



António Pedro Moutinho Cachaço

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Estudo de desvios geométricos em impressão 3D em peças axissimétricas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Bruno Alexandre Rodrigues
Simões Soares, Professor Auxiliar Convidado, FCT-UNL

Coorientador: Professora Doutora Carla Maria Moreira
Machado, Professora Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2019

Estudo de desvios geométricos em impressão 3D

Copyright © António Pedro Moutinho Cachaço, Faculdade de Ciências e Tecnologias, 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

Em primeiro lugar quero agradecer a todo o corpo docente e técnico do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial que ao longo do curso me foi instruindo e durante esta dissertação me foi auxiliando. Deixo também o meu agradecimento ao meu orientador, Professor Bruno Soares, por todo o trabalho que me ajudou a desenvolver, à minha coorientadora, Professora Carla Machado, pela instrução em conhecimentos estatísticos e aos Professores Ricardo Cláudio e José Simões do Instituto Politécnico de Setúbal pelos conhecimentos técnicos na medição por coordenadas.

Agradeço também aos meus pais, que tornaram possível a minha frequência neste curso, ao meu irmão pelas correções que fez, à minha namorada, Mariana, que me apoiou e felicitou durante esta dissertação, a todos os meus colegas e amigos, que ao longo destes anos me acompanharam nas noites de estudo, de trabalho e boémias, ao Núcleo de Engenharia Mecânica pelos projetos em que participei e à Comissão de Praxe de Engenharia Mecânica pelos momentos que me proporcionou.

Resumo

As tecnologias de Manufatura Aditiva têm vindo a tornar-se cada vez mais comuns em ambientes académicos, industriais e laboratoriais. Isto porque são tecnologias que permitem a rápida criação de um protótipo ou peça a partir das ferramentas de Desenho Assistido por Computador.

Esta dissertação tem como objetivo o estudo da influência de diversos parâmetros de impressão nos desvios geométricos em Fabricação por Filamento Fundido (FFF), uma tecnologia de Manufatura Aditiva.

O estudo foi dividido em duas partes, o *Screening* inicial e uma Metodologia de Superfície de Resposta. Na primeira fez-se uma triagem dos parâmetros, descobrindo aqueles que são estatisticamente significativos e na segunda aplicou-se a Metodologia de Superfície de Resposta de forma a obter equações que prevejam a resposta geométrica face aos parâmetros escolhidos.

A parte experimental consiste na impressão de provetes, na sua medição em Máquina de Medição por Coordenadas e no tratamento de dados por análise estatística.

O tratamento estatístico foi feito utilizando um *software* capaz de criar Planeamentos de Experiências e executar Análises de Variância e Metodologia de Superfície de Resposta. Esta ferramenta permitiu a obtenção dos parâmetros significativos e a posterior criação das equações de segunda ordem que fazem o modelo empírico.

O resultado desta dissertação consiste em modelos empíricos de segundo grau de desvios de cilindridade, paralelismo e perpendicularidade. Estes polinómios tendem a apontar para os parâmetros de impressão causadores de efeito de escada como fatores significativos. A significância do efeito de escada indica que o método de medição não é adequado ao processo de FFF.

Palavras-Chave: Manufatura Aditiva, Desvios Geométricos, Planeamento de Experiências, Fabricação por Filamento Fundido

Abstract

Additive Manufacturing technologies are getting more and more common in academic, industrial and laboratorial environments. Mainly because they allow a fast creation of a part or prototype from Computer Assisted Design.

The objective of this thesis is to study and understand the influence of several printing parameters on the geometric deviation of parts manufactured by Fused Filament Fabrication (FFF), an Additive Manufacturing technology.

This study was divided in two parts, the Screening and the Response Surface Methodology. The first in order to calculate the factors that are statistically significant and the second in to obtain second order empirical models to form response surfaces.

The experiment consists in the printing of test pieces, measuring them with a Coordinate Measuring Machine and analysing the data statistically.

The statistical analysis was made possible through a software able to create Design of Experiments and execute Analysis of Variance and Response Surface Methodology. This tool made possible to obtain the significant factors and create the empirical models.

The result of this thesis are the second order models of cylindrical, parallelism and perpendicular deviations. These equations tend to point the factors that cause stair effect as the significant factors. The significance of this effect points that the measuring method is not adequate to the process of Fused Filament Fabrication.

