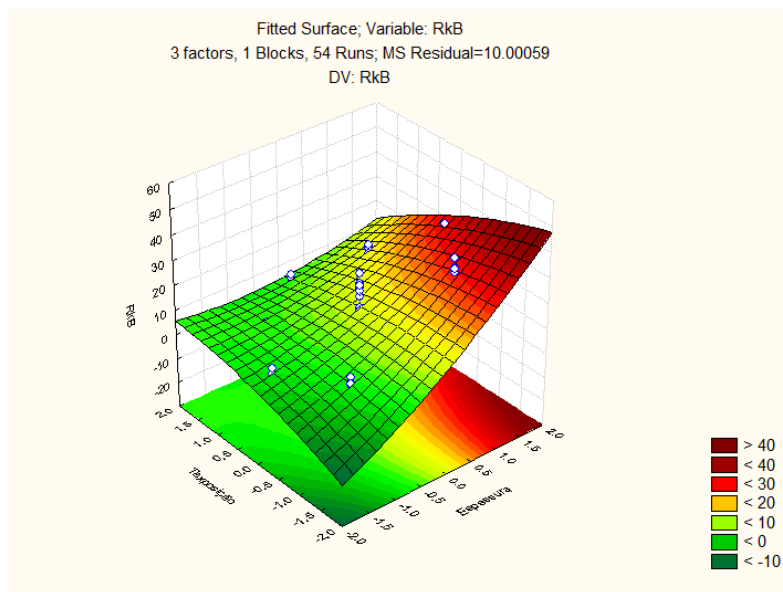


Figura 5.12 - Superfície de resposta para RkB em função do tempo do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.

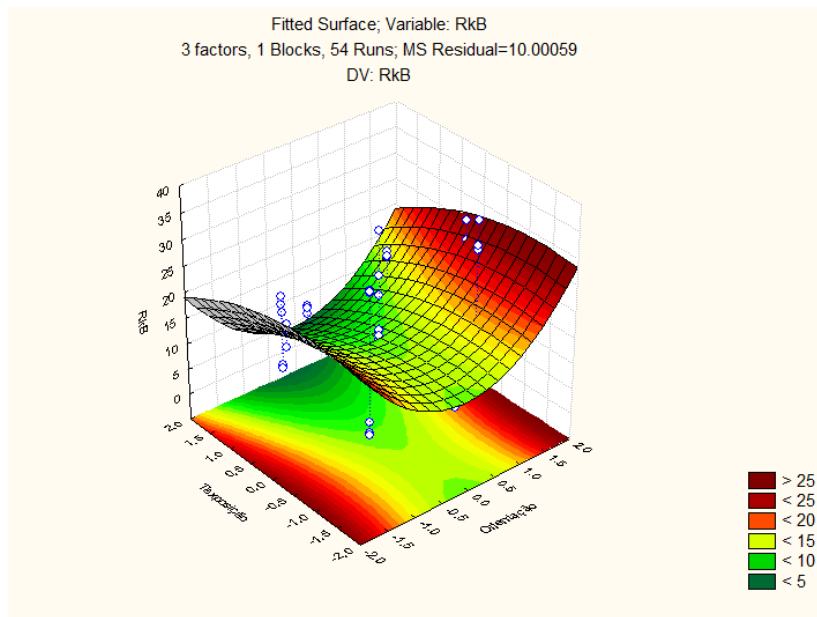


Figura 5.13 - Superfície de resposta para RkB em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.

Relativamente ao parâmetro RkB, representada na

Figura 5.11, verifica-se que a maior rugosidade se obtém para a maior orientação e a maior espessura e a menor para uma orientação em torno dos 45° e a menor espessura. Da superfície de resposta que combina a espessura e o tempo de exposição, representada na Figura 5.12, verifica-se que a maior rugosidade se obtém para a maior espessura e o menor tempo de exposição e a menor para a menor espessura e o menor tempo de exposição. Apartir da superfície obtida em função da orientação e do tempo de exposição, representada na Figura 5.13, conclui-se que a maior rugosidade se obtém para os valores de orientação mais elevados e o menor tempo de exposição e a menor para os valores médios de orientação, correspondentes a 45°, e o maior de exposição.

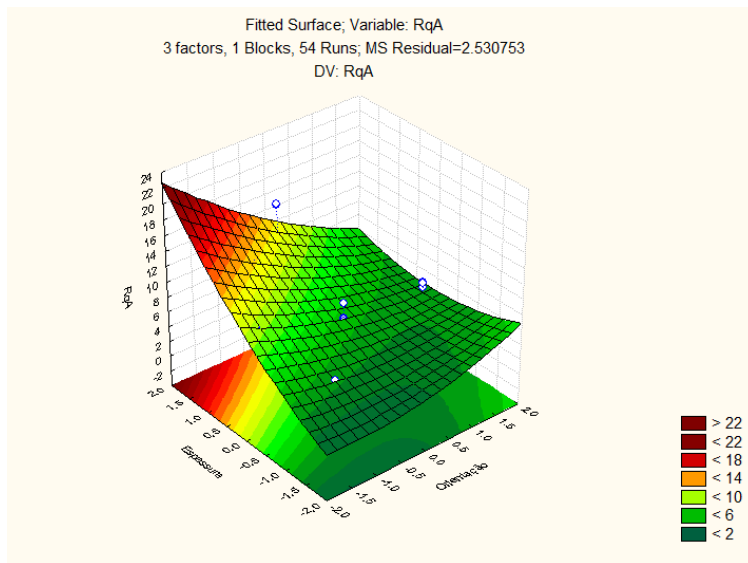


Figura 5.14 - Superfície de resposta para RqA em função do tempo da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.

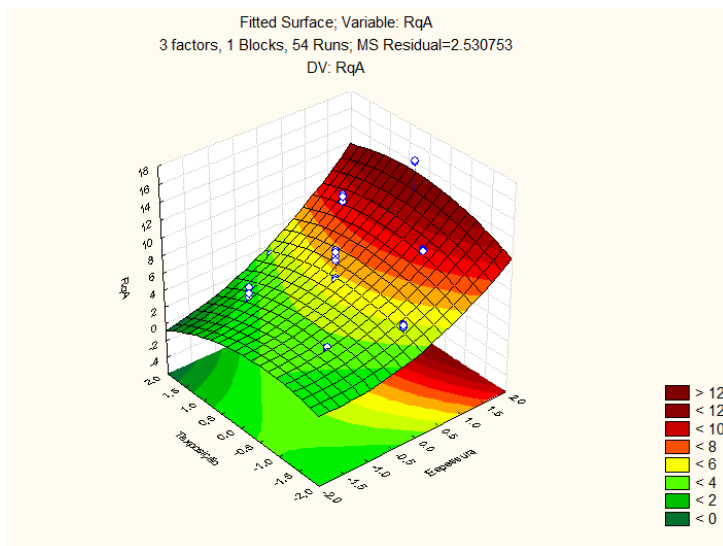


Figura 5.15 - Superfície de resposta para RqA em função do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.

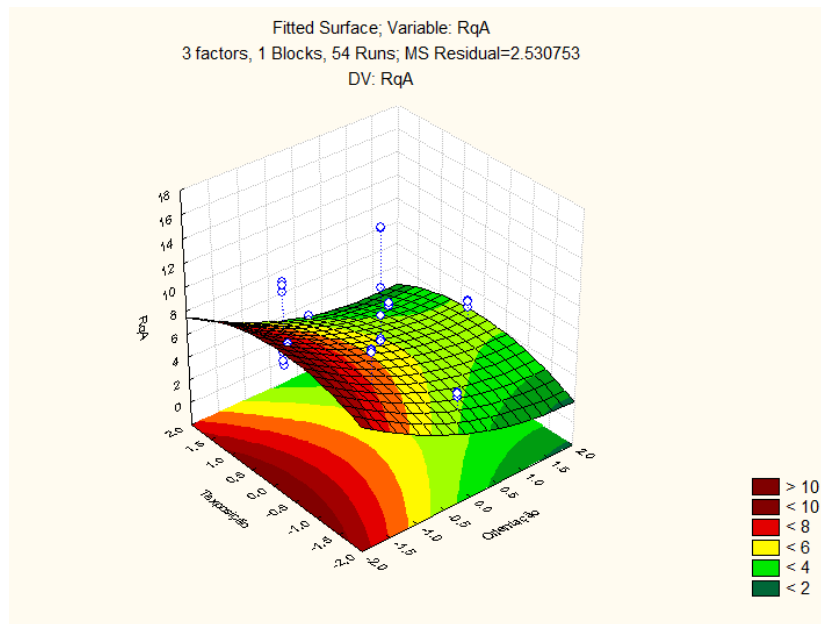


Figura 5.16 - Superfície de resposta para RqA em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.

Apartir da observação das superfícies de resposta para o parâmetro RqA, representada na Figura 5.14, verifica-se que o maior valor de rugosidade se observa para a menor orientação e a maior espessura e a menor para a menor orientação e as espessuras mais reduzidas. Considerando a superfície obtida em função do tempo de exposição e da espessura, representada na Figura 5.15, infere-se que a maior rugosidade se obtém para os valores de tempo de exposição mais elevados e a maior espessura e a menor para o maior tempo de exposição e a menor espessura. Relativamente à superfície obtida em função da orientação e do tempo de exposição, representada na Figura 5.16, verifica-se que a maior rugosidade se obtém para a menor orientação e os valores de tempo de exposição mais reduzidos e a menor para a maior orientação e o menor tempo de exposição.

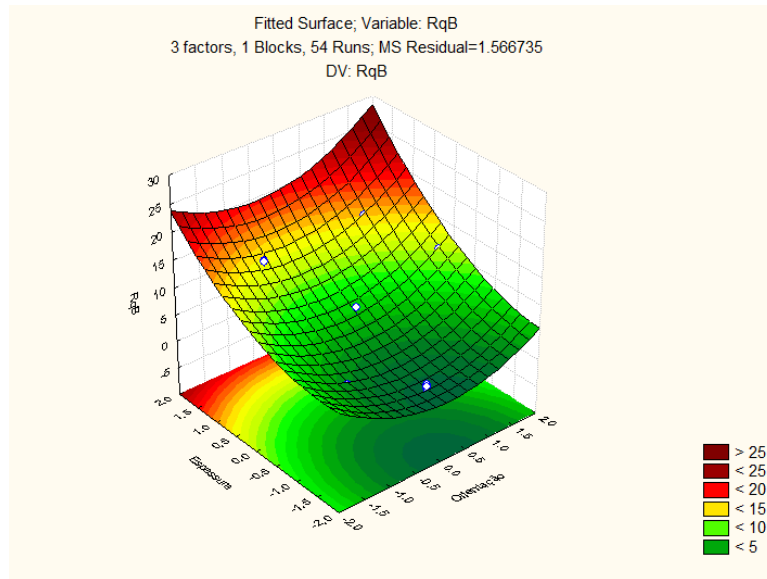


Figura 5.17 - Superfície de resposta para RqB em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.

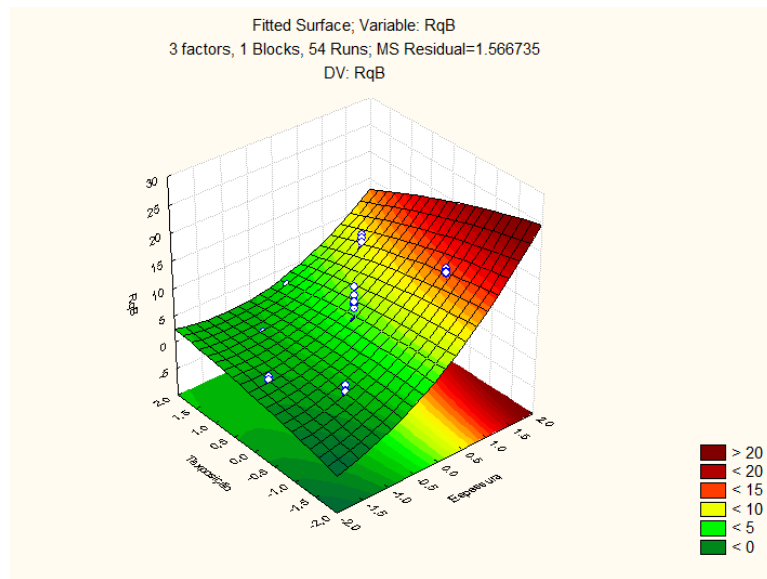


Figura 5.18 - Superfície de resposta para RqB em função do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.

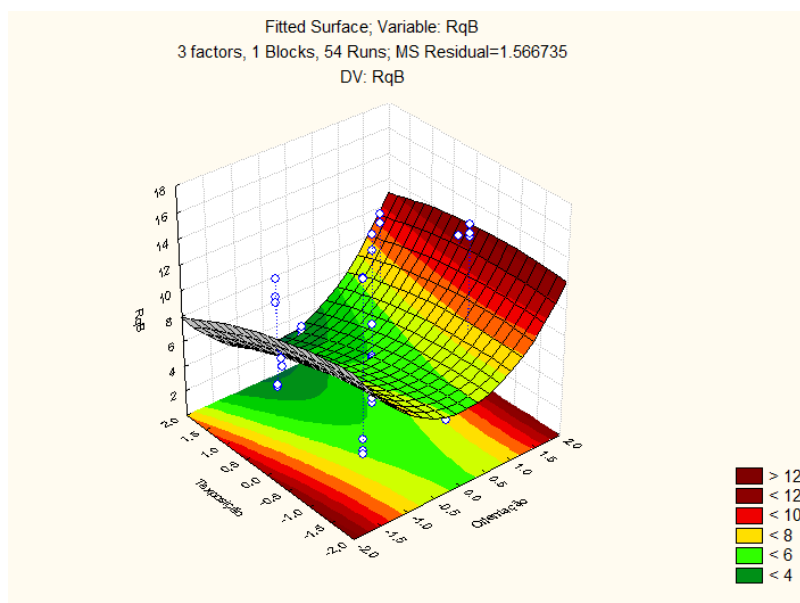


Figura 5.19 - Superfície de resposta para RqB em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.

No que diz respeito ao parâmetro RqB, representada na Figura 5.18, facilmente se verifica que a maior rugosidade se obtém para a maior orientação e a maior espessura e a menor para uma orientação em torno dos 45° e a menor espessura. Da superfície de resposta que combina a espessura e o tempo de exposição, representada na Figura 5.19, verifica-se que a maior rugosidade se obtém para a maior espessura e o menor tempo de exposição e a menor para a menor espessura e o menor tempo de exposição. Apartir da superfície obtida em função da orientação e do tempo de exposição, representada na, conclui-se que a maior rugosidade se obtém para a maior orientação e os valores de tempo de exposição mais reduzidos e para a menor orientação e o menor tempo de exposição. Quanto à menor rugosidade dá-se para o menor tempo de exposição e a orientação em torno do nível 0, que corresponde a 45°.

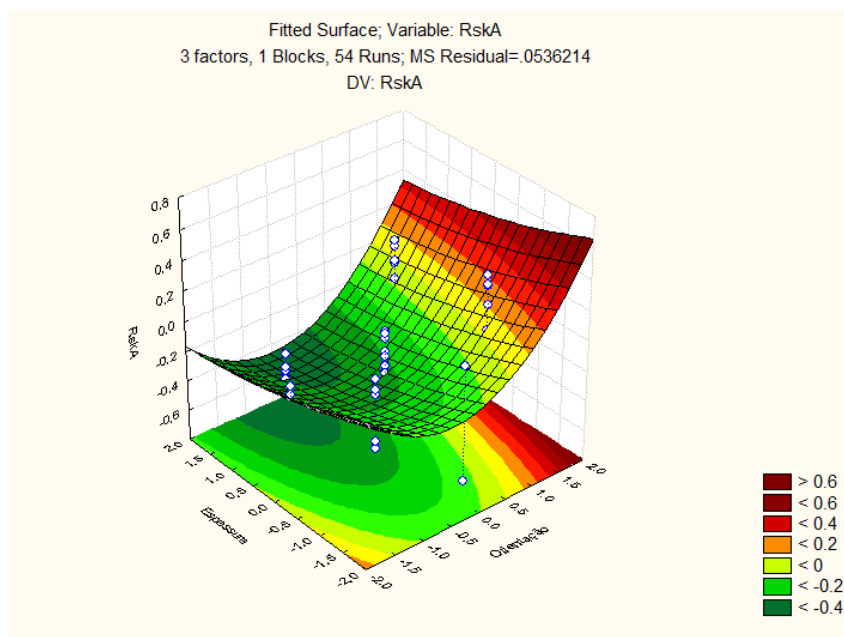


Figura 5.20 - Superfície de resposta para RskA em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.

Relativamente ao parâmetro RskA, representado na Figura 5.20, a maior rugosidade obtém-se para a maior orientação e a menor espessura e a menor para a maior espessura e a orientação em torno de valores mais baixos, próximos do nível -0.5.

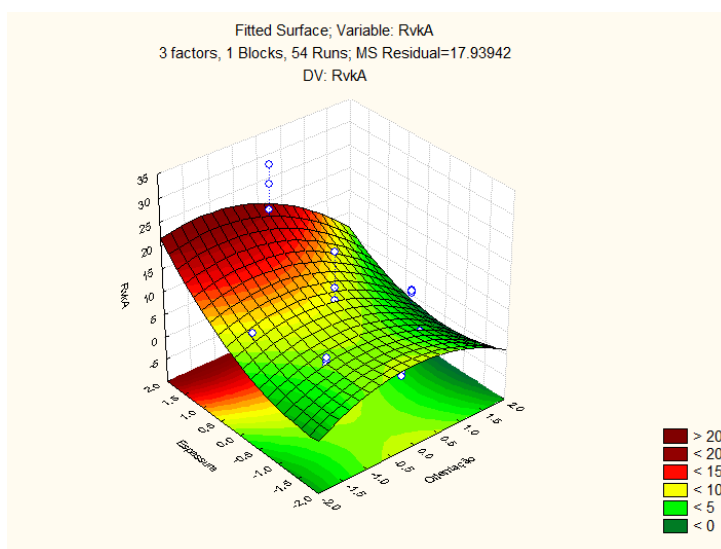


Figura 5.21 - Superfície de resposta para RvkA em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.

Recorrendo à observação da superfície de resposta para o parâmetro RvkA, representada na Figura 5.21, a maior rugosidade obteve-se para a maior espessura e a menor orientação e a menor para os valores de espessura mais reduzidos e a maior orientação.

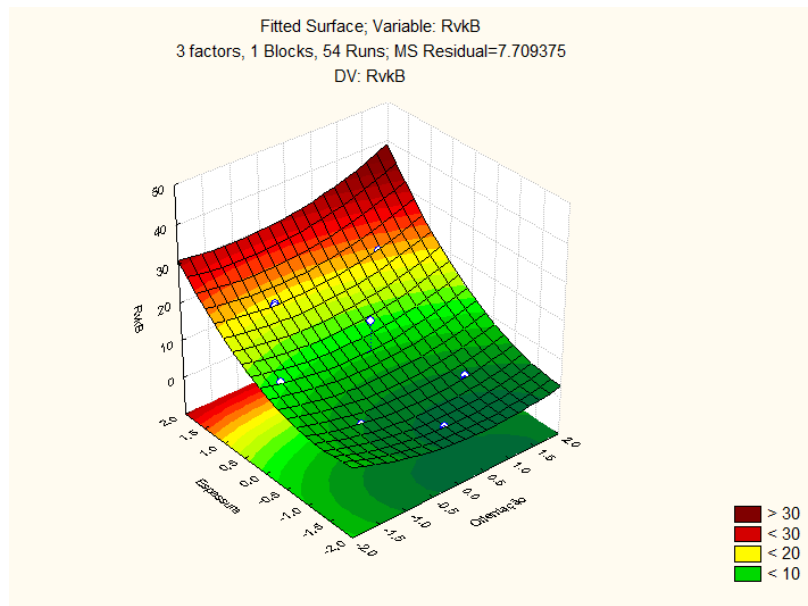


Figura 5.22 - Superfície de resposta para RvkB em função da orientação e da espessura, considerando o tempo de exposição no nível 0.

Apartir da observação da superfície de resposta para RvkB, representada na Figura 5.22, verifica-se que a maior rugosidade ocorreu para a maior espessura e a maior orientação e a menor para orientação em torno de 0.5 e a menor espessura.

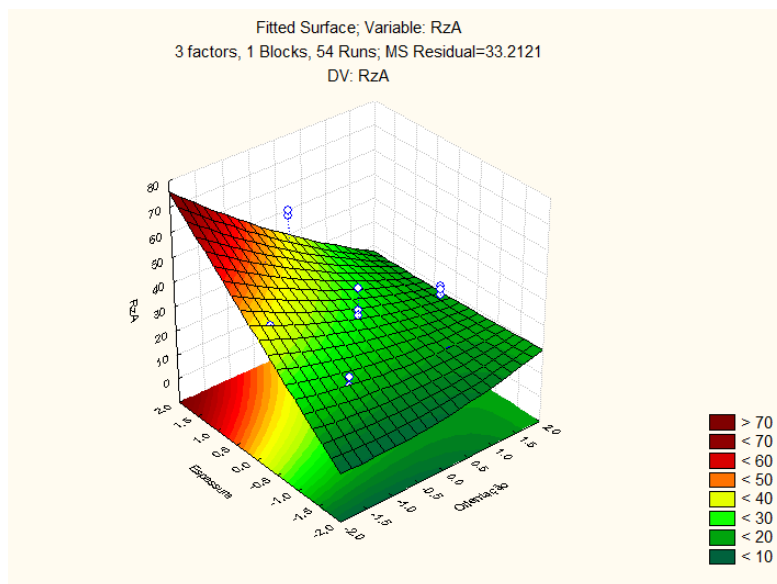


Figura 5.23 - Superfície de resposta para RzA em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.

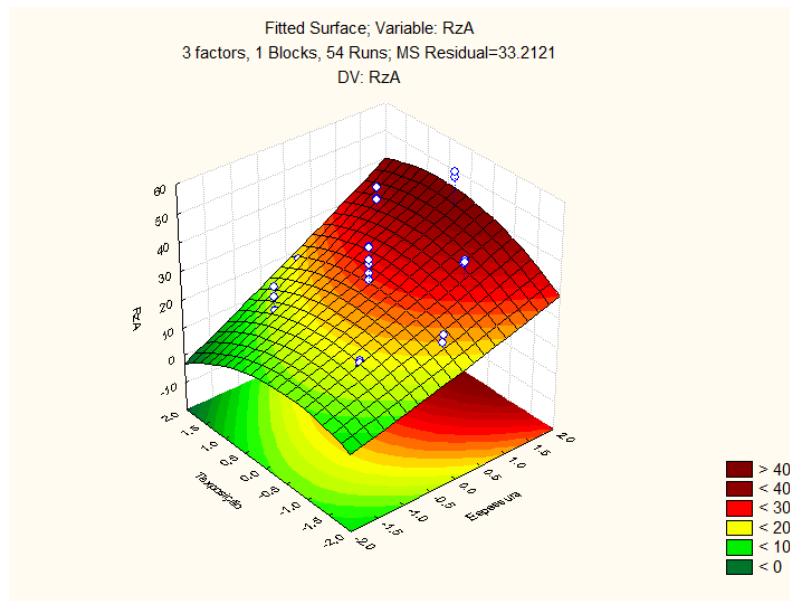


Figura 5.24 - Superfície de resposta para RZA em função do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.

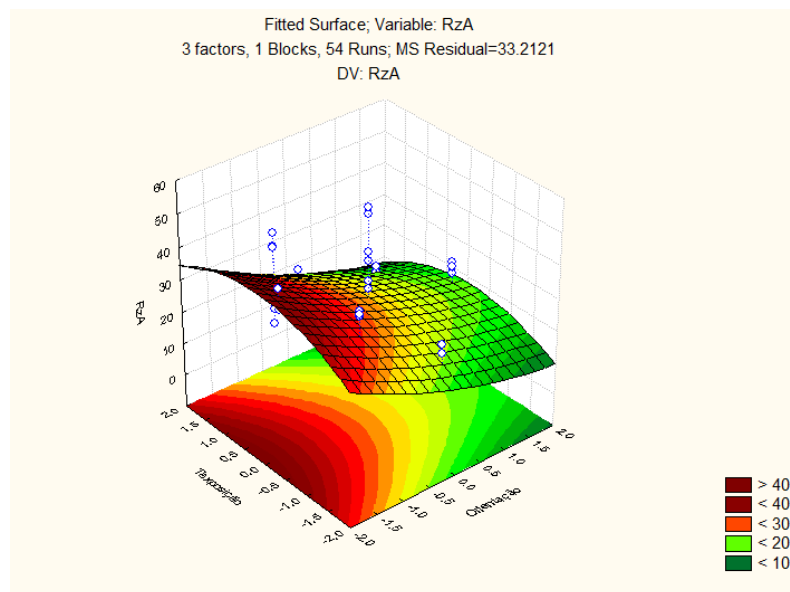


Figura 5.25 - Superfície de resposta para RZA em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.

Quanto à superfície de resposta do parâmetro RZA em função da orientação e da espessura, representada na Figura 5.23, a maior rugosidade obteve-se para a menor orientação e a maior espessura e a menor para a menor espessura e a orientação mais reduzida. Para a superfície que combina a espessura e o tempo de exposição, representada na Figura 5.24, verificou-se que a maior rugosidade estava associada com a maior espessura e os tempos de exposição mais elevados e a menor com a menor espessura e o maior tempo de exposição. Para a combinação da orientação com o tempo de exposição,

representada na Figura 5.25, infere-se que a maior rugosidade se obteve para a menor orientação e tempos de exposição em torno do nível 0 e a maior para a maior orientação e menor tempo de exposição.

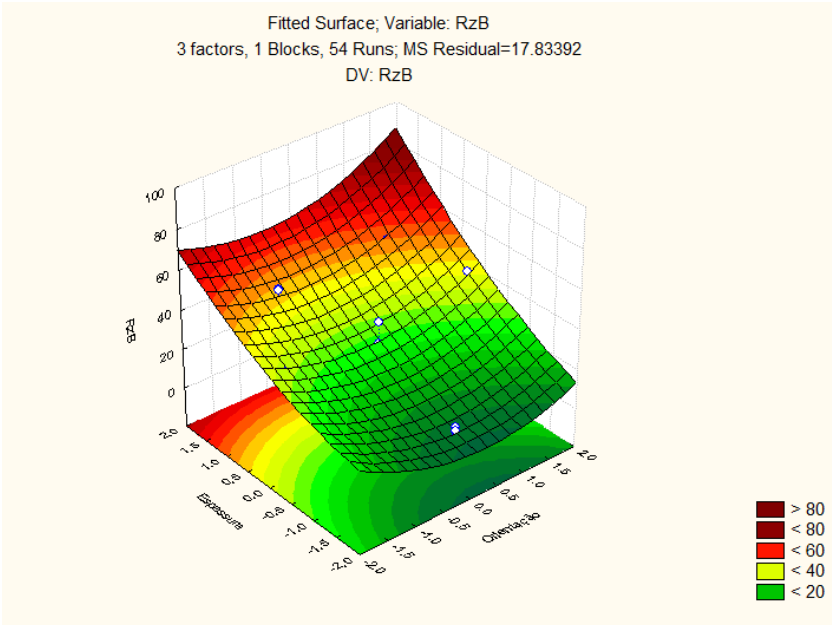


Figura 5.26 - Superfície de resposta para RzB em função da espessura e da orientação, considerando o tempo de exposição no nível 0.

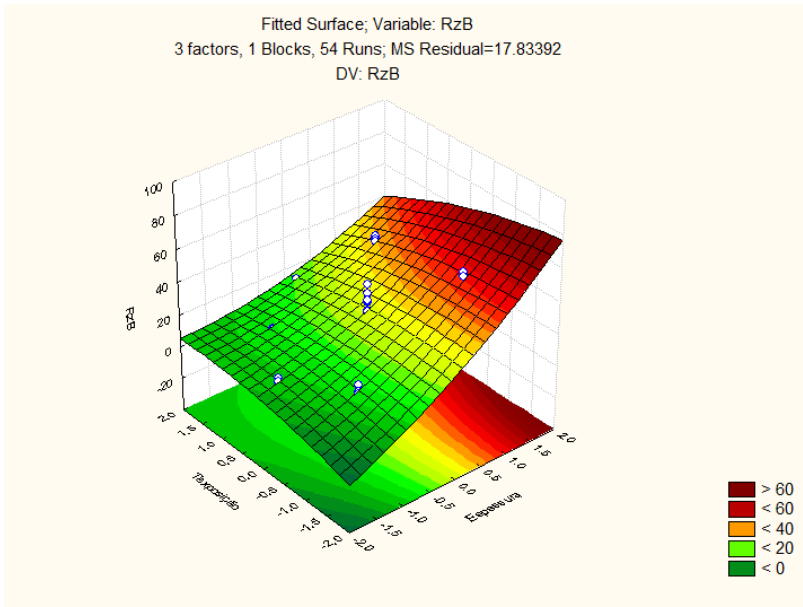


Figura 5.27 - Superfície de resposta para RzB em função do tempo de exposição e da espessura, considerando a orientação no nível 0.

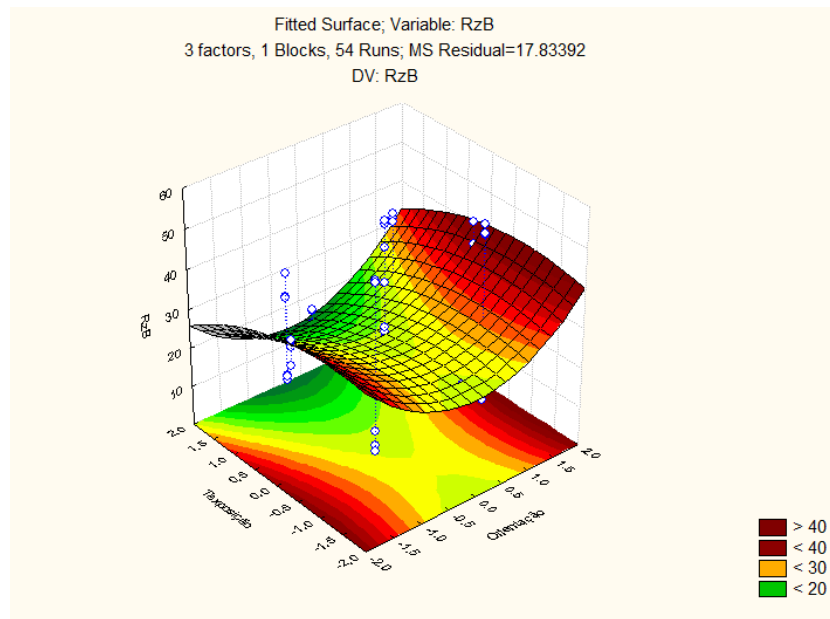


Figura 5.28 - Superfície de resposta para RzB em função do tempo de exposição e da orientação, considerando a espessura no nível 0.

Relativamente à superfície de resposta para o parâmetro RzB em função da orientação e da espessura, representada na Figura 5.26, a maior rugosidade obteve-se para a maior espessura e maior orientação e a menor para a menor espessura e orientação em torno do nível 0. No que diz respeito à superfície obtida em função do tempo de exposição e da espessura, representada na Figura 5.5, a maior rugosidade obtém-se para as orientações mais reduzidas e a menor para o maior tempo de exposição e a orientação em torno de 45°. Para a superfície em função da orientação e do tempo de exposição, representada na Figura 5.6, a maior rugosidade para o maior tempo de exposição quer para as orientações mais elevadas como para as mais baixas e a menor para o maior tempo de exposição e a orientação em torno do nível 0, correspondente a 45°.

Em suma, de modo geral a rugosidade é fortemente influenciada pela espessura da camada e pela orientação, tendo um tempo de exposição um efeito menos impactante.

Os modelos empíricos decorrentes da aplicação da MSR para cada um dos parâmetros de rugosidade e para cada uma das faces em provetes impressos com a Prusa SL1S disponibilizam-se na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Modelos matemáticos para prever as rugosidades nas faces A e B.

$R_{aA} = 4.349 - 1.264x_1 + 2.226x_2 + 0.595x_2^2 - 1.215x_1x_2$	$R^2 = 0.806$ $R_A^2 = 0.766$
$R_{qA} = 5.497 - 1.481x_1 + 2.505x_2 + 0.578x_2^2 - 0.529x_3^2 - 1.336x_1x_2$	$R^2 = 0.794$ $R_A^2 = 0.752$
$R_{zA} = 26.513 - 6.026x_1 + 7.949x_2 - 2.287x_3^2 - 4.288x_1x_2$	$R^2 = 0.769$ $R_A^2 = 0.721$

$R_{sk_A} = -0.327 + 0.125x_1 + 0.129x_1^2 - 0.082x_2$	$R^2 = 0.431$ $R_A^2 = 0.315$
$R_{k_A} = 12.765 - 3.865x_1 + 2.737x_1^2 + 5.068x_2^2 - 3.475x_1x_2$	$R^2 = 0.885$ $R_A^2 = 0.861$
$R_{pk_A} = 6.492 - 1.429x_2^2$	$R^2 = 0.312$ $R_A^2 = 0.172$
$R_{vk_A} = 8.565 - 1.910x_1 - 1.627x_1^2 + 3.196x_2$	$R^2 = 0.528$ $R_A^2 = 0.431$
$R_{a_B} = 4.042 + 1.439x_1^2 + 4.244x_1 + 1.214x_1^2 - 0.664x_3 - 0.971x_2x_3$	$R^2 = 0.943$ $R_A^2 = 0.932$
$R_{q_B} = 5.128 + 1.637x_1^2 + 4.788x_2 + 1.224x_2^2 - 0.766x_3 - 1.075x_2x_3$	$R^2 = 0.944$ $R_A^2 = 0.932$
$R_{z_B} = 24.822 + 3.747x_1^2 + 15.210x_2 + 2.063x_2^2 - 2.637x_3 - 3.297x_2x_3$	$R^2 = 0.933$ $R_A^2 = 0.919$
$R_{sk_B} = -0.307 - 0.217x_1$	$R^2 = 0.503$ $R_A^2 = 0.402$
$R_{k_B} = 12.044 + 3.710x_1^2 + 8.516x_2 + 1.193x_2^2 - 2.086x_3 - 3.410x_2x_3$	$R^2 = 0.903$ $R_A^2 = 0.883$
$R_{pk_B} = 5.740 - 1.100x_2^2$	$R^2 = 0.158$ $R_A^2 = 0$
$R_{vk_B} = 7.580 + 1.090x_1^2 + 7.297x_2 + 2.098x_2^2$	$R^2 = 0.877$ $R_A^2 = 0.852$

Validação dos modelos empíricos

Para a validação dos modelos obtidos imprimiram-se mais 3 provetes situados no intervalo considerado, contudo fora dos níveis anteriormente considerados. Na Tabela 5.6 estabelece-se uma comparação entre o valor da rugosidade medida e a determinada para cada um deles.

Tabela 5.6 - Testes realizados para a validação dos modelos empíricos obtidos.

Orientação	-0.5	0.5	0.5
Espessura	-0.5	0.5	-0.5
Tempo de exposição	-0.5	0.5	0.5
R_{a_A} calculada	3.713	4.675	3.057
R_{a_B} calculada	2.673	6.253	6.738
R_{a_A} empírica	2.020	4.286	1.897
R_{a_B} empírica	1.755	2.194	1.869
Diferença Percentual A	45.597%	8.328%	37.957%
Diferença Percentual B	34.356%	64.918%	72.257%
R_{q_A} calculada	4.663	5.687	3.850
R_{q_B} calculada	3.564	7.586	3.335
R_{q_A} empírica	2.525	5.200	2.368

R_{q_B} empírica	2.350	2.643	2.535
Diferença Percentual A	45.850%	8.569%	38.502%
Diferença Percentual B	34.054%	65.160%	23.988%
R_{z_A} calculada	23.908	25.831	20.026
R_{z_B} calculada	19.164	31.737	18.175
R_{z_A} empírica	11.392	21.032	11.690
R_{z_B} empírica	11.900	11.709	13.529
Diferença Percentual A	52.351%	18.579%	41.624%
Diferença Percentual B	37.904%	63.106%	26.563%
R_{sk_A} calculada	-0.316	-0.273	-0.191
R_{sk_B} calculada	-0.493	0.108	-0.359
R_{sk_A} empírica	0.258	0.594	0.143
R_{sk_B} empírica	-0.493	0.108	-0.359
Diferença Percentual A	181.646%	317.460%	175.044%
Diferença Percentual B	0.068%	0.000%	0.000%
R_{k_A} calculada	15.780	11.915	13.653
R_{k_B} calculada	9.202	15.632	8.821
R_{k_A} empírica	5.516	13.102	5.561
R_{k_B} empírica	4.727	7.442	5.065
Diferença Percentual A	65.047%	-9.960%	59.267%
Diferença Percentual B	48.631%	52.395%	42.580%
R_{pk_A} calculada	6.135	6.135	6.135
R_{pk_B} calculada	5.465	5.465	5.465
R_{pk_A} empírica	4.040	10.470	4.167
R_{pk_B} empírica	2.466	2.591	3.276
Diferença Percentual A	34.143%	-70.666%	32.078%
Diferença Percentual B	54.883%	52.583%	40.049%
R_{vk_A} calculada	7.515	8.801	5.605
R_{vk_B} calculada	4.729	12.026	4.729
R_{vk_A} empírica	4.339	6.357	3.298
R_{vk_B} empírica	5.620	2.715	5.755
Diferença Percentual A	42.262%	37.766%	41.166%
Diferença Percentual B	-18.841%	77.421%	-21.689%

Por forma a que a análise seja mais intuitiva efetuou-se um gráfico recorrendo ao software Excel com os valores obtidos que se representa na Figura 5.29.

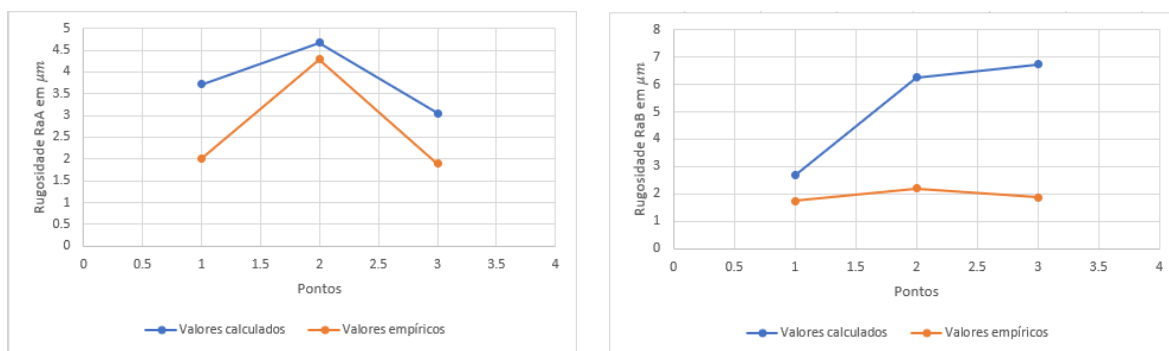


Figura 5.29 - Comparação dos resultados obtidos por via analítica e empírica para o parâmetro Ra para a face A e B, respetivamente.

Os gráficos elaborados para os restantes parâmetros de rugosidade encontram-se no anexo E. Recorrendo à sua observação verifica-se que de um modo geral existe um melhor ajuste dos modelos para a face A. Em função dos pontos e dos parâmetros analisados observa-se alguma variabilidade, existindo pontos bastantes próximos e outros com maior diferença entre valores previstos e obtidos. Conclui-se, portanto, que existem pontos em que o ajuste é melhor do que noutros, obtendo-se para a maioria dos parâmetros um $R_A^2 \geq 0.5$ o que indica uma boa adequação do modelo e, por isso, uma boa aproximação à realidade. Destaca-se o ajuste total dos valores empíricos e analíticos para o parâmetro Rsk.

Estudo da influência da orientação, da espessura de camada e do tempo de exposição

Selecionaram-se os provetes produzidos para a experiência de RSM com a mesma espessura de camada e tempo de exposição e observou-se a influência da orientação na rugosidade obtida. A Tabela 5.7 e Figura 5.30 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 5.7 - Resultados do parâmetro Ra de rugosidade obtidos considerando a variação da orientação e a espessura e o tempo de exposição constantes.