Keywords: Additive Manufacturing, Geometric Tolerances, Design of Experiments, Fused Filament Fabrication

Índice Geral

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Índice Geral.....	xi
Índice de Imagens.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xv
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xvii
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação.....	2
2 Estado da Arte.....	3
2.1 Tecnologias de manufatura aditiva.....	3
2.1.1 Definição de Manufatura aditiva.....	3
2.1.2 História da Manufatura aditiva.....	3
2.1.3 As Categorias de processos.....	4
2.1.4 Etapas da Manufatura Aditiva.....	8
2.1.5 Slicers e Gcode.....	10
2.1.6 Processo FFF e os seus parâmetros.....	11
2.2 Tolerâncias Geométricas.....	15
2.2.1 Importância do Toleranciamento.....	15
2.2.2 Máquina de Medição por Coordenadas.....	18
2.3 Métodos estatísticos.....	18
2.3.1 Planeamento de Experiências.....	18
2.3.2 Análise de Variância.....	19
2.3.3 Metodologia de Superfície de Resposta.....	21
3 Metodologia.....	25
3.1 Planeamento de Experiências de Screening.....	25
3.2 Impressão dos Provetes.....	27
3.3 Proвете.....	28
3.4 Controlo geométrico por Máquina de Medição por coordenadas.....	29
3.5 Metodologia da Superfície de Resposta.....	30
4 Procedimento Experimental.....	31
4.1 Execução do <i>Screening</i> inicial.....	31
4.1.1 Parâmetros utilizados.....	31
4.1.2 Planeamento de Experiências.....	Erro! Marcador não definido.

4.1.3 Impressão dos Provetes do <i>Screening</i>	34
4.1.4 Pós-processamento	34
4.1.5 Medição do Provette Impresso	36
4.1.6 Tratamento dos dados	37
4.2 Execução da Metodologia de Superfície de Resposta	37
4.2.1 Parâmetros utilizados.....	37
4.2.2 Planeamento de Experiências – Planeamento Composto Central.....	37
4.2.3 Impressão de Provetes e pós-processamento	38
4.2.4 Medição e tratamento estatístico	38
5 Resultados Experimentais	39
5.1 Resultados de <i>Screening</i>	39
5.1.1 Análise de Normalidade	39
5.1.2 ANOVA.....	39
5.1.3 Considerações.....	40
5.2 Resultados da MSR	41
5.2.1 ANOVA.....	41
5.2.2 Análise de Normalidade	42
5.2.3 Coeficientes de regressão	42
5.2.4 Superfícies de Resposta	43
5.2.5 Considerações.....	43
6 Conclusão	45
6.1 Conclusões.....	45
6.2 Propostas de trabalhos futuros	46
Anexos.....	51
Anexo A – Desenhos técnicos do provete e apoios	51
Anexo B - <i>Screening</i>	63
Anexo C - Planeamento Composto Central	87

Índice de Figuras

FIGURA 2-1: IMPRESSORA SLA DE <i>CHARLES HULL</i>	3
FIGURA 2-2: FUNCIONAMENTO DO PROCESSO <i>BINDER JETTING</i> ..	5
FIGURA 2-3: FUNCIONAMENTO DO PROCESSO <i>DIRECTED ENERGY DEPOSITION</i>	5
FIGURA 2-4-ESQUEMA DO PROCESSO SLS..	6
FIGURA 2-5: FUNCIONAMENTO DO PROCESSO <i>SHEET LAMINATION</i> ..	6
FIGURA 2-6: FUNCIONAMENTO DO PROCESSO <i>MATERIAL JETTING</i> ..	7
FIGURA 2-7: FUNCIONAMENTO DO PROCESSO <i>VAT PHOTOPOLYMERIZATION</i> ..	8
FIGURA 2-8 : SEPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS PELO <i>SLICER</i>	10
FIGURA 2-9: FUNCIONAMENTO DO PROCESSO FFF.....	11
FIGURA 2-10: CATEGORIAS DE PARÂMETROS.....	12
FIGURA 2-11: EXEMPLO DE DIVERSAS ALTURAS DE CAMADA.....	12
FIGURA 2-12: VARIAÇÃO NO NÚMERO DE PERÍMETROS.....	13
FIGURA 2-13: EFEITO DA PERCENTAGEM DE ENCHIMENTO.....	13
FIGURA 2-14: EXEMPLO DA UTILIZAÇÃO DE SUPORTE.....	15
FIGURA 2-15: TOLERANCIA DE COAXIALIDADE.....	16
FIGURA 2-16: CAMPO DE TOLERÂNCIA DE PARALELISMO.....	17
FIGURA 2-17: CAMPO DE TOLERANCIAMENTO DE PERPENDICULARIDADE ENTRE UM PLANO E UMA RETA.....	17
FIGURA 2-18: CAMPO DE TOLERÂNCIA DE PERPENDICULARIDADE DE PLANOS.....	17
FIGURA 2-19: EXEMPLO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.....	22
FIGURA 2-20: INTERPRETAÇÃO DO CCC, CCF E CCI.....	23
FIGURA 3-1: IMPRESSORA <i>BLOCKS ONE MK2</i>	27
FIGURA 3-2: GEOMETRIAS A ESTUDAR.....	28
FIGURA 3-3: <i>MITOTOYO EURO-C544</i>	29
FIGURA 3-4: APALPADOR CMM.....	30
FIGURA 4-1: DEMONSTRAÇÃO DO EFEITO DE ESCADA.....	32
FIGURA 4-2: DEMONSTRAÇÃO DO EFEITO DE ESCADA A 5º.....	33
FIGURA 4-3: PROVETE EM <i>SOLIDWORKS</i> E EM STL.....	34
FIGURA 4-4: PROVETE IMPRESSO A -5º.....	35

FIGURA 4-5: DEFEITO DE MEDIÇÃO CRIADO POR <i>STRINGING</i>	36
FIGURA 4-6: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO PROVETE.	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.
FIGURA 6-1: INTERAÇÃO DA CMM COM O EFEITO DE ESCADA.	45

Índice de Tabelas

TABELA 2-1: DURAÇÃO DE IMPRESSÃO FACE À VELOCIDADE.....	14
TABELA 2-2: CATEGORIAS DE TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS. RETIRADO DE [32]	16
TABELA 2-3: EXEMPLO DE TABELA ANOVA.	21
TABELA 3-1: ESPECIFICAÇÕES DA MÁQUINA <i>BLOCKS ONE MK2</i> [44].	27
TABELA 4-1: NÍVEIS DO DOE DE <i>SCREENING</i>	33
TABELA 4-2: CARACTERÍSTICAS CONSIDERADAS.....	36
TABELA 4-3: NÍVEIS DO CCD.	38
TABELA 5-1: SIGNIFICÂNCIA DOS PARÂMETROS.....	40
TABELA 5-2: FATORES SIGNIFICATIVOS NO MSR.....	41
TABELA 5-3: EQUAÇÕES DOS MODELOS EMPÍRICOS.	42

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

ANOVA	(Análise de Variância)
ASTM	(American Society for Testing and Materials)
CAD	(Computer Aided Design; Desenho Assistido por Computador)
CCD	(Central Composite Design; Planeamento Composto Central)
CMM	(Coordinate Measuring Machine; Máquina de Medição por Coordenadas)
DoE	(Design of Experiments; Planeamento de Experiências)
FDM	(Fused Deposition Modeling; Modelação por Deposição de Filamento)
FFF	(Fabricação por Filamento Fundido)
ISO	(International Organization for Standardization)
MA	(Manufatura Aditiva)
RSM	(Metodologia de Superfície de Resposta)
PLA	(Polylactic Acid)

1 Introdução

1.1 Motivação

Os processos de Manufatura Aditiva (MA) transformaram a indústria pela forma rápida com que proporcionam a prototipagem, o que os torna processos de eleição para essas aplicações. Para além da prototipagem, existem também peças finais que são produzidas por MA, como por exemplo das peças as próprias impressoras de Fabricação por Filamento Fundido (FFF) [1].

O aumento da utilização de MA para produção de peças finais criou a necessidade de estudar as vantagens e desvantagens destes processos, de forma a garantir que peças produzidas por tecnologias tradicionais possam ser substituídas por peças produzidas por MA, sem afetar a funcionalidade do sistema.

Uma propriedade relevante para uma peça montada num conjunto é a sua geometria. Para confirmar que uma peça monta num conjunto, existem tolerâncias dimensionais e tolerâncias geométricas, que são os limites dos desvios que cada peça pode tomar de forma a que continue a ser validada para o funcionamento.

Não existem ainda estudos sobre as tolerâncias geométricas das tecnologias MA, apenas sobre as tolerâncias dimensionais [2]. Daí surge a necessidade de existir um trabalho que relacione os parâmetros de impressão com os desvios geométricos obtidos pelo processo de FFF.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal descobrir quais os parâmetros de impressão que proporcionam desvios geométricos menores e obter superfícies de resposta que permitam identificar as tendências da resposta geométrica face aos parâmetros de impressão utilizados.

Dentro do universo de parâmetros de impressão, foram apenas escolhidos seis parâmetros que, intuitivamente, poderiam provocar distorções geométricas: a percentagem de enchimento, temperatura de extrusão, altura de camada, velocidade de impressão, orientação do provete e quantidade de perímetros.