Proвете	Orientação	Espessura	Tempo de Exposição	R_{aA}	R_{aB}
34(C)	0	0	0	3.304	3.582
54(C)	0	0	0	3.821	3.613
35(C)	0	0	0	4.446	3.455
53(C)	0	0	0	4.084	2.922
16(C)	0	0	0	4.030	3.692
18(C)	0	0	0	4.066	4.406
52(C)	0	0	0	3.933	4.700
36(C)	0	0	0	4.739	4.176
33(C)	0	0	0	4.890	4.247
51(C)	0	0	0	6.200	6.044
17(C)	0	0	0	3.739	3.860
15(C)	0	0	0	4.043	4.123

10	1.682	0	0	3.304	9.887
46	1.682	0	0	5.340	8.596
28	1.682	0	0	5.235	7.266
9	-1.682	0	0	7.533	6.917
27	-1.682	0	0	7.896	7.565
45	-1.682	0	0	7.804	6.624

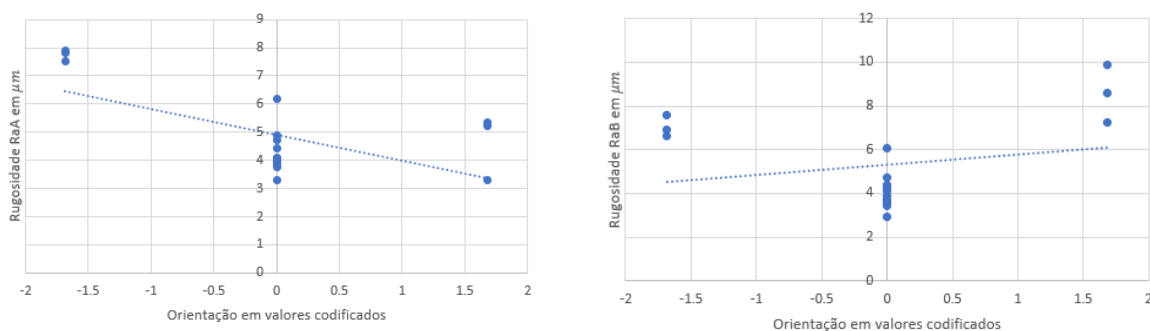


Figura 5.30 - Evolução do parâmetro Ra na face A e B, respectivamente, em função da variação da orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes.

Recorrendo à observação dos gráficos da Figura 5.30 observa-se que a rugosidade na face A diminui com a orientação. Tal deve-se ao famoso efeito de escada que se torna mais intenso para menores valores de inclinação. Por exemplo, para uma inclinação nula a face A fica paralela à plataforma de impressão e portanto o efeito de escada é máximo, o que se associa com maior rugosidade superficial. Contrariamente, a rugosidade na face B aumenta com o aumento da inclinação. Isto deve-se à correspondência existente entre a inclinação mínima e a face A perpendicular à plataforma de impressão.

Destaca-se também a proximidade dos valores de rugosidade para a face A e B em provetes produzidos a 45°, o que corresponde ao nível 0.

Os gráficos para os restantes parâmetros de rugosidade disponibilizam-se no anexo E. Apartir da sua observação constata-se que os resultados supramencionados são comuns aos restantes parâmetros analisados, sendo evidente a reação linear de dependência que se verifica. Destaca-se que o único parâmetro em que os resultados diferiram foi Rsk quer para a face A quer para a face B. Ao considerar que este parâmetro se associa à irregularidade do perfil estudado e tendo em conta os perfis característicos de peças produzidas por impressão 3D, considera-se um resultado admissível e de acordo com o esperado.

Por forma a estudar a influência da espessura de camada no acabamento superficial e verificar se a rugosidade obtida nas faces A e B coincidia para provetes impressos a 45° desenvolveu-se uma análise da rugosidade medida em provetes com espessura variável e os restantes fatores constantes.

Nas Tabela 5.8 e Figura 5.31 representam-se os resultados obtidos.

Tabela 5.8 - Resultados do parâmetro Ra de rugosidade obtidos considerando a variação da espessura e a orientação e o tempo de exposição constantes.

Provete	Orientação	Espessura	Tempo de Exposição	R_{aA}	R_{aB}
34(C)	0	0	0	3.304	3.582
54(C)	0	0	0	3.821	3.613
35(C)	0	0	0	4.446	3.455
53(C)	0	0	0	4.084	2.922
16(C)	0	0	0	4.030	3.692
18(C)	0	0	0	4.066	4.406
52(C)	0	0	0	3.933	4.700
36(C)	0	0	0	4.739	4.176
33(C)	0	0	0	4.890	4.247
51(C)	0	0	0	6.200	6.044
17(C)	0	0	0	3.739	3.860
15(C)	0	0	0	4.043	4.123
11	0	-1.682	0	1.445	2.040
47	0	-1.682	0	1.751	1.37
29	0	-1.682	0	1.782	1.774
30	0	1.682	0	13.630	12.889
48	0	1.682	0	9.135	12.976
12	0	1.682	0	13.627	11.996

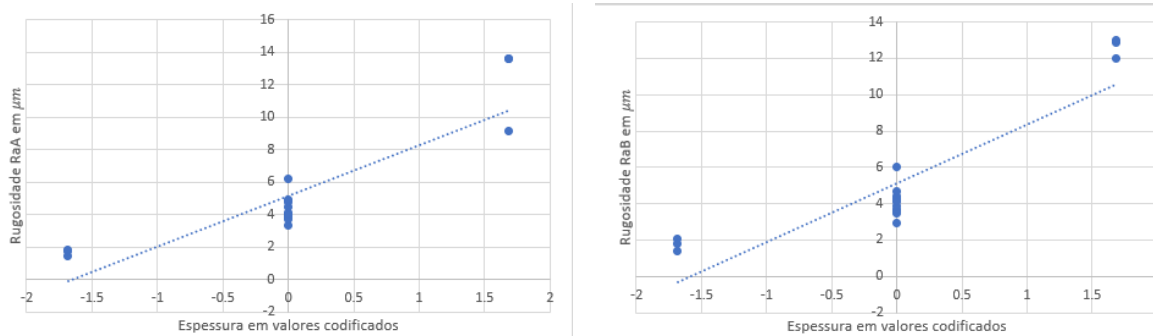


Figura 5.31 - Evolução do parâmetro Ra na face A e B, respetivamente, em função da variação da espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes.

Recorrendo à observação dos gráficos da Figura 5.31 facilmente se infere que se observa um aumento da rugosidade superficial com o aumento da espessura da camada quer para a face A quer para a face B. É evidente a proximidade dos valores das rugosidades obtidas quer para a face A quer para a face B, o que permite prever que a espessura é aproximadamente igual para faces distintas de provetes produzidos com as mesmas características. Destacam-se também os valores bastante próximos e praticamente coincidentes das rugosidade obtidas para o nível 0 na face A e B tal como esperado.

Os gráficos obtidos para os restantes parâmetros de rugosidade encontram-se no anexo E. No que toca à análise dos resultados obtidos para estes parâmetros destaca-se a proximidade dos valores obtidos nas faces A e B e os valores bastantes próximos de rugosidade obtidos nestas faces para os pontos correspondentes ao nível 0.

De modo a investigar a influência do tempo de exposição no acabamento superficial estabeleceu-se uma análise da rugosidade empírica de provetes com tempo de exposição variável e os restantes fatores constantes.

As Tabela 5.9 e Figura 5.32 ilustram os resultados obtidos.

Tabela 5.9 - Resultados do parâmetro R_a de rugosidade obtidos considerando a variação do tempo de exposição e a orientação e a espessura constantes.

Provete	Orientação	Espessura	Tempo de Exposição	R_{aA}	R_{aB}
34(C)	0	0	0	3.304	3.582
54(C)	0	0	0	3.821	3.613
35(C)	0	0	0	4.446	3.455
53(C)	0	0	0	4.084	2.922
16(C)	0	0	0	4.030	3.692
18(C)	0	0	0	4.066	4.406
52(C)	0	0	0	3.933	4.700
36(C)	0	0	0	4.739	4.176
33(C)	0	0	0	4.890	4.247
51(C)	0	0	0	6.200	6.044
17(C)	0	0	0	3.739	3.860
15(C)	0	0	0	4.043	4.123
14	0	0	1.682	3.271	2.746
50	0	0	1.682	2.923	3.090
32	0	0	1.682	3.068	3.259
49	0	0	-1.682	4.579	4.185
31	0	0	-1.682	5.244	3.947
13	0	0	-1.682	5.073	3.443

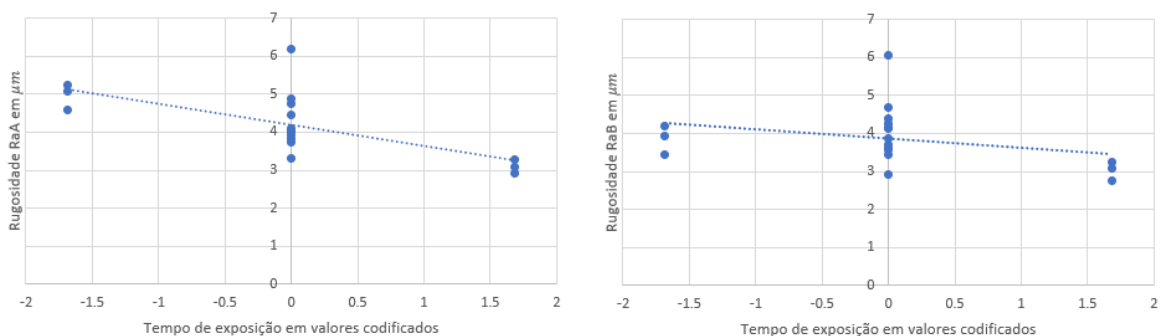


Figura 5.32 - Evolução do parâmetro Ra na face A e B, respetivamente, em função da variação do tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes.

Apartir da análise dos gráficos da Figura 5.30 observa-se uma diminuição dos valores de Ra com o aumento do tempo de exposição tanto para a face A como para a face B. Isto deve-se à relação entre o tempo de exposição e a cura da resina, durante a qual se dá a sua solidificação. Ora evidentemente se a resina tiver uma cura mais completa, a sua solidificação também será melhor, permitindo a produção de peças com um melhor acabamento superficial. Destaca-se a conformidade dos valores obtidos entre a face A e a face B.

Os gráficos efetuados para os restantes parâmetros de rugosidade disponibilizam-se no anexo E. Relativamente à sua análise salienta-se a proximidade dos valores obtidos nas faces A e B e os valores bastantes próximos de rugosidade obtidos nestas faces para os pontos correspondentes ao nível 0. A única discrepância observada foi no parâmetro Rpk, nomeadamente, entre a face A e a face B. Tal pode dever-se não só à natureza deste parâmetro que se associa aos picos obtidos recorrendo à curva de Abbott, como também à fraca influência do tempo de exposição neste parâmetro de rugosidade tal como se tinha observado na respetiva Tabela ANOVA.

6

CONCLUSÕES

Ao longo do presente capítulo apresentam-se as conclusões inferidas dos resultados obtidos nesta dissertação, bem como os possíveis trabalhos futuros a desenvolver para a sua continuação.

6.1 Conclusões

Ao considerar os resultados obtidos para a primeira experiência de *screening* efetuada constatou-se que uma possível fonte de erro é a incapacidade da impressora de trabalhar com a variável *anti-aliasing*, que se admitiu inicialmente significativa e, por isso, foi integrada como um dos fatores. Salienta-se também a disparidade de valores entre a face A e B e os baixos coeficientes de correlação obtidos para os diversos parâmetros na face A que podem indicar que os fatores considerados não são os mais significativos. Deste modo, realizou-se uma segunda experiência com a resina Anycubic Grey em que se retirou o *anti-aliasing* da gama de fatores significativos. Posto isto, ao considerar os coeficientes de correlação obtidos para esta resina parece que de facto o *anti-aliasing* pode não ter expressão e surgiu a hipótese da rugosidade depender do conjunto resina impressora selecionado. Deste modo, optou-se pela realização de uma terceira experiência de *screening* com a mesma impressora e a resina Prusament Tough Orange, mantendo os parâmetros de impressão considerados para a resina Grey. Tendo por base os resultados da análise estatística efetuada para esta experiência constatou-se que a resina utilizada influencia a expressão dos fatores, nomeadamente, qual a face em que os parâmetros têm mais fatores significativos. Relativamente aos coeficientes de correlação obtidos os seus valores quase unitários evidenciam um bom ajuste dos resultados.

Seguidamente, estabeleceu-se uma experiência de *screening* com a mesma resina, Prusament Tough Orange, e o mesmo número de fatores, orientação, espessura e tempo de exposição, com a impressora SL1S. Mediante a análise dos seus resultados é possível constatar a significância dos três fatores estudados para as respostas analisadas e um bom ajuste dos resultados experimentais.

Ao comparar os resultados obtidos para as experiências de *screening* realizadas com a resina Prusament Tough Orange em ambas as impressoras, SL1S e Photon Mono, existe a possibilidade de a rugosidade superficial depender não só da resina utilizada como também da impressora. Esta teoria é corroborada pela menor resolução XY da impressora SL1S comparativamente à impressora Photon Mono, tal como se observa nas Tabela 4.4 e Tabela 4.5, que influencia a cura e, conseqüentemente, a rugosidade obtida. No entanto, o método de comparação ideal entre as duas impressoras teria por base um estudo de RSM em que os coeficientes de correlação fossem praticamente unitários. Deste modo, esta conjectura consiste apenas numa mera hipótese.

Por último, realizou-se uma experiência de RSM com a Prusament Tough Orange e a SL1S por forma a prever a influência dos diversos fatores de rugosidade nos parâmetros estudados.

Os maiores valores de rugosidade relacionam-se com os menores valores de orientação. Isto é, observam-se em faces praticamente paralelas à plataforma de impressão, dado ser a região onde o efeito de escada é mais significativo e, por isso, os degraus em que as superfícies são discretizadas mais pronunciados. Relativamente à espessura de camada, evidencia-se a relação de proporcionalidade direta com a rugosidade e sua influência extrema na resposta. Peças produzidas com maior espessura têm sempre maior rugosidade. Deste modo, o efeito de escada só é preponderante em peças com inclinação reduzida. No que toca ao tempo de exposição, observa-se uma relação inversamente proporcional com a rugosidade superficial. Destaca-se também que os valores obtidos para as rugosidades nas faces A e B para a orientação de 45° são bastante próximos, tal como esperado.

Tendo em conta a comparação dos diversos modelos com os resultados empíricos obtidos constata-se que ainda que o ajuste não seja ideal, dado que nenhum coeficiente de correlação é unitário o que pode indicar a existência de mais fatores significativos, a maioria dos modelos obtidos constituem uma boa aproximação da realidade.

6.2 Propostas de trabalhos futuros

Para o estudo da rugosidade superficial propõem-se:

- experiências com outros instrumentos de medida de rugosidade superficial mais precisos;
- terminar o estudo de diferentes materiais com diferentes impressoras, uma vez que cada combinação material impressora se prevê influenciar significativamente a rugosidade obtida;
 - experiência de RSM na impressora Anycubic para estabelecer uma comparação e verificar se a impressora influencia a equação de rugosidade obtida;
- estabelecer uma comparação entre a rugosidade obtida com outros processos de impressão 3D;
- procurar investigar a criação de uma equação teórica para prever a rugosidade superficial em peças produzidas por outras tecnologias de foto polimerização.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. B. A. Tamez and I. Taha, "A review of additive manufacturing technologies and markets for thermosetting resins and their potential for carbon fiber integration," *Addit Manuf*, vol. 37, p. 101748, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ADDMA.2020.101748.
- [2] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, "The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0," *Procedia Manuf*, vol. 11, pp. 545–554, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.
- [3] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, vol. 3. Springer, 2010.
- [4] S. Thiede, M. Wiese, and C. Herrmann, "Upscaling strategies for polymer additive manufacturing: an assessment from economic and environmental perspective for SLS, MJF and DLP," *Procedia CIRP*, vol. 104, pp. 653–658, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.PROCIR.2021.11.110.
- [5] "Wohlers Report 2021: Weakened Growth for Additive Manufacturing - 3Dnatives." <https://www.3dnatives.com/en/wohlers-report-2021-180320214/> (accessed Feb. 15, 2022).
- [6] "Wohlers Associates publishes 2021 annual State of 3D Printing report - 3D Printing Industry." <https://3dprintingindustry.com/news/wohlers-associates-publishes-2021-annual-state-of-3d-printing-report-186439/> (accessed Feb. 15, 2022).
- [7] J. W. Stansbury and M. J. Idacavage, "3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities," *Dental Materials*, vol. 32, no. 1, pp. 54–64, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.DENTAL.2015.09.018.
- [8] E.-H. Lee, J.-S. Ahn, Y.-J. Lim, H.-B. Kwon, and M.-J. Kim, "Effect of layer thickness and printing orientation on the color stability and stainability of a 3D-printed resin material," *J Prosthet Dent*, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.PROSDENT.2022.01.024.
- [9] D. Ahn, H. Kim, and S. Lee, "Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing," *J Mater Process Technol*, vol. 209, no. 2, pp. 664–671, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2008.02.050.
- [10] S. Barone, P. Neri, A. Paoli, A. v. Razionale, and F. Tamburrino, "Development of a DLP 3D printer for orthodontic applications," in *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 38, pp. 1017–1025. doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.187.
- [11] A. Bagheri Saed, A. H. Behraves, S. Hasannia, S. A. Alavinasab Ardebili, B. Akhoundi, and M. Pourghayoumi, "Functionalized poly l-lactic acid synthesis and optimization of process parameters for 3D printing of porous scaffolds via digital light processing (DLP) method," *J Manuf Process*, vol. 56, pp. 550–561, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2020.04.076.

- [12] Y. Wang, X. Li, Y. Chen, and C. Zhang, "Strain rate dependent mechanical properties of 3D printed polymer materials using the DLP technique," *Addit Manuf*, vol. 47, p. 102368, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.ADDMA.2021.102368.
- [13] D. Ahn, H. Kim, and S. Lee, "Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 47, no. 3–4, pp. 593–606, Mar. 2007, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2006.05.004.
- [14] M. Mao *et al.*, "The emerging frontiers and applications of high-resolution 3D printing," *Micromachines (Basel)*, vol. 8, no. 4, Apr. 2017, doi: 10.3390/MI8040113.
- [15] H. Dodziuk, "Applications of 3D printing in healthcare," *Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska/Polish Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, vol. 13, no. 3, pp. 283–293, 2016, doi: 10.5114/KITP.2016.62625.
- [16] J. W. Shin *et al.*, "Evaluation of the Color Stability of 3D-Printed Crown and Bridge Materials against Various Sources of Discoloration: An In Vitro Study," *Materials 2020, Vol. 13, Page 5359*, vol. 13, no. 23, p. 5359, Nov. 2020, doi: 10.3390/MA13235359.
- [17] ASTM International, *F2792 – 12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. 2013. doi: 10.1520/F2792-12A.
- [18] ben Redwood, Filemon Schöffner, and Brian Garret, *The 3D Printing Handbook Technologies, design and applications*. 3D Hubs, 2017.
- [19] J. B. Bruce, *Workshop Process, Practices and Materials*. 1997.
- [20] "What is SLA 3D printing? | Hubs." <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/#work> (accessed Feb. 10, 2022).
- [21] "SLA 3D printing materials compared | Hubs." <https://www.hubs.com/knowledge-base/sla-3d-printing-materials-compared/> (accessed Feb. 10, 2022).
- [22] F. Cosmi and A. Dal Maso, "A mechanical characterization of SLA 3D-printed specimens for low-budget applications," in *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 32, pp. 194–201. doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.602.
- [23] António Mourão, *Desenho Técnico - Noções de acabamentos superficiais e de tolerâncias dimensionais*. 2010.
- [24] C. Arnold, D. Monsees, J. Hey, and R. Schweyen, "Surface quality of 3D-printed models as a function of various printing parameters," *Materials*, vol. 12, no. 12, Jun. 2019, doi: 10.3390/ma12121970.
- [25] J. Nagendra, M. K. Srinath, S. Sujeeth, K. S. Naresh, and M. S. Ganesha Prasad, "Optimization of process parameters and evaluation of surface roughness for 3D printed nylon-aramid composite," *Mater Today Proc*, vol. 44, pp. 674–682, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.10.609.

- [26] R. I. Campbell, M. Martorelli, and H. S. Lee, "Surface roughness visualisation for rapid prototyping models," *Computer-Aided Design*, vol. 34, no. 10, pp. 717–725, Sep. 2002, doi: 10.1016/S0010-4485(01)00201-9.
- [27] W. Piedra-Cascón, V. R. Krishnamurthy, W. Att, and M. Revilla-León, "3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review," *Journal of Dentistry*, vol. 109. Elsevier Ltd, Jun. 01, 2021. doi: 10.1016/j.jdent.2021.103630.
- [28] Paulo Jorge Bártolo, *Stereolithography: Materials, Processes and Applications*. 2011.
- [29] Jacobs P.F., *Rapid Prototyping Manufacturing Fundamentals of StereoLithography*, 1 st. Society of Manufacturing Engin, 1992.
- [30] C. K. Scotti, M. M. de A. C. Velo, F. A. P. Rizzante, T. R. de L. Nascimento, R. F. L. Mondelli, and J. F. S. Bombonatti, "Physical and surface properties of a 3D-printed composite resin for a digital workflow," *Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 124, no. 5, pp. 614.e1-614.e5, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.PROSDENT.2020.03.029.
- [31] "Intro to Stereolithography 3D Printing A comprehensive guide for professional users," 2020.
- [32] N. A. Chartrain, C. B. Williams, and A. R. Whittington, "A review on fabricating tissue scaffolds using vat photopolymerization," *Acta Biomater*, vol. 74, pp. 90–111, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.ACTBIO.2018.05.010.
- [33] T. Wohlers and T. Gornet, "History of Additive Manufacturing," 2016.
- [34] Ross F. Housholder, "Molding Process," 4247508, Jan. 27, 1981 Accessed: Feb. 15, 2022. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US4247508A>
- [35] C. W. Hull and C. Arcadia, "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography," 4575330, Mar. 11, 1986
- [36] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective," *Composites Part B: Engineering*, vol. 110. Elsevier Ltd, pp. 442–458, Feb. 01, 2017. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
- [37] Hod Lipson and Melba Kurman, *Fabricated: The New World of 3D Printing*. 2013.
- [38] L. Jyothish Kumar, P. M. Pandey, and D. I. Wimpenny, *3D printing and additive manufacturing technologies*. Springer Singapore, 2018. doi: 10.1007/978-981-13-0305-0.
- [39] B. Coppola, J. Schmitt, T. Lacondemine, C. Tardivat, L. Montanaro, and P. Palmero, "Digital light processing stereolithography of zirconia ceramics: Slurry elaboration and orientation-reliant mechanical properties," *J Eur Ceram Soc*, vol. 42, no. 6, pp. 2974–2982, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2022.01.024.
- [40] S. Taşın, A. Ismatullaev, and A. Usumez, "Comparison of surface roughness and color stainability of 3-dimensionally printed interim prosthodontic material with conventionally fabricated and CAD-CAM milled materials," *Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 0, no. 0, 2021, doi: 10.1016/J.PROSDENT.2021.01.027.

- [41] W. Gao *et al.*, “The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering,” *CAD Computer Aided Design*, vol. 69, pp. 65–89, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.cad.2015.04.001.
- [42] E. Rossegger *et al.*, “High resolution additive manufacturing with acrylate based vitrimers using organic phosphates as transesterification catalyst,” *Polymer (Guildf)*, vol. 221, p. 123631, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.POLYMER.2021.123631.
- [43] Y. Li, Q. Mao, J. Yin, Y. Wang, J. Fu, and Y. Huang, “Theoretical prediction and experimental validation of the digital light processing (DLP) working curve for photocurable materials,” *Addit Manuf*, vol. 37, p. 101716, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ADDMA.2020.101716.
- [44] A. José and F. Mourão, “Introdução à Engenharia Simultânea e ao Projeto para Fabrico e Montagem,” 1999.
- [45] K. v. Wong and A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, pp. 1–10, Aug. 2012, doi: 10.5402/2012/208760.
- [46] P. Gay, D. Blanco, F. Pelayo, A. Noriega, and P. Fernández, “Analysis of Factors Influencing the Mechanical Properties of Flat PolyJet Manufactured Parts,” in *Procedia Engineering*, 2015, vol. 132, pp. 70–77. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.481.
- [47] “Compare Resin 3D Printing Technologies,” 2019.
- [48] Y. Pan and Y. Chen, “Meniscus process optimization for smooth surface fabrication in Stereolithography,” *Addit Manuf*, vol. 12, pp. 321–333, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.ADDMA.2016.05.004.
- [49] T. Chen, D. Wang, X. Chen, M. Qiu, and Y. Fan, “Three-dimensional printing of high-flux ceramic membranes with an asymmetric structure via digital light processing,” *Ceram Int*, vol. 48, no. 1, pp. 304–312, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2021.09.105.
- [50] K. G. Mostafa, D. S. Nobes, and A. J. Qureshi, “Investigation of Light-Induced Surface Roughness in Projection Micro-Stereolithography Additive Manufacturing (PμSLA),” *Procedia CIRP*, vol. 92, pp. 187–193, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.PROCIR.2020.05.177.
- [51] “Introducing Projection Micro Stereolithography (PμSL) | Cambridge Network.” <https://www.cambridgenetwork.co.uk/news/introducing-projection-micro-stereolithography-pmsl> (accessed Dec. 05, 2022).
- [52] J.-M. Park, J. Jeon, J.-Y. Koak, S.-K. Kim, and S.-J. Heo, “Dimensional accuracy and surface characteristics of 3D-printed dental casts,” *The Journal od Prosthetic Dentistry*, vol. 126, no. 3, pp. 426–437, 2021.
- [53] S. O. Onuh and K. K. B. Hon, “Optimising Build Parameters for Improved Surface Finish in Stereolithography,” 1998.
- [54] “How to Get the Perfect 3D Printer Resin Settings – Quality – 3D Printerly.” <https://3dprinterly.com/how-to-get-the-perfect-3d-printer-resin-settings-quality/> (accessed Mar. 31, 2022).

- [55] E. A. Garcia, "A study on the effect of print parameters on mechanical properties of parts manufactured using additive manufacturing," University of Alberta, 2017.
- [56] "Guide to Post-Processing and Finishing SLA 3D Prints." <https://formlabs.com/blog/post-processing-and-finishing-sla-prints/> (accessed Feb. 10, 2022).
- [57] M. Revilla-León, D. Jordan, M. M. Methani, W. Piedra-Cascón, M. Özcan, and A. Zandinejad, "Influence of printing angulation on the surface roughness of additive manufactured clear silicone indices: An in vitro study," *J Prosthet Dent*, vol. 125, no. 3, pp. 462–468, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.PROSDENT.2020.02.008.
- [58] "Most Detailed Explanations about Anti-aliasing, Gray Level and Image Blur Functions of CHITUBOX." <https://www.chitubox.com/en/article/support/indepth/technology/52> (accessed Mar. 31, 2022).
- [59] "SLA Printing: Is 3D Printer Resin Toxic? | All3DP." <https://all3dp.com/2/sla-3d-printing-is-3d-printer-resin-toxic/> (accessed Feb. 11, 2022).
- [60] Z. Zguris, "How Mechanical Properties of Stereolithography 3D Prints are Affected by UV Curing".
- [61] L. Nasiry Khanlar *et al.*, "Surface roughness and shear bond strength to composite resin of additively manufactured interim restorative material with different printing orientations," *J Prosthet Dent*, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.PROSDENT.2021.08.010.
- [62] J. M. R. Tavares, "Indicação dos Estados de Superfície," *FEUP*, Feb. 04, 2022.
- [63] David Esteves Guedes, "Análise Metrológica de Acabamento de Superfícies Aplicada a Componentes Mecânicos," 2014.
- [64] Nikolaj Agentoft Feidenhans'l, "Optical Characterization of Nanostructured Surface," 2016.
- [65] S. Al-Amshawee, M. Y. B. M. Yunus, J. G. Lynam, W. H. Lee, F. Dai, and I. H. Dakhil, "Roughness and wettability of biofilm carriers: A systematic review," *Environ Technol Innov*, vol. 21, p. 101233, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.ETI.2020.101233.
- [66] M. C. Salcedo, I. B. Coral, and G. V. Ochoa, "Characterization of Surface Topography with Abbott Firestone Curve," *Contemporary Engineering Sciences*, vol. 11, no. 68, pp. 3397–3407, 2018, doi: 10.12988/ces.2018.87319.
- [67] A. Spencer, I. Dobryden, N. Almqvist, A. Almqvist, and R. Larsson, "The influence of AFM and VSI techniques on the accurate calculation of tribological surface roughness parameters," *Tribol Int*, vol. 57, pp. 242–250, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2012.09.001.
- [68] N. Milan, P. Parenti, M. Annoni, M. Sorgato, and G. Lucchetta, "Innovative fabrication of diffractive surfaces on plastic parts via textures micromilled on NiP injection moulds," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 113, no. 5–6, pp. 1347–1359, Mar. 2021, doi: 10.1007/S00170-021-06693-4/FIGURES/14.

- [69] Afsaneh Morshedi and Mina Akbarian, "Application of Response Surface Methodology: Design of Experiments and Optimization: a Mini Review," *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, vol. 4, pp. 2434–2439, 2014.
- [70] António Francisco da Silva Mondim, "Metodologias de Superfície de Resposta: uma investigação no âmbito da indústria cerâmica e do vidro," Universidade Aberta, 2014.
- [71] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 8 th. John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [72] W. Cheng, J. Y. H. Fuh, A. Y. C. Nee, Y. S. Wong, H. T. Loh, and T. Miyazawa, "Multi-objective optimization of partbuilding orientation in stereolithography," *Rapid Prototyp J*, vol. 1, no. 4, pp. 12–23, Jan. 1995, doi: 10.1108/13552549510104429/FULL/XML.
- [73] J. S. Shim, J. E. Kim, S. H. Jeong, Y. J. Choi, and J. J. Ryu, "Printing accuracy, mechanical properties, surface characteristics, and microbial adhesion of 3D-printed resins with various printing orientations," *Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 124, no. 4, pp. 468–475, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.PROSDENT.2019.05.034.
- [74] "5.4.7. Examples of DOE's." <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section4/pri47.htm> (accessed Feb. 09, 2022).
- [75] M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, and L. A. Escaleira, "Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry," *Talanta*, vol. 76, no. 5. Elsevier, pp. 965–977, Sep. 15, 2008. doi: 10.1016/j.talanta.2008.05.019.
- [76] "5.3.3.6.1. Central Composite Designs (CCD)." <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3361.htm> (accessed Feb. 07, 2022).
- [77] Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, and Christine M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology*, Thrid Edition. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2009.
- [78] "3.2.3.2. Two-Way Crossed ANOVA." <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/ppc/section2/ppc232.htm> (accessed Feb. 08, 2022).
- [79] "3DJAKE Color Mix Resin Basic - 3DJake Portugal." <https://www.3djake.pt/3djake/color-mix-resin-basic> (accessed Feb. 28, 2022).
- [80] "Grey Photoreactive Resin for Form 1, Form 1+, Form 2 SAFETY DATA SHEET."
- [81] "Grey Pro Photopolymer Resin for Form 2."
- [82] "Density of cured Resins - General Discussion - Formlabs Community Forum." <https://forum.formlabs.com/t/density-of-cured-resins/28310> (accessed Jun. 05, 2022).
- [83] "Mechanical properties."
- [84] "21_09_09_SDS_Prusament-Resin-Tough-Prusa-Orange_EN".
- [85] "Photon Mono Faster LCD-based /SLA Resin 3D Printer | ANYCUBIC 3D Printing." <https://www.anycubic.com/products/photon-mono-resin-3d-printer> (accessed Mar. 30, 2022).

- [86] “Anycubic Photon Mono Review: Hands On | All3DP.” <https://all3dp.com/1/anycubic-photon-mono-review-3d-printer-specs/> (accessed Mar. 31, 2022).
- [87] “Original Prusa SL1S Speed: Specs, Price, Release & Reviews | All3DP.” <https://all3dp.com/1/original-prusa-sl1s-speed-review-3d-printer-specs/> (accessed Apr. 27, 2022).
- [88] “Original Prusa SL1S SPEED | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa.” <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-sl1s-speed/> (accessed Apr. 27, 2022).
- [89] “Prusa SL1S Speed Resin 3D Printer Review: Speedy, Smart, and Sophisticated | Tom’s Hardware.” <https://www.tomshardware.com/reviews/prusa-sl1s-speed-resin-3d-printer> (accessed Apr. 27, 2022).
- [90] “SURFTEST SJ-210 Series - Mitutoyo.” <https://www.mitutoyo.com/literature/surftest-sj-210-series/> (accessed Apr. 12, 2022).
- [91] R. A. Boyer, F. K. Kasper, J. D. English, and H. B. Jacob, “Effect of print orientation on the dimensional accuracy of orthodontic aligners printed 3-dimensionally,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 160, no. 5, pp. 732-742.e1, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.AJODO.2021.01.018.
- [92] A. Edelmann, J. D. English, S. J. Chen, and F. K. Kasper, “Analysis of the thickness of 3-dimensional-printed orthodontic aligners,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 158, no. 5, pp. e91–e98, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.AJODO.2020.07.029.
- [93] “Form Wash/Form Wash L time settings.” https://support.formlabs.com/s/article/Form-Wash-Time-Settings?language=en_US (accessed Apr. 20, 2022).
- [94] “Form Cure time and temperature settings.” https://support.formlabs.com/s/article/Form-Cure-Time-and-Temperature-Settings?language=en_US (accessed Apr. 20, 2022).

Anexo A

Tabela F de Fisher

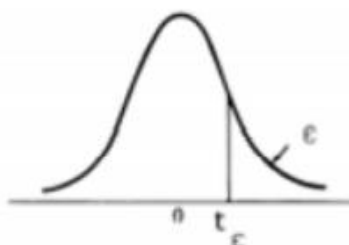
Tabela A 1 – Tabela de distribuição F de Fisher para $\alpha = 0.05$.

Critical Values of the *F*-Distribution: $\alpha = 0.05$

Denom. d.f.	Numerator Degrees of Freedom									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161.448	199.500	215.707	224.583	230.162	233.986	236.768	238.883	240.543	241.882
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385	19.396
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.786
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.687	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.621	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236
26	4.225	3.369	2.975	2.743	2.587	2.474	2.388	2.321	2.265	2.220
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.572	2.459	2.373	2.305	2.250	2.204
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.558	2.445	2.359	2.291	2.236	2.190
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.545	2.432	2.346	2.278	2.223	2.177
30	4.171	3.316	2.922	2.690	2.534	2.421	2.334	2.266	2.211	2.165
31	4.160	3.305	2.911	2.679	2.523	2.409	2.323	2.255	2.199	2.153
32	4.149	3.295	2.901	2.668	2.512	2.399	2.313	2.244	2.189	2.142
33	4.139	3.285	2.892	2.659	2.503	2.389	2.303	2.235	2.179	2.133
34	4.130	3.276	2.883	2.650	2.494	2.380	2.294	2.225	2.170	2.123
35	4.121	3.267	2.874	2.641	2.485	2.372	2.285	2.217	2.161	2.114
36	4.113	3.259	2.866	2.634	2.477	2.364	2.277	2.209	2.153	2.106
37	4.105	3.252	2.859	2.626	2.470	2.356	2.270	2.201	2.145	2.098
38	4.098	3.245	2.852	2.619	2.463	2.349	2.262	2.194	2.138	2.091
39	4.091	3.238	2.845	2.612	2.456	2.342	2.255	2.187	2.131	2.084
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.449	2.336	2.249	2.180	2.124	2.077
41	4.079	3.226	2.833	2.600	2.443	2.330	2.243	2.174	2.118	2.071
42	4.073	3.220	2.827	2.594	2.438	2.324	2.237	2.168	2.112	2.065
43	4.067	3.214	2.822	2.589	2.432	2.318	2.232	2.163	2.106	2.059
44	4.062	3.209	2.816	2.584	2.427	2.313	2.226	2.157	2.101	2.054
45	4.057	3.204	2.812	2.579	2.422	2.308	2.221	2.152	2.096	2.049
46	4.052	3.200	2.807	2.574	2.417	2.304	2.216	2.147	2.091	2.044
47	4.047	3.195	2.802	2.570	2.413	2.299	2.212	2.143	2.086	2.039
48	4.043	3.191	2.798	2.565	2.409	2.295	2.207	2.138	2.082	2.035
49	4.038	3.187	2.794	2.561	2.404	2.290	2.203	2.134	2.077	2.030
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.400	2.286	2.199	2.130	2.073	2.026
60	4.001	3.150	2.758	2.525	2.368	2.254	2.167	2.097	2.040	1.993
70	3.978	3.128	2.736	2.503	2.346	2.231	2.143	2.074	2.017	1.969
80	3.960	3.111	2.719	2.486	2.329	2.214	2.126	2.056	1.999	1.951
90	3.947	3.098	2.706	2.473	2.316	2.201	2.113	2.043	1.986	1.938
100	3.936	3.087	2.696	2.463	2.305	2.191	2.103	2.032	1.975	1.927
120	3.920	3.072	2.680	2.447	2.290	2.175	2.087	2.016	1.959	1.910
140	3.909	3.061	2.669	2.436	2.279	2.164	2.076	2.005	1.947	1.899
180	3.894	3.046	2.655	2.422	2.264	2.149	2.061	1.990	1.932	1.884
200	3.888	3.041	2.650	2.417	2.259	2.144	2.056	1.985	1.927	1.878
∞	3.841	2.996	2.605	2.372	2.214	2.099	2.010	1.938	1.880	1.831

Tabela "t-student"

Tabela A 2 - Tabela de distribuição "t-student" com $\alpha = 0.05$.



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
∞	.253	.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090

Anexo B

Resultados da primeira experiência de *screening*

Tabela B 3 - Resultados obtidos para os parâmetros RaA e RqA

Ensaio	Orientação [°]	Espessura [mm]	Tempo de exposição [s]	Anti- alising	RaA				RqA			
					Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
16	70	77.5	7	8	6.832	6.65	7.591	7.024	8.162	7.981	9.054	8.399
7	20	77.5	7	2	9.821	9.79	9.246	9.619	12.097	11.851	11.333	11.76
10	70	32.5	5	8	2.248	2.119	2.534	2.300	2.705	2.655	3.029	2.796
12	70	77.5	5	8	2.152	2.446	1.862	2.153	2.617	2.929	2.301	2.616
3	20	77.5	5	2	3.036	3.366	3.621	3.341	3.681	4.024	4.42	4.042
13	20	32.5	7	8	2.766	2.759	2.872	2.799	3.442	3.408	3.541	3.464
14	70	32.5	7	8	2.864	4.527	3.4	3.597	3.526	5.459	4.207	4.397
11	20	77.5	5	8	8.627	8.541	7.751	8.306	10.277	10.079	9.348	9.901
8	70	77.5	7	2	2.98	2.736	3.5	3.072	3.654	3.286	4.245	3.728
1	20	32.5	5	2	6.89	6.604	7.217	6.904	7.875	7.541	8.23	7.882
5	20	32.5	7	2	8.025	6.759	7.036	7.273	9.56	7.71	8.223	8.498
15	20	77.5	7	8	8.19	7.722	8.019	7.977	9.963	9.368	9.727	9.686
9	20	32.5	5	8	2.809	3.183	3.121	3.034	3.441	3.827	3.734	3.667
2	70	32.5	5	2	7.549	7.947	8.927	8.141	8.595	9.054	10.306	9.318
4	70	77.5	5	2	3.509	3.638	3.567	3.571	4.298	4.568	4.368	4.411
6	70	32.5	7	2	2.875	4.264	3.303	3.481	3.608	5.23	4.091	4.310

Tabela B 4 - Resultados obtidos para os parâmetros RzA, RskA e RkA

Ensaio	RzA				RskA				RkA			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
16	35.414	35.091	37.697	36.067	-0.29	-0.365	-0.198	-0.284	24.81	23.008	28.256	25.358
7	52.386	50.261	48.839	50.495	0.057	-0.024	-0.01	0.008	29.571	32.433	29.547	30.517
10	12.166	12.578	13.52	12.755	0.039	0.291	0.193	0.174	7.605	6.408	9.06	7.691
12	11.161	10.758	9.432	10.450	0.126	-0.013	0.031	0.048	7.495	8.744	5.987	7.409
3	15.837	16.033	18.569	16.813	-0.124	-0.319	-0.208	-0.217	10.64	10.243	12.532	11.138
13	15.75	15.57	16.104	15.808	0.324	0.66	0.603	0.529	8.425	7.966	8.529	8.307
14	16.246	23.54	19.991	19.926	0.037	0.076	0.148	0.087	9.026	14.171	9.907	11.035
11	41.842	39.691	39.848	40.460	-0.379	-0.403	-0.353	-0.378	27.263	26.484	26.523	26.757
8	14.876	13.771	16.807	15.151	-0.197	-0.097	-0.416	-0.237	10.51	9.946	11.79	10.749
1	30.431	29.444	31.672	30.516	-0.161	-0.222	-0.119	-0.167	20.808	19.395	22.093	20.765
5	40.351	28.487	32.452	33.763	-0.188	-0.153	-0.144	-0.162	24.283	20.609	24.533	23.142
15	43.844	42.352	43.223	43.140	-0.118	-0.038	-0.213	-0.123	28.397	26.088	28.186	27.557
9	14.798	15.796	15.65	15.415	-0.44	0.248	0.313	0.040	8.126	10.542	9.758	9.475
2	31.233	33.061	39.377	34.557	-0.204	-0.265	-0.095	-0.188	21.546	22.387	25.289	23.074
4	17.348	19.482	18.568	18.466	-0.011	0.001	0.174	0.055	11.93	10.339	11.437	11.235
6	18.071	22.851	19.501	20.141	0.177	0.121	0.374	0.224	9.227	14.171	10.503	11.300

Tabela B 5 - Resultados obtidos para os parâmetros RpkA, RvkA e RaB

Ensaio	RpkA				RvkA				RaB			
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média

	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
16	5.24	2.54	2.241	3.340	7.145	7.855	6.804	7.268	12.801	13.064	13.547	13.137
7	9.327	6.603	6.713	7.548	12.233	11.065	11.683	11.660	15.128	14.814	15.068	15.003
10	2.435	3.472	2.841	2.916	2.556	2.224	1.794	2.191	2.069	2.365	2.121	2.185
12	2.844	2.736	3.274	2.951	1.497	2.39	1.812	1.900	16.626	16.396	16.487	16.503
3	3.16	1.878	2.386	2.475	3.603	4.562	4.99	4.385	16.97	16.599	16.826	16.798
13	5.83	5.252	4.712	5.265	3.592	1.901	2.297	2.597	1.773	2.055	2.183	2.004
14	3.33	6.728	6.134	5.397	3.234	4.275	5.593	4.367	2.204	2.696	2.213	2.371
11	4.162	2.858	3.382	3.467	10.495	10.138	9.066	9.900	15.284	14.886	15.528	15.233
8	2.968	3.536	1.673	2.726	3.939	3.218	4.975	4.044	16.501	16.43	16.319	16.417
1	2.256	2.419	4.591	3.089	6.835	6.31	6.39	6.512	2.872	2.952	3.338	3.054
5	10.118	3.01	6.149	6.426	9.48	5.975	6.03	7.162	2.138	2.137	2.646	2.307
15	11.919	10.434	14.885	12.413	11.084	11.491	11.065	11.213	14.059	12.178	14.117	13.451
9	3.25	3.91	3.014	3.391	4.213	2.94	3.187	3.447	2.921	2.331	2.26	2.504
2	1.847	1.56	12.413	5.273	8.268	9	9.36	8.876	2.63	2.98	2.947	2.852
4	3.193	4.172	3.375	3.580	4.113	5.167	4.733	4.671	16.075	16.019	15.982	16.025
6	4.43	5.791	5.551	5.257	3.273	3.649	2.623	3.182	3.998	3.05	3.237	3.428

Tabela B 6 - Resultados obtidos para os parâmetros RqB, RzB e RskB

Ensaio	RqB				RzB				RskB			
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
16	14.601	14.886	15.544	15.010	48.259	49.929	52.904	50.364	-0.23	-0.197	-0.194	-0.207
7	17.302	16.986	17.244	17.177	60.018	58.471	59.551	59.347	-0.081	-0.256	-0.091	-0.143
10	2.52	2.839	2.584	2.648	11.391	12.416	11.28	11.696	-0.32	-0.184	-0.466	-0.323
12	19.119	18.85	18.958	18.976	67.299	65.45	66.161	66.303	-0.06	-0.148	-0.077	-0.095

3	19.41	19.091	19.292	19.264	67.185	66.185	65.973	66.448	-0.011	-0.01	-0.088	-0.036
13	2.113	2.504	2.737	2.451	8.619	11.093	11.595	10.436	-0.235	-0.23	0.035	-0.143
14	2.699	3.524	2.73	2.984	12.308	16.503	14.127	14.313	0.022	-0.261	-0.536	-0.258
11	17.491	17.046	17.658	17.398	59.621	58.45	58.877	58.983	-0.176	-0.241	-0.155	-0.191
8	19.049	18.961	18.831	18.947	66.663	66.032	66.007	66.234	-0.126	-0.12	-0.098	-0.115
1	3.339	3.461	3.903	3.568	13.024	13.428	14.596	13.683	-0.046	-0.097	0.033	-0.037
5	2.615	2.609	3.223	2.816	10.712	11.125	12.853	11.563	-0.154	-0.004	-0.334	-0.164
15	16.073	14.04	16.106	15.406	53.752	48.304	54.766	52.274	-0.125	-0.226	-0.177	-0.176
9	3.512	2.783	2.696	2.997	14.722	11.997	11.005	12.575	-0.344	-0.444	-0.424	-0.404
2	3.325	3.504	3.54	3.456	13.77	13.173	13.898	13.614	0.011	0.026	0.147	0.061
4	18.527	18.339	18.416	18.427	63.942	62.86	63.697	63.500	-0.079	-0.067	-0.066	-0.071
6	4.738	3.649	3.912	4.100	19.004	14.635	16.06	16.566	0.008	-0.056	-0.141	-0.063

Tabela B 7 - Resultados obtidos para os parâmetros RkB, RpkB e RvkB

Ensaio	RkB				RpkB				RvkB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
16	41.672	41.592	44.773	42.679	3.637	1.879	0.929	2.148	8.416	11.102	9.543	9.687
7	50.851	45.653	51.18	49.228	3.252	2.609	2.186	2.682	8.702	12.152	8.024	9.626
10	6.663	7.731	6.671	7.022	3.066	3.606	2.201	2.958	4.068	5.257	4.044	4.456
12	59.473	58.479	57.723	58.558	2.939	1.59	2.334	2.288	7.787	6.619	9.096	7.834
3	62.287	62.911	60.785	61.994	0.861	0	0.792	0.551	5.178	4.811	5.765	5.251
13	5.9	6.461	7.509	6.623	1.786	2.392	7.141	3.773	2.231	3.328	3.179	2.913

14	5.912	7.205	6.763	6.627	3.955	4.997	3.444	4.132	5.071	10.083	4.868	6.674
11	49.977	46.077	46.804	47.619	0.858	2.568	0.414	1.28	11.461	12.864	13.425	12.583
8	62.239	61.094	61.242	61.525	2.125	0.606	1.087	1.273	4.994	5.417	5.276	5.229
1	10.594	11.392	13.111	11.699	2.395	1.343	1.944	1.894	1.918	1.626	1.226	1.59
5	6.28	7.301	7.333	6.971	1.953	1.844	2.167	1.988	2.787	2.22	3.817	2.941
15	47.168	41.909	45.81	44.962	1.391	1.79	2.745	1.975	8.065	8.683	9.557	8.768
9	8.721	6.564	6.981	7.422	5.277	4.25	2.753	4.093	5.226	4.013	3.331	4.19
2	8.421	10.183	9.244	9.283	4.194	3.561	3.871	3.875	3.268	2.204	2.383	2.618
4	59.866	55.548	59.898	58.437	0.683	1.573	0.421	0.892	4.985	8.122	5.067	6.058
6	12.845	10.001	10.968	11.271	6.467	4.546	5.442	5.485	7.421	4.743	5.159	5.774

Tabela B 8 - Resultados obtidos para Ra

ANOVA; Var.:RaA; R-sqr=.73105; Adj.:.19314 2**(4-0) design; MS Residual=5.397233 DV: RaA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	15.8344	1	15.83443	2.933805	0.147417
(2)Espessura	3.5454	1	3.54538	0.656887	0.454492
(3)Texposição	3.1397	1	3.13969	0.581722	0.480054
(4)Anti-alising	4.2097	1	4.20968	0.779970	0.417584
1 by 2	7.4634	1	7.46337	1.382814	0.292559
1 by 3	1.6076	1	1.60761	0.297859	0.608685
1 by 4	0.2086	1	0.20862	0.038653	0.851879
2 by 3	11.4802	1	11.48024	2.127060	0.204523
2 by 4	24.8062	1	24.80621	4.596097	0.084903
3 by 4	1.0566	1	1.05661	0.195769	0.676642
Error	26.9862	5	5.39723		
Total SS	100.3380	15			

Tabela B 9 - Resultados obtidos para RaB

ANOVA; Var.:RaB; R-sqr=.99571; Adj.:98712 2**(4-0) design; MS Residual=.5699611 DV: RaB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.4111	1	0.4111	0.721	0.434496
(2)Espessura	648.5002	1	648.5002	1137.797	0.000000
(3)Texposição	3.0941	1	3.0941	5.429	0.067217
(4)Anti-alising	4.5128	1	4.5128	7.918	0.037379
1 by 2	0.0247	1	0.0247	0.043	0.843303
1 by 3	0.4262	1	0.4262	0.748	0.426719
1 by 4	0.0193	1	0.0193	0.034	0.861321
2 by 3	2.2993	1	2.2993	4.034	0.100839
2 by 4	0.6978	1	0.6978	1.224	0.318898
3 by 4	0.9441	1	0.9441	1.656	0.254437
Error	2.8498	5	0.5700		
Total SS	663.7793	15			

Tabela B 10 - Resultados obtidos para RkA

ANOVA; Var.:RkA; R-sqr=.77118; Adj.:31355 2**(4-0) design; MS Residual=47.17997 DV: RkA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	155.048	1	155.0482	3.286313	0.129601
(2)Espessura	80.688	1	80.6883	1.710224	0.247854
(3)Texposição	57.833	1	57.8335	1.225806	0.318624
(4)Anti-alising	21.005	1	21.0054	0.445219	0.534168
1 by 2	66.542	1	66.5421	1.410389	0.288328
1 by 3	9.539	1	9.5388	0.202180	0.671789
1 by 4	4.623	1	4.6232	0.097991	0.766890
2 by 3	125.799	1	125.7987	2.666357	0.163419
2 by 4	265.810	1	265.8095	5.633950	0.063668
3 by 4	8.165	1	8.1653	0.173067	0.694653
Error	235.900	5	47.1800		
Total SS	1030.953	15			

Tabela B 11 - Resultados obtidos para RkB

ANOVA; Var.:RkB; R-sqr=.98596; Adj.:95787 2**(4-0) design; MS Residual=23.79697 DV: RkB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	22.284	1	22.284	0.9364	0.377645
(2)Espessura	8014.084	1	8014.084	336.7692	0.000009
(3)Texposição	64.592	1	64.592	2.7143	0.160369
(4)Anti-alising	149.428	1	149.428	6.2793	0.054102
1 by 2	15.819	1	15.819	0.6647	0.451969
1 by 3	5.943	1	5.943	0.2498	0.638459
1 by 4	0.350	1	0.350	0.0147	0.908251
2 by 3	36.852	1	36.852	1.5486	0.268493
2 by 4	41.715	1	41.715	1.7530	0.242800
3 by 4	3.342	1	3.342	0.1404	0.723219
Error	118.985	5	23.797		
Total SS	8473.394	15			

Tabela B 12 - Resultados obtidos para RpkA

ANOVA; Var.:RpkA; R-sqr=.8568; Adj.:57041 2**(4-0) design; MS Residual=2.750319 DV: RpkA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	9.97191	1	9.97191	3.62573	0.115250
(2)Espessura	0.13789	1	0.13789	0.05014	0.831689
(3)Texposição	28.16602	1	28.16602	10.24100	0.023991
(4)Anti-aliasing	0.47886	1	0.47886	0.17411	0.693794
1 by 2	12.21270	1	12.21270	4.44047	0.088933
1 by 3	18.55168	1	18.55168	6.74529	0.048415
1 by 4	3.26766	1	3.26766	1.18810	0.325434
2 by 3	2.15894	1	2.15894	0.78498	0.416195
2 by 4	4.97216	1	4.97216	1.80785	0.236539
3 by 4	2.36339	1	2.36339	0.85932	0.396473
Error	13.75159	5	2.75032		
Total SS	96.03281	15			

Tabela B 13 - Resultados obtidos para RpkB

ANOVA; Var.:RpkB; R-sqr=.76401; Adj.:29202 2**(4-0) design; MS Residual=1.331709 DV: RpkB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	1.44841	1	1.44841	1.08763	0.344772
(2)Espessura	14.26699	1	14.26699	10.71330	0.022122
(3)Texposição	1.97777	1	1.97777	1.48514	0.277329
(4)Anti-aliasing	1.00334	1	1.00334	0.75342	0.425087
1 by 2	1.31637	1	1.31637	0.98848	0.365762
1 by 3	0.01127	1	0.01127	0.00846	0.930271
1 by 4	1.00300	1	1.00300	0.75317	0.425159
2 by 3	0.01626	1	0.01626	0.01221	0.916322
2 by 4	0.02098	1	0.02098	0.01575	0.905013
3 by 4	0.49187	1	0.49187	0.36935	0.569901
Error	6.65854	5	1.33171		
Total SS	28.21480	15			

Tabela B 14 - Resultados obtidos para RqA

ANOVA; Var.:RqA; R-sqr=.7322; Adj.:1966 (4-0) 2**(4-0) design; MS Residual=7.420974 DV: RqA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	22.3824	1	22.38236	3.016095	0.142953
(2)Espessura	6.5170	1	6.51696	0.878181	0.391722
(3)Texposição	5.7696	1	5.76960	0.777473	0.418280
(4)Anti-aliasing	5.0880	1	5.08803	0.685629	0.445365
1 by 2	11.4684	1	11.46838	1.545401	0.268928
1 by 3	2.4201	1	2.42010	0.326116	0.592664
1 by 4	0.2266	1	0.22658	0.030532	0.868144
2 by 3	15.2087	1	15.20870	2.049421	0.211683
2 by 4	31.2015	1	31.20153	4.204506	0.095583
3 by 4	1.1678	1	1.16784	0.157370	0.707955
Error	37.1049	5	7.42097		
Total SS	138.5550	15			

Tabela B 15 - Resultados obtidos para RqB

ANOVA; Var.:RqB; R-sqr=.99525; Adj.:98574
2**(4-0) design; MS Residual=.8139504
DV: RqB

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.7527	1	0.7527	0.925	0.380396
(2)Espessura	835.0222	1	835.0222	1025.888	0.000001
(3)Texposição	3.8439	1	3.8439	4.723	0.081819
(4)Anti-aliasing	6.1063	1	6.1063	7.502	0.040842
1 by 2	0.0359	1	0.0359	0.044	0.841992
1 by 3	0.5296	1	0.5296	0.651	0.456508
1 by 4	0.0343	1	0.0343	0.042	0.845546
2 by 3	3.2463	1	3.2463	3.988	0.102320
2 by 4	1.0849	1	1.0849	1.333	0.300472
3 by 4	1.2602	1	1.2602	1.548	0.268542
Error	4.0698	5	0.8140		
Total SS	855.9859	15			

Tabela B 16 - Resultados obtidos para RskA

ANOVA; Var.:RskA; R-sqr=.70996; Adj.:12988
2**(4-0) design; MS Residual=.0455242
DV: RskA

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.007627	1	0.007627	0.167540	0.699252
(2)Espessura	0.173611	1	0.173611	3.813601	0.108275
(3)Texposição	0.028505	1	0.028505	0.626144	0.464637
(4)Anti-aliasing	0.037765	1	0.037765	0.829569	0.404168
1 by 2	0.003461	1	0.003461	0.076033	0.793780
1 by 3	0.101336	1	0.101336	2.225984	0.195913
1 by 4	0.011845	1	0.011845	0.260185	0.631705
2 by 3	0.057920	1	0.057920	1.272300	0.310534
2 by 4	0.135056	1	0.135056	2.966692	0.145609
3 by 4	0.000044	1	0.000044	0.000976	0.976283
Error	0.227621	5	0.045524		
Total SS	0.784793	15			

Tabela B 17 - Resultados obtidos para RskB

ANOVA; Var.:RskB; R-sqr=.83355; Adj.:50064
2**(4-0) design; MS Residual=.0066799
DV: RskB

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.003108	1	0.003108	0.46529	0.525475
(2)Espessura	0.005563	1	0.005563	0.83275	0.403334
(3)Texposição	0.001885	1	0.001885	0.28219	0.618011
(4)Anti-aliasing	0.094710	1	0.094710	14.17835	0.013084
1 by 2	0.000707	1	0.000707	0.10579	0.758157
1 by 3	0.004128	1	0.004128	0.61798	0.467400
1 by 4	0.001647	1	0.001647	0.24656	0.640564
2 by 3	0.006467	1	0.006467	0.96810	0.370338
2 by 4	0.024206	1	0.024206	3.62373	0.115328
3 by 4	0.024833	1	0.024833	3.71749	0.111765
Error	0.033400	5	0.006680		
Total SS	0.200653	15			

Tabela B 18 - Resultados obtidos para RvkA

ANOVA; Var.:RvkA; R-sqr=.77739; Adj.:.33218
2**(4-0) design; MS Residual=6.843601
DV: RvkA

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	25.9488	1	25.94884	3.791694	0.109057
(2)Espessura	17.4473	1	17.44733	2.549437	0.171223
(3)Texposição	5.7744	1	5.77441	0.843768	0.400464
(4)Anti-aliasing	3.6182	1	3.61824	0.528704	0.499757
1 by 2	20.6464	1	20.64642	3.016895	0.142911
1 by 3	3.2095	1	3.20947	0.468974	0.523907
1 by 4	0.3856	1	0.38564	0.056351	0.821780
2 by 3	18.1661	1	18.16606	2.654460	0.164189
2 by 4	21.7374	1	21.73735	3.176303	0.134809
3 by 4	2.5632	1	2.56320	0.374540	0.567297
Error	34.2180	5	6.84360		
Total SS	153.7150	15			

Tabela B 19 - Resultados obtidos para RvkB

ANOVA; Var.:RvkB; R-sqr=.87816; Adj.:.63448
2**(4-0) design; MS Residual=3.367659
DV: RvkB

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.0137	1	0.01369	0.00406	0.951635
(2)Espessura	71.7409	1	71.74090	21.30290	0.005759
(3)Texposição	3.0900	1	3.08998	0.91754	0.382112
(4)Anti-aliasing	20.2890	1	20.28902	6.02467	0.057615
1 by 2	14.6498	1	14.64976	4.35013	0.091398
1 by 3	2.0765	1	2.07648	0.61659	0.467873
1 by 4	0.0003	1	0.00034	0.00010	0.992346
2 by 3	0.9332	1	0.93316	0.27709	0.621119
2 by 4	3.4219	1	3.42188	1.01610	0.359709
3 by 4	5.1468	1	5.14685	1.52832	0.271269
Error	16.8383	5	3.36766		
Total SS	138.2003	15			

Tabela B 20 - Resultados obtidos para RzA

ANOVA; Var.:RzA; R-sqr=.75684; Adj.:.27053
2**(4-0) design; MS Residual=112.8773
DV: RzA

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	389.043	1	389.0428	3.446597	0.122520
(2)Espessura	144.982	1	144.9817	1.284418	0.308479
(3)Texposição	189.475	1	189.4752	1.678594	0.251697
(4)Anti-aliasing	41.867	1	41.8674	0.370910	0.569116
1 by 2	245.314	1	245.3139	2.173279	0.200431
1 by 3	38.892	1	38.8919	0.344550	0.582717
1 by 4	3.655	1	3.6551	0.032381	0.864259
2 by 3	242.331	1	242.3315	2.146857	0.202755
2 by 4	443.797	1	443.7974	3.931678	0.104198
3 by 4	17.350	1	17.3500	0.153707	0.711172
Error	564.387	5	112.8773		
Total SS	2321.094	15			

Tabela B 21 - Resultados obtidos para RzB

ANOVA; Var.:RzB; R-sqr=.99229; Adj.:97688
 2**(4-0) design; MS Residual=14.31557
 DV: RzB

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	18.667	1	18.667	1.3039	0.305212
(2)Espessura	8977.910	1	8977.910	627.1430	0.000002
(3)Texposição	41.291	1	41.291	2.8844	0.150198
(4)Anti-alising	72.298	1	72.298	5.0503	0.074530
1 by 2	0.126	1	0.126	0.0088	0.928991
1 by 3	6.803	1	6.803	0.4752	0.521290
1 by 4	0.013	1	0.013	0.0009	0.976694
2 by 3	50.148	1	50.148	3.5030	0.120161
2 by 4	28.081	1	28.081	1.9616	0.220245
3 by 4	21.708	1	21.708	1.5164	0.272924
Error	71.578	5	14.316		
Total SS	9288.622	15			

Anexo C

Resultados da segunda experiência de screening

Tabela C 1 - Resultados obtidos para RaA, RqA e RzA

Ensaio	Orientação [°]	Espessura [mm]	Tempo de exposição [s]	RaA				RqA				RzA			
				Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	70	77.5	3	12.571	12.677	12.364	12.537	15.313	15.485	15.082	15.293	63.612	64.187	62.814	63.538
3	20	77.5	3	7.806	5.799	7.927	7.177	9.243	7.253	9.423	8.640	35.755	33.249	37.15	35.385
1	20	32.5	3	9.768	9.47	9.464	9.567	11.226	10.904	10.882	11.004	41.557	40.945	39.908	40.803
8	70	77.5	5	13.741	13.852	12.625	13.406	16.407	16.671	15.532	16.203	65.628	67.158	64.266	65.684
2	70	32.5	3	10.292	10.257	10.2	10.250	11.859	11.881	11.797	11.846	43.544	44.582	43.812	43.979
6	70	32.5	5	10.012	9.623	9.776	9.804	11.591	11.234	11.407	11.411	43.937	42.468	44.028	43.478
5	20	32.5	5	8.233	8.84	9.173	8.749	9.548	10.31	10.609	10.156	37.904	41.272	40.404	39.860
7	20	77.5	5	5.555	5.818	5.373	5.582	6.691	6.859	6.566	6.705	28.187	27.257	28.186	27.877

Tabela C 2 - Resultados obtidos para RskA, RkA e RpkA

Ensaio	RskA				RkA				RpkA			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	0.053	0.134	0.156	0.114	37.89	37.74	37.061	37.564	12.345	12.972	11.847	12.388

3	-0.525	-0.728	-0.625	-0.626	21.741	15.667	20.678	19.362	2.547	3.746	3.835	3.376
1	0.289	0.267	0.265	0.274	29.065	28.961	28.468	28.831	10.194	8.253	8.939	9.129
8	-0.057	-0.286	-0.075	-0.139	46.496	46.128	37.81	43.478	6.211	4.983	10.084	7.093
2	0.251	0.230	0.235	0.239	34.055	33.394	33.017	33.489	7.252	8.091	7.638	7.660
6	0.16	0.162	0.174	0.165	34.928	34.012	33.508	34.149	6.487	6.129	7.085	6.567
5	0.08	0.136	0.192	0.136	30.581	30.173	29.067	29.940	3.945	6.285	7.56	5.930
7	-0.258	-0.061	-0.318	-0.212	18.764	20.883	19.229	19.625	2.972	2.328	2.541	2.614

Tabela C 3 - Resultados obtidos para RvkA, RaB e RqB

Ensaio	RvkA				RaB				RqB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	10.568	11.609	10.918	11.032	15.856	15.629	15.958	15.814	18.229	17.883	18.29	18.134
3	11.915	10.088	14.574	12.192	14.889	14.834	15.093	14.939	17.074	17.047	17.385	17.169
1	3.389	3.486	2.99	3.288	4.614	4.47	4.959	4.681	5.601	5.269	5.86	5.577
8	10.436	15.19	15.156	13.594	13.487	12.553	13.658	13.233	15.451	14.451	15.67	15.191
2	2.374	3.691	3.854	3.306	5.290	5.440	5.299	5.343	6.307	6.481	6.314	6.367
6	2.626	3.354	3.230	3.070	4.168	4.874	5.205	4.749	5.004	5.864	6.334	5.734
5	3.767	5.257	3.664	4.229	3.479	3.348	3.505	3.444	4.116	3.849	4.169	4.045
7	5.245	5.442	5.681	5.456	14.323	14.54	14.471	14.445	16.368	16.575	16.621	16.521

Tabela C 4 - Resultados para RzB, RskB e RkB

Ensaio	RzB				RskB				RkB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	61.975	60.458	62.353	61.595	-0.122	-0.131	-0.111	-0.121	55.301	54.008	55.509	54.939
3	58.054	59.590	59.928	59.191	-0.282	-0.149	-0.177	-0.203	42.599	46.981	50.117	46.566
1	23.982	20.821	24.077	22.960	-0.528	-0.521	-0.425	-0.491	12.773	12.409	13.596	12.926
8	53.661	50.754	54.367	52.927	-0.276	-0.378	-0.267	-0.307	38.725	32.973	41.041	37.580
2	26.209	26.33	26.256	26.265	-0.461	-0.448	-0.424	-0.444	18.024	17.711	17.27	17.668
6	20.592	24.452	26.963	24.002	-0.049	-0.116	-0.219	-0.128	14.339	17.543	18.216	16.700
5	15.268	13.472	15.515	14.752	0.123	-0.029	-0.094	0.000	12.63	12.504	14.232	13.122
7	56.262	56.832	57.100	56.731	-0.275	-0.239	-0.329	-0.281	39.724	39.452	42.243	40.473

Tabela C 5 - Resultados para RpkB e RvkB

Ensaio	RpkB				RvkB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	3.133	1.496	1.437	2.022	6.486	6.248	6.591	6.442
3	0.557	2.499	0.352	1.136	15.315	11.948	10.205	12.489
1	4.234	1.211	2.322	2.589	8.121	6.357	7.026	7.168
8	3.239	4.538	4.984	4.254	13.489	15.715	11.882	13.695
2	1.137	1.062	1.378	1.192	7.01	7.213	7.343	7.189
6	3.007	2.516	2.795	2.773	4.079	5.369	5.716	5.055
5	2.653	1.438	1.078	1.723	1.046	0.582	1.234	0.954
7	0.609	1.794	0.892	1.098	16.198	16.946	14.593	15.912

Tabela C 6 - Resultados obtidos para RaA

ANOVA; Var.:RaA; R-sqr=.98819; Adj.:.91736 2**(3-0) design; MS Residual=.5467094 DV: RaA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	27.83077	1	27.83077	50.90597	0.088649
(2)Espessura	0.01389	1	0.01389	0.02540	0.899377
(3)Texposição	0.49568	1	0.49568	0.90665	0.515590
1 by 2	16.37827	1	16.37827	29.95791	0.115043
1 by 3	1.00583	1	1.00583	1.83980	0.404439
2 by 3	0.03618	1	0.03618	0.06618	0.839704
Error	0.54671	1	0.54671		
Total SS	46.30734	7			

Tabela C 7 - Resultados obtidos para RaB

ANOVA; Var.:RaB; R-sqr=.99551; Adj.:.96856 2**(3-0) design; MS Residual=.9320676 DV: RaB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.3324	1	0.3324	0.3566	0.657286
(2)Espessura	202.1390	1	202.1390	216.8716	0.043163
(3)Texposição	3.0094	1	3.0094	3.2288	0.323299
1 by 2	0.6632	1	0.6632	0.7115	0.553913
1 by 3	0.2609	1	0.2609	0.2799	0.690209
2 by 3	0.1936	1	0.1936	0.2078	0.727733
Error	0.9321	1	0.9321		
Total SS	207.5306	7			

Tabela C 8 - Resultados obtidos para RkA

ANOVA; Var.:RkA; R-sqr=.99042; Adj.:.93292 2**(3-0) design; MS Residual=4.650233 DV: RkA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	324.1143	1	324.1143	69.69850	0.075893
(2)Espessura	5.0891	1	5.0891	1.09438	0.485651
(3)Texposição	7.8950	1	7.8950	1.69777	0.416724
1 by 2	137.6804	1	137.6804	29.60721	0.115708
1 by 3	3.3835	1	3.3835	0.72759	0.550402
2 by 3	2.4288	1	2.4288	0.52230	0.601603
Error	4.6502	1	4.6502		
Total SS	485.2413	7			

Tabela C 9 - Resultados obtidos para RkB

ANOVA; Var.:RkB; R-sqr=.99352; Adj.:95465
2**(3-0) design; MS Residual=12.7563
DV: RkB

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	23.805	1	23.805	1.8661	0.402280
(2)Espessura	1774.352	1	1774.352	139.0961	0.053850
(3)Texposição	73.358	1	73.358	5.7508	0.251513
1 by 2	1.008	1	1.008	0.0790	0.825568
1 by 3	19.319	1	19.319	1.5145	0.434407
2 by 3	64.294	1	64.294	5.0402	0.266772
Error	12.756	1	12.756		
Total SS	1968.893	7			

Tabela C 10 - Resultados obtidos para RpkA

ANOVA; Var.:RpkA; R-sqr=.91842; Adj.:42891
2**(3-0) design; MS Residual=5.508434
DV: RpkA

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	20.03340	1	20.03340	3.636859	0.307457
(2)Espessura	1.81991	1	1.81991	0.330387	0.667889
(3)Texposição	13.38945	1	13.38945	2.430718	0.363070
1 by 2	25.64115	1	25.64115	4.654890	0.276306
1 by 3	0.73670	1	0.73670	0.133740	0.776804
2 by 3	0.38970	1	0.38970	0.070746	0.834503
Error	5.50843	1	5.50843		
Total SS	67.51874	7			

Tabela C 11 - Resultados obtidos para RpkB

ANOVA; Var.:RpkB; R-sqr=.99952; Adj.:99667
2**(3-0) design; MS Residual=.0039161
DV: RpkB

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	1.706012	1	1.706012	435.6379	0.030478
(2)Espessura	0.006786	1	0.006786	1.7329	0.413582
(3)Texposição	1.057300	1	1.057300	269.9864	0.038697
1 by 2	2.407184	1	2.407184	614.6851	0.025664
1 by 3	2.779689	1	2.779689	709.8060	0.023884
2 by 3	0.273677	1	0.273677	69.8846	0.075793
Error	0.003916	1	0.003916		
Total SS	8.234564	7			

Tabela C 12 - Resultados obtidos para RqA

ANOVA; Var.:RqA; R-sqr=.98942; Adj:.92591 2**(3-0) design; MS Residual=.7387201 DV: RqA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	41.62521	1	41.62521	56.34774	0.084313
(2)Espessura	0.73548	1	0.73548	0.99562	0.500699
(3)Texposição	0.66567	1	0.66567	0.90111	0.516566
1 by 2	24.69288	1	24.69288	33.42657	0.109033
1 by 3	1.32655	1	1.32655	1.79574	0.408131
2 by 3	0.00839	1	0.00839	0.01135	0.932429
Error	0.73872	1	0.73872		
Total SS	69.79289	7			

Tabela C 13 - Resultados obtidos para RqB

ANOVA; Var.:RqB; R-sqr=.99517; Adj:.96616 2**(3-0) design; MS Residual=1.275737 DV: RqB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.5590	1	0.5590	0.4382	0.627755
(2)Espessura	256.4207	1	256.4207	200.9981	0.044830
(3)Texposição	4.1414	1	4.1414	3.2463	0.322566
1 by 2	1.0120	1	1.0120	0.7933	0.536779
1 by 3	0.2441	1	0.2441	0.1913	0.737507
2 by 3	0.2539	1	0.2539	0.1991	0.732839
Error	1.2757	1	1.2757		
Total SS	263.9068	7			

Tabela C 14 - Resultados obtidos para RskA

ANOVA; Var.:RskA; R-sqr=.89655; Adj:.27582 2**(3-0) design; MS Residual=.066917 DV: RskA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.081541	1	0.081541	1.218534	0.468594
(2)Espessura	0.351541	1	0.351541	5.253389	0.261904
(3)Texposição	0.000325	1	0.000325	0.004859	0.955697
1 by 2	0.083845	1	0.083845	1.252972	0.464184
1 by 3	0.045451	1	0.045451	0.679216	0.561183
2 by 3	0.017205	1	0.017205	0.257111	0.701247
Error	0.066917	1	0.066917		
Total SS	0.646825	7			

Tabela C 15 - Resultados obtidos para RskB

ANOVA; Var.:RskB; R-sqr=.99708; Adj.:97959 2**(3-0) design; MS Residual=.0005723 DV: RskB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.000082	1	0.000082	0.1439	0.769197
(2)Espessura	0.002875	1	0.002875	5.0238	0.267158
(3)Texposição	0.036947	1	0.036947	64.5529	0.078831
1 by 2	0.002323	1	0.002323	4.0593	0.293297
1 by 3	0.009964	1	0.009964	17.4090	0.149754
2 by 3	0.143559	1	0.143559	250.8245	0.040144
Error	0.000572	1	0.000572		
Total SS	0.196323	7			

Tabela C 16 - Resultados obtidos para RvkA

ANOVA; Var.:RvkA; R-sqr=.90174; Adj.:3122 2**(3-0) design; MS Residual=13.71832 DV: RvkA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	4.2574	1	4.2574	0.310341	0.676429
(2)Espessura	100.6780	1	100.6780	7.338948	0.225120
(3)Texposição	1.5045	1	1.5045	0.109673	0.796408
1 by 2	8.2391	1	8.2391	0.600590	0.580279
1 by 3	8.2445	1	8.2445	0.600985	0.580178
2 by 3	2.9752	1	2.9752	0.216876	0.722540
Error	13.7183	1	13.7183		
Total SS	139.6170	7			

Tabela C 17 - Resultados obtidos para RvkB

ANOVA; Var.:RvkB; R-sqr=.99996; Adj.:99969 2**(3-0) design; MS Residual=.0077709 DV: RvkB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	2.1459	1	2.14590	276.15	0.038264
(2)Espessura	99.2171	1	99.21709	12767.79	0.005634
(3)Texposição	0.6778	1	0.67784	87.23	0.067905
1 by 2	19.1766	1	19.17662	2467.75	0.012814
1 by 3	7.8223	1	7.82233	1006.62	0.020059
2 by 3	45.2422	1	45.24224	5822.02	0.008343
Error	0.0078	1	0.00777		
Total SS	174.2898	7			

Tabela C 18 - Resultados obtidos para RzA

ANOVA; Var.:RzA; R-sqr=.99119; Adj.:93834 2**(3-0) design; MS Residual=10.60915 DV: RzA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	661.643	1	661.6431	62.36530	0.080187
(2)Espessura	74.192	1	74.1924	6.99325	0.230155
(3)Texposição	5.791	1	5.7913	0.54588	0.594907
1 by 2	437.587	1	437.5868	41.24616	0.098337
1 by 3	12.741	1	12.7412	1.20096	0.470896
2 by 3	1.918	1	1.9175	0.18074	0.744086
Error	10.609	1	10.6092		
Total SS	1204.481	7			

Tabela C 19 - Resultados obtidos para RzB

ANOVA; Var.:RzB; R-sqr=.99304; Adj.:95129 2**(3-0) design; MS Residual=18.46598 DV: RzB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	15.558	1	15.558	0.8425	0.527239
(2)Espessura	2537.058	1	2537.058	137.3910	0.054181
(3)Texposição	58.311	1	58.311	3.1578	0.326315
1 by 2	24.343	1	24.343	1.3182	0.456164
1 by 3	0.009	1	0.009	0.0005	0.986227
2 by 3	0.054	1	0.054	0.0029	0.965656
Error	18.466	1	18.466		
Total SS	2653.798	7			

Anexo D

Resultados da experiência de *screening orange anycubic*

Tabela D 1 - Resultados obtidos para RaA, RqA e RzA

Ensaio	Orientação [°]	Espessura [mm]	Tempo de exposição [s]	RaA				RqA				RzA			
				Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	70	77.5	3	12.375	11.859	11.689	11.974	15.024	14.433	14.305	14.587	61.575	60.069	59.519	60.388
3	20	77.5	3	4.077	4.201	4.605	4.294	5.124	5.194	5.673	5.330	23.825	22.172	24.677	23.558
1	20	32.5	3	3.224	3.07	3.126	3.140	3.918	3.62	3.685	3.741	15.103	14.905	14.101	14.703
8	70	77.5	5	12.74	12.208	11.967	12.305	15.539	14.947	14.62	15.035	62.376	60.606	60.607	61.196
2	70	32.5	3	9.186	9.088	9.054	9.109	10.493	10.447	10.486	10.475	37.844	37.844	37.583	37.757
6	70	32.5	5	9.15	8.284	8.42	8.618	10.544	9.51	9.67	9.908	38.429	34.356	35.089	35.958
5	20	32.5	5	3.018	3.064	2.553	2.878	3.842	3.882	3.191	3.638	16.402	17.184	13.806	15.797
7	20	77.5	5	4.296	4.258	3.911	4.155	5.211	5.139	4.741	5.030	21.328	21.494	19.498	20.773

Tabela D 2 - Resultados obtidos para RskA, RkA e RpkA

Ensaio	RskA				RkA				RpkA			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	-0.158	-0.1	0.012	-0.082	37.082	35.794	33.403	35.426	8.636	8.146	9.784	8.855
3	-0.08	0.114	-0.083	-0.016	14.451	14.95	14.63	14.677	4.478	4.596	3.965	4.346

1	0.017	-0.026	-0.098	-0.036	10.419	10.699	10.992	10.703	3.065	1.63	1.17	1.955
8	-0.102	-0.128	-0.077	-0.102	38.124	35.787	34.511	36.141	9.046	9.13	10.596	9.591
2	0.058	0.086	0.139	0.094	33.937	33.859	33.922	33.906	4.323	4.212	4.082	4.206
6	-0.036	0.01	0.015	-0.004	33.379	29.105	31.134	31.206	2.994	3.553	2.371	2.973
5	0.254	-0.25	0.017	0.007	8.308	9.728	6.93	8.322	6.086	6.747	5.032	5.955
7	0.119	-0.068	0.038	0.030	14.445	15.759	14.69	14.965	3.92	3.144	3.127	3.397

Tabela D 3 - Resultados obtidos para RvKA, RaB e RqB

Ensaio	RvKA				RaB				RqB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	14.206	13.161	14.324	13.897	14.318	13.931	14.481	14.243	16.308	15.897	16.444	16.216
3	6.077	6.253	6.6	6.310	15.008	13.762	13.479	14.083	17.306	15.866	15.553	16.242
1	3.219	3.057	2.951	3.076	4.05	3.382	3.172	3.535	4.964	4.143	3.954	4.354
8	13.476	13.829	13.217	13.507	12.17	12.134	12.166	12.157	13.958	13.864	13.926	13.916
2	1.292	3.984	0.677	1.984	3.765	4.016	4.174	3.985	4.558	4.771	4.92	4.750
6	4.328	3.84	2.942	3.703	3.427	3.041	3.288	3.252	4.26	3.773	3.992	4.008
5	5.073	4.29	5.251	4.871	2.284	2.485	1.626	2.132	3.003	3.198	2.045	2.749
7	4.88	5.012	5.159	5.017	9.229	7.5	4.134	6.954	10.741	8.932	5.092	8.255

Tabela D 4 - Resultados para RzB, RskB e RkB

Ensaio	RzB				RskB				RkB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	54.807	53.958	54.486	54.417	-0.27	-0.241	-0.208	-0.240	40.749	37.103	38.295	38.716
3	60.9	56.806	55.144	57.617	-0.274	-0.218	-0.309	-0.267	47.113	40.168	40.047	42.443
1	20.281	17.152	16.666	18.033	0	0.14	0.14	0.093	13.216	10.025	9.8	11.014
8	49.257	47.877	49.041	48.725	-0.397	-0.403	-0.403	-0.401	29.333	29.001	28.383	28.906
2	18.566	19.127	19.508	19.067	-0.366	-0.334	-0.343	-0.348	12.577	14.283	14.616	13.825
6	17.615	15.588	16.218	16.474	-0.146	0.005	-0.154	-0.098	10.533	9.587	11.677	10.599
5	13.18	14.623	9.984	12.596	-0.235	0.155	0.068	-0.004	5.883	6.973	4.965	5.940
7	39.538	34.226	22.744	32.169	-0.686	-0.767	-0.512	-0.655	15.836	16.618	15.292	15.915

Tabela D 5 - Resultados para RpkB e RvkB

Ensaio	RpkB				RvkB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	1.081	0.628	1.533	1.081	13.317	16.485	16.425	15.409
3	1.437	2.264	1.079	1.593	12.839	14.359	13.152	13.45
1	3.097	4.426	4.271	3.931	4.903	4.215	4.691	4.603
8	2.23	4.096	2.923	3.083	18.535	17.226	18.199	17.987
2	2.551	1.278	0.804	1.544	6.575	6.182	7.137	6.631
6	3.71	3.098	2.723	3.177	4.581	3.955	3.419	3.985
5	8.707	5.556	2.461	5.575	5.383	4.964	2.128	4.158
7	3.573	3.347	2.004	2.975	20.583	15.485	8.203	14.757

Tabela D 6 - Resultados para RaA

ANOVA; Var.:RaA; R-sqr=.99943; Adj.:.99601 2**(3-0) design; MS Residual=.0611917 DV: RaA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	94.7996	1	94.79957	1549.223	0.016171
(2)Espessura	10.0868	1	10.08679	164.839	0.049485
(3)Texposição	0.0394	1	0.03943	0.644	0.569375
1 by 2	2.1228	1	2.12283	34.691	0.107065
1 by 3	0.0072	1	0.00722	0.118	0.789362
2 by 3	0.1115	1	0.11147	1.822	0.405946
Error	0.0612	1	0.06119		
Total SS	107.2285	7			

Tabela D 7 - Resultados para RaB

ANOVA; Var.:RaB; R-sqr=.98713; Adj.:.90994 2**(3-0) design; MS Residual=2.389298 DV: RaB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	6.0089	1	6.0089	2.51492	0.358162
(2)Espessura	149.0746	1	149.0746	62.39265	0.080169
(3)Texposição	16.1066	1	16.1066	6.74114	0.234048
1 by 2	1.7974	1	1.7974	0.75227	0.545152
1 by 3	4.0784	1	4.0784	1.70693	0.415896
2 by 3	6.2646	1	6.2646	2.62195	0.352204
Error	2.3893	1	2.3893		
Total SS	185.7198	7			

Tabela D 8 - Tabela ANOVA para RkA

ANOVA; Var.:RkA; R-sqr=.99993; Adj.:.99952 2**(3-0) design; MS Residual=.0694402 DV: RkA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	968.264	1	968.2640	13943.85	0.005391
(2)Espessura	36.429	1	36.4288	524.61	0.027777
(3)Texposição	2.080	1	2.0801	29.96	0.115048
1 by 2	2.165	1	2.1646	31.17	0.112828
1 by 3	0.001	1	0.0015	0.02	0.908390
2 by 3	4.626	1	4.6259	66.62	0.077612
Error	0.069	1	0.0694		
Total SS	1013.634	7			