A experiência foi dividida em duas partes: o *Screening* que descarta os fatores que não são estatisticamente significativos; e o Planeamento Composto Central que faz um estudo mais aprofundado dos fatores que foram significativos no *Screening*. A partir da análise do Planeamento Composto Central é possível aplicar a Metodologia de Superfície de Resposta, por forma a obter os modelos empíricos.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos.

O primeiro capítulo, a Introdução, apresenta a motivação, objetivos e estrutura desta dissertação.

No segundo capítulo faz-se a história da arte alusiva às diversas tecnologias de MA caracterizando-as enquanto processos e comparando-as.

No terceiro capítulo são apresentadas as metodologias utilizadas na presente dissertação e a explicação das mesmas.

No quarto capítulo descreve-se o procedimento experimental.

No quinto capítulo estão apresentados os resultados experimentais obtidos.

No sexto e último capítulo são discutidos os resultados experimentais, apresentadas as conclusões e propostos os trabalhos futuros.

2 Estado da Arte

2.1 Tecnologias de Manufatura Aditiva

2.1.1 Definição de manufatura aditiva

A Manufatura Aditiva é o termo aplicado ao conjunto de tecnologias que produzem objetos físicos a partir de representações geométricas em CAD através adição sucessiva de material. Este material é sobreposto em camadas sucessivas, ao invés das tradicionais tecnologias de Manufatura Subtrativa, que retiram material camada após camada, como as tecnologias de corte por arranque de apara; e das tecnologias de enformação, como a forja ou a injeção plástica que moldam o material à forma desejada. A produção por Manufatura Aditiva está cada vez mais presente no dia a dia e é correntemente denominada de Impressão 3D. O processo de FFF já é utilizado de forma quotidiana por entusiastas devido à simplicidade dos equipamentos e possibilidade de os ter montados num escritório ou mesmo dentro de casa [3].

2.1.2 História da manufatura aditiva

A impressão de peças tridimensionais desenhadas num computador é algo que já é possível desde a década de 1980. Nesta década houve avanços em diversos sentidos no que chamavam de Prototipagem Rápida, devido à rapidez e simplicidade de criação de protótipos com estas tecnologias [1], [4], [5].

Charles Hull foi o primeiro, em 1983 a criar um protótipo para uma impressora de Estereolitografia, patenteando-a em 1986 e construída em 1987, (Figura 2-1) [4], [6].

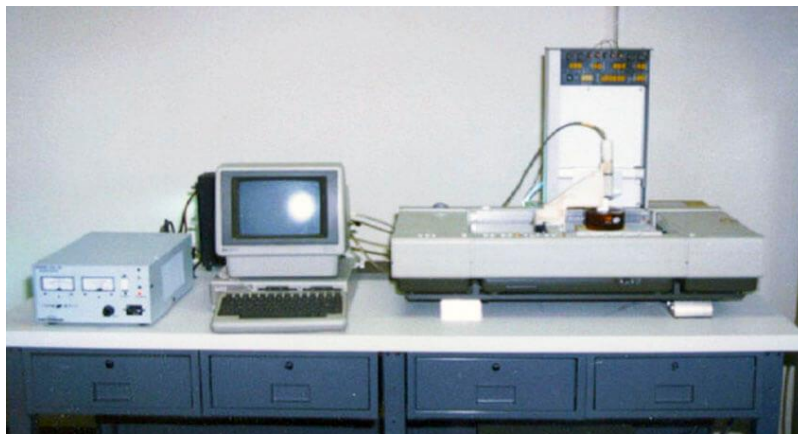


Figura 2-1: Impressora SLA de Charles Hull [6].

Em 1988 foi patenteada a tecnologia de *Selective Laser Sintering* que usa LASER para fundir uma camada de pó [7].

A tecnologia FDM, a mais comum do mercado e na qual vai ser baseada esta dissertação, foi patenteada em 1989 por S. Scott Crump fundador da empresa *Stratasys* que começou a comercialização da tecnologia [7].

Depois, entre as décadas de 1990 e 2000 foram desenvolvidas e testadas todas as tecnologias apresentadas na secção 2.1.3, e melhoradas as tecnologias existentes [1], [4], [7].

A utilização destas tecnologias foi aumentando com tempo e tornou-se popular entre unidades de investigação de empresas e universidades. A partir de 2009, com o expirar das patentes, os preços caíram abruptamente devido à criação de *software open source* para as diversas tecnologias, o que levou à disseminação dos equipamentos entre entusiastas e comerciais [5].

2.1.3 As Categorias de processos

A Manufatura Aditiva é composta por sete categorias de tecnologias segundo a norma ASTM-ISO. Estas tecnologias são diferenciadas pelo material de base que usam no processo: líquido, laminado ou pó.