Tabela D 9 - Tabela ANOVA para RkB

ANOVA; Var.:RkB; R-sqr=.9795; Adj.:85648 (2**(3-0) design; MS Residual=27.64085 DV: RkB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	35.002	1	35.0020	1.26631	0.462509
(2)Espessura	894.666	1	894.6662	32.36753	0.110767
(3)Texposição	249.058	1	249.0577	9.01049	0.204722
1 by 2	0.402	1	0.4019	0.01454	0.923608
1 by 3	43.079	1	43.0793	1.55854	0.429948
2 by 3	98.264	1	98.2638	3.55502	0.310446
Error	27.641	1	27.6409		
Total SS	1348.112	7			

Tabela D 10 - Tabela ANOVA para RpkA

ANOVA; Var.:RpkA; R-sqr=.88852; Adj.:21961 (2**(3-0) design; MS Residual=5.981764 DV: RpkA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	12.42761	1	12.42761	2.077582	0.386134
(2)Espessura	15.40403	1	15.40403	2.575164	0.354771
(3)Texposição	0.81473	1	0.81473	0.136202	0.774924
1 by 2	16.34300	1	16.34300	2.732137	0.346373
1 by 3	1.57383	1	1.57383	0.263105	0.698278
2 by 3	1.11080	1	1.11080	0.185697	0.740973
Error	5.98176	1	5.98176		
Total SS	53.65575	7			

Tabela D 11 - Tabela ANOVA para RkB

ANOVA; Var.:RpkB; R-sqr=.99671; Adj.:.977 (2**(3-0) design; MS Residual=.0498753 DV: RpkB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	3.36572	1	3.365715	67.4825	0.077117
(2)Espessura	3.77529	1	3.775294	75.6946	0.072853
(3)Texposição	5.54390	1	5.543895	111.1550	0.060203
1 by 2	2.39842	1	2.398415	48.0882	0.091175
1 by 3	0.04656	1	0.046563	0.9336	0.510934
2 by 3	0.00145	1	0.001449	0.0291	0.892522
Error	0.04988	1	0.049875		
Total SS	15.18121	7			

Tabela D 12 - Tabela ANOVA para RqA

ANOVA; Var.:RqA; R-sqr=.99881; Adj.:.99165 2**(3-0) design; MS Residual=.1838201 DV: RqA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	130.1368	1	130.1368	707.9578	0.023915
(2)Espessura	18.6681	1	18.6681	101.5563	0.062966
(3)Texposição	0.0341	1	0.0341	0.1853	0.741225
1 by 2	4.8953	1	4.8953	26.6310	0.121853
1 by 3	0.0100	1	0.0100	0.0546	0.853878
2 by 3	0.0836	1	0.0836	0.4550	0.622206
Error	0.1838	1	0.1838		
Total SS	154.0118	7			

Tabela D 13 - Tabela ANOVA para RqB

ANOVA; Var.:RqB; R-sqr=.9875; Adj.:.91251 (2**(3-0) design; MS Residual=2.907264 DV: RqB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	6.6454	1	6.6454	2.28581	0.372018
(2)Espessura	187.8762	1	187.8762	64.62302	0.078788
(3)Texposição	19.9501	1	19.9501	6.86217	0.232155
1 by 2	1.9801	1	1.9801	0.68107	0.560758
1 by 3	5.3628	1	5.3628	1.84463	0.404041
2 by 3	7.8818	1	7.8818	2.71106	0.347465
Error	2.9073	1	2.9073		
Total SS	232.6037	7			

Tabela D 14 - Tabela ANOVA para RskA

ANOVA; Var.:RskA; R-sqr=.97451; Adj.:.82154 2**(3-0) design; MS Residual=.0006907 DV: RskA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.000767	1	0.000767	1.11052	0.483324
(2)Espessura	0.006786	1	0.006786	9.82527	0.196601
(3)Texposição	0.000110	1	0.000110	0.15928	0.758254
1 by 2	0.012561	1	0.012561	18.18659	0.146632
1 by 3	0.005356	1	0.005356	7.75485	0.219479
2 by 3	0.000820	1	0.000820	1.18742	0.472694
Error	0.000691	1	0.000691		
Total SS	0.027091	7			

Tabela D 15 - Tabela ANOVA para RskB

ANOVA; Var.:RskB; R-sqr=.99547; Adj:.96829
2**(3-0) design; MS Residual=.0018
DV: RskB

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.008064	1	0.008064	4.4803	0.280977
(2)Espessura	0.181804	1	0.181804	101.0025	0.063137
(3)Texposição	0.019734	1	0.019734	10.9635	0.186722
1 by 2	0.083368	1	0.083368	46.3156	0.092879
1 by 3	0.041089	1	0.041089	22.8272	0.131350
2 by 3	0.061484	1	0.061484	34.1575	0.107883
Error	0.001800	1	0.001800		
Total SS	0.397344	7			

Tabela D 16 - Tabela ANOVA para RvkA

ANOVA; Var.:RvkA; R-sqr=.99919; Adj:.99435
2**(3-0) design; MS Residual=.12005
DV: RvkA

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	23.8671	1	23.86714	198.8100	0.045075
(2)Espessura	78.7303	1	78.73033	655.8129	0.024847
(3)Texposição	0.4195	1	0.41953	3.4946	0.312710
1 by 2	42.0292	1	42.02917	350.0972	0.033992
1 by 3	0.0854	1	0.08542	0.7116	0.553901
2 by 3	3.3765	1	3.37653	28.1261	0.118647
Error	0.1200	1	0.12005		
Total SS	148.6282	7			

Tabela D 17 - Tabela ANOVA para RvkB

ANOVA; Var.:RvkB; R-sqr=.99367; Adj:.95572
2**(3-0) design; MS Residual=1.507137
DV: RvkB

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	6.2017	1	6.2017	4.1149	0.291578
(2)Espessura	222.8688	1	222.8688	147.8756	0.052234
(3)Texposição	0.0787	1	0.0787	0.0522	0.856946
1 by 2	1.3892	1	1.3892	0.9217	0.512969
1 by 3	0.1083	1	0.1083	0.0719	0.833232
2 by 3	6.0825	1	6.0825	4.0358	0.294035
Error	1.5071	1	1.5071		
Total SS	238.2364	7			

Tabela D 18 - Tabela ANOVA para RzA

ANOVA; Var.:RzA; R-sqr=.99785; Adj.:98492 2**(3-0) design; MS Residual=5.259606 DV: RzA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	1814.047	1	1814.047	344.9018	0.034246
(2)Espessura	475.861	1	475.861	90.4747	0.066684
(3)Texposição	0.898	1	0.898	0.1708	0.750519
1 by 2	144.823	1	144.823	27.5350	0.119884
1 by 3	0.061	1	0.061	0.0116	0.931565
2 by 3	0.202	1	0.202	0.0384	0.876790
Error	5.260	1	5.260		
Total SS	2441.153	7			

Tabela D 19 - Tabela ANOVA para RzB

ANOVA; Var.:RzB; R-sqr=.98521; Adj.:89647 2**(3-0) design; MS Residual=35.74915 DV: RzB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	41.715	1	41.715	1.16688	0.475461
(2)Espessura	2008.470	1	2008.470	56.18231	0.084435
(3)Texposição	191.786	1	191.786	5.36477	0.259465
1 by 2	8.913	1	8.913	0.24931	0.705184
1 by 3	63.841	1	63.841	1.78581	0.408977
2 by 3	66.751	1	66.751	1.86721	0.402193
Error	35.749	1	35.749		
Total SS	2417.225	7			

Anexo E

Resultados da experiência de *screening orange* Prusa

Tabela E 1 - Resultados obtidos para RaA, RqA e RzA

Ensaio	Orientação [°]	Espessura [mm]	Tempo de exposição [s]	RaA				RqA				RzA			
				Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	70	77.5	3	1.748	2.34	1.717	1.935	2.183	3.064	2.153	2.467	10.069	15.931	9.758	11.919
3	20	77.5	3	8.555	8.391	7.739	8.228	9.811	9.664	9.004	9.493	36.802	36.653	34.173	35.876
1	20	32.5	3	2.129	2.698	2.434	2.420	2.569	3.226	2.932	2.909	11.679	14.24	13.094	13.004
8	70	77.5	5	3.654	2.783	2.633	3.023	4.249	3.462	3.182	3.631	16.191	15.139	13.994	15.108
2	70	32.5	3	1.987	1.957	1.86	1.935	2.545	2.431	2.632	2.536	11.838	10.629	13.248	11.905
6	70	32.5	5	3.244	2.053	1.337	2.211	4.253	2.497	1.682	2.811	19.962	11.202	8.125	13.096
5	20	32.5	5	2.522	2.659	2.268	2.483	3.195	3.32	2.855	3.123	15.85	16.355	14.502	15.569
7	20	77.5	5	8.728	8.24	7.781	8.250	10.347	9.746	9.109	9.734	42.393	39.725	37.709	39.942

Tabela E 2 - Resultados obtidos para RskA, RkA e RpkA

Ensaio	RskA				RkA				RpkA			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	0.068	0.024	0.054	0.049	5.269	6.28	5.917	5.822	2.37	4.969	2.205	3.181
3	-0.37	-0.347	-0.453	-0.39	21.29	23.076	20.187	21.518	3.545	1.83	3.07	2.815

1	-0.082	-0.169	0.004	-0.082	7.507	9.345	8.528	8.460	1.882	2.641	2.275	2.266
8	0.17	0.388	0.175	0.244	12.836	8.74	9.419	10.332	2.506	4.76	2.756	3.341
2	0.017	0.346	0.619	0.327	4.968	5.506	4.968	5.147	3.442	3.309	6.786	4.512
6	0.723	0.11	0.028	0.287	8.058	6.475	4.226	6.253	10.826	4.619	2.826	6.090
5	0.124	0.325	-0.073	0.125	7.763	8.734	7.161	7.886	4.462	4.154	2.681	3.766
7	-0.407	-0.235	-0.399	-0.347	23.504	27.987	20.72	24.070	8.386	5.567	3.441	5.798

Tabela E 3 - Resultados obtidos para RvkA, RaB e RqB

Ensaio	RvkA				RaB				RqB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	2.063	5.58	2.199	3.281	13.149	13.985	13.968	13.701	15.02	15.843	15.894	15.586
3	12.626	10.684	11.234	11.515	14.27	13.823	14.188	14.094	16.301	15.842	16.203	16.115
1	2.021	2.71	2.299	2.343	1.43	1.842	1.479	1.584	1.819	2.413	1.864	2.032
8	1.364	1.812	1.879	1.685	10.847	11.695	11.893	11.478	12.565	13.417	13.639	13.207
2	4.583	3.211	2.873	3.556	1.91	1.874	1.867	1.884	2.408	2.321	2.27	2.333
6	4.512	2.478	1.322	2.771	1.681	1.636	1.629	1.649	2.073	2.001	1.995	2.023
5	3.291	3.883	3.513	3.562	1.564	2.353	2.415	2.111	1.934	2.933	3.014	2.627
7	13.336	7.634	11.335	10.768	10.268	8.303	8.85	9.140	11.683	9.55	10.149	10.461

Tabela E 4 - Resultados para RzB, RskB e RkB

Ensaio	RzB				RskB				RkB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	50.332	53.23	53.551	52.371	-0.436	-0.382	-0.43	-0.416	27.728	28.919	30.289	28.979
3	54.15	53.457	54.542	54.050	-0.334	-0.308	-0.352	-0.331	35.734	36.163	34.744	35.547
1	9.288	13.154	9.318	10.587	0.087	0.637	0.305	0.343	4.423	5.588	4.652	4.888
8	43.41	46.741	45.686	45.279	-0.642	-0.585	-0.586	-0.604	20.324	19.084	20.073	19.827
2	11.286	10.57	10.121	10.659	0.15	-0.12	-0.432	-0.134	6	6.095	5.936	6.010
6	9.966	8.912	8.915	9.264	0.079	0.255	0.242	0.192	5.63	5.256	5.52	5.469
5	9.055	13.004	14.491	12.183	0.369	-0.082	-0.047	0.080	4.605	6.805	7.053	6.154
7	38.626	34.06	35.567	36.084	-0.402	-0.521	-0.492	-0.472	21.346	17.185	19.092	19.208

Tabela E 5 - Resultados para RzB e RskB

Ensaio	RzB				RskB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
4	1.18	0.958	0.919	1.019	22.538	24.224	23.457	23.406
3	1.178	1.52	1.375	1.358	19.381	18.09	20.331	19.267
1	2.215	4.235	2.5	2.983	1.7	2.196	1.9	1.932
8	1.269	2.411	0.388	1.356	22.729	25.592	25.173	24.498
2	2.752	1.828	1.479	2.020	1.939	2.303	2.562	2.268
6	2.066	2.342	2.144	2.184	1.646	1.42	1.254	1.440
5	2.414	3.601	3.909	3.308	1.763	3.614	3.288	2.888
7	0.484	3.382	1.022	1.629	18.017	15.902	15.358	16.426

Tabela E 6 - Tabela ANOVA para RaA

ANOVA; Var.:RaA; R-sqr=.99829; Adj.:98802 2**(3-0) design; MS Residual=.0909511 DV: RaA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	18.84059	1	18.84059	207.1507	0.044161
(2)Espessura	19.17972	1	19.17972	210.8794	0.043770
(3)Texposição	0.26245	1	0.26245	2.8856	0.338717
1 by 2	14.47848	1	14.47848	159.1896	0.050352
1 by 3	0.20512	1	0.20512	2.2553	0.373990
2 by 3	0.07418	1	0.07418	0.8156	0.532391
Error	0.09095	1	0.09095		
Total SS	53.13149	7			

Tabela E 7 - Tabela ANOVA para RaB

ANOVA; Var.:RaB; R-sqr=.99331; Adj.:95315 2**(3-0) design; MS Residual=1.525131 DV: RaB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.3974	1	0.3974	0.2606	0.699533
(2)Espessura	212.0393	1	212.0393	139.0302	0.053863
(3)Texposição	5.9231	1	5.9231	3.8837	0.298942
1 by 2	0.5549	1	0.5549	0.3639	0.654459
1 by 3	0.4846	1	0.4846	0.3178	0.673223
2 by 3	6.9708	1	6.9708	4.5706	0.278531
Error	1.5251	1	1.5251		
Total SS	227.8952	7			

Tabela E 8 - Tabela ANOVA para RkA

ANOVA; Var.:RkA; R-sqr=.99997; Adj.:99982 2**(3-0) design; MS Residual=.0096142 DV: RkA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	147.7481	1	147.7481	15367.65	0.005135
(2)Espessura	144.4603	1	144.4603	15025.69	0.005193
(3)Texposição	7.2086	1	7.2086	749.79	0.023239
1 by 2	74.9618	1	74.9618	7796.97	0.007209
1 by 3	1.6532	1	1.6532	171.95	0.048455
2 by 3	5.3312	1	5.3312	554.51	0.027019
Error	0.0096	1	0.0096		
Total SS	381.3728	7			

Tabela E 9 - Tabela ANOVA para RkB

ANOVA; Var.:RkB; R-sqr=.98995; Adj:.92962 2**(3-0) design; MS Residual=10.116 DV: RkB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	3.798	1	3.7978	0.37542	0.650039
(2)Espessura	820.922	1	820.9217	81.15080	0.070382
(3)Texposição	76.669	1	76.6693	7.57902	0.221812
1 by 2	5.098	1	5.0976	0.50392	0.607002
1 by 3	3.617	1	3.6172	0.35757	0.656910
2 by 3	85.910	1	85.9098	8.49247	0.210440
Error	10.116	1	10.1160		
Total SS	1006.129	7			

Tabela E 10 - Tabela ANOVA para RpkA

ANOVA; Var.:RpkA; R-sqr=.92161; Adj:.45127 2**(3-0) design; MS Residual=1.0527 DV: RpkA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.76880	1	0.768800	0.730312	0.549815
(2)Espessura	0.28100	1	0.281000	0.266933	0.696407
(3)Texposição	4.83605	1	4.836050	4.593947	0.277909
1 by 2	5.54778	1	5.547781	5.270046	0.261535
1 by 3	0.94211	1	0.942107	0.894943	0.517656
2 by 3	0.00052	1	0.000523	0.000497	0.985816
Error	1.05270	1	1.052700		
Total SS	13.42896	7			

Tabela E 11 - Tabela ANOVA para RpkB

ANOVA; Var.:RpkB; R-sqr=.99863; Adj:.99039 2**(3-0) design; MS Residual=.0063657 DV: RpkB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.911025	1	0.911025	143.1151	0.053092
(2)Espessura	3.293461	1	3.293461	517.3777	0.027970
(3)Texposição	0.150609	1	0.150609	23.6595	0.129083
1 by 2	0.272199	1	0.272199	42.7604	0.096607
1 by 3	0.001128	1	0.001128	0.1772	0.746335
2 by 3	0.001790	1	0.001790	0.2812	0.689598
Error	0.006366	1	0.006366		
Total SS	4.636578	7			

Tabela E 12 - Tabela ANOVA para RqA

ANOVA; Var.:RqA; R-sqr=.99864; Adj.:99046 2**(3-0) design; MS Residual=.0930961 DV: RqA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	23.85678	1	23.85678	256.2596	0.039717
(2)Espessura	24.31020	1	24.31020	261.1301	0.039346
(3)Texposição	0.44856	1	0.44856	4.8183	0.272139
1 by 2	19.35561	1	19.35561	207.9099	0.044081
1 by 3	0.12095	1	0.12095	1.2992	0.458460
2 by 3	0.10496	1	0.10496	1.1274	0.480924
Error	0.09310	1	0.09310		
Total SS	68.29015	7			

Tabela E 13 - Tabela ANOVA para RqB

ANOVA; Var.:RqB; R-sqr=.99244; Adj.:94705 2**(3-0) design; MS Residual=2.185095 DV: RqB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.4578	1	0.4578	0.2095	0.726735
(2)Espessura	268.5828	1	268.5828	122.9158	0.057267
(3)Texposição	7.5046	1	7.5046	3.4344	0.315014
1 by 2	0.7936	1	0.7936	0.3632	0.654721
1 by 3	0.7027	1	0.7027	0.3216	0.671588
2 by 3	8.6493	1	8.6493	3.9583	0.296503
Error	2.1851	1	2.1851		
Total SS	288.8759	7			

Tabela E 14 - Tabela ANOVA para RskA

ANOVA; Var.:RskA; R-sqr=.9629; Adj.:7403 2**(3-0) design; MS Residual=.0200667 DV: RskA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.320534	1	0.320534	15.97339	0.156083
(2)Espessura	0.151617	1	0.151617	7.55564	0.222127
(3)Texposição	0.020605	1	0.020605	1.02680	0.495791
1 by 2	0.026297	1	0.026297	1.31047	0.457097
1 by 3	0.001136	1	0.001136	0.05661	0.851290
2 by 3	0.000636	1	0.000636	0.03170	0.887834
Error	0.020067	1	0.020067		
Total SS	0.540891	7			

Tabela E 15 - Tabela ANOVA para RskB

ANOVA; Var.:RskB; R-sqr=.93846; Adj:.5692 2**(3-0) design; MS Residual=.0507211 DV: RskB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	0.042389	1	0.042389	0.83573	0.528523
(2)Espessura	0.663744	1	0.663744	13.08615	0.171697
(3)Texposição	0.008822	1	0.008822	0.17394	0.748455
1 by 2	0.002726	1	0.002726	0.05374	0.854983
1 by 3	0.036585	1	0.036585	0.72130	0.551766
2 by 3	0.019175	1	0.019175	0.37805	0.649047
Error	0.050721	1	0.050721		
Total SS	0.824163	7			

Tabela E 16 - Tabela ANOVA para RvkA

ANOVA; Var.:RvkA; R-sqr=.99842; Adj:.98897 2**(3-0) design; MS Residual=.1666569 DV: RvkA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	35.6872	1	35.68717	214.1356	0.043437
(2)Espessura	28.1875	1	28.18753	169.1351	0.048855
(3)Texposição	0.4551	1	0.45506	2.7305	0.346457
1 by 2	39.3296	1	39.32958	235.9913	0.041383
1 by 3	1.0177	1	1.01769	6.1065	0.244798
2 by 3	0.9633	1	0.96327	5.7800	0.250941
Error	0.1667	1	0.16666		
Total SS	105.8070	7			

Tabela E 17 - Tabela ANOVA para RvkB

ANOVA; Var.:RvkB; R-sqr=.99453; Adj:.96173 2**(3-0) design; MS Residual=4.086464 DV: RvkB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	15.3985	1	15.3985	3.7682	0.302837
(2)Espessura	704.4193	1	704.4193	172.3787	0.048395
(3)Texposição	0.3287	1	0.3287	0.0804	0.824060
1 by 2	22.1900	1	22.1900	5.4301	0.258066
1 by 3	0.5773	1	0.5773	0.1413	0.771124
2 by 3	0.4410	1	0.4410	0.1079	0.797933
Error	4.0865	1	4.0865		
Total SS	747.4413	7			

Tabela E 18 - Tabela ANOVA para RzA

ANOVA; Var.:RzA; R-sqr=.99997; Adj.:99977 2**(3-0) design; MS Residual=.0307107 DV: RzA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	342.7355	1	342.7355	11160.14	0.006026
(2)Espessura	303.4539	1	303.4539	9881.06	0.006404
(3)Texposição	15.1553	1	15.1553	493.49	0.028638
1 by 2	255.5947	1	255.5947	8322.67	0.006978
1 by 3	0.6334	1	0.6334	20.62	0.137981
2 by 3	1.5304	1	1.5304	49.83	0.089587
Error	0.0307	1	0.0307		
Total SS	919.1339	7			

Tabela E 19 - Tabela ANOVA para RzB

ANOVA; Var.:RzB; R-sqr=.99153; Adj.:.9407 2**(3-0) design; MS Residual=24.02862 DV: RzB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação	2.725	1	2.725	0.1134	0.793195
(2)Espessura	2631.413	1	2631.413	109.5116	0.060650
(3)Texposição	77.223	1	77.223	3.2138	0.323927
1 by 2	13.423	1	13.423	0.5586	0.591389
1 by 3	7.766	1	7.766	0.3232	0.670911
2 by 3	79.754	1	79.754	3.3191	0.319579
Error	24.029	1	24.029		
Total SS	2836.333	7			

Anexo F

Resultados da experiência de RSM orange Prusa

Tabela F 1 - Resultados obtidos para os parâmetros RaA, RqA e RzA

Ensaio	Orientação [°]	Espessura [mm]	Tempo de exposição [s]	RaA				RqA				RzA			
				Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
34(C)	45	55	4	3.971	3.328	2.613	3.304	5.338	4.27	3.315	4.308	31.353	21.447	14.872	22.557
10	95	55	4	4.978	4.88	4.607	4.822	5.906	5.698	5.392	5.665	26.022	22.821	21.565	23.469
3	20	77.5	3	9.116	8.549	8.539	8.735	10.468	9.959	9.918	10.115	38.344	37.03	37.52	37.631
47	45	10	4	1.719	1.728	1.805	1.751	2.239	2.182	2.276	2.232	11.288	10.502	10.871	10.887
25	70	77.5	3	2.128	2.392	2.326	2.282	2.678	2.947	2.887	2.837	11.847	12.591	12.826	12.421
21	20	77.5	3	8.901	8.729	8.383	8.671	10.287	10.156	9.654	10.032	40.514	40.653	35.908	39.025
14	45	55	6	3.242	2.957	3.613	3.271	4.191	3.857	4.669	4.239	23.041	19.885	22.919	21.948
44	70	77.5	5	3.892	4.115	4.049	4.019	4.66	4.975	4.833	4.823	19.593	21.915	19.728	20.412
12	45	100	4	13.969	13.89	13.023	13.627	16.018	15.941	15.054	15.671	52.616	53.121	53.003	52.913
4	20	77.5	5	9.31	9.539	8.685	9.178	10.972	11.25	10.325	10.849	45.15	47.871	44.214	45.745
54(C)	45	55	4	3.567	3.943	3.954	3.821	4.359	4.978	4.894	4.744	19.464	24.04	22.657	22.053
2	20	32.5	5	2.687	2.823	3.175	2.895	3.426	3.505	3.997	3.643	18.267	16.652	19.045	17.988
45	-5	55	4	9.685	6.944	6.784	7.804	11.935	8.464	8.094	9.498	52.831	38.507	34.877	42.072
35(C)	45	55	4	4.414	4.523	4.4	4.446	5.334	5.457	5.282	5.358	24.151	24.32	23.284	23.918
20	20	32.5	5	3.668	3.964	3.393	3.675	4.813	5.061	4.449	4.774	28.84	26.194	23.699	26.244
46	95	55	4	5.259	5.33	5.431	5.340	6.191	6.295	6.563	6.350	25.611	25.725	29.069	26.802
42	70	32.5	5	2.187	2.325	2.152	2.221	2.725	2.837	2.782	2.781	12.558	13.028	14.161	13.249
37	20	32.5	3	2.932	2.811	3.317	3.020	3.533	3.566	4.475	3.858	16.417	17.986	26.975	20.459

48	45	100	4	8.968	9.069	9.369	9.135	10.585	10.63	11.051	10.755	38.47	37.704	39.839	38.671
1	20	32.5	3	2.979	2.715	3.199	2.964	3.665	3.36	4.121	3.715	17.452	16.507	21.088	18.349
41	70	32.5	3	2.303	2.345	2.061	2.236	2.935	2.906	2.534	2.792	14.677	14.446	12.073	13.732
7	70	77.5	3	3.078	2.952	1.754	2.595	4.068	3.852	2.239	3.386	20.36	18.016	10.714	16.363
53(C)	45	55	4	4.286	4.122	3.844	4.084	5.144	5.123	4.664	4.977	22.147	24.327	20.989	22.488
30	45	100	4	13.596	13.868	13.425	13.630	15.76	15.947	15.563	15.757	55.517	53.997	55.36	54.958
39	20	77.5	3	9.091	8.446	7.843	8.460	10.54	9.822	9.213	9.858	39.055	38.027	37.409	38.164
38	20	32.5	5	3.174	3.134	2.96	3.089	4.534	4.16	3.725	4.140	27.808	22.55	17.722	22.693
11	45	10	4	1.415	1.353	1.568	1.445	1.988	2.059	2.027	2.025	9.68	13.52	10.494	11.231
16(C)	45	55	4	4.085	3.818	4.186	4.030	5.061	4.626	5.121	4.936	24.381	22.044	23.673	23.366
49	45	55	2	4.497	5.242	3.997	4.579	5.927	6.613	4.891	5.810	30.15	30.737	22.092	27.660
8	70	77.5	5	3.683	4.168	4.05	3.967	4.411	4.935	4.795	4.714	18.818	20.456	20.58	19.951
26	70	77.5	5	4.518	4.29	3.658	4.155	5.459	5.251	4.372	5.027	24.242	23.274	18.431	21.982
31	45	55	2	4.811	5.089	5.831	5.244	5.692	6.022	6.792	6.169	23.762	24.686	26.742	25.063
19	20	32.5	3	2.832	3.028	3.75	3.203	3.484	3.835	4.67	3.996	16.213	21.462	21.27	19.648
9	-5	55	4	7.698	7.749	7.151	7.533	8.992	9.121	8.47	8.861	35.794	37.052	34.746	35.864
18(C)	45	55	4	4.193	4.114	3.891	4.066	5.419	5.085	4.836	5.113	27.318	23.216	23.556	24.697
23	70	32.5	3	2.574	2.574	2.795	2.648	3.152	3.213	3.447	3.271	14.033	15.678	15.967	15.226
52(C)	45	55	4	3.514	4.262	4.023	3.933	4.284	5.157	4.971	4.804	21.944	22.312	22.901	22.38
43	70	77.5	3	1.898	1.552	1.668	1.706	2.508	2.067	2.112	2.229	12.507	11.431	10.311	11.416
28	95	55	4	5.369	5.182	5.154	5.235	6.376	6.107	6.106	6.196	26.716	24.561	24.861	25.379
36(C)	45	55	4	4.735	4.886	4.596	4.739	6.312	6.584	6.369	6.422	30.9	33.53	33.048	32.493
50	45	55	6	3.467	2.572	2.731	2.923	4.378	3.369	3.468	3.738	21.743	18.421	17.265	19.143
24	70	32.5	5	2.178	2.888	1.529	2.198	2.917	3.683	1.889	2.830	15.193	17.985	8.671	13.950
33(C)	45	55	4	4.689	4.782	5.198	4.890	5.989	6.033	6.509	6.177	31.089	29.297	30.701	30.362
51(C)	45	55	4	5.675	6.521	6.405	6.200	7.671	8.976	8.5	8.382	39.443	45.467	39.18	41.363
17(C)	45	55	4	4.176	3.648	3.394	3.739	5.362	4.572	4.566	4.833	25.933	23.176	21.697	23.602
15(C)	45	55	4	4.254	3.59	4.284	4.043	5.12	4.365	5.217	4.901	23.96	30.32	23.533	25.938

22	20	77.5	5	9.163	8.476	7.875	8.505	10.71	9.965	9.375	10.017	43.721	41.942	40.053	41.905
27	-5	55	4	8.055	8.386	7.246	7.896	9.425	9.877	8.509	9.270	38.037	40.067	34.158	37.421
5	70	32.5	3	2.651	2.445	2.977	2.691	3.265	3.141	3.795	3.400	15.736	16.948	19.876	17.520
32	45	55	6	2.882	3.006	3.315	3.068	3.796	3.758	4.121	3.892	19.187	17.084	19.232	18.501
13	45	55	2	5.023	5.197	5	5.073	6.054	6.139	5.886	6.026	26.995	24.427	23.642	25.021
29	45	10	4	1.953	1.908	1.484	1.782	2.414	2.357	1.918	2.230	11.852	10.98	9.319	10.717
6	70	32.5	5	2.377	2.023	1.995	2.132	2.975	2.513	2.528	2.672	14.846	12.227	12.216	13.096
40	20	77.5	5	9.624	8.418	9.147	9.063	11.152	9.945	10.683	10.593	42.575	40.161	42.048	41.595

Tabela F 2 - Resultados obtidos para os parâmetros RskA, RkA e RpkA

Ensaio	RskA				RkA				RpkA			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
34(C)	0.224	-0.458	-0.174	-0.136	11.453	9.624	7.526	9.534	8.173	4.003	2.169	4.782
10	-0.076	-0.13	-0.149	-0.118	17.812	15.492	15.188	16.164	2.971	3.607	2.834	3.137
3	-0.304	-0.341	-0.259	-0.301	24.423	25.394	26.57	25.462	3.293	2.701	3.243	3.079
47	0.269	-0.137	0.205	0.112	4.601	5.419	5.784	5.268	3.173	2.628	3.226	3.009
25	-0.244	0.251	-0.004	0.001	6.393	7.812	7.027	7.077	2.394	3.44	3.598	3.144
21	-0.251	-0.364	-0.27	-0.295	27.273	24.399	24.634	25.435	4.438	3.399	2.034	3.290
14	-0.834	-0.321	0.12	-0.345	10.862	9.028	11.361	10.417	2.622	4.14	8.129	4.964
44	0.24	0.284	0.228	0.251	14.135	13.927	14.541	14.201	4.497	5.691	3.932	4.707
12	-0.579	-0.568	-0.674	-0.607	22.598	23.711	20.961	22.423	1.042	0.941	2.412	1.465
4	-0.165	-0.224	-0.16	-0.183	28.325	31.611	30.792	30.243	6.881	5.866	5.37	6.039
54(C)	-0.321	-0.244	-0.408	-0.324	12.321	10.76	12.326	11.802	1.341	5.82	4.204	3.788
2	-0.213	0.25	0.138	0.058	8.529	10.014	9.896	9.480	3.207	3.99	4.671	3.956
45	0.095	-0.185	-0.152	-0.081	27.774	21.281	23.903	24.319	20.187	6.493	3.62	10.100

35(C)	-0.387	-0.177	-0.113	-0.226	12.894	14.034	13.651	13.526	3.879	5.14	4.255	4.425
20	-0.676	-0.07	0.025	-0.240	11.542	13.2	10.091	11.611	5.786	5.919	6.017	5.907
46	-0.086	-0.036	-0.133	-0.085	17.55	17.834	17.986	17.790	4.012	4.313	6.371	4.899
42	0.26	0.146	0.611	0.339	6.299	7.544	7.041	6.961	3.49	2.859	4.88	3.743
37	-0.007	-0.362	-0.84	-0.403	10.796	8.488	9.858	9.714	2.604	3.233	5.609	3.815
48	-0.752	-0.699	-0.766	-0.739	16.608	15.596	15.231	15.812	0.615	1.248	1.997	1.287
1	-0.015	0.066	-0.189	-0.046	10.04	9.026	8.983	9.350	3.198	2.815	5.314	3.776
41	0.573	0.281	0.347	0.400	7.28	7.585	6.654	7.173	4.514	3.741	2.839	3.698
7	0.855	0.042	-0.251	0.215	8.87	8.686	4.828	7.461	8.04	8.609	2.668	6.439
53(C)	-0.317	-0.258	-0.424	-0.333	12.47	13.089	12.064	12.541	2.997	3.98	2.704	3.227
30	-0.553	-0.563	-0.564	-0.56	29.186	25.555	28.123	27.621	2.418	2.06	0.486	1.655
39	-0.268	-0.301	-0.328	-0.299	29.306	25.452	26.397	27.052	1.673	2.496	3.888	2.686
38	-1.114	-0.109	0.159	-0.355	9.113	9.096	9.457	9.222	5.411	5.539	5.666	5.539
11	-0.215	-1.626	-0.114	-0.652	3.791	3.392	4.16	3.781	3.127	2.436	3.162	2.908
16(C)	-0.295	-0.323	-0.083	-0.234	10.822	10.104	12.152	11.026	6.032	5.672	12.956	8.220
49	-0.223	-0.106	-0.707	-0.345	11.351	15.135	11.4	12.629	7.279	7.835	3.352	6.155
8	0.209	0.076	0.031	0.105	12.677	15.172	14.684	14.178	5.238	4.085	4.438	4.587
26	0.363	0.273	0.136	0.257	16.624	14.453	13.348	14.808	5.734	6.233	3.516	5.161
31	-0.65	-0.649	-0.434	-0.578	13.386	14.132	16.849	14.789	2.954	3.716	2.753	3.141
19	-0.015	-0.34	0.301	-0.018	9.405	9.825	11.549	10.260	2.559	3.071	8.316	4.649
9	-0.239	-0.205	0.045	-0.133	25.154	24.951	27.43	25.845	4.064	2.679	5.103	3.949
18(C)	-0.318	0.068	0.116	-0.045	13.085	13.758	12.77	13.204	5.679	6.936	6.439	6.351
23	0.394	0.352	-0.124	0.207	8.224	7.921	9.624	8.590	3.664	4.285	2.752	3.567
52(C)	-0.377	-0.026	-0.422	-0.275	11.33	14.616	11.609	12.518	3.565	4.496	3.454	3.838
43	0.65	-0.44	0.152	0.121	5.416	4.65	5.088	5.051	4.274	2.34	3.047	3.220
28	-0.307	-0.258	-0.034	-0.200	17.846	18.195	19.113	18.385	4.122	2.286	3.168	3.192
36(C)	-0.563	-0.659	-0.16	-0.461	14.915	14.17	12.535	13.873	8.487	16.607	15.486	13.527
50	0.246	-0.558	0.312	0	10.397	7.729	7.804	8.643	4.674	3.293	4.901	4.289

24	0.751	0.088	0.153	0.331	5.731	7.575	4.843	6.050	6.014	6.748	1.97	4.911
33(C)	-0.653	-0.401	-0.678	-0.577	13.776	13.718	13.625	13.706	8.06	7.998	7.125	7.728
51(C)	-0.608	-0.369	-0.499	-0.492	15.321	16.12	16.864	16.102	10.445	14.659	17.646	14.250
17(C)	-0.69	-0.002	0.186	-0.169	11.372	12.621	10.038	11.344	3.845	4.694	6.648	5.062
15(C)	-0.333	-0.567	-0.581	-0.494	13.85	10.694	13.76	12.768	5.15	1.95	1.966	3.022
22	-0.366	-0.296	-0.162	-0.275	26.914	28.326	25.9	27.047	3.4	5.409	6.404	5.071
27	-0.21	-0.032	0	-0.081	26.811	30.356	25.983	27.717	4.66	5.393	6.438	5.497
5	0.197	-0.052	-0.03	0.038	8.809	7.718	8.946	8.491	3.397	3.695	4.692	3.928
32	0.439	-0.372	-0.108	-0.014	7.62	9.415	10.696	9.244	5.656	2.617	3.529	3.934
13	-0.385	-0.512	-0.356	-0.418	13.59	14.32	15.869	14.593	4.766	3.317	3.869	3.984
29	0.022	-0.111	-0.517	-0.202	6.553	6.293	4.241	5.696	2.252	2.361	2.99	2.534
6	0.491	0.353	0.165	0.336	7.092	5.996	6.039	6.376	4.021	3.06	2.713	3.265
40	-0.394	-0.373	-0.295	-0.354	25.222	26.734	28.851	26.936	3.516	5.454	4.769	4.580

Tabela F 3 - Resultados obtidos para os parâmetros RvkA, RaB e RqB

Ensaio	RvkA				RaB				RqB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
34(C)	6.765	7.14	5.29	6.398	3.032	3.588	4.127	3.582	3.805	4.632	5.332	4.590
10	3.579	4.169	3.739	3.829	9.912	10.302	9.447	9.887	12.029	12.466	11.706	12.067
3	11.764	9.657	8.314	9.912	13.75	13.968	13.637	13.785	15.673	15.915	15.539	15.709
47	3.164	2.558	4.608	3.443	1.272	1.454	1.384	1.370	1.558	2.052	1.719	1.776
25	3.162	2.349	3.493	3.001	13.514	13.247	13.254	13.338	15.456	15.083	15.121	15.220
21	8.745	10.942	8.737	9.475	13.596	13.682	13.682	13.653	15.533	15.651	15.627	15.604
14	7.964	5.44	5.328	6.244	2.74	2.751	2.746	2.746	3.483	3.369	3.472	3.441
44	2.013	2.984	2.676	2.558	10.723	10.421	10.444	10.529	12.33	12.025	12.229	12.195

12	31.13	29.653	30.22	30.334	11.617	11.481	12.89	11.996	13.511	13.325	14.803	13.880
4	9.383	9.01	8.452	8.948	8.725	8.644	8.733	8.701	9.971	9.898	9.924	9.931
54(C)	4.929	8.437	7.723	7.030	3.149	3.549	4.141	3.613	4.038	4.503	5.221	4.587
2	5.92	2.88	7.51	5.437	2.401	2.34	1.861	2.201	3.129	3.047	2.292	2.823
45	16.084	9.259	7.198	10.847	7.381	6.423	6.069	6.624	8.801	7.722	7.41	7.978
35(C)	7.097	5.541	5.688	6.109	3.164	3.588	3.613	3.455	3.96	4.702	4.586	4.416
20	6.52	8.432	6.66	7.204	2.239	1.933	2.27	2.147	2.804	2.357	2.883	2.681
46	3.88	4.24	5.345	4.488	8.403	8.946	8.44	8.596	10.253	10.802	10.334	10.463
42	3.333	2.017	1.838	2.396	1.599	1.288	1.446	1.444	1.996	1.713	1.818	1.842
37	4.675	5.962	9.352	6.663	1.911	1.778	1.742	1.810	2.512	2.338	2.213	2.354
48	19.922	20.37	22.083	20.792	13.034	12.894	13	12.976	15.261	14.911	14.909	15.027
1	3.618	4.029	5.418	4.355	2.094	3.929	1.806	2.610	2.64	5.112	2.261	3.338
41	1.978	2.279	1.899	2.052	1.598	1.539	1.566	1.568	2.065	1.904	2.024	1.998
7	3.023	3.513	2.752	3.096	14.146	14.204	14.17	14.173	16.125	16.201	16.146	16.157
53(C)	6.963	6.363	5.284	6.203	3.273	2.56	2.934	2.922	4.104	3.23	3.71	3.681
30	24.439	28.386	25.611	26.145	12.466	12.521	13.679	12.889	14.503	14.484	16.073	15.02
39	8.35	9.578	8.429	8.786	13.219	13.9	13.974	13.698	15.08	15.799	15.913	15.597
38	11.14	7.238	6.146	8.175	1.878	3.01	1.791	2.226	2.338	3.995	2.243	2.859
11	5.101	4.498	3.013	4.204	2.391	1.966	1.764	2.040	3.193	2.505	2.15	2.616
16(C)	6.687	6.546	6.322	6.518	3.951	3.133	3.993	3.692	4.905	4.112	5.166	4.728
49	8.863	7.912	7.606	8.127	4.259	5.061	3.235	4.185	5.633	6.491	4.096	5.407
8	2.2	3.14	2.712	2.684	11.239	11.109	11.312	11.220	12.87	12.72	13.015	12.868
26	3.434	4.568	2.174	3.392	10.37	10.585	10.674	10.540	11.948	12.206	12.275	12.143
31	9.45	8.548	8.473	8.824	3.979	3.573	4.29	3.947	5.013	4.699	5.39	5.034
19	3.413	5.287	5.724	4.808	1.457	1.81	1.633	1.633	1.832	2.227	2.204	2.088
9	7.572	8.795	5.83	7.399	7.266	6.936	6.55	6.917	8.971	8.686	8.278	8.645
18(C)	7.218	6.626	5.677	6.507	4.879	4.249	4.09	4.406	6.169	5.289	5.272	5.577
23	1.823	2.664	5.762	3.416	1.466	1.449	2.394	1.770	1.95	1.938	3.11	2.333

52(C)	5.471	4.389	7.189	5.683	5.363	4.561	4.175	4.700	6.333	5.522	5.02	5.625
43	2.154	2.972	1.799	2.308	13.236	13.694	13.576	13.502	15.137	15.652	15.533	15.441
28	5.462	4.185	3.183	4.277	7.07	7.196	7.531	7.266	8.719	8.939	9.351	9.003
36(C)	11.513	13.963	13.033	12.836	4.18	3.753	4.594	4.176	5.447	4.808	6.055	5.438
50	5.296	4.687	5.059	5.014	2.779	3.089	3.403	3.090	3.464	3.899	4.363	3.909
24	3.424	5.507	1.467	3.466	1.938	1.579	1.571	1.696	2.466	1.993	1.987	2.149
33(C)	9.099	9.955	11.398	10.151	3.604	5.097	4.041	4.247	4.342	6.385	5.053	5.26
51(C)	17.072	25.22	19.209	20.500	5.43	7.116	5.586	6.044	7.424	9.278	7.561	8.088
17(C)	8.287	5.172	5.695	6.385	4.003	3.964	3.614	3.860	4.978	4.845	4.488	4.770
15(C)	5.712	5.741	7.113	6.189	3.456	4.325	4.588	4.123	4.162	5.203	5.528	4.964
22	10.874	8.936	8.511	9.440	8.62	7.957	8.066	8.214	9.927	9.257	9.245	9.476
27	7.772	6.479	4.361	6.204	7.81	6.945	7.939	7.565	9.605	8.719	9.621	9.315
5	3.027	3.874	5.722	4.208	1.405	1.845	1.694	1.648	1.736	2.371	2.124	2.077
32	4.196	5.616	5.745	5.186	3.192	3.297	3.287	3.259	4.015	4.146	4.36	4.174
13	9.241	8.544	6.421	8.069	3.61	3.969	2.75	3.443	4.697	5.053	3.562	4.437
29	2.864	3.496	3.075	3.145	2.15	1.838	1.333	1.774	2.555	2.179	1.713	2.149
6	3.661	1.769	3.249	2.893	1.171	1.345	1.86	1.459	1.63	1.685	2.304	1.873
40	13.597	9.173	9.008	10.593	10.335	9.536	9.43	9.767	11.991	11.07	10.981	11.347

Tabela F 4 - Resultados obtidos para os parâmetros RzB, RskB e RkB

Ensaio	RzB				RskB				RkB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
34(C)	17.861	23.557	26.515	22.644	-0.045	-0.104	-0.341	-0.163	9.222	10.322	11.462	10.335
10	43.53	46.101	44.017	44.549	0.469	0.32	0.358	0.382	26.67	24.075	22.55	24.432
3	51.231	53.158	52.636	52.342	-0.374	-0.383	-0.365	-0.374	30.944	32.129	32.279	31.784

47	7.518	12.09	8.718	9.442	0.139	0.135	0.238	0.171	4.071	3.238	4.723	4.011
25	52.045	51.955	52.436	52.145	-0.38	-0.356	-0.393	-0.376	31.849	30.126	30.003	30.659
21	52.006	53.333	52.899	52.746	-0.415	-0.373	-0.343	-0.377	29.848	32.396	33.978	32.074
14	15.955	15.718	17.915	16.529	-0.271	-0.286	-0.067	-0.208	7.342	8.941	9.321	8.535
44	42.241	41.54	43.661	42.481	-0.58	-0.602	-0.597	-0.593	19.618	17.521	19.274	18.804
12	49.212	45.518	49.207	47.979	-0.611	-0.637	-0.533	-0.594	21.205	19.26	23.21	21.225
4	35.101	33.836	34.515	34.484	-0.441	-0.512	-0.371	-0.441	19.351	17.07	19.364	18.595
54(C)	21.202	22.13	25.077	22.803	-0.18	0.199	-0.221	-0.067	9.276	10.742	12.899	10.972
2	16.773	15.258	11.234	14.422	-0.249	-0.134	0.014	-0.123	6.777	6.611	5.979	6.456
45	31.222	28.38	26.907	28.836	-0.14	0.007	0.131	-0.001	28.757	21.211	17.27	22.413
35(C)	19.423	24.767	23.541	22.577	-0.064	-0.687	-0.705	-0.485	9.496	8.997	10.546	9.680
20	13.762	10.785	14.285	12.944	0.31	0.212	-0.083	0.146	7.147	6.621	7.095	6.954
46	36.734	41.164	39.426	39.108	-0.107	-0.242	-0.17	-0.173	27.824	31.958	24.723	28.168
42	9.758	9.484	8.335	9.192	0.121	-0.451	0.117	-0.071	4.902	3.723	4.31	4.312
37	12.537	12.481	10.426	11.815	0.913	0.446	0.484	0.614	5.757	5.03	5.433	5.407
48	56.16	51.148	53.427	53.578	-0.101	-0.371	-0.374	-0.282	40.054	30.614	29.941	33.536
1	11.663	24.8	10.1	15.521	0.425	0.326	0.522	0.424	6.546	10.421	5.336	7.434
41	11.811	8.593	10.779	10.394	0.059	-0.161	-0.209	-0.104	5.011	5.048	4.908	4.989
7	54.965	55.144	54.097	54.735	-0.314	-0.233	-0.288	-0.278	36.546	37.385	34.618	36.183
53(C)	21.311	15.706	17.855	18.291	-0.111	-0.469	-0.334	-0.305	9.886	7.927	8.85	8.888
30	52.275	50.188	60.426	54.296	-0.578	-0.555	-0.661	-0.598	24.202	22.63	28.45	25.094
39	50.559	52.581	53.659	52.266	-0.422	-0.339	-0.349	-0.370	29.873	31.664	34.027	31.855
38	11.133	19.738	11.041	13.971	0.016	0.002	0.062	0.027	5.971	7.503	5.389	6.288
11	14.309	11.024	10.425	11.919	-0.028	-0.374	-0.096	-0.166	6.735	5.62	6.374	6.243
16(C)	23.065	22.087	26.05	23.734	-0.295	-0.41	0.193	-0.171	12.276	9.626	11.884	11.262
49	28.776	29.059	20.52	26.118	-0.261	-0.197	-0.283	-0.247	12.239	12.027	10.2	11.489
8	44.197	43.094	44.284	43.858	-0.548	-0.541	-0.554	-0.548	19.737	19.234	20.92	19.964
26	41.527	41.107	42.452	41.695	-0.623	-0.58	-0.551	-0.585	18.285	19.025	20.298	19.203

31	24.614	22.714	26.911	24.746	-0.154	-0.262	-0.263	-0.226	11.652	10.069	12.149	11.290
19	8.972	11.125	11.439	10.512	-0.525	-0.476	-0.36	-0.454	5.015	4.749	4.957	4.907
9	34.849	33.534	32.079	33.487	-0.286	-0.102	-0.239	-0.209	20.24	19.303	17.903	19.149
18(C)	29.86	24.292	25.902	26.685	-0.16	-0.235	-0.497	-0.297	16.418	14.535	12.038	14.330
23	9.886	10.254	15.004	11.715	-0.262	0.287	0.258	0.094	3.927	4.197	5.437	4.520
52(C)	26.482	24.981	23.412	24.958	-0.329	-0.478	-0.158	-0.322	17.238	13.045	12.947	14.410
43	50.85	54.112	52.416	52.459	-0.435	-0.364	-0.398	-0.399	30.176	32.812	31.932	31.640
28	35.379	33.834	34.615	34.609	-0.229	-0.231	-0.396	-0.285	21.855	20.063	21.653	21.190
36(C)	29.186	25.324	29.291	27.934	-0.462	-0.226	-0.356	-0.348	12.041	11.747	12.947	12.245
50	15.758	20.624	22.991	19.791	0.36	-0.188	-0.031	0.047	9.127	10.535	10.268	9.977
24	12.15	9.02	9.866	10.345	-0.537	-0.136	0.149	-0.175	6.289	4.777	4.875	5.314
33(C)	19.276	28.403	24.95	24.210	-0.272	-0.753	-0.293	-0.439	11.229	14.239	12.773	12.747
51(C)	36.371	43.834	36.903	39.036	-0.335	-0.221	-0.808	-0.455	15.158	17.443	11.449	14.683
17(C)	23.469	22.144	21.605	22.406	-0.232	-0.3	-0.577	-0.370	10.734	11.759	10.298	10.930
15(C)	18.545	23.379	24.175	22.033	-0.242	-0.091	-0.534	-0.289	11.752	14.526	13.96	13.413
22	34.302	36.072	32.418	34.264	-0.604	-0.518	-0.556	-0.559	15.257	19.774	16.003	17.011
27	36.292	33.514	35.626	35.144	-0.556	-0.638	-0.649	-0.614	24.475	21.866	24.384	23.575
5	8.457	11.492	11.016	10.322	0.08	0.521	0.306	0.302	4.484	5.185	5.245	4.971
32	18.814	19.174	22.222	20.070	-0.411	0.421	0.499	0.170	9.388	10.112	9.427	9.642
13	24.307	24.324	18.286	22.306	-0.05	-0.648	-0.05	-0.249	10.026	10.045	7.753	9.275
29	11.362	9.325	9.122	9.936	0.217	0.11	0.151	0.159	7.306	6.633	4.381	6.107
6	8.503	7.888	10.807	9.066	-0.443	0.415	0.1	0.024	2.815	4.237	6.055	4.369
40	43.105	38.764	39.458	40.442	-0.413	-0.573	-0.59	-0.525	21.991	19.307	19.447	20.248

Tabela F 5 - Resultados obtidos para os parâmetros RpkB e RvkB

Ensaio	RpkB				RvkB			
	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]	Medição 1 [μm]	Medição 2 [μm]	Medição 3 [μm]	Média [μm]
34(C)	4.823	6.967	5.943	5.911	4.993	6.026	7.794	6.271
10	12.701	15.773	14.081	14.185	7.219	9.098	9.501	8.606
3	0.93	0.834	1.403	1.056	21.879	20.835	19.694	20.803
47	1.815	3.559	1.904	2.426	1.587	3.941	1.989	2.506
25	0.91	2.921	0.437	1.423	20.246	19.538	21.261	20.348
21	0.627	4.453	1.871	2.317	21.868	19.807	18.776	20.150
14	3.388	2.662	4.547	3.532	7.072	4.334	5.111	5.506
44	2.336	0.551	8.325	3.737	22.334	23.069	22.247	22.550
12	4.385	0.827	2.699	2.637	25.232	25.403	26.311	25.649
4	2.285	0.612	1.881	1.593	14.734	16.812	14.052	15.199
54(C)	3.854	6.793	8.417	6.355	5.771	5.378	6.803	5.984
2	3.778	3.968	2.911	3.552	4.71	4.179	2.125	3.671
45	3.305	3.449	6.306	4.353	6.942	6.912	5.875	6.576
35(C)	4.156	5.179	3.139	4.158	5.481	9.774	7.65	7.635
20	3.94	2.436	3.51	3.295	2.645	1.682	5.084	3.137
46	1.561	4.664	5.188	3.804	9.788	8.132	10.276	9.399
42	2.137	1.789	2.199	2.042	2.524	2.991	2.281	2.599
37	4.445	3.477	2.842	3.588	1.528	3.351	2.581	2.487
48	7.82	10.4	7.508	8.576	9.722	18.391	19.507	15.873
1	3.977	9.784	3.176	5.646	1.623	8.472	1.49	3.862
41	2.846	2.167	2.095	2.369	3.289	1.71	2.637	2.545
7	1.026	6.431	0.311	2.589	18.322	17.328	19.808	18.486
53(C)	4.734	2.681	4.277	3.897	5.084	4.919	6.261	5.421

30	2.954	1.279	6.264	3.499	25.225	25.769	26.373	25.789
39	1.6	1.431	4.552	2.528	20.735	20.802	19.005	20.181
38	2.802	7.032	3.523	4.452	3.62	8.185	2.299	4.701
11	9.69	2.913	1.476	4.693	3.019	3.085	2.725	2.943
16(C)	3.412	5.153	7.98	5.515	7.449	7.476	5.706	6.877
49	7.427	13.894	3.783	8.368	8.282	11.199	6.557	8.679
8	2.127	1.429	0.817	1.458	22.913	23.462	22.88	23.085
26	1.675	0.282	1.934	1.297	22.301	22.205	21.26	21.922
31	6.204	6.11	6.75	6.355	7.111	7.858	9.737	8.235
19	1.181	2.368	3.136	2.228	2.702	3.593	4.719	3.671
9	7.086	5.86	5.423	6.123	9.93	10.583	10.594	10.369
18(C)	5.201	3.29	4.935	4.475	8.892	8.512	7.401	8.268
23	3.612	2.532	6.532	4.225	3.024	3.513	6.633	4.390
52(C)	4.175	3.439	4.641	4.085	6.323	7.46	5.227	6.337
43	1.206	2.333	0.392	1.310	20.738	20.071	20.515	20.441
28	4.328	3.693	4.397	4.139	9.369	11.054	10.516	10.313
36(C)	10.854	5.432	12.081	9.456	8.261	6.311	11.133	8.568
50	4.699	4.859	6.209	5.256	2.522	4.991	6.041	4.518
24	1.368	1.941	2.517	1.942	4.529	2.722	2.098	3.116
33(C)	2.388	3.591	3.9	3.293	4.164	10.909	6.948	7.340
51(C)	7.913	12.69	17.848	12.817	16.759	18.441	17.703	17.634
17(C)	5.547	4.007	3.367	4.307	7.643	6.291	6.278	6.737
15(C)	2.101	4.342	3.197	3.213	4.004	4.661	6.3	4.988
22	0.868	4.196	0.861	1.975	18.324	12.458	16.243	15.675
27	5.094	1.757	0.793	2.548	11.996	12.841	11.956	12.264
5	1.823	3.929	3.268	3.007	1.671	2.334	1.901	1.969
32	2.775	5.292	7.196	5.088	5.703	3.256	5.247	4.735
13	6.063	4.481	4.605	5.050	7.246	8.858	5.482	7.195

29	2.166	1.86	2.197	2.074	2.239	1.253	2.138	1.877
6	1.692	2.459	2.103	2.085	3.807	1.422	3.891	3.040
40	13.872	0.747	2.023	5.547	18.126	18.741	18.356	18.408

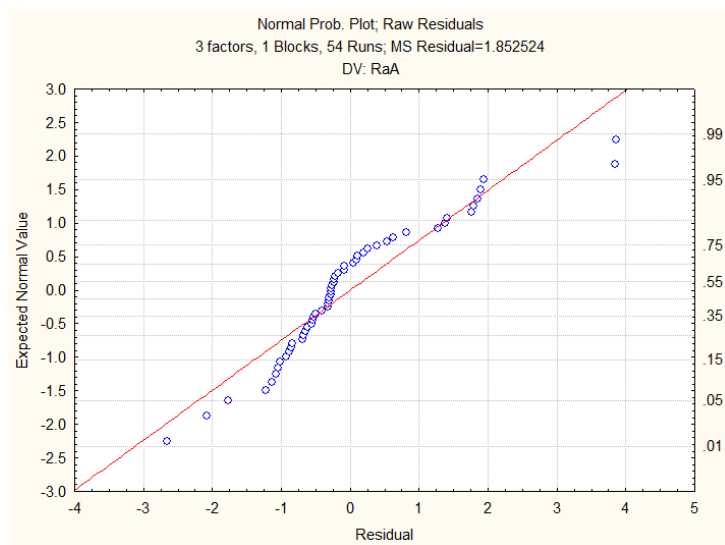


Figura F 1 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente ao parâmetro RaA

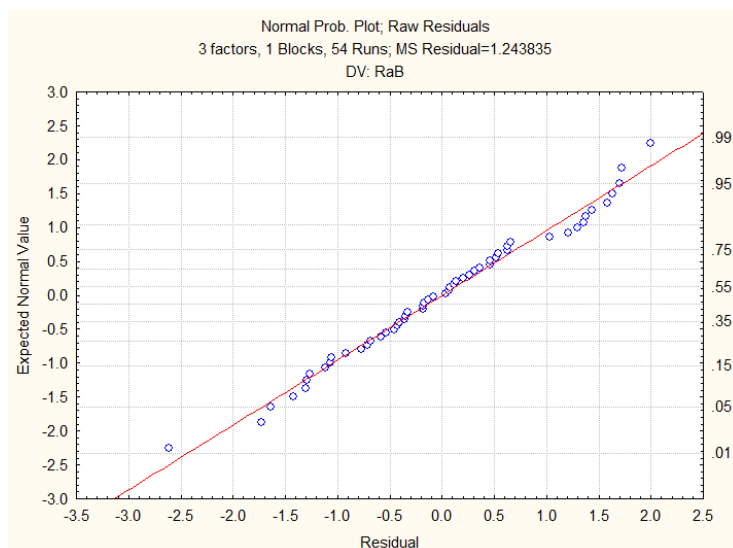


Figura F 2 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente ao parâmetro RaB

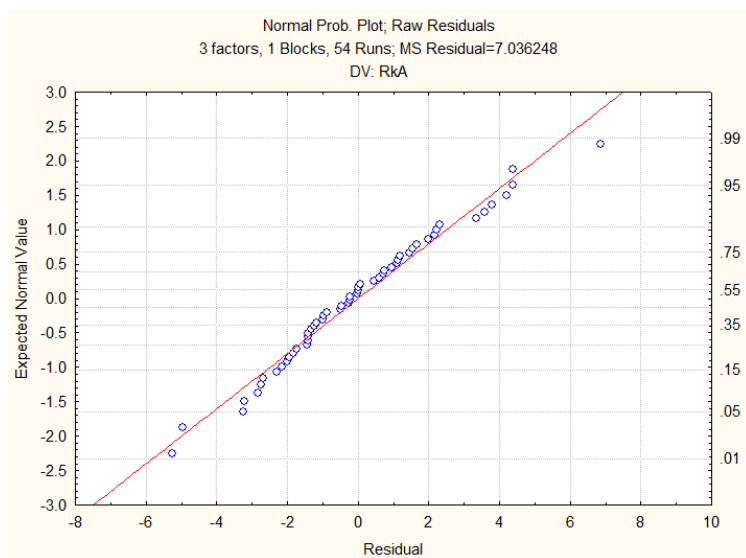


Figura F 3 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente ao parâmetro RkA

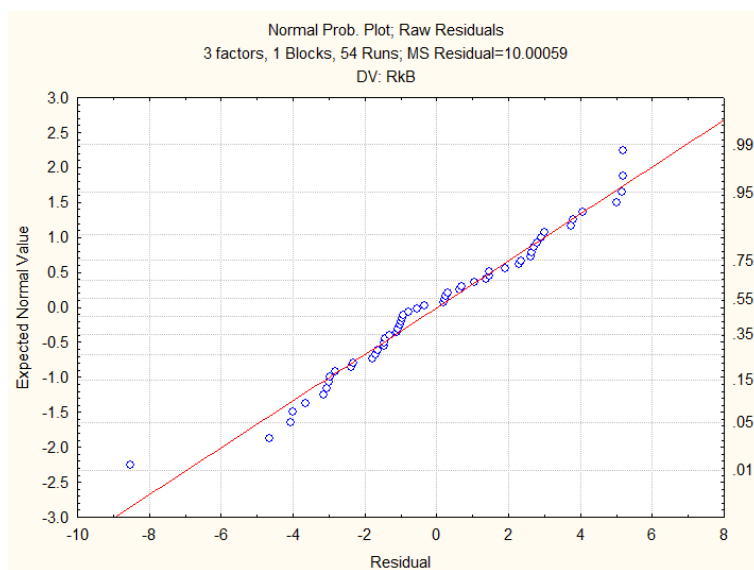


Figura F 4 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente ao parâmetro RkB

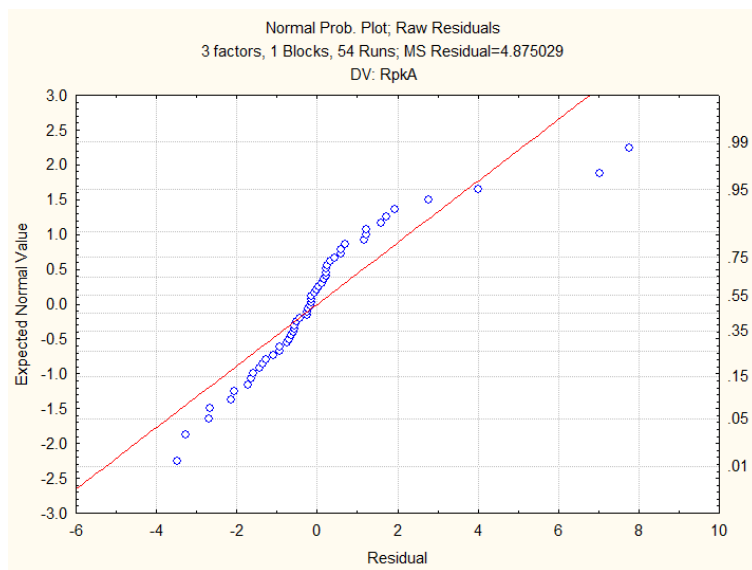


Figura F 5 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente ao parâmetro RpkA



Figura F 6 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente ao parâmetro RpkB

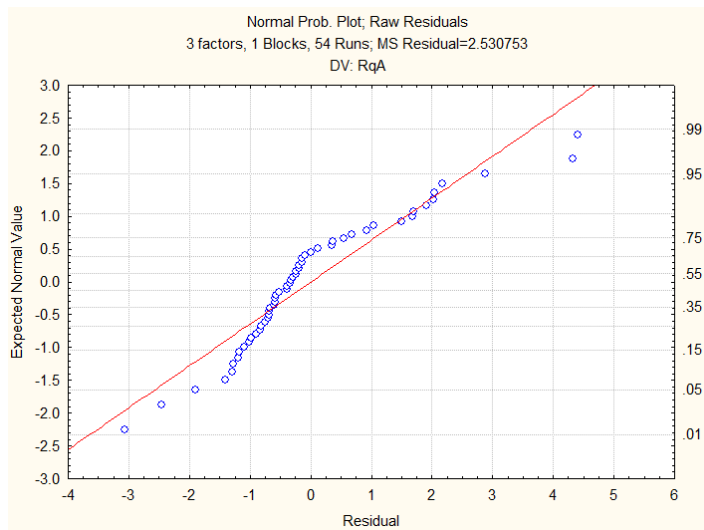


Figura F 7 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente ao parâmetro RqA

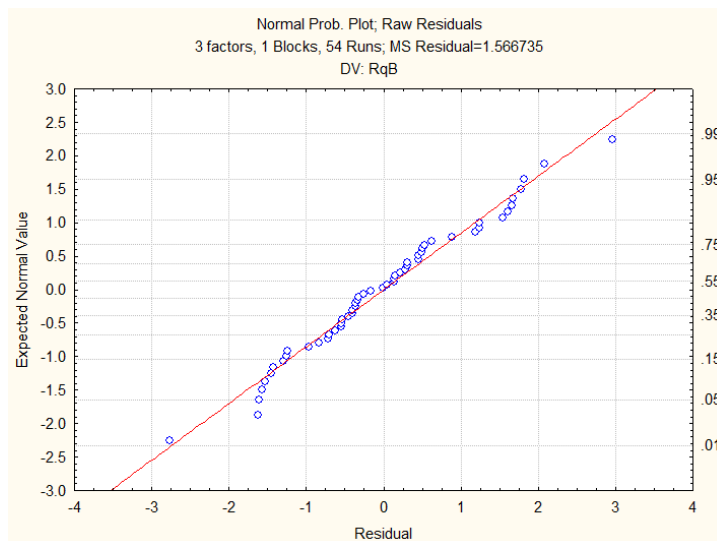


Figura F 8 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente ao parâmetro RqB

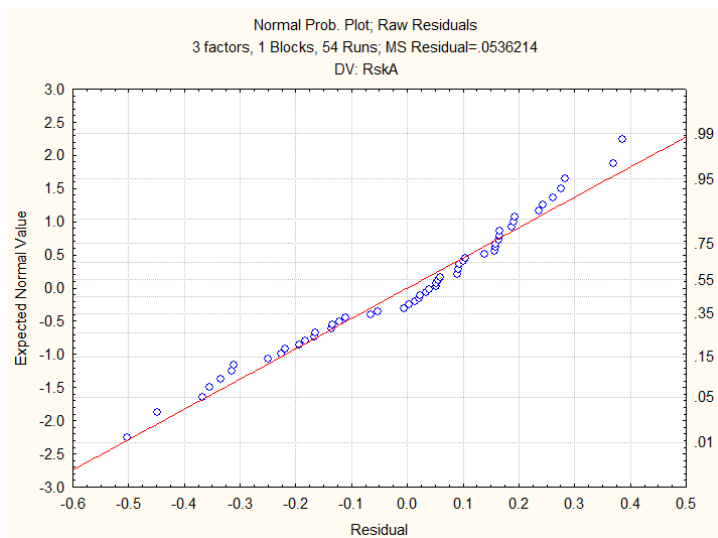


Figura F 9 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente ao parâmetro RskA

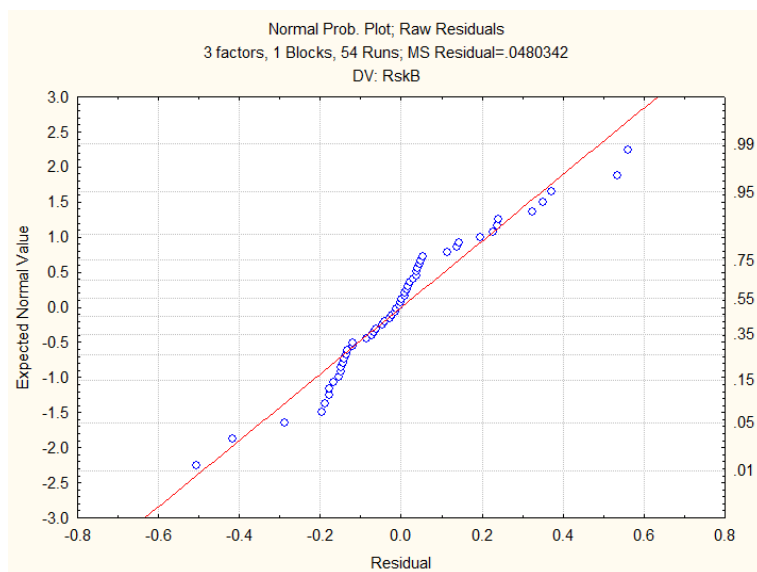


Figura F 10 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente ao parâmetro RskB

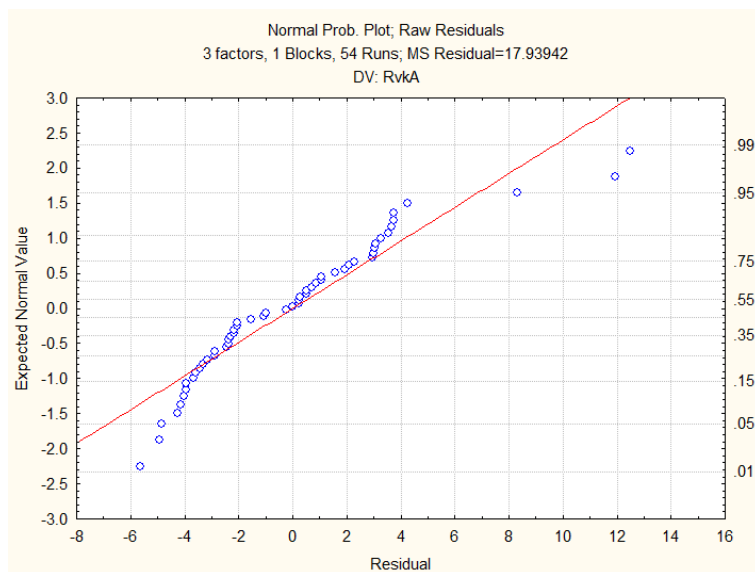


Figura F 11 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente ao parâmetro RvkA

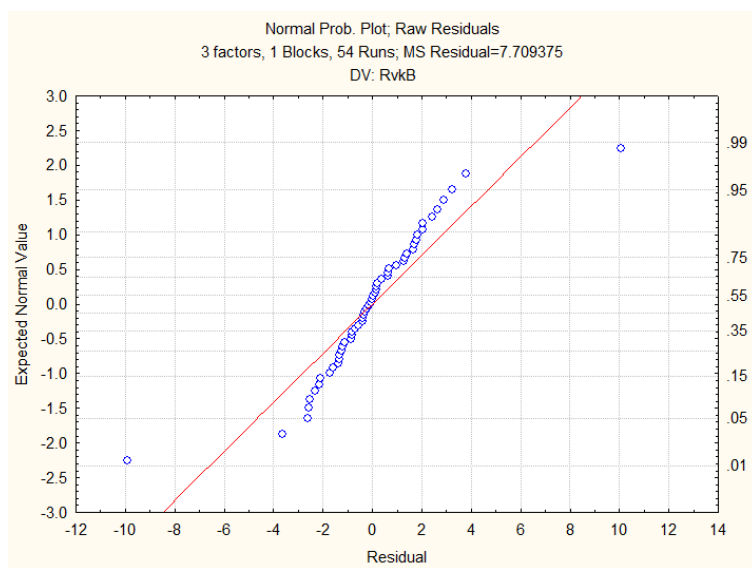


Figura F 12 - Análise da normalidade dos resíduos do modelo empírico relativamente ao parâmetro RvkB