Começando pelas tecnologias que têm pós como base, temos a *Binder Jetting*, *Directed Energy Deposition* e *Powder Bed Fusion*.

Binder Jetting é uma tecnologia que utiliza uma base com uma cama de pó de material e uma cabeça de impressão com um *nozzle*. Este *nozzle* deposita um aglomerante sobre o pó, construindo assim a camada. Após a deposição de aglomerante numa camada, deposita-se outra camada de pó em cima da anterior e deposita-se aglomerante para fazer a nova camada. Esta tecnologia permite a utilização de materiais como pós metálicos ou cerâmicos, alcançando características variadas. Este processo é representado na Figura 2-2 [8], [9].

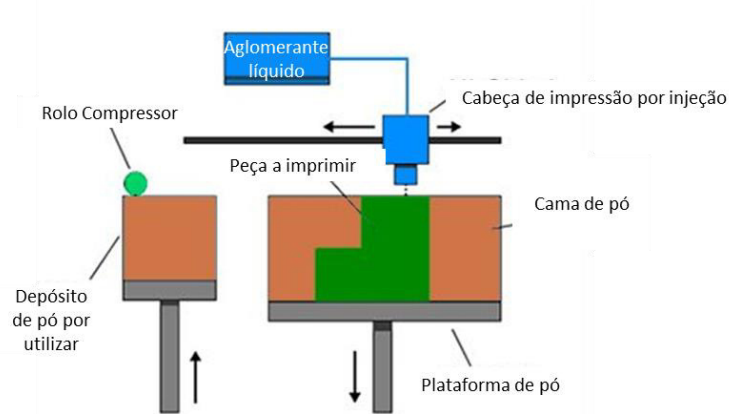


Figura 2-2: Funcionamento do processo Binder Jetting.
Adaptada de [8].

Directed Energy Deposition tem como princípio a fusão dos materiais através de uma fonte térmica focada, como *LASER*, plasma ou feixe de elétrons. O seu funcionamento, visível na Figura 2-3 consiste na injeção de pó ou filamento metálico em direção da zona de impressão e em simultâneo a utilização da fonte térmica para fundir o material em pó. Este processo permite obter peças com propriedades mecânicas semelhantes aos métodos tradicionais e, ao contrário destes, com propriedades variáveis. É possível ter mais que um *nozzle* de injeção de pó e injetar múltiplos materiais em quantidades diferentes de forma a obter ligas variáveis na peça [10], [11].

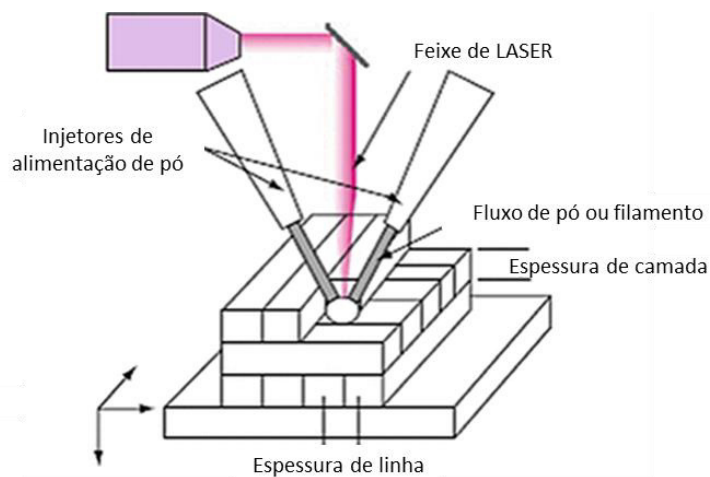


Figura 2-3: Funcionamento do processo Directed Energy Deposition. Adaptado de [11].

Powder Bed Fusion é semelhante ao processo de *Binder jetting*, com a diferença de que, em vez da deposição de aglomerante, utiliza uma fonte térmica para fundir o material. Esta fonte térmica pode ser um feixe de *LASER* ou um feixe de elétrons e funde materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos. Esta tecnologia é por vezes chamada de *SLS* ou *Selective Laser Sintering* e é demonstrada na seguinte Figura 2-4. [12]–[14]

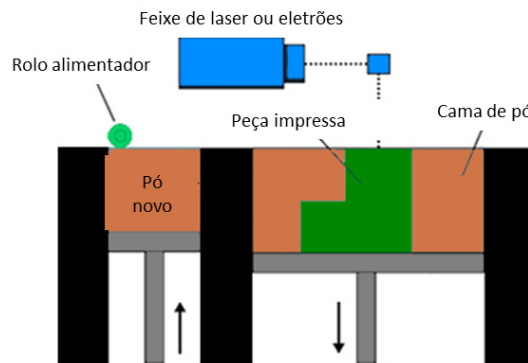


Figura 2-4-Esquema do Processo SLS. Adaptado de [14].