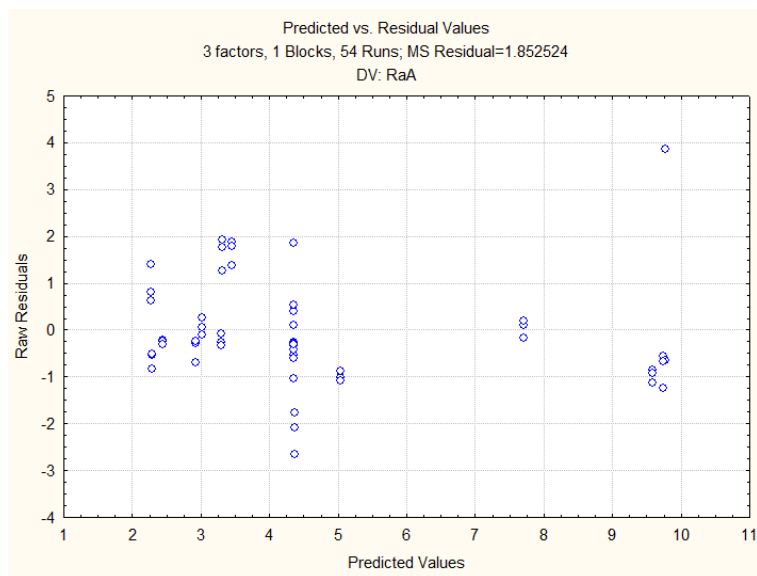


Figura F 13 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RaA

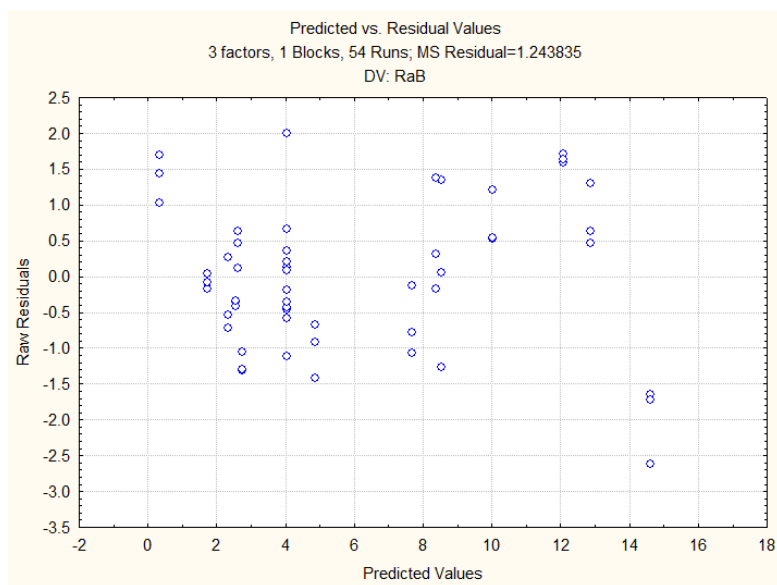


Figura F 14 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RaB

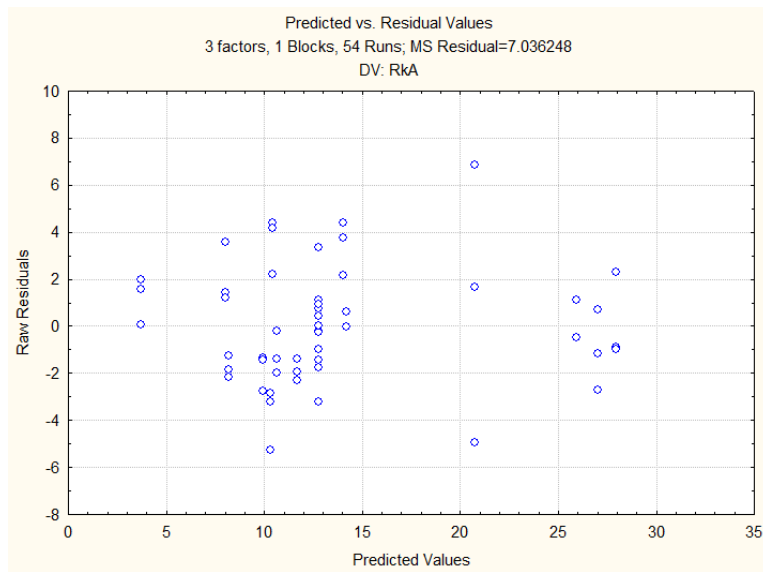


Figura F 15 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RkA

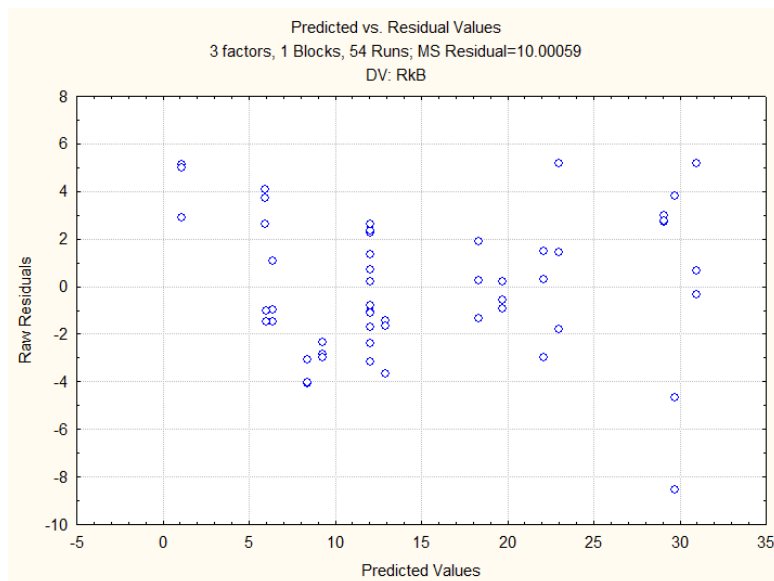


Figura F 16 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RkB

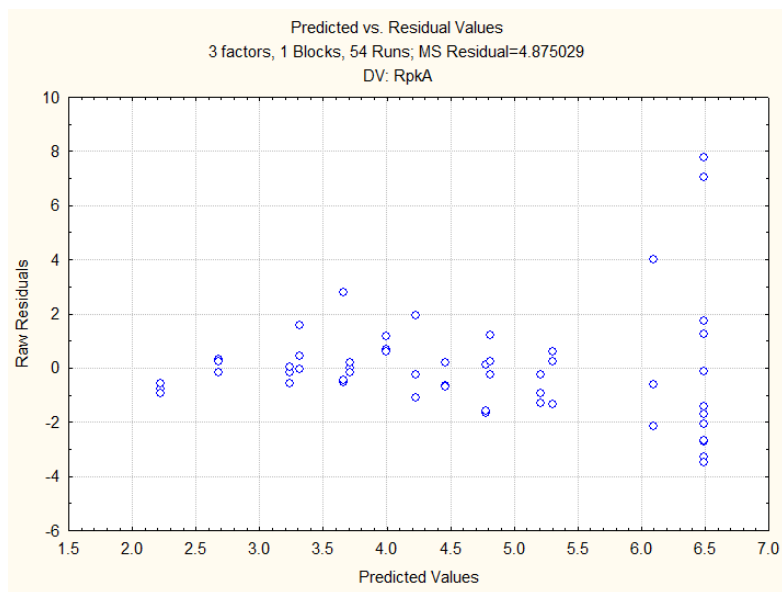


Figura F 17 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RpkA

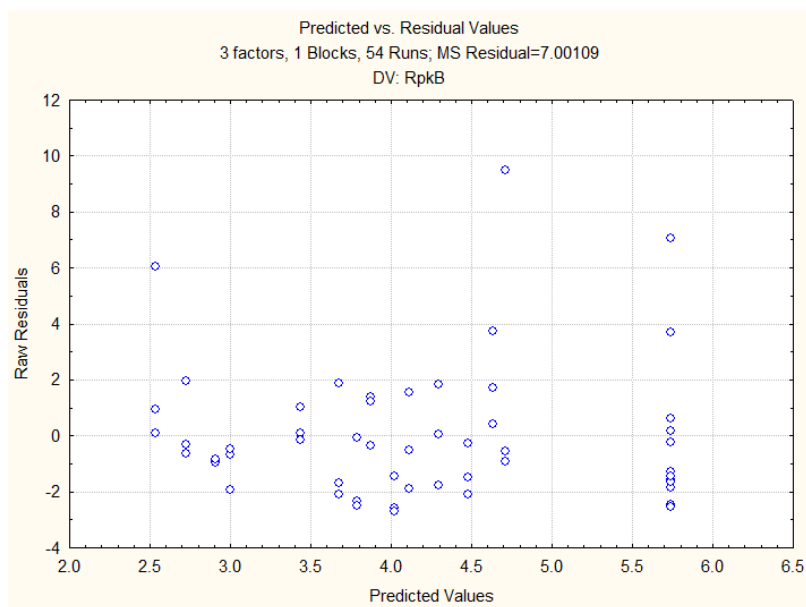


Figura F 18 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RpkB

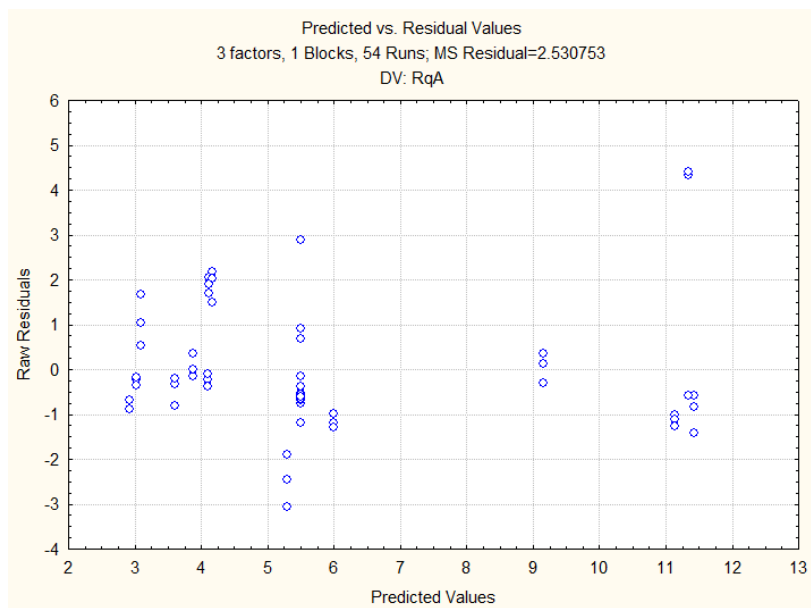


Figura F 19 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RqA

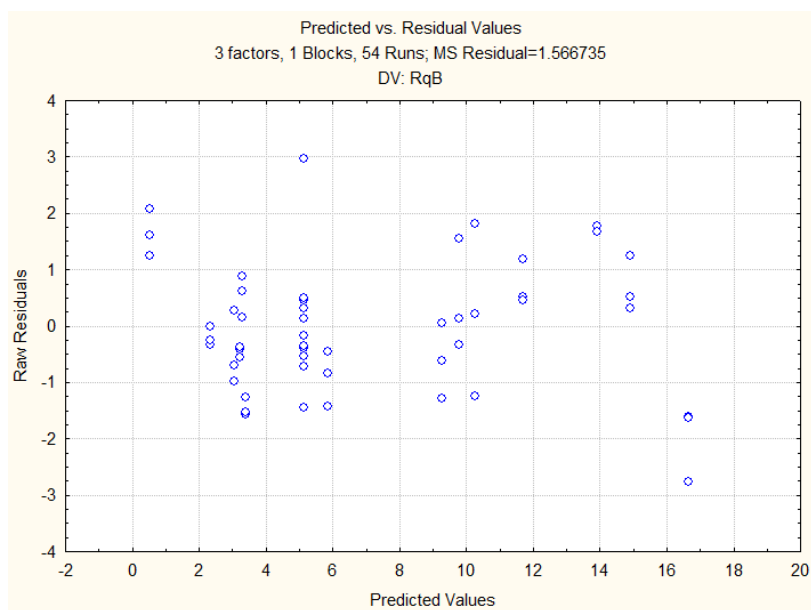


Figura F 20 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RqB

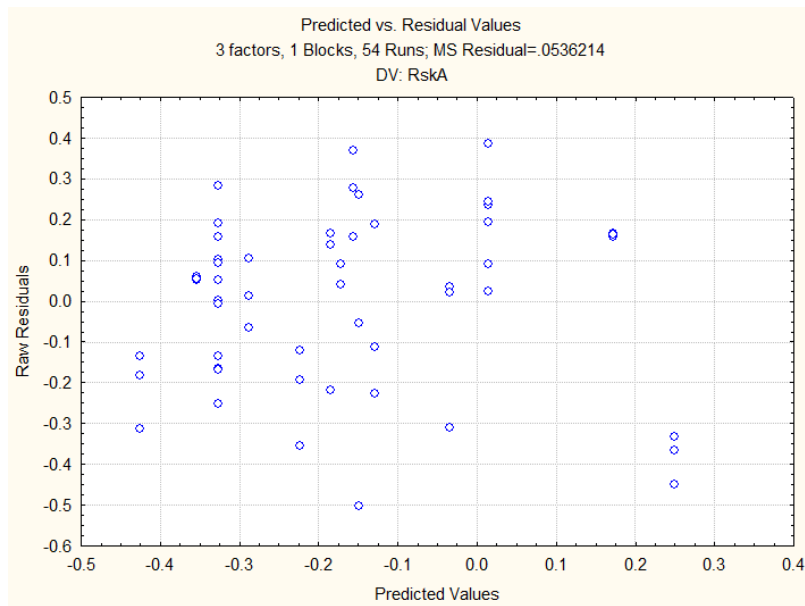


Figura F 21 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RskA

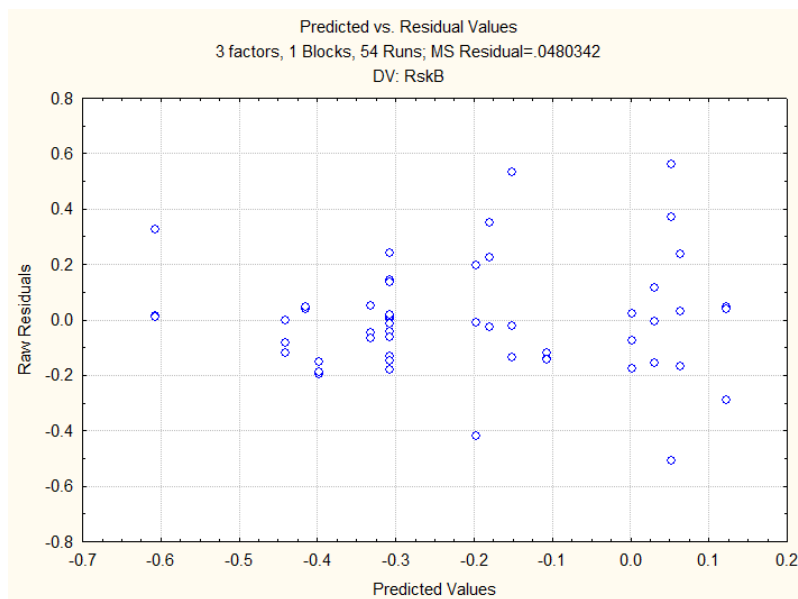


Figura F 22 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RskB

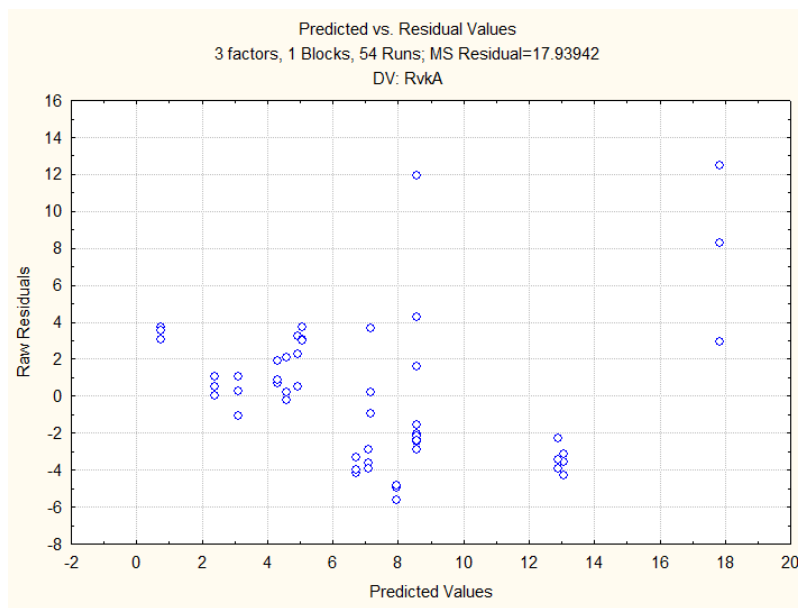


Figura F 23 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RvkA

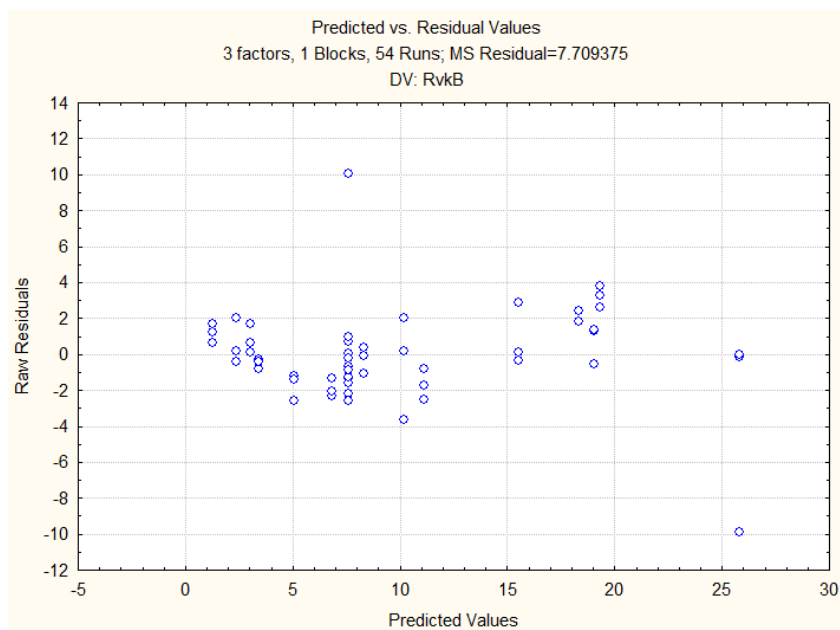


Figura F 24 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RvkB

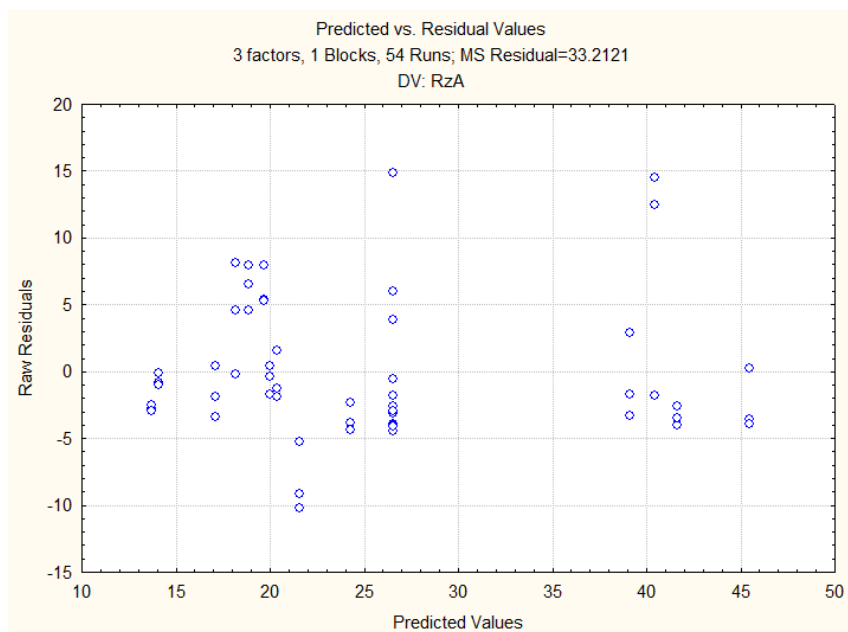


Figura F 25 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RzA

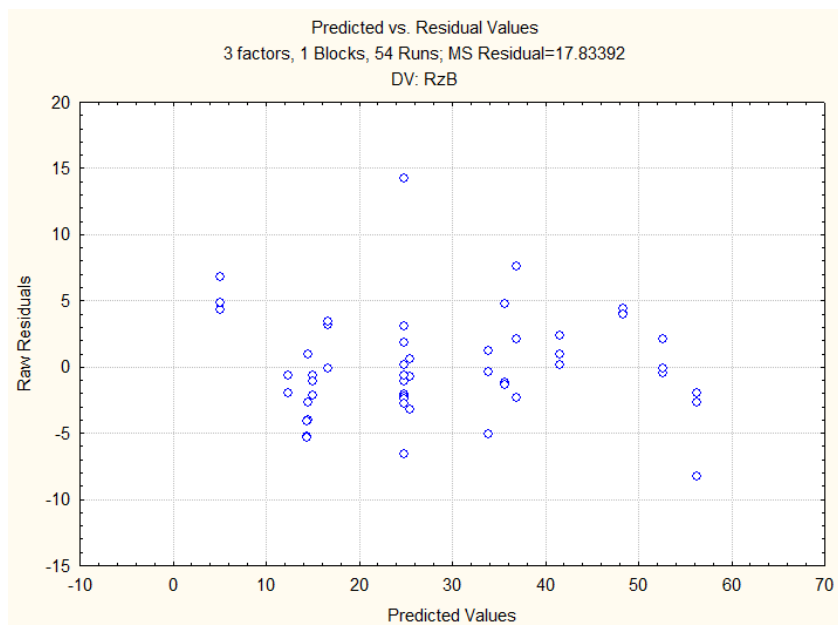


Figura F 26 - Gráfico de resíduos em função dos valores previstos para RzB

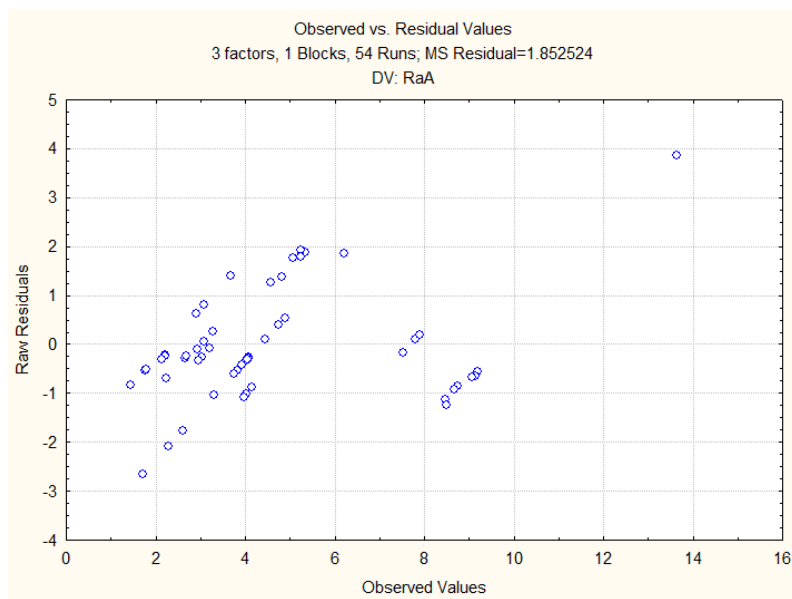


Figura F 27 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RaA

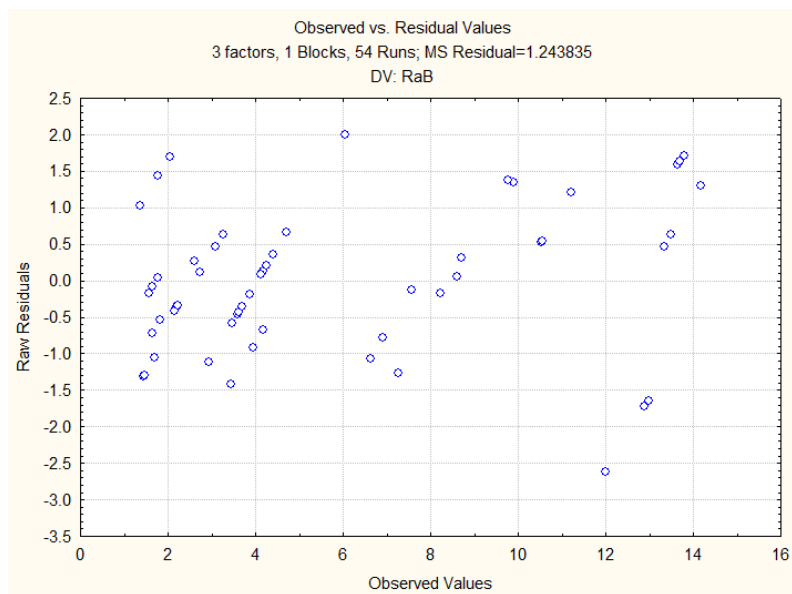


Figura F 28 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RaB

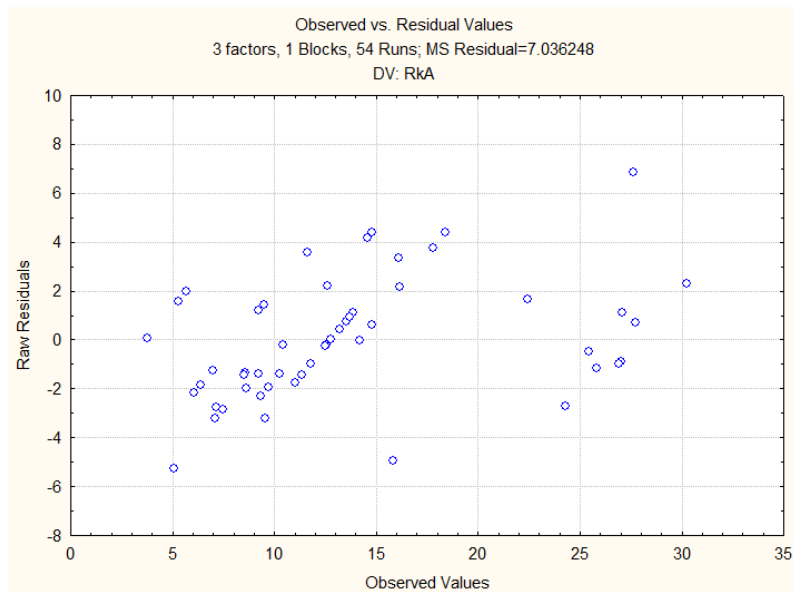


Figura F 29 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RkA

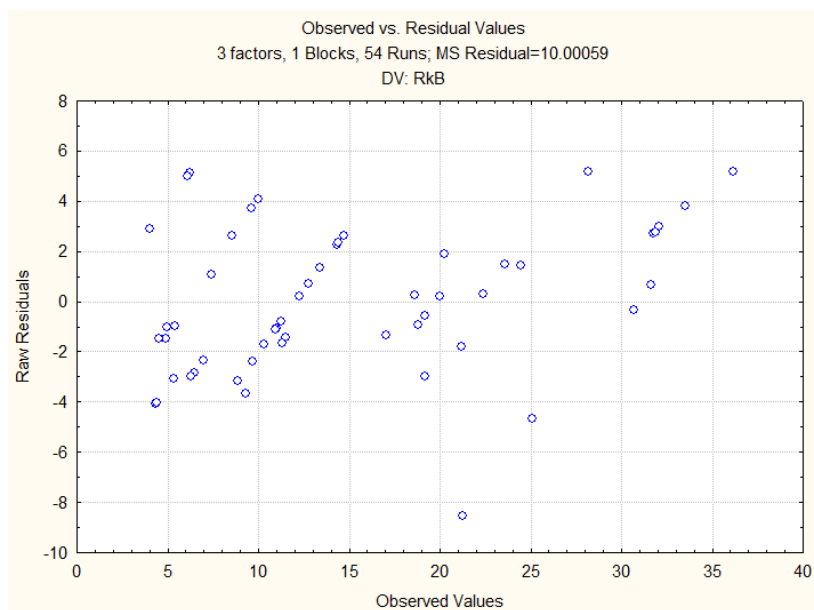


Figura F 30 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RkB

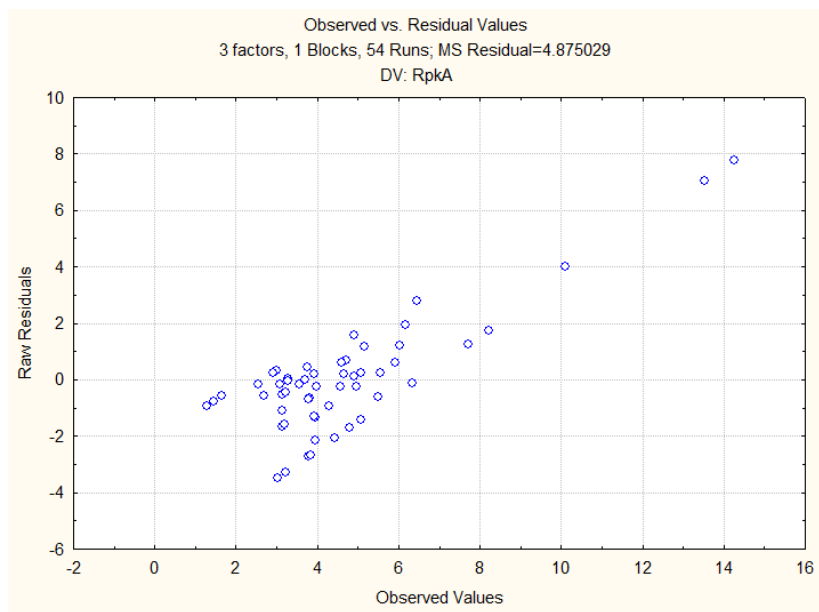


Figura F 31 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RpkA

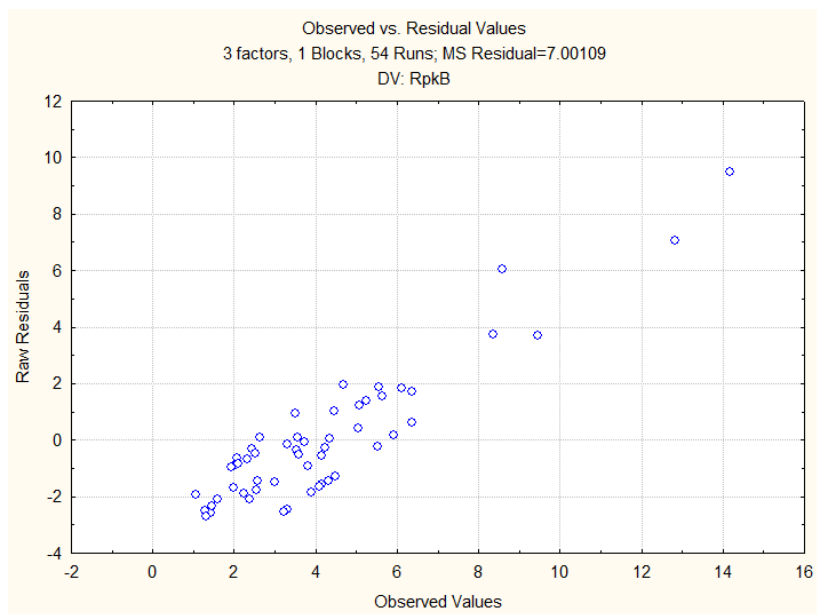


Figura F 32 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RpkB

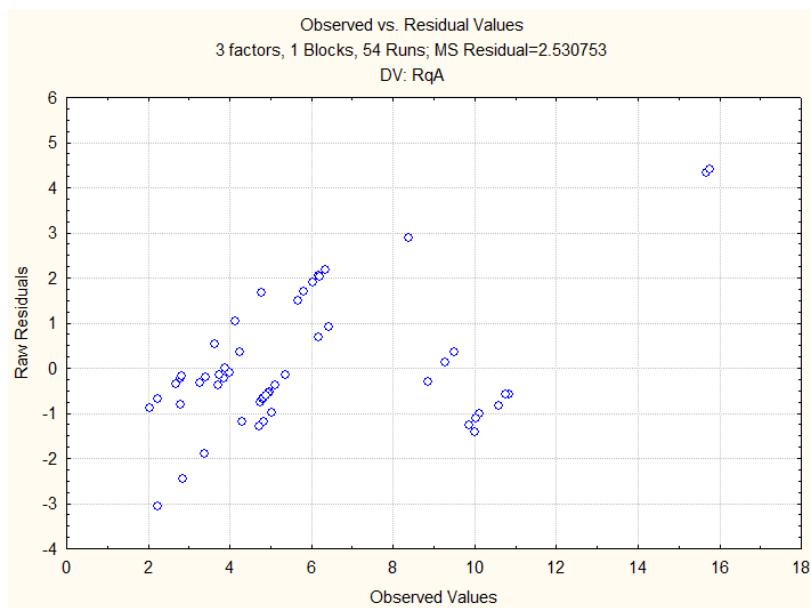


Figura F 33 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RqA

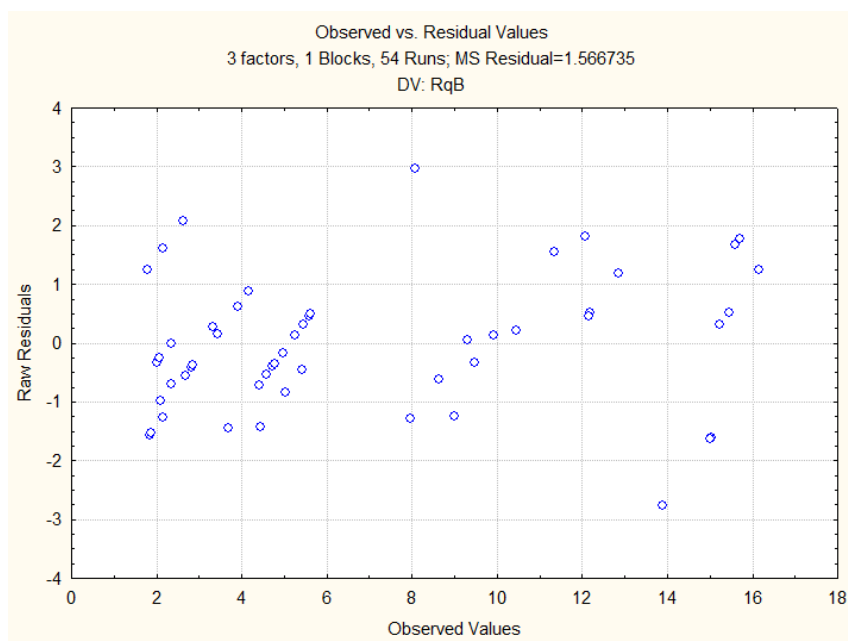


Figura F 34 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RqB

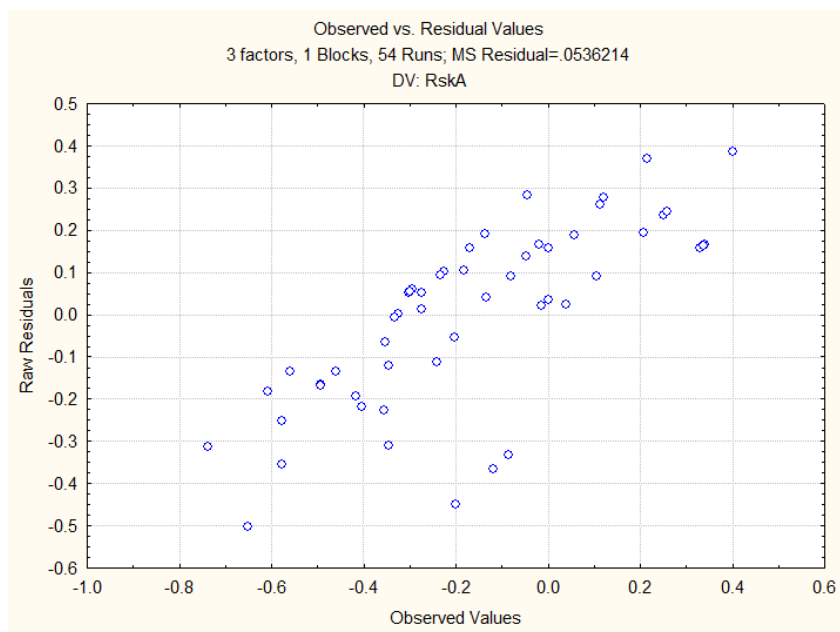


Figura F 35 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RskA

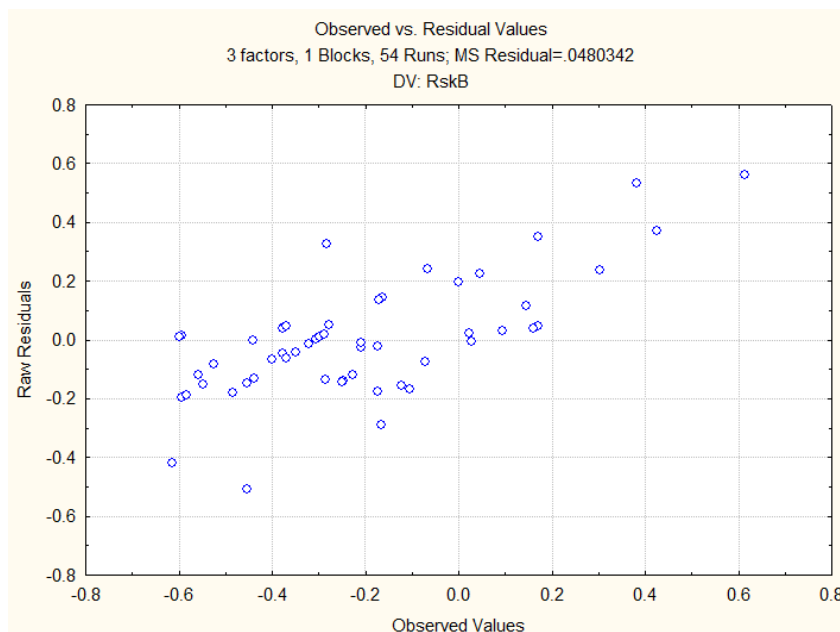


Figura F 36 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RskB

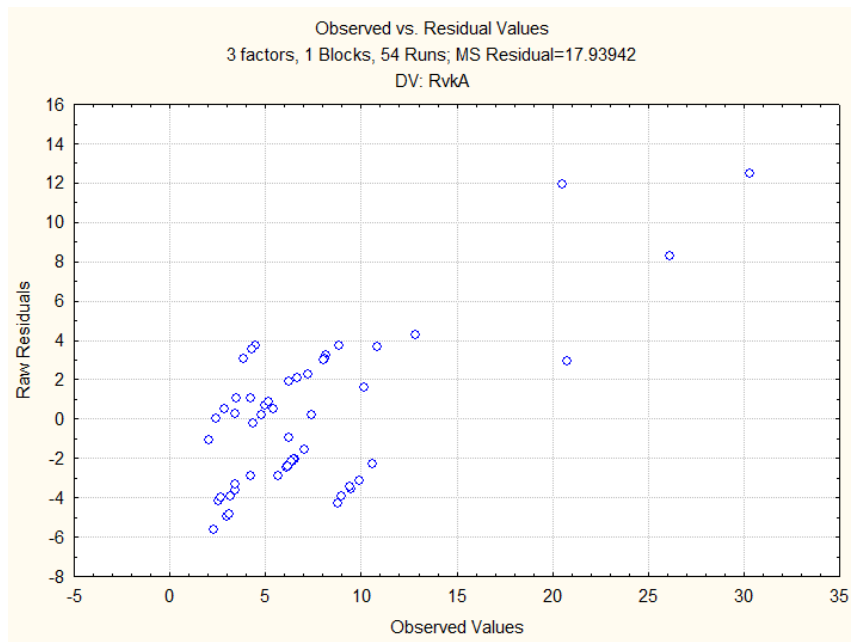


Figura F 37 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RvkA

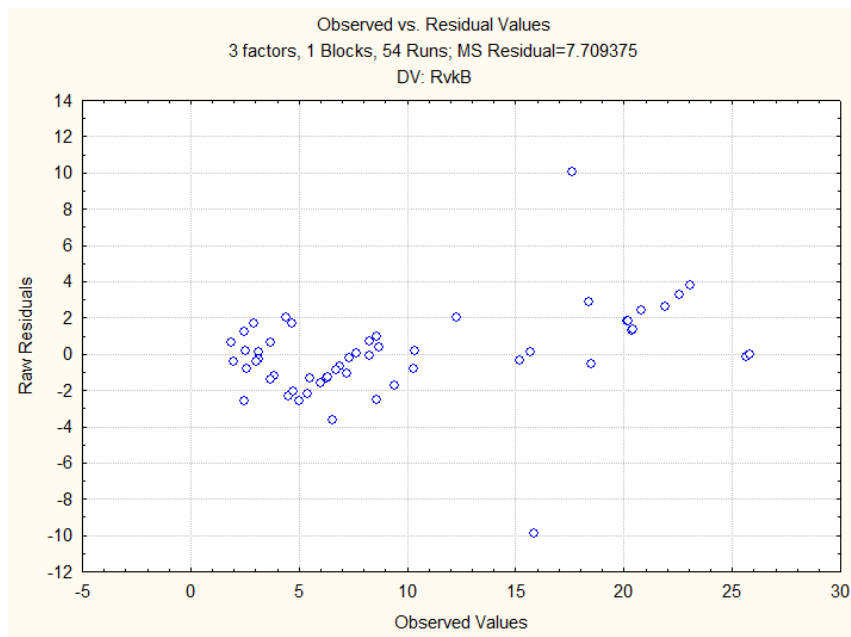


Figura F 38 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RvkB

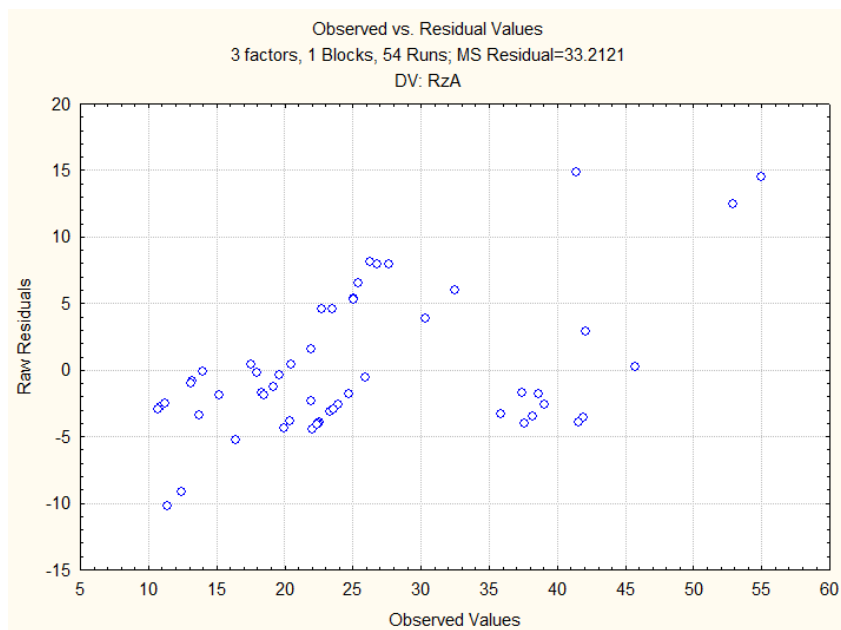


Figura F 39 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RzA

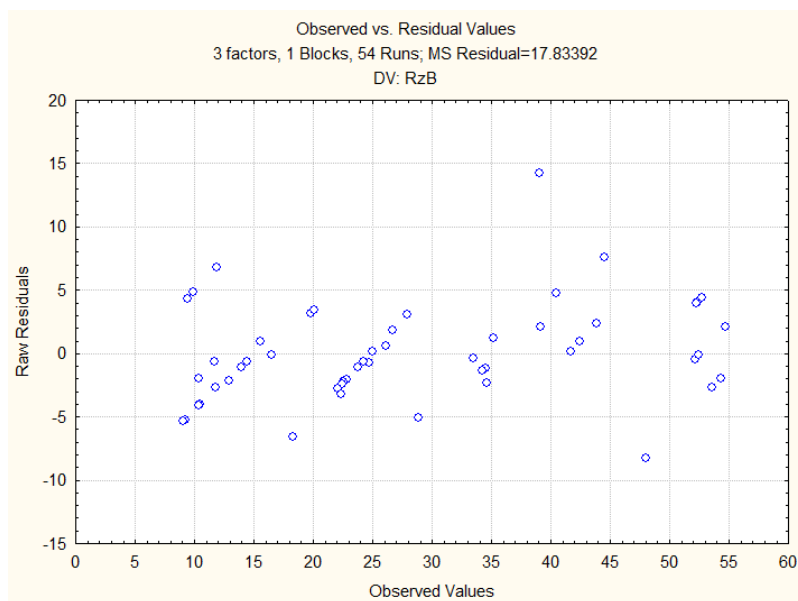


Figura F 40 - Gráfico de resíduos em função dos valores observados para RzB

Os resíduos não violam o pressuposto da normalidade, uma vez que se distribuem em torno da reta na análise de normalidade e nas restantes figuras se apresentam suficientemente dispersos para que se possa afirmar que não existe uma variável que não foi considerada.

Tabela F 6 – Tabela ANOVA para o parâmetro RkA

ANOVA; Var.:RkA; R-sqr=.88476; Adj:.86118 3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=7 DV: RkA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	612.017	1	612.017	86.9806	0.000000
Orientação(Q)	284.294	1	284.294	40.4042	0.000000
(2)Espessura(L)	1052.267	1	1052.267	149.5495	0.000000
Espessura(Q)	1.323	1	1.323	0.1880	0.666717
(3)Texposição(L)	0.211	1	0.211	0.0300	0.863173
Texposição(Q)	23.853	1	23.853	3.3900	0.072342
1L by 2L	289.827	1	289.827	41.1905	0.000000
1L by 3L	5.477	1	5.477	0.7784	0.382429
2L by 3L	47.462	1	47.462	6.7453	0.012734
Error	309.595	44	7.036		
Total SS	2686.420	53			

Tabela F 7 - Tabela ANOVA para o parâmetro RkB

ANOVA; Var.:RkB; R-sqr=.90303; Adj:.88319 3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=1 DV: RkB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	2.675	1	2.675	0.2675	0.607601
Orientação(Q)	522.200	1	522.200	52.2169	0.000000
(2)Espessura(L)	2970.933	1	2970.933	297.0758	0.000000
Espessura(Q)	53.993	1	53.993	5.3990	0.024831
(3)Texposição(L)	178.280	1	178.280	17.8269	0.000119
Texposição(Q)	32.750	1	32.750	3.2748	0.077184
1L by 2L	8.000	1	8.000	0.7999	0.375977
1L by 3L	0.398	1	0.398	0.0398	0.842844
2L by 3L	279.027	1	279.027	27.9010	0.000004
Error	440.026	44	10.001		
Total SS	4537.737	53			

Tabela F 8 - Tabela ANOVA para o parâmetro RpkA

ANOVA; Var.:RpkA; R-sqr=.31232; Adj.:.1716 3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=4 DV: RpkA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	6.2528	1	6.25276	1.28261	0.263548
Orientação(Q)	5.2781	1	5.27806	1.08267	0.303784
(2)Espessura(L)	0.7528	1	0.75284	0.15443	0.696238
Espessura(Q)	77.4509	1	77.45092	15.88727	0.000250
(3)Texposição(L)	3.5245	1	3.52451	0.72297	0.399774
Texposição(Q)	14.9039	1	14.90393	3.05720	0.087355
1L by 2L	2.0672	1	2.06722	0.42404	0.518314
1L by 3L	2.2942	1	2.29422	0.47061	0.496307
2L by 3L	0.8061	1	0.80606	0.16534	0.686255
Error	214.5013	44	4.87503		
Total SS	311.9186	53			

Tabela F 9 - Tabela ANOVA para o parâmetro RpkB

ANOVA; Var.:RpkB; R-sqr=.15786; Adj.:0. (R: 3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=7 DV: RpkB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	0.6147	1	0.61466	0.087795	0.768393
Orientação(Q)	7.2461	1	7.24614	1.035001	0.314549
(2)Espessura(L)	0.1315	1	0.13146	0.018777	0.891634
Espessura(Q)	45.8960	1	45.89604	6.555556	0.013965
(3)Texposição(L)	2.0783	1	2.07830	0.296854	0.588612
Texposição(Q)	10.4857	1	10.48572	1.497726	0.227535
1L by 2L	0.6309	1	0.63094	0.090120	0.765439
1L by 3L	1.2222	1	1.22221	0.174574	0.678110
2L by 3L	2.7198	1	2.71982	0.388485	0.536315
Error	308.0480	44	7.00109		
Total SS	365.7929	53			

Tabela F 10 - Tabela ANOVA para o parâmetro RqA

ANOVA; Var.:RqA; R-sqr=.7939; Adj.:75174 (3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=2 DV: RqA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	89.8341	1	89.8341	35.4970	0.000000
Orientação(Q)	6.4249	1	6.4249	2.5387	0.118242
(2)Espessura(L)	257.1493	1	257.1493	101.6098	0.000000
Espessura(Q)	12.6862	1	12.6862	5.0128	0.030266
(3)Texposição(L)	0.2122	1	0.2122	0.0838	0.773521
Texposição(Q)	10.6325	1	10.6325	4.2013	0.046382
1L by 2L	42.8473	1	42.8473	16.9307	0.000167
1L by 3L	0.2585	1	0.2585	0.1022	0.750764
2L by 3L	2.5071	1	2.5071	0.9907	0.325022
Error	111.3531	44	2.5308		
Total SS	540.2833	53			

Tabela F 11 - Tabela ANOVA para o parâmetro RqB

ANOVA; Var.:RqB; R-sqr=.94353; Adj.:93198 (3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=1 DV: RqB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	3.456	1	3.4555	2.2056	0.144644
Orientação(Q)	101.638	1	101.6379	64.8724	0.000000
(2)Espessura(L)	939.079	1	939.0787	599.3857	0.000000
Espessura(Q)	56.846	1	56.8465	36.2834	0.000000
(3)Texposição(L)	24.018	1	24.0175	15.3297	0.000310
Texposição(Q)	1.431	1	1.4309	0.9133	0.344466
1L by 2L	4.361	1	4.3608	2.7834	0.102349
1L by 3L	1.223	1	1.2227	0.7804	0.381824
2L by 3L	27.750	1	27.7501	17.7120	0.000125
Error	68.936	44	1.5667		
Total SS	1220.730	53			

Tabela F 12 - Tabela ANOVA para o parâmetro RskA

ANOVA; Var.:RskA; R-sqr=.43095; Adj.:.3145 3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=.(DV: RskA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	0.642398	1	0.642398	11.98026	0.001208
Orientação(Q)	0.632299	1	0.632299	11.79191	0.001308
(2)Espessura(L)	0.276166	1	0.276166	5.15029	0.028197
Espessura(Q)	0.007628	1	0.007628	0.14226	0.707854
(3)Texposição(L)	0.129325	1	0.129325	2.41182	0.127586
Texposição(Q)	0.186154	1	0.186154	3.47163	0.069113
1L by 2L	0.000000	1	0.000000	0.00000	0.998834
1L by 3L	0.016137	1	0.016137	0.30095	0.586060
2L by 3L	0.000202	1	0.000202	0.00377	0.951310
Error	2.359342	44	0.053621		
Total SS	4.146139	53			

Tabela F 13 - Tabela ANOVA para o parâmetro RskB

ANOVA; Var.:RskB; R-sqr=.50329; Adj.:.4016 3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=.(DV: RskB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	0.007718	1	0.007718	0.16067	0.690480
Orientação(Q)	0.083698	1	0.083698	1.74247	0.193652
(2)Espessura(L)	1.927500	1	1.927500	40.12768	0.000000
Espessura(Q)	0.019769	1	0.019769	0.41156	0.524509
(3)Texposição(L)	0.019612	1	0.019612	0.40829	0.526153
Texposição(Q)	0.127323	1	0.127323	2.65066	0.110647
1L by 2L	0.007764	1	0.007764	0.16164	0.689602
1L by 3L	0.002528	1	0.002528	0.05264	0.819601
2L by 3L	0.000030	1	0.000030	0.00063	0.980052
Error	2.113504	44	0.048034		
Total SS	4.255023	53			

Tabela F 14 - Tabela ANOVA para o parâmetro RvkA

ANOVA; Var.:RvkA; R-sqr=.52765; Adj:.4310; 3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=1 DV: RvkA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	149.503	1	149.5025	8.33374	0.006011
Orientação(Q)	100.507	1	100.5068	5.60257	0.022399
(2)Espessura(L)	418.377	1	418.3774	23.32168	0.000017
Espessura(Q)	72.154	1	72.1540	4.02209	0.051082
(3)Texposição(L)	2.119	1	2.1187	0.11810	0.732739
Texposição(Q)	70.917	1	70.9175	3.95316	0.053026
1L by 2L	19.990	1	19.9904	1.11433	0.296904
1L by 3L	1.756	1	1.7559	0.09788	0.755867
2L by 3L	0.383	1	0.3828	0.02134	0.884529
Error	789.334	44	17.9394		
Total SS	1671.073	53			

Tabela F 15 - Tabela ANOVA para o parâmetro RvkB

ANOVA; Var.:RvkB; R-sqr=.87712; Adj:.8519; 3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=7 DV: RvkB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	2.978	1	2.978	0.3863	0.537442
Orientação(Q)	45.084	1	45.084	5.8479	0.019802
(2)Espessura(L)	2181.254	1	2181.254	282.9352	0.000000
Espessura(Q)	167.052	1	167.052	21.6686	0.000030
(3)Texposição(L)	7.869	1	7.869	1.0207	0.317866
Texposição(Q)	0.003	1	0.003	0.0004	0.983326
1L by 2L	17.149	1	17.149	2.2244	0.142978
1L by 3L	14.251	1	14.251	1.8486	0.180879
2L by 3L	1.005	1	1.005	0.1304	0.719779
Error	339.212	44	7.709		
Total SS	2760.470	53			

Tabela F 16 - Tabela ANOVA para o parâmetro RzA

ANOVA; Var.:RzA; R-sqr=.76845; Adj.:.72109 3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=3 DV: RzA					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	1487.947	1	1487.947	44.80137	0.000000
Orientação(Q)	29.124	1	29.124	0.87690	0.354164
(2)Espessura(L)	2588.996	1	2588.996	77.95341	0.000000
Espessura(Q)	1.382	1	1.382	0.04160	0.839326
(3)Texposição(L)	1.693	1	1.693	0.05097	0.822435
Texposição(Q)	198.389	1	198.389	5.97340	0.018601
1L by 2L	441.261	1	441.261	13.28615	0.000703
1L by 3L	2.002	1	2.002	0.06029	0.807179
2L by 3L	48.974	1	48.974	1.47458	0.231102
Error	1461.332	44	33.212		
Total SS	6311.197	53			

Tabela F 17 - Tabela ANOVA para o parâmetro RzB

ANOVA; Var.:RzB; R-sqr=.93312; Adj.:.91943 3 factors, 1 Blocks, 54 Runs; MS Residual=1 DV: RzB					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Orientação(L)	34.62	1	34.617	1.9411	0.170552
Orientação(Q)	532.81	1	532.814	29.8765	0.000002
(2)Espessura(L)	9478.77	1	9478.768	531.5023	0.000000
Espessura(Q)	161.48	1	161.478	9.0546	0.004325
(3)Texposição(L)	284.84	1	284.841	15.9718	0.000242
Texposição(Q)	67.20	1	67.198	3.7680	0.058664
1L by 2L	63.31	1	63.309	3.5499	0.066166
1L by 3L	3.79	1	3.794	0.2127	0.646900
2L by 3L	260.90	1	260.905	14.6297	0.000409
Error	784.69	44	17.834		
Total SS	11731.99	53			

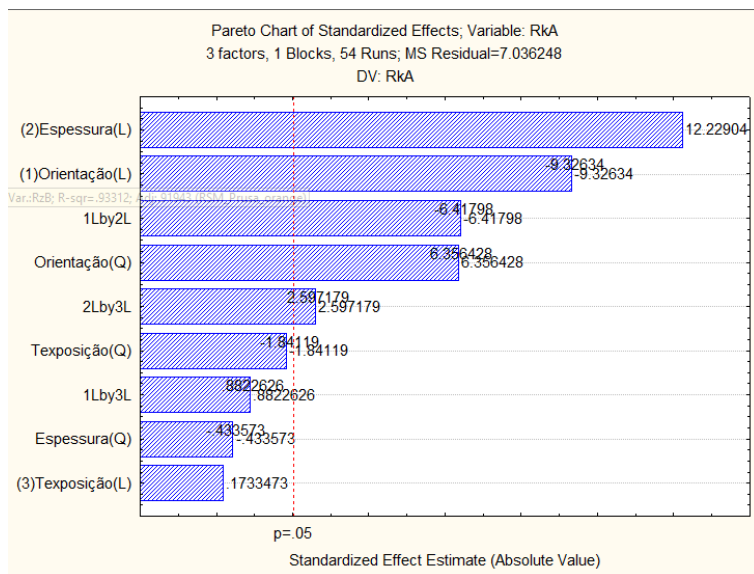


Figura F 41 - Gráfico de Pareto para o parâmetro RkA

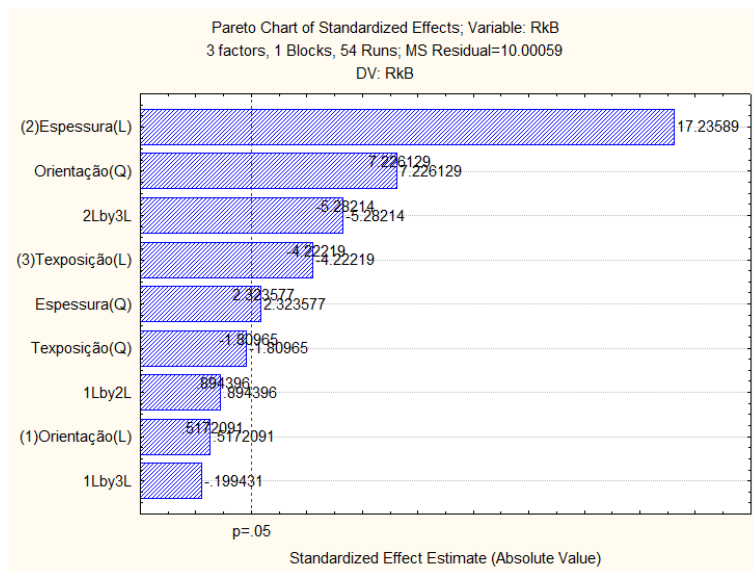


Figura F 42 - Gráfico de Pareto para o parâmetro RkB

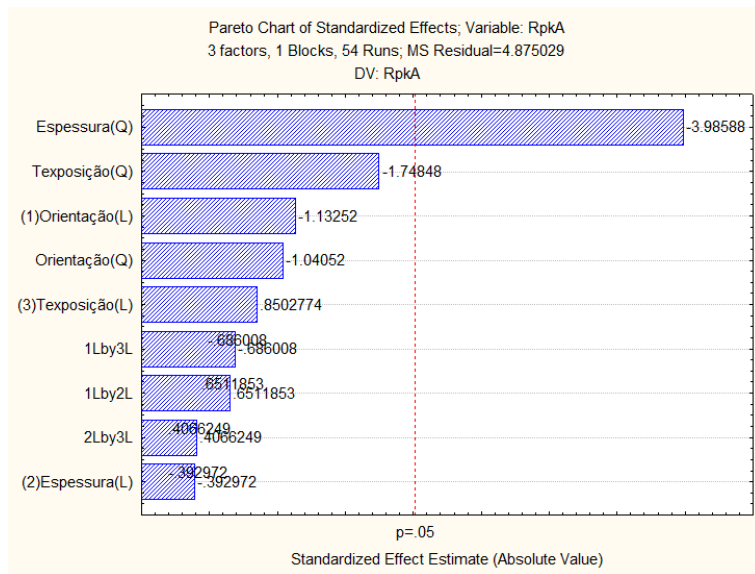


Figura F 43 - Gráfico de Pareto para o parâmetro RpkA

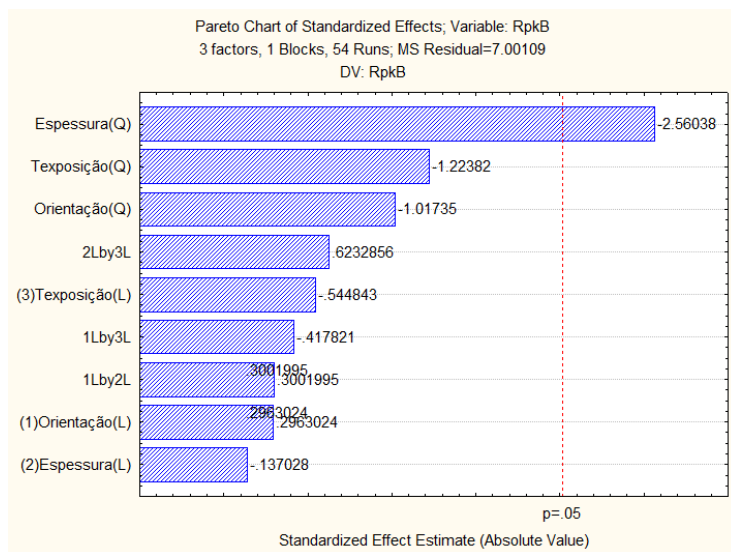


Figura F 44 - Gráfico de Pareto para o parâmetro RpkB

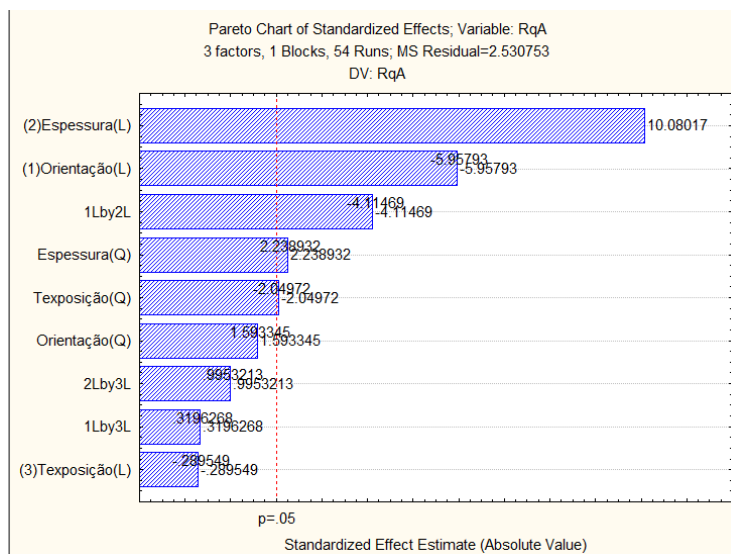


Figura F 45 - Gráfico de Pareto para o parâmetro RqA

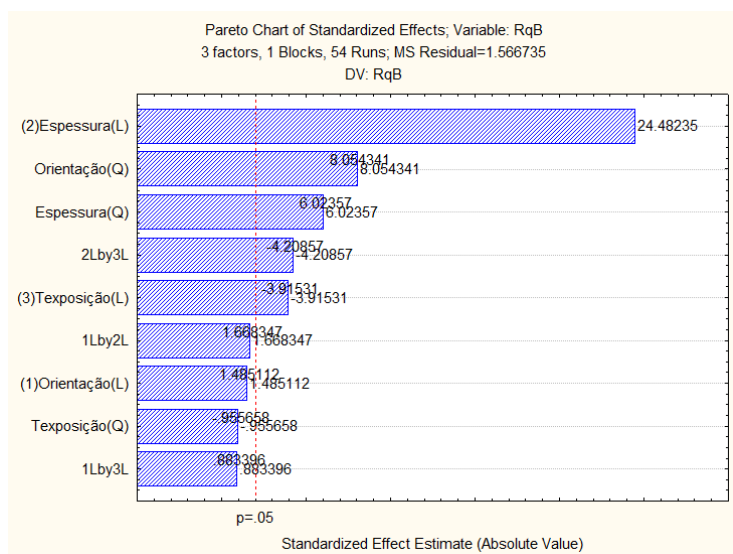


Figura F 46 - Gráfico de Pareto para o parâmetro RqB

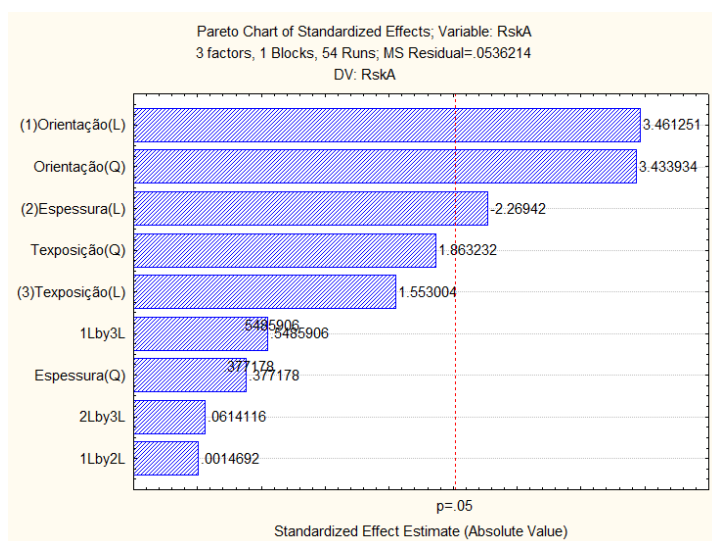


Figura F 47 - Gráfico de Pareto para o parâmetro RskA

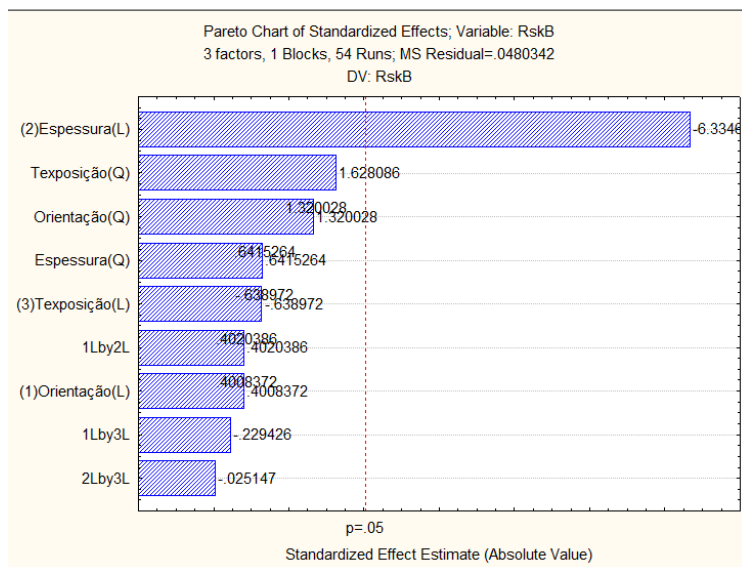


Figura F 48 - Gráfico de Pareto para o parâmetro RskB

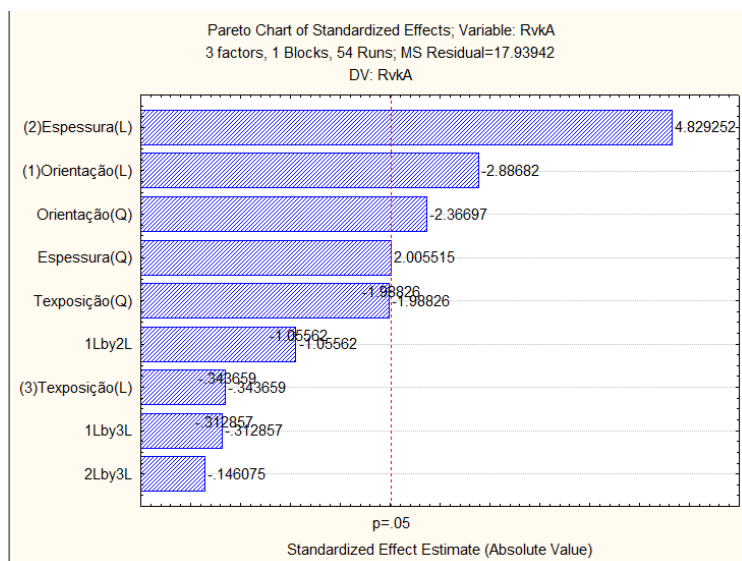


Figura F 49 - Gráfico de Pareto para o parâmetro RvkA

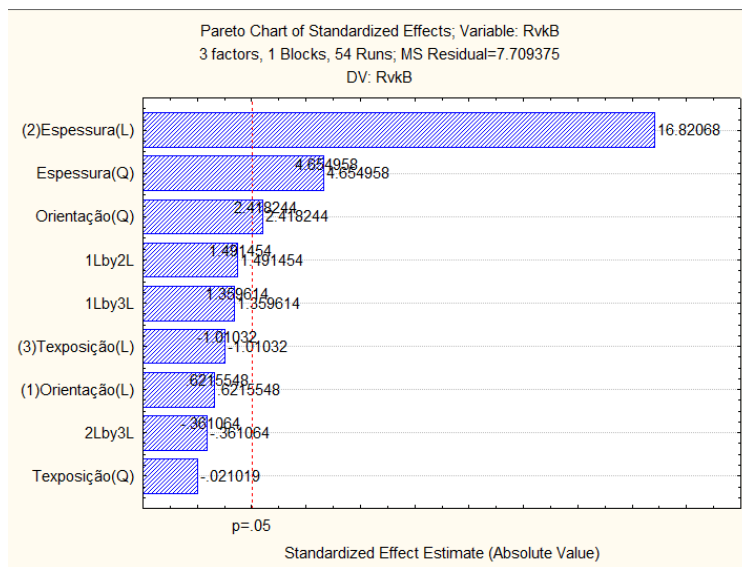


Figura F 50 - Gráfico de Pareto para o parâmetro RvkB

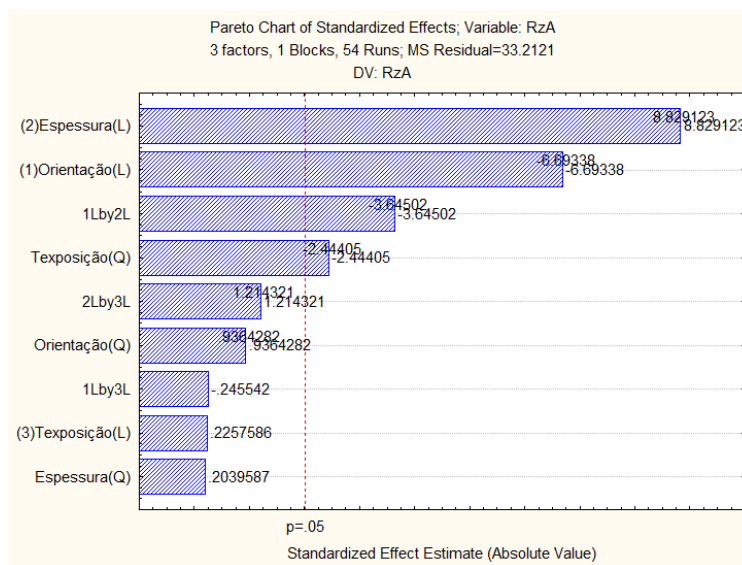


Figura F 51 - Gráfico de Pareto para o parâmetro RzA

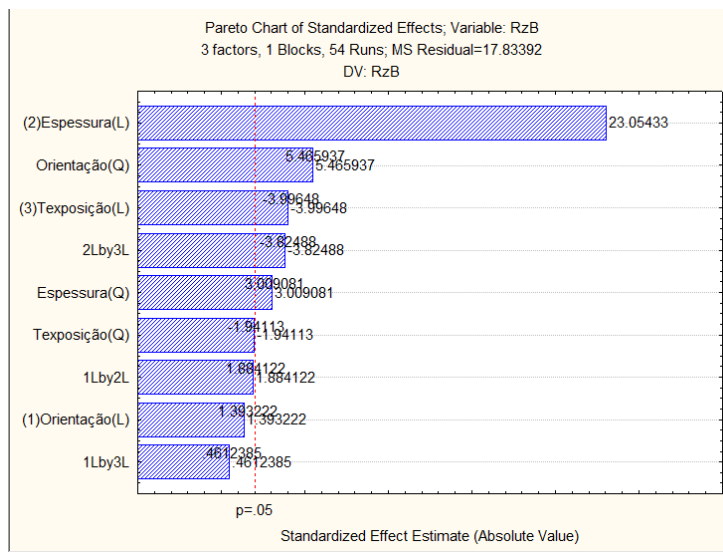


Figura F 52 - Gráfico de Pareto para o parâmetro RzB

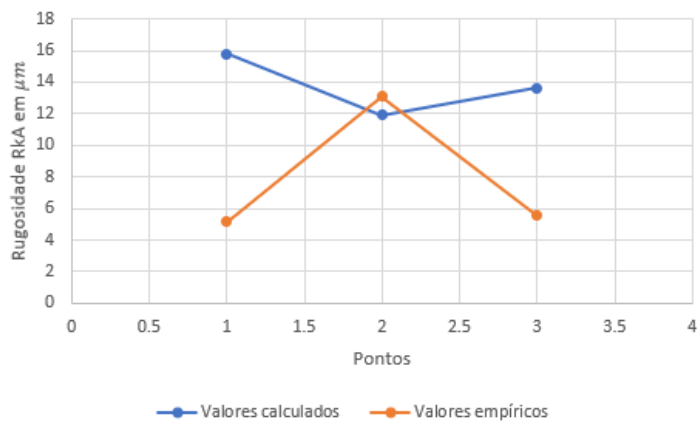


Figura F 53 - Comparação dos valores obtidos com os valores previstos pelo modelo empírico para RkA

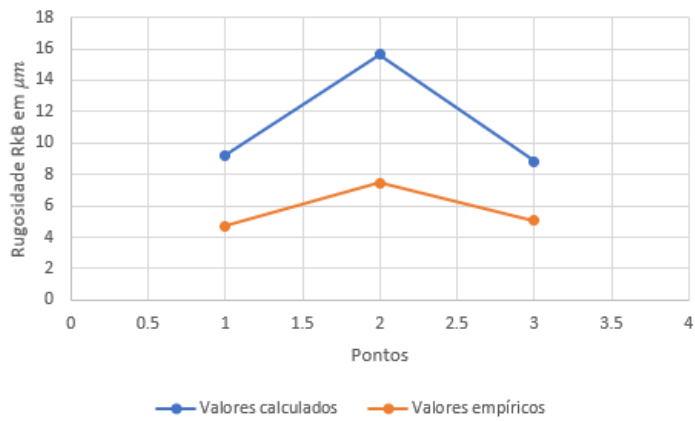


Figura F 54 - Comparação dos valores obtidos com os valores previstos pelo modelo empírico para RkB

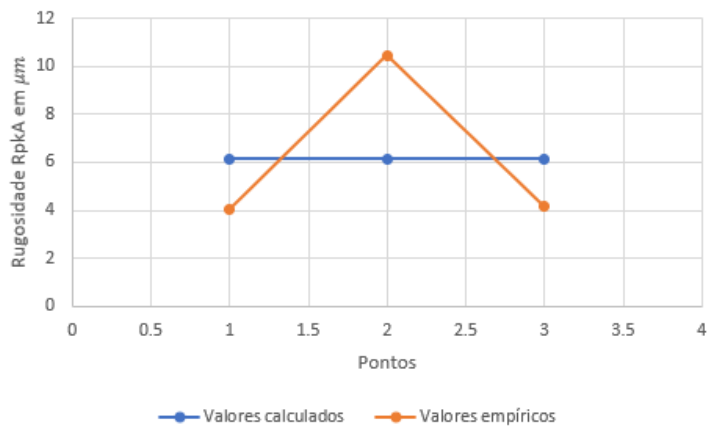


Figura F 55 - Comparação dos valores obtidos com os valores previstos pelo modelo empírico para RpkA

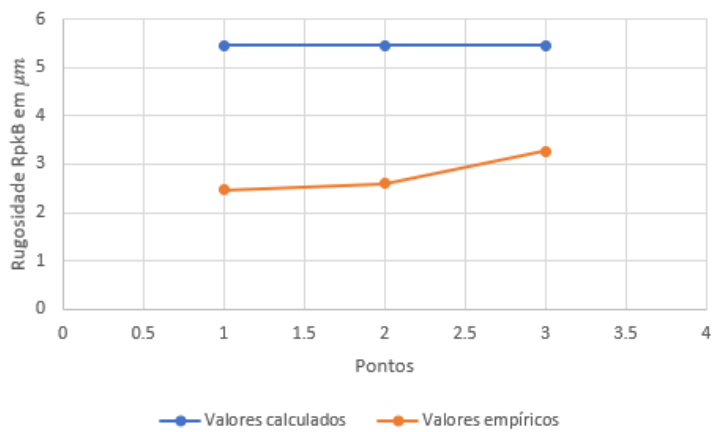


Figura F 56 - Comparação dos valores obtidos com os valores previstos pelo modelo empírico para RpkB

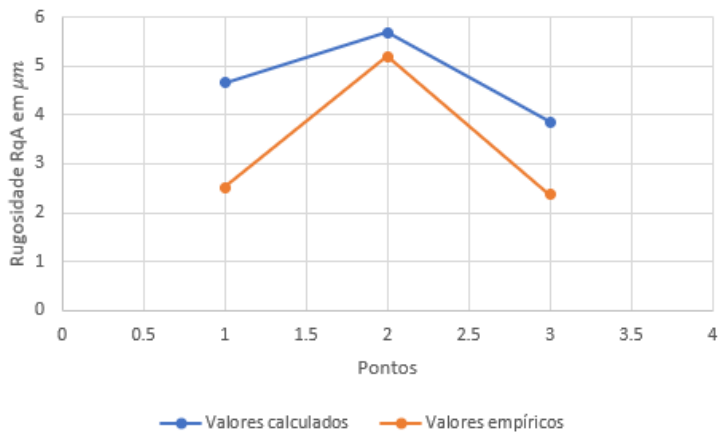


Figura F 57 - Comparação dos valores obtidos com os valores previstos pelo modelo empírico para RqA

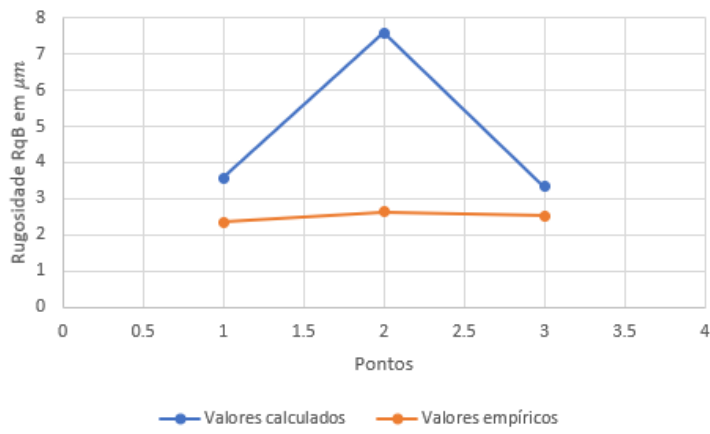


Figura F 58 - Comparação dos valores obtidos com os valores previstos pelo modelo empírico para RqB

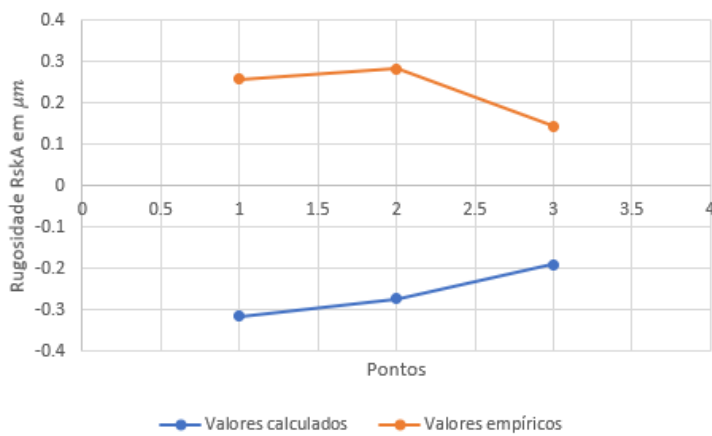


Figura F 59 - Comparação dos valores obtidos com os valores previstos pelo modelo empírico para RskA

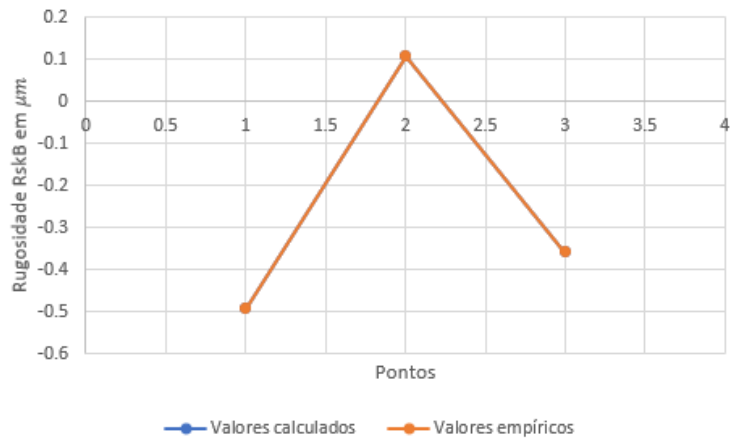


Figura F 60 - Comparação dos valores obtidos com os valores previstos pelo modelo empírico para RskB

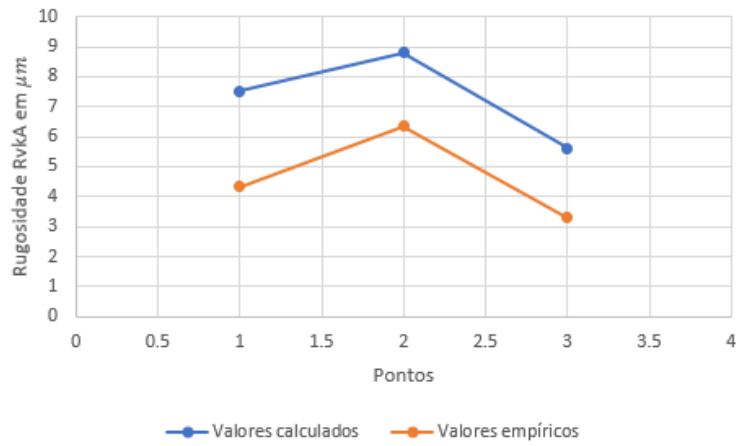


Figura F 61 - Comparação dos valores obtidos com os valores previstos pelo modelo empírico para RvkA

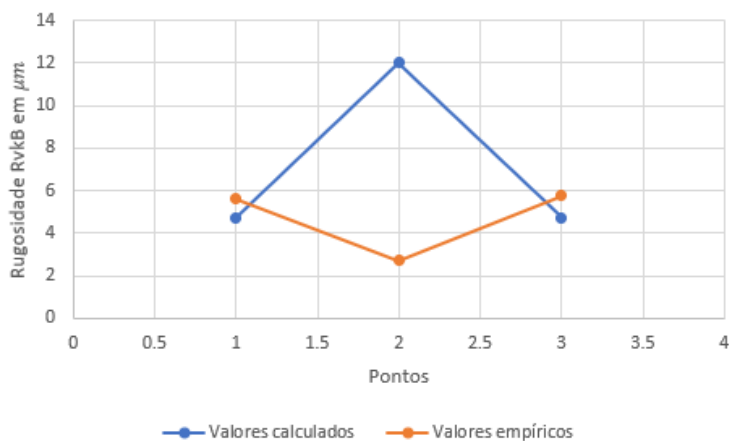


Figura F 62 - Comparação dos valores obtidos com os valores previstos pelo modelo empírico para RvkB

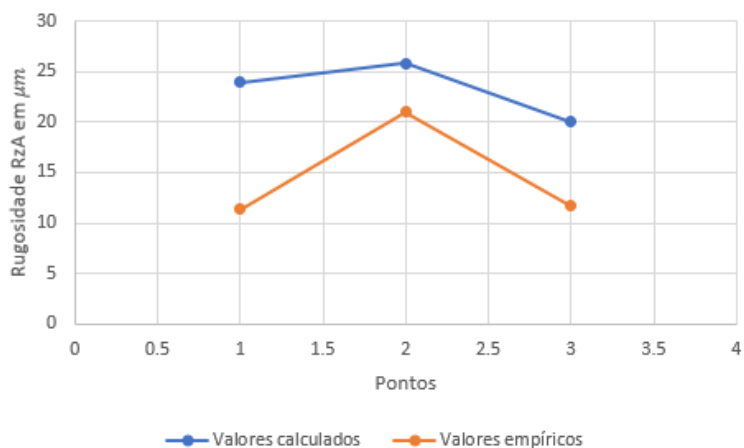


Figura F 63 - Comparação dos valores obtidos com os valores previstos pelo modelo empírico para RzA

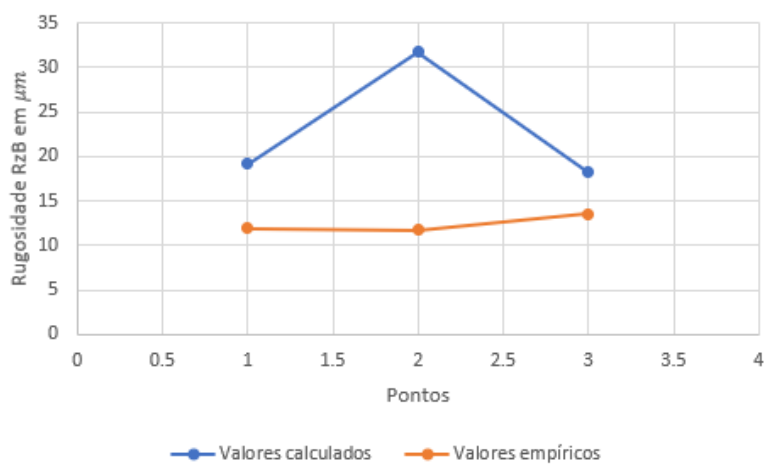


Figura F 64 - Comparação dos valores obtidos com os valores previstos pelo modelo empírico para RzB

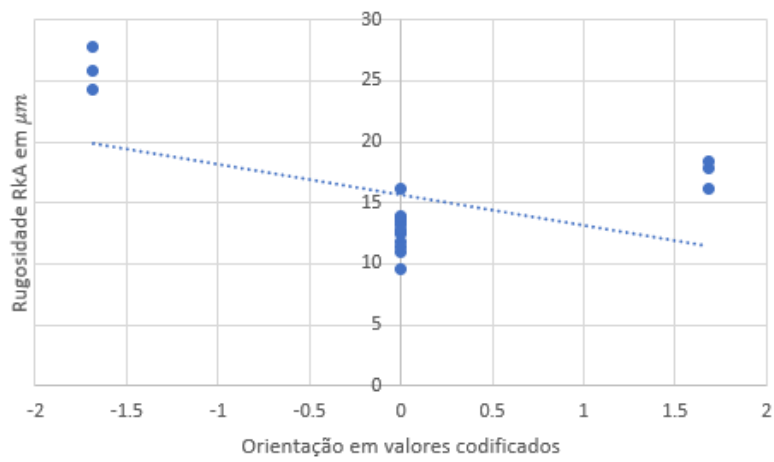


Figura F 65 - Evolução de RkA com a orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes.