Com base em materiais laminados, existe ao processo de *Sheet Lamination* ou *Laminated Object Manufacturing*. Este processo, esquematizado na Figura 2-5, consiste na sobreposição de folhas que são cortadas a *LASER* para a geometria da camada a realizar. Depois de sobreposta e alinhada a folha cortada, um rolo aplica pressão e temperatura ligando-a às camadas anteriores. [15], [16]

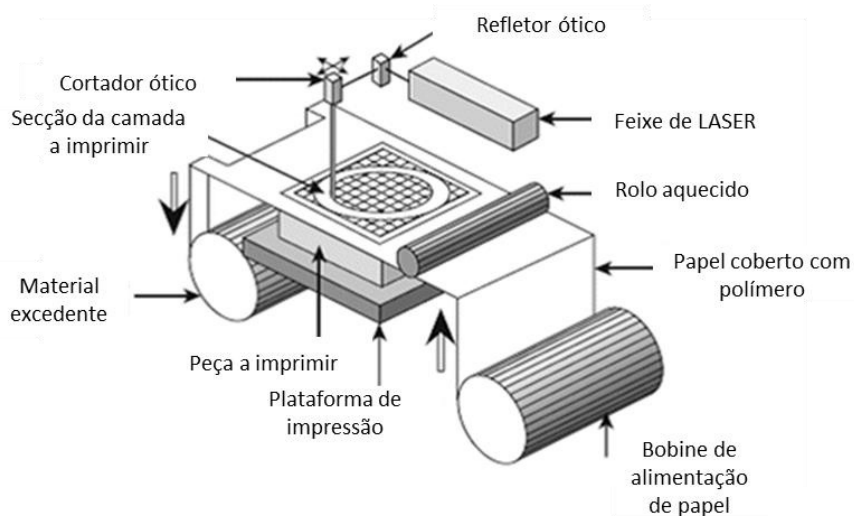


Figura 2-5: Funcionamento do processo Sheet Lamination. Adaptado de [16].

A categoria de processos que usam material no estado líquido são *Material Jetting*, *Vat Photopolymerization* e *Material Extrusion*.

Material Jetting consiste na injeção de gotículas de resina fotossensível e cura por radiação UV feita através de uma cabeça de impressão sobre uma base. Este processo, assim como o *Vat Photopolymerization*, permite camadas de 16 microns de espessura, o que os torna bastante detalhados. Como se pode ver na Figura 2-6, esta tecnologia assemelha-se às impressoras bidimensionais de papel na forma como depositam as gotículas, sendo que neste caso é injetada resina em vez de tinta e esta resina é curada com luz UV à medida que é depositada. Nesta tecnologia é comum haver um segundo injetor para o material de suporte. Este material é solúvel e facilmente retirado no fim da impressão. [17], [18]

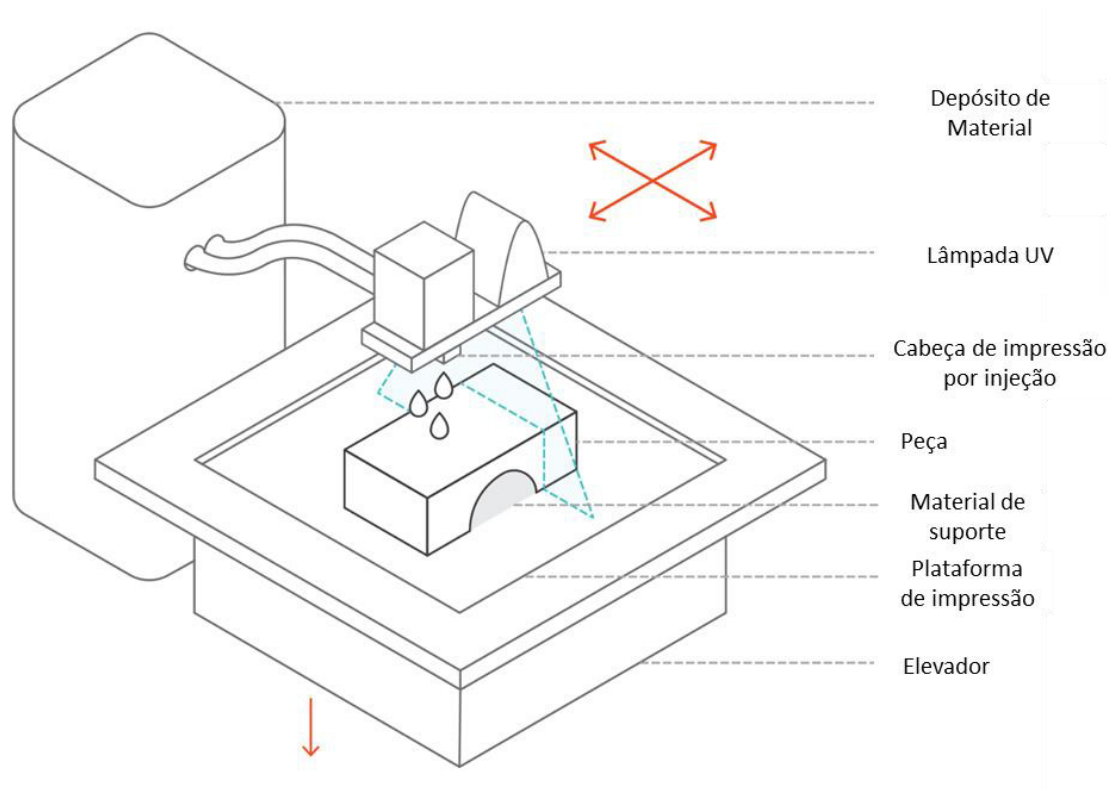


Figura 2-6: Funcionamento do processo Material Jetting. Adaptado de [18].

O *Vat Photopolymerization* funciona com base em resinas semelhantes ao *Material Jetting*, mas em vez de deposição em forma de gotículas, este processo utiliza uma plataforma de impressão imersa num tanque de resina que, com auxílio de um *LASER*, vai solidificando camada a camada. Começando com a plataforma encostada ao fundo do tanque, camada a camada vai-se afastando e solidificando material em cada camada (Figura 2-7) [19], [20].

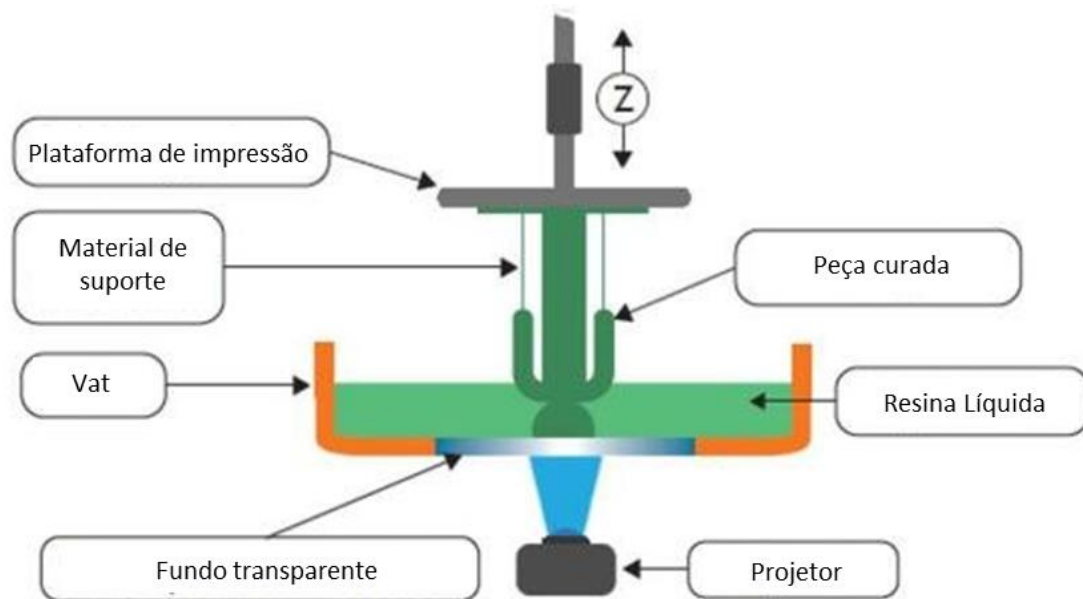


Figura 2-7: Funcionamento do processo Vat photopolymerization. Adaptado de [20].