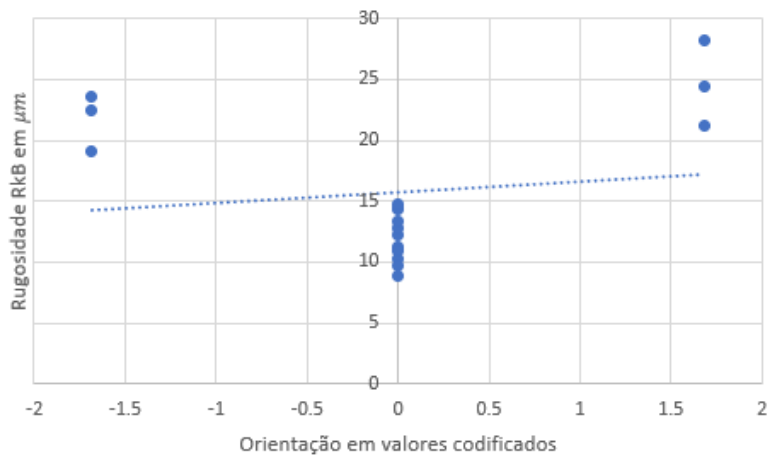


Figura F 66 - Evolução de RkB com a orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes

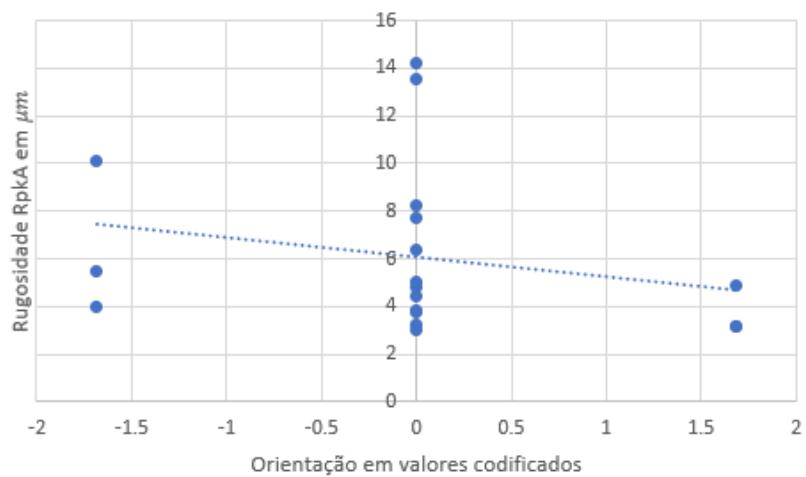


Figura F 67 - Evolução de RpkA com a orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes

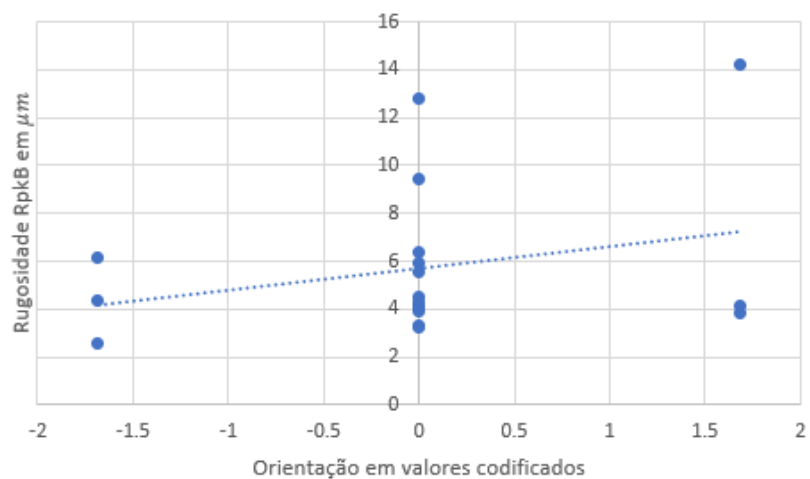


Figura F 68 - Evolução de RpkB com a orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes

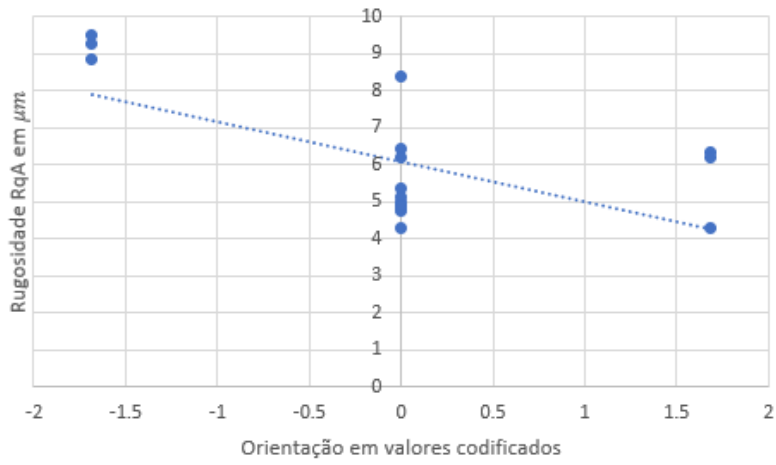


Figura F 69 - Evolução de RqA com a orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes

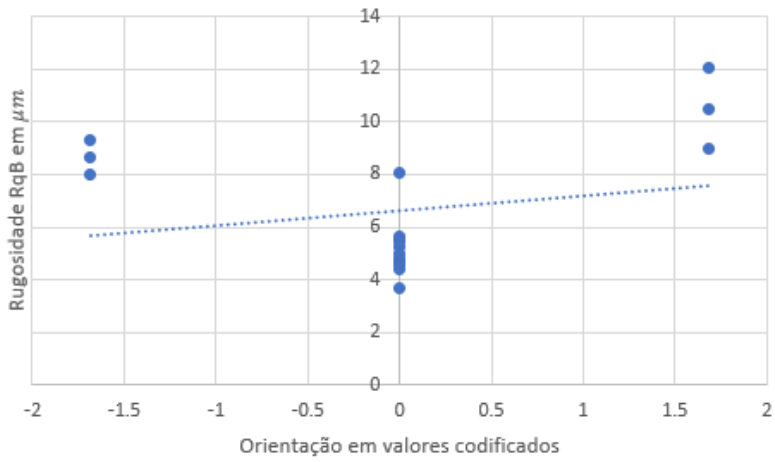


Figura F 70 - Evolução de RqB com a orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes

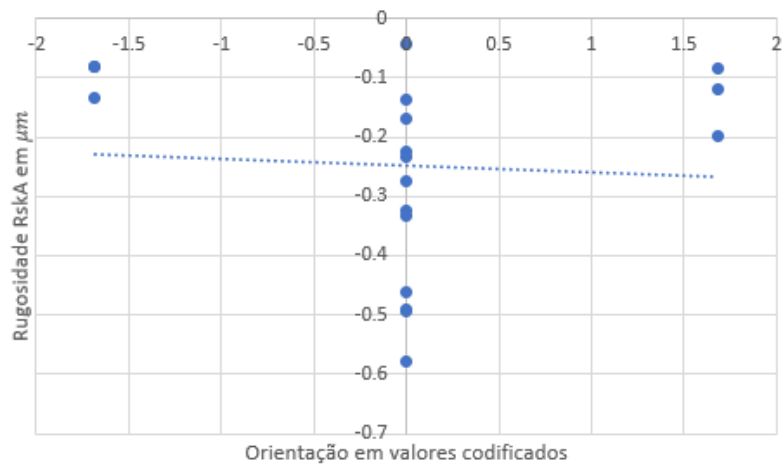


Figura F 71 - Evolução de RskA com a orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes

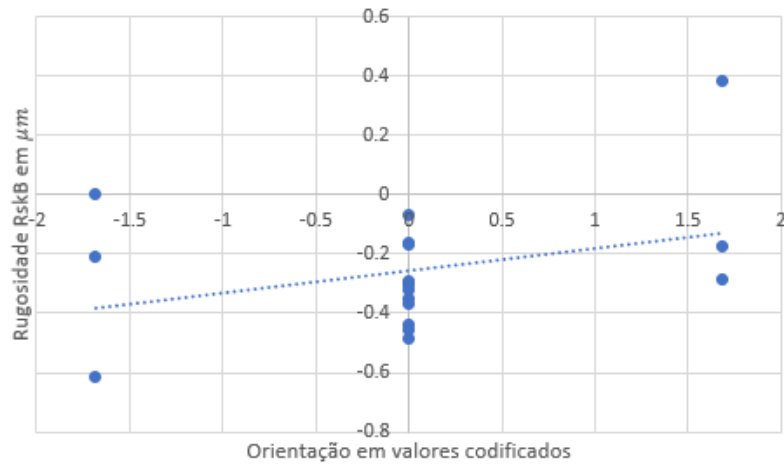


Figura F 72 - Evolução de RskB com a orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes

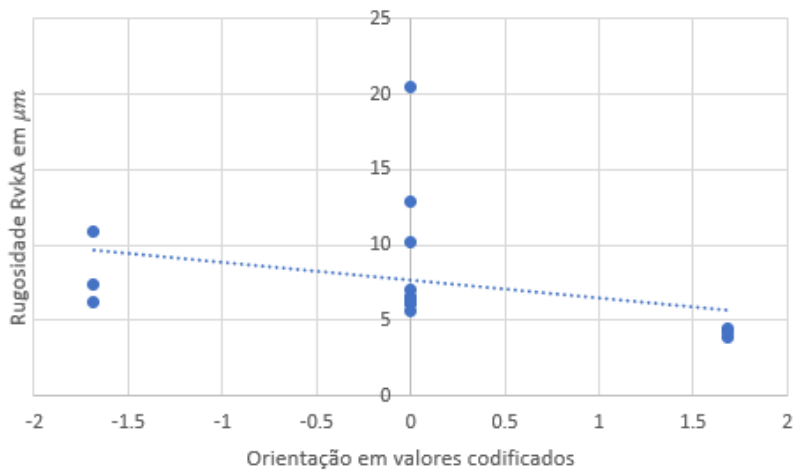


Figura F 73 - Evolução de RvKA com a orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes

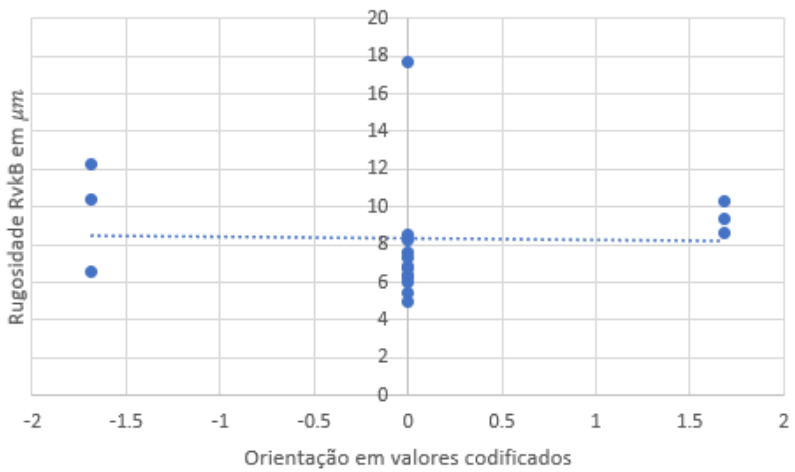


Figura F 74 - Evolução de RvKB com a orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes

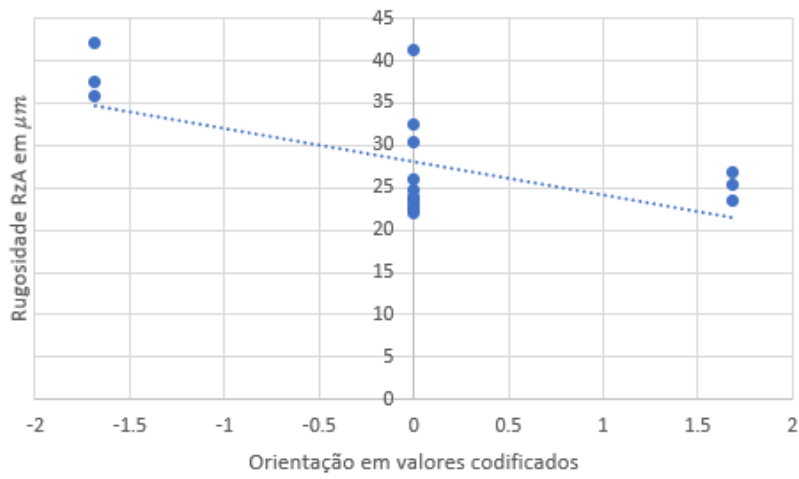


Figura F 75 - Evolução de RzA com a orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes

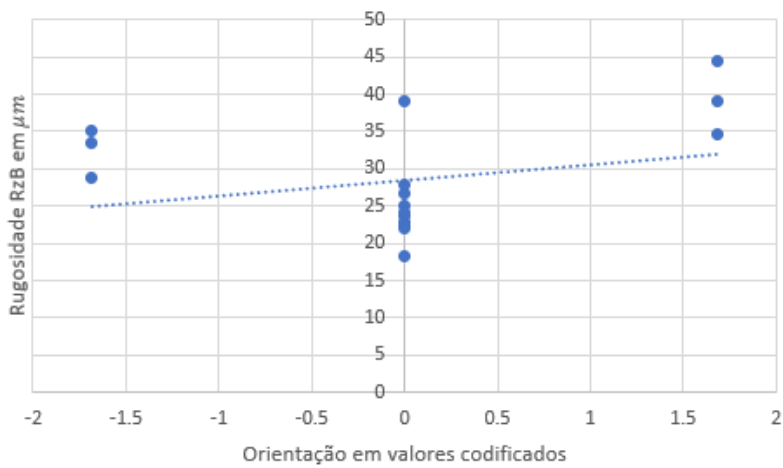


Figura F 76 - Evolução de RzB com a orientação, mantendo a espessura e o tempo de exposição constantes

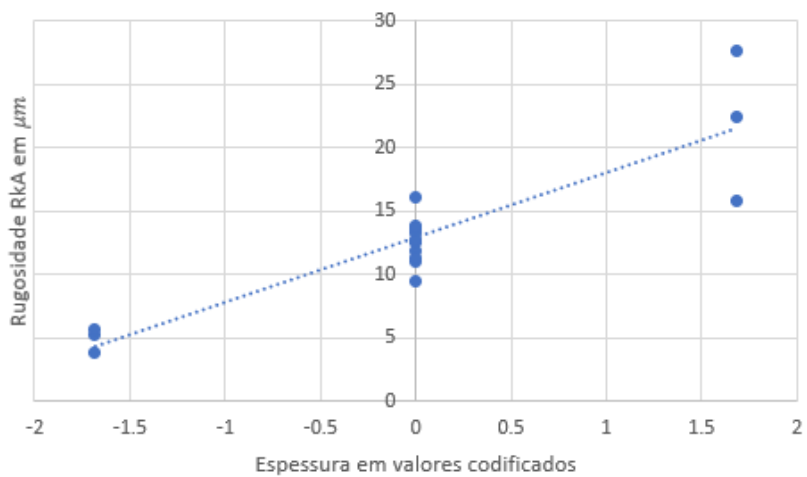


Figura F 77 - Evolução de RkA com a espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes

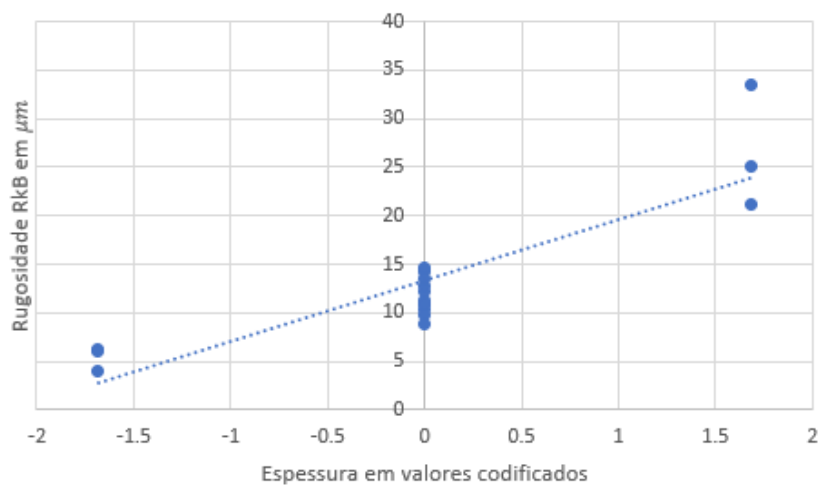


Figura F 78 - Evolução de RkB com a espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes

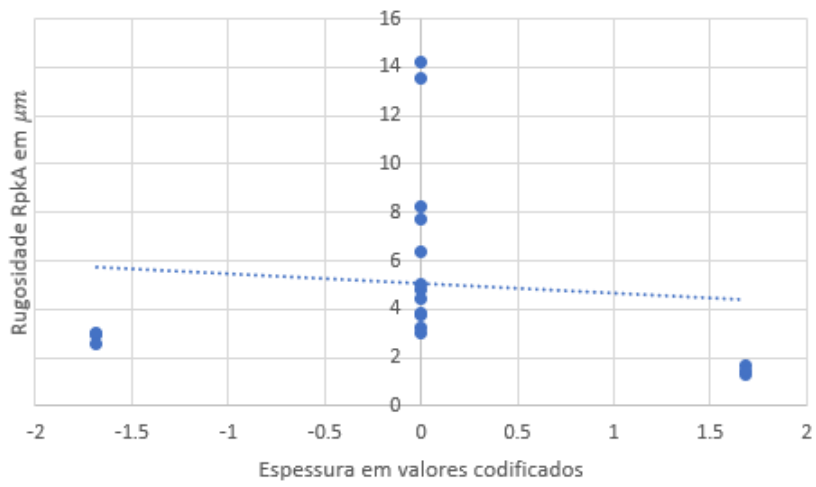


Figura F 79 - Evolução de RpkA com a espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes

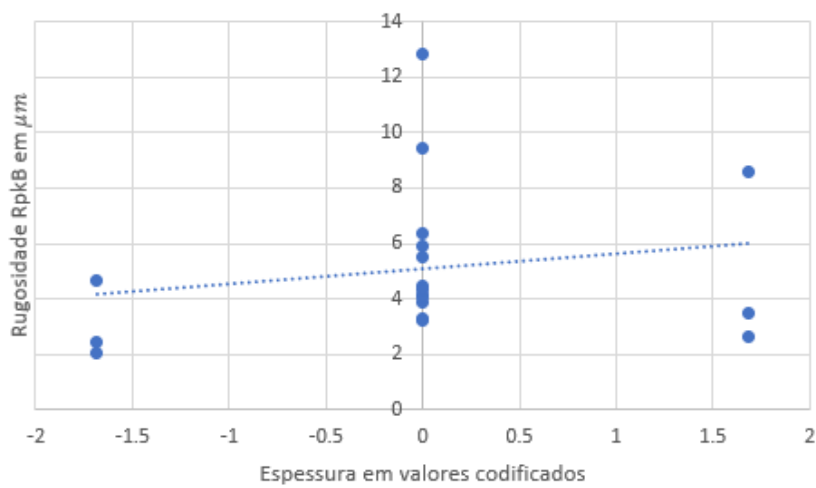


Figura F 80 - Evolução de RpkB com a espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes

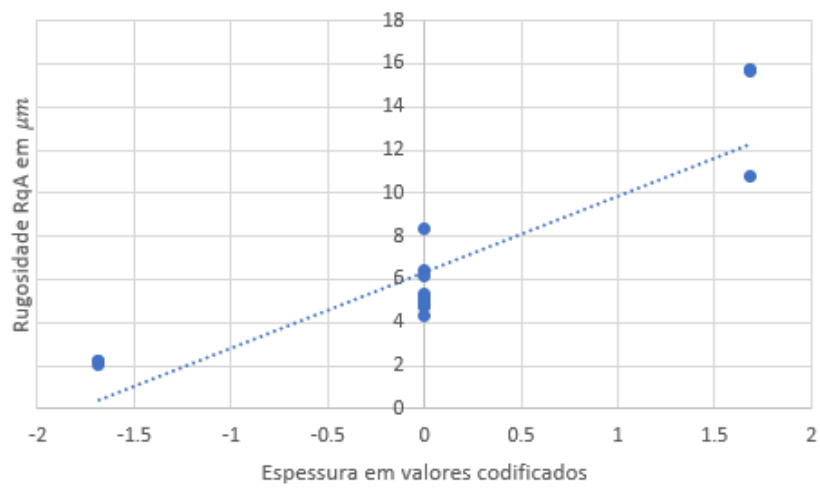


Figura F 81 - Evolução de RpkB com a espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes

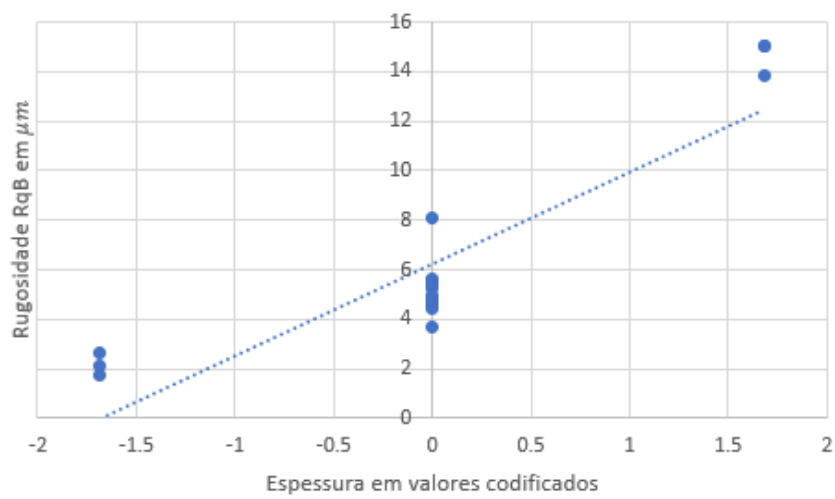


Figura F 82 - Evolução de RqB com a espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes

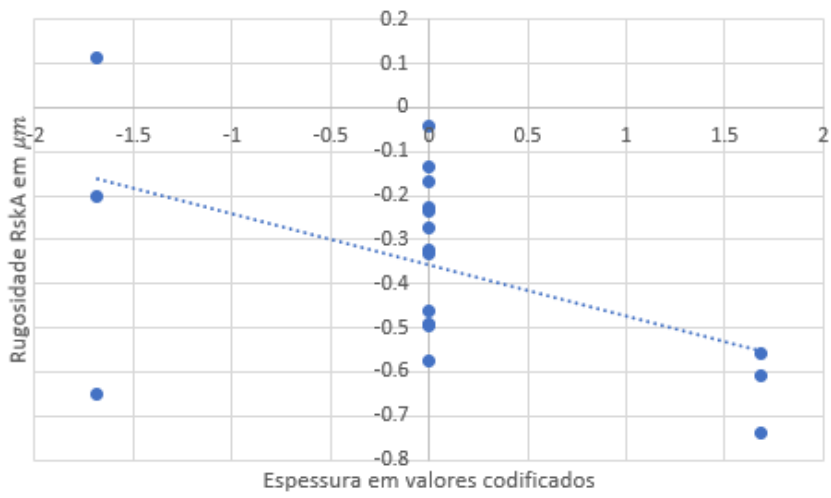


Figura F 83 - Evolução de RskA com a espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes

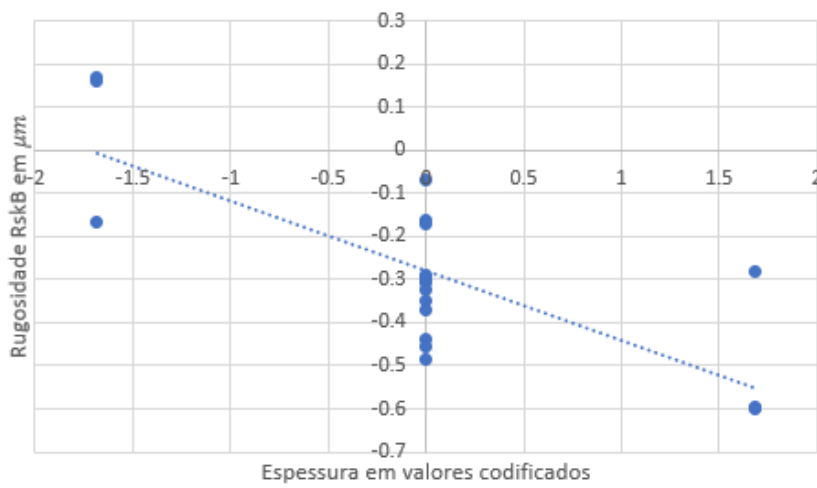


Figura F 84 - Evolução de RskB com a espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes

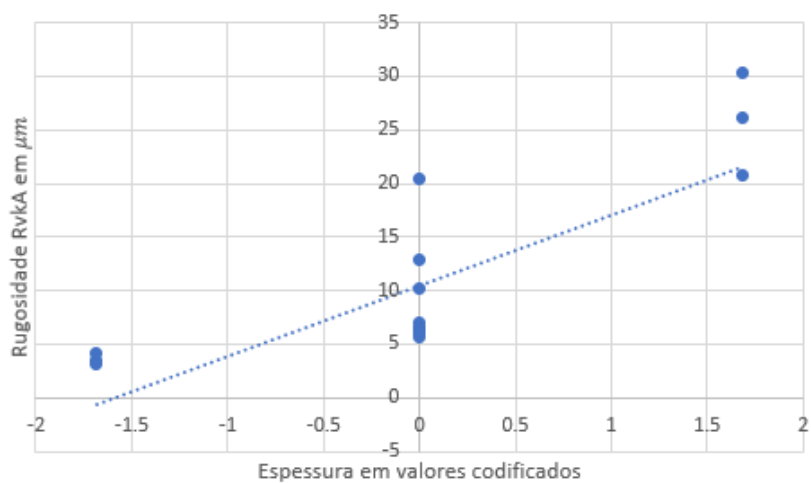


Figura F 85 - Evolução de RvkA com a espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes

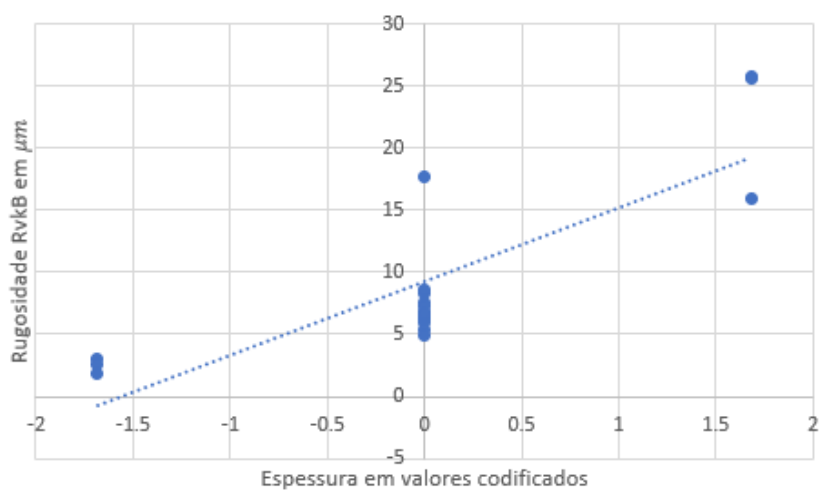


Figura F 86 - Evolução de RvkB com a espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes

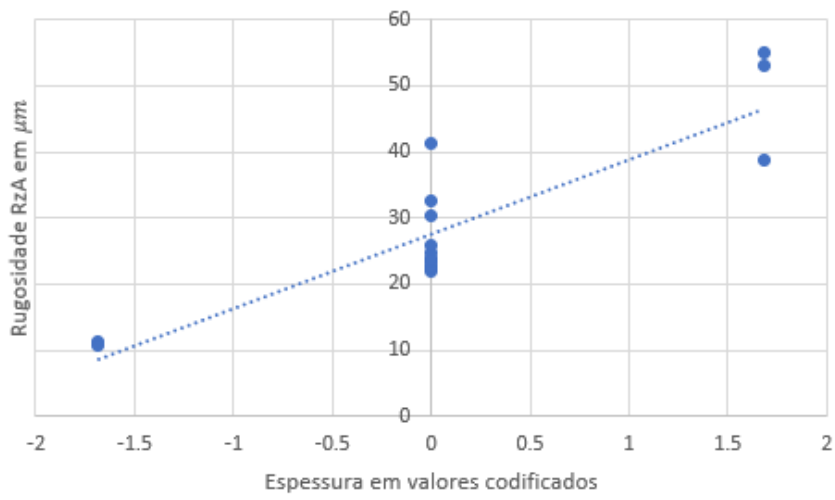


Figura F 87 - Evolução de RzA com a espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes

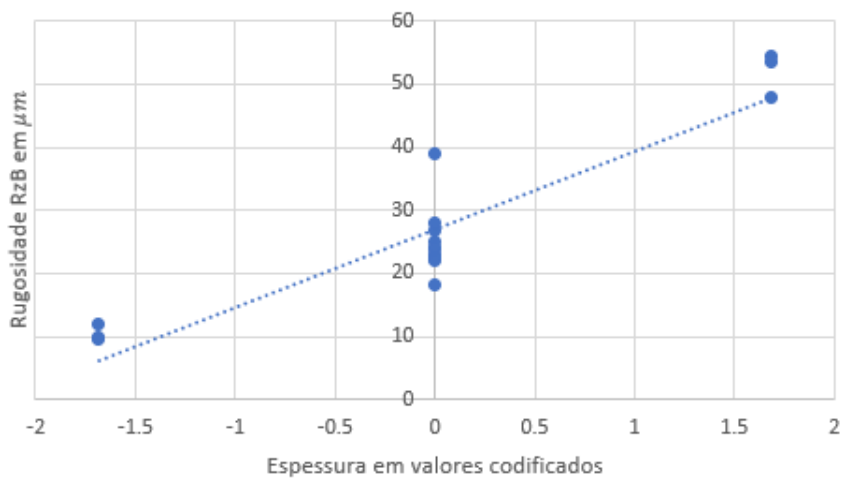


Figura F 88 - Evolução de RzB com a espessura, mantendo a orientação e o tempo de exposição constantes

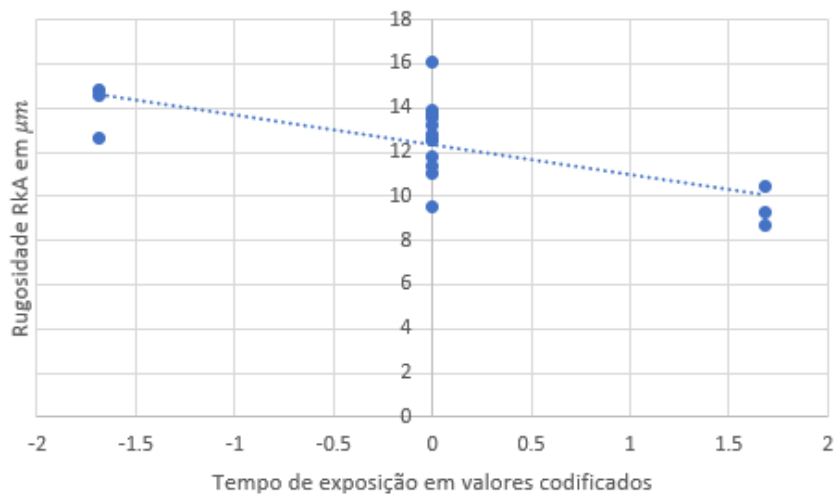


Figura F 89 - Evolução de RkA com o tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes

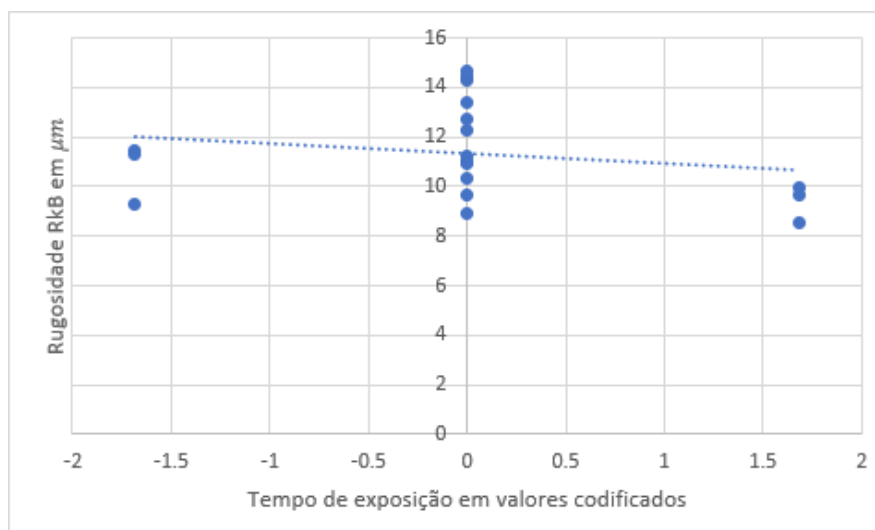


Figura F 90 - Evolução de RkB com o tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes

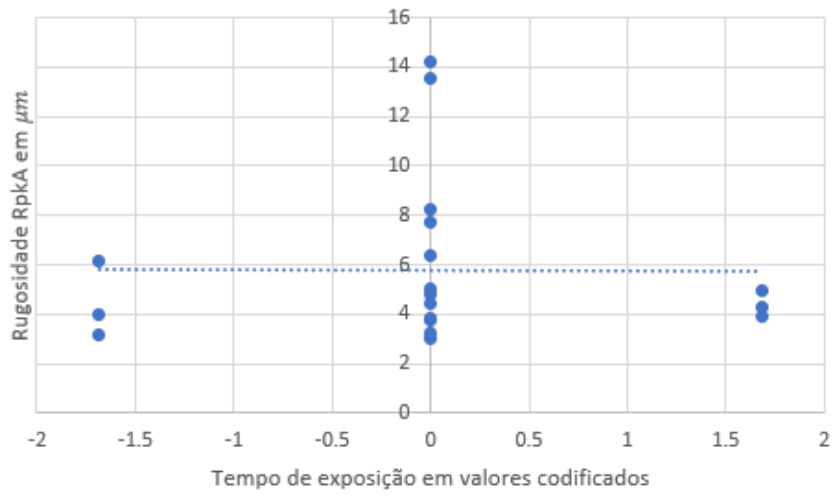


Figura F 91 - Evolução de RpkA com o tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes

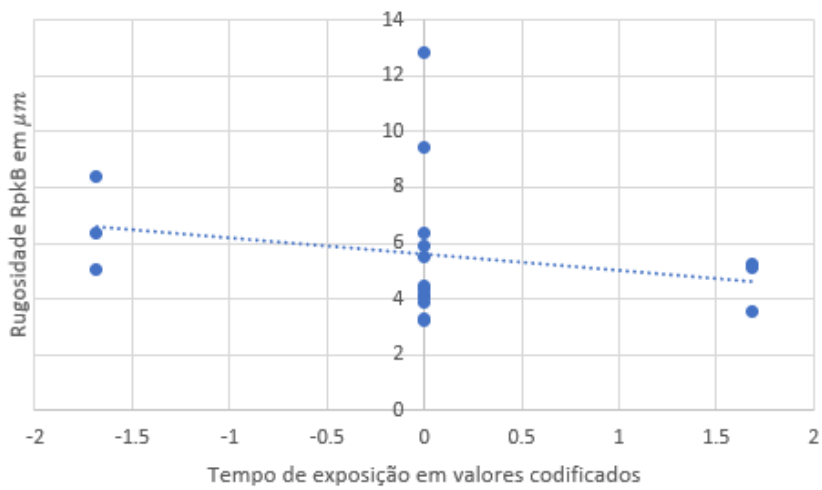


Figura F 92 - Evolução de Rpk com o tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes

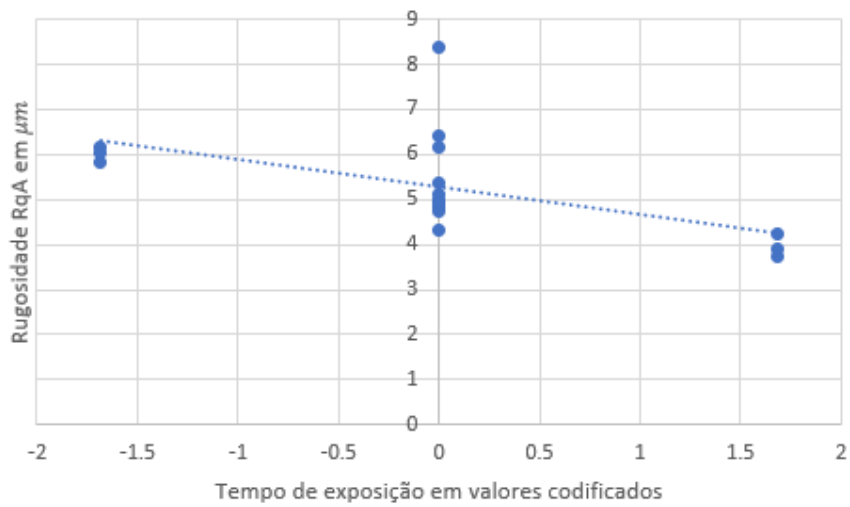


Figura F 93 - Evolução de RqA com o tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes

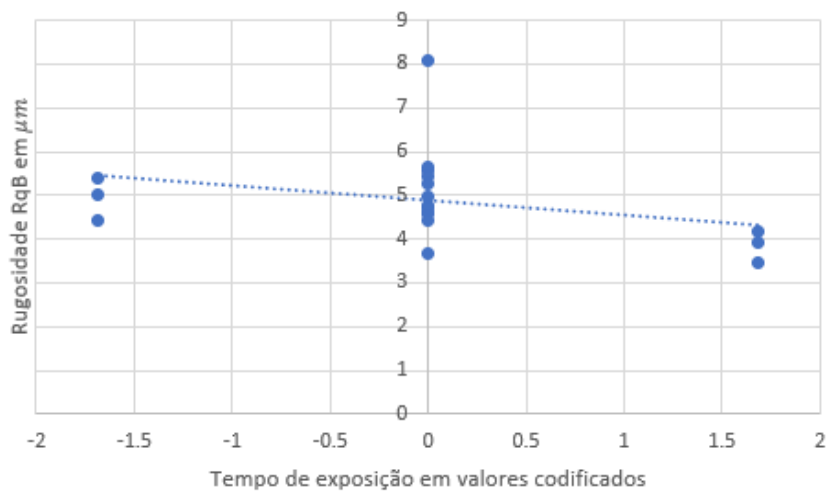


Figura F 94 - Evolução de RqB com o tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes

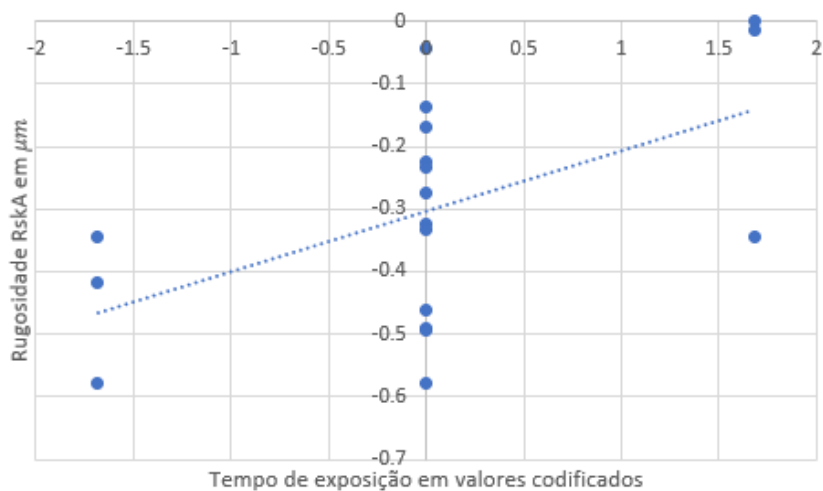


Figura F 95 - Evolução de RskA com o tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes

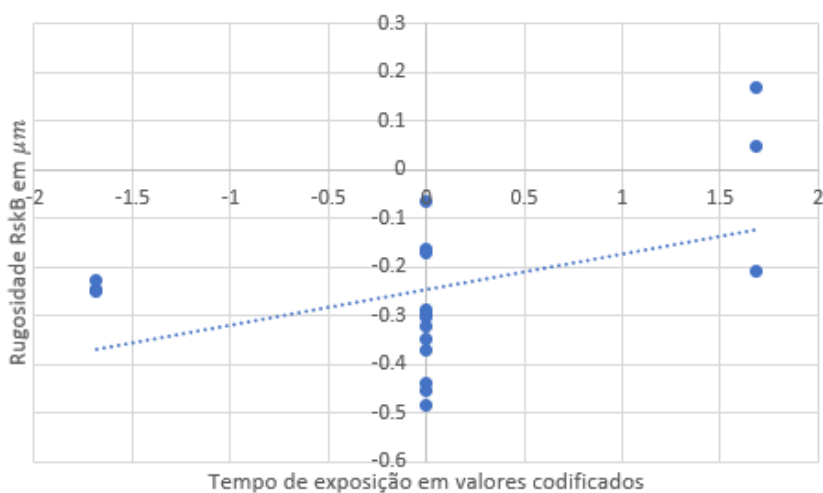


Figura F 96 - Evolução de RskB com o tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes

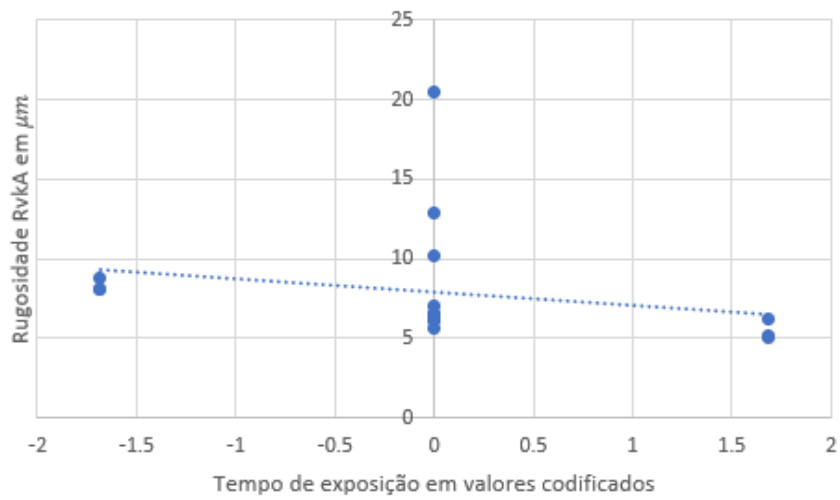


Figura F 97 - Evolução de RvkA com o tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes

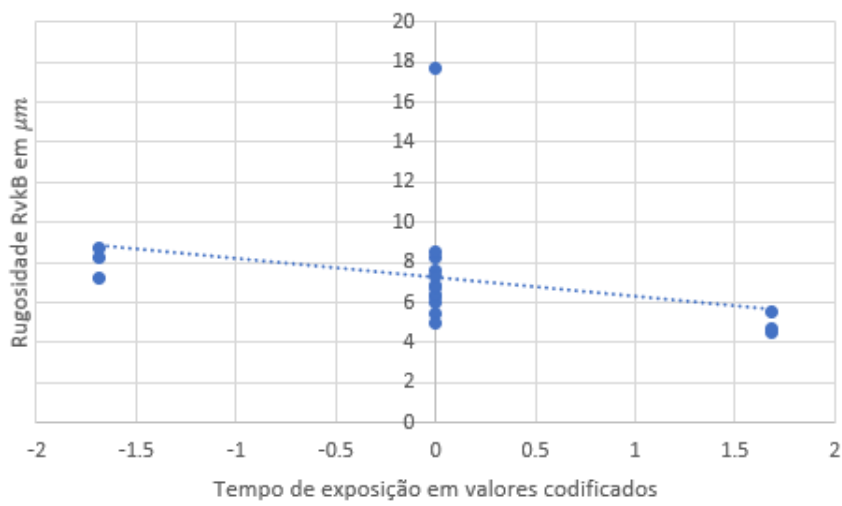


Figura F 98 - Evolução de RvkB com o tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes

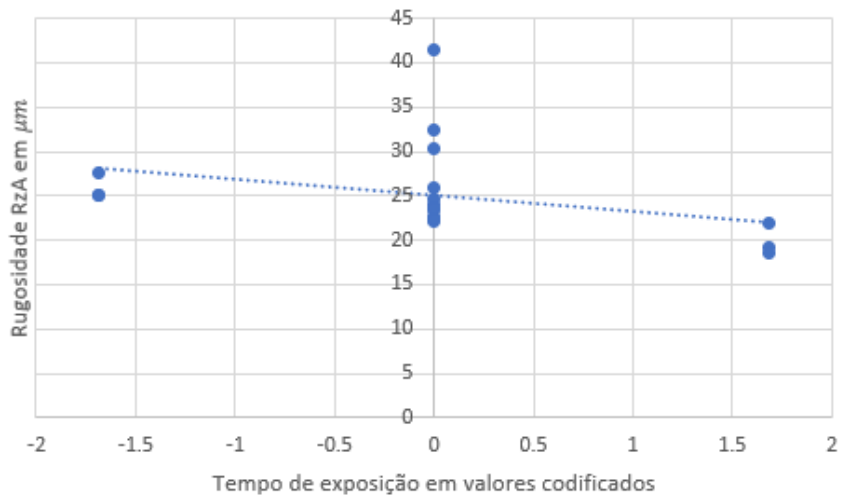


Figura F 99 - Evolução de RzA com o tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes

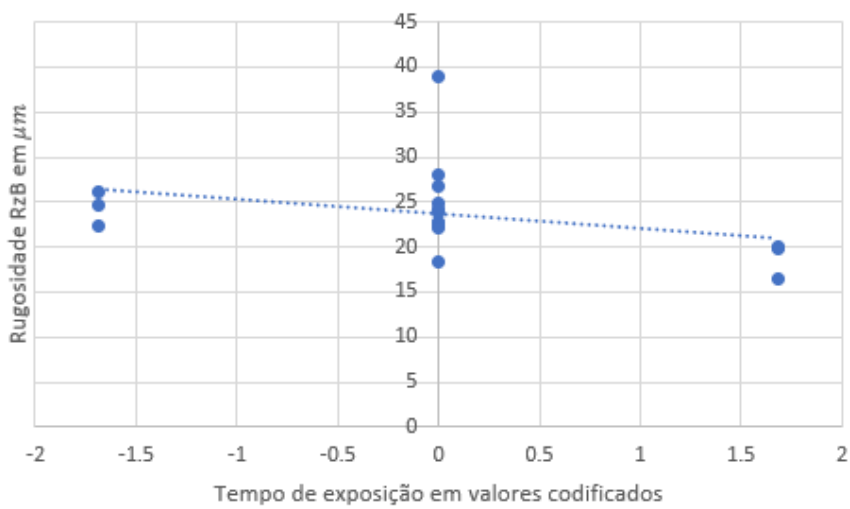


Figura F 100 - Evolução de RzB com o tempo de exposição, mantendo a orientação e a espessura constantes