Por fim existe o processo que vai ser utilizado nesta dissertação. O processo de *Material Extrusion*, como descrito na secção 2.1.6 tem como base a extrusão de polímeros termoplásticos. Neste processo, existe uma cabeça de injeção com um extrusor que aquece o polímero até o fundir e o deposita numa mesa camada após camada até obter o modelo tridimensional. [1], [3], [7], [21], [22]

2.1.4 Etapas da Manufatura Aditiva

Os processos de Manufatura Aditiva podem ser divididos em cinco subprocessos ou etapas que estão listadas abaixo. [23]

1ª etapa - Criação do modelo 3D

Para que se possa imprimir uma peça, a primeira tarefa é criar o modelo 3D, para tal, utilizam-se ferramentas de *CAD* ou, no caso da engenharia inversa, um *scanner* 3D. Ao criar o modelo, há que ter em consideração as geometrias a criar pelas particularidades associadas ao processo de MA, por exemplo, minimizar as zonas que necessitam de suporte, de forma a reduzir os defeitos superficiais associados, o material desperdiçado no suporte e adicionalmente o tempo de impressão

2ª etapa - Criação do ficheiro STL e a sua manipulação

De forma a ser interpretado pelo *Slicer*, o ficheiro CAD tem que ser convertido em STL. O STL ou *STereoLithography file*, descreve as superfícies como triângulos simplificando o modelo. É possível diminuir ou aumentar o número de triângulos da malha de forma a diminuir o tamanho do ficheiro ou a aumentar a aproximação da malha ao modelo original.

Após a conversão em STL, o ficheiro é importado para o *Slicer*, onde é separado por camadas. Estas camadas consistem em desenhos bidimensionais paralelos ao plano da plataforma de impressão que são distanciados pela espessura de camada. É também no *Slicer* que se escolhe os parâmetros de impressão para a produção do *Gcode* que é lido pela impressora.

3ª etapa – Impressão

A impressão das peças é feita de forma automatizada pela máquina que lê o *Gcode* e o interpreta. Dependendo da tecnologia utilizada, a impressão é executada como descrito na secção anterior (2.1.3).

4ª etapa - Remoção das peças

No caso da tecnologia FFF, a remoção da peça é tão simples como a sua separação da plataforma de impressão. Contudo, em algumas tecnologias, especialmente as que utilizam material de base em pó, a sua remoção é um processo complicado e delicado que exige perícia e equipamento de segurança devido à toxicidade de alguns materiais.

5ª etapa - Pós processamento

O pós-processamento varia também com a tecnologia a utilizar. E pode variar desde uma operação simples até uma série de operações morosas e dispendiosas.

No caso de FFF, o pós-processamento consiste na remoção de suportes e, se necessário, a limpeza de *stringing*, fenómeno inerente à viscosidade do material extrudido. São operações relativamente simples e podem ser executadas com ferramentas de uso quotidiano como um X-ato ou um alicate de pontas. Já no caso das tecnologias que utilizam resinas fotossensíveis, o pós-processamento é compreendido pela limpeza da resina desnecessária utilizando álcool isopropílico, a cura da peça sob luz ultravioleta e por fim a remoção dos suportes. Para as tecnologias que utilizam materiais em pó, o pós processamento consiste na remoção do excedente e acabamentos superficiais.[24]

2.1.5 Slicers e Gcode

Como meio de comunicação entre o utilizador e qualquer uma das tecnologias de manufatura aditiva, é utilizado o formato *Gcode*, um tipo de ficheiros comum a ferramentas de maquinação por controlo numérico computadorizado. Embora este código tenha sido feito de forma a ser facilmente escrito e lido por computadores e ferramentas computadorizadas, também é facilmente alterado manualmente por um operador o que permite a personalização de um trabalho ou um pequeno ajuste por parte do mesmo.

De forma a transformar uma malha gráfica, em STL, num ficheiro *gcode* pronto a transferir para a máquina de MA, existem vários softwares chamados *Slicer*. Estes softwares, mais precisamente aqueles específicos para processos FFF, são softwares bastante intuitivos e adaptáveis aos parâmetros de impressão escolhidos pelo operador do programa. De seguida este ficheiro é carregado para a impressora que o lê e o executa de forma a obter a peça tridimensional pretendida.[23], [25]

Nesta dissertação, como *Slicer*, foi usada a versão 3.3.0 do *Ultimaker Cura*, um *software* de utilização livre que permite o controlo de diversos parâmetros do processo e que é adaptável a uma vasta gama de máquinas.

Na imagem abaixo está a representação de um corte de uma impressão (Figura 2-8), onde se pode observar como o *Slicer* transforma uma malha, num ficheiro pronto a imprimir e como gera as diferentes características dependendo da funcionalidade de cada parte. As várias cores representam cada uma das características: a vermelho os perímetros, parte exterior da peça; a verde, o lado interior dos perímetros; a amarelo o enchimento; e a azul os suportes. Dividindo a peça nestas diversas características, é possível ajustar os parâmetros para cada característica conforme o requerido.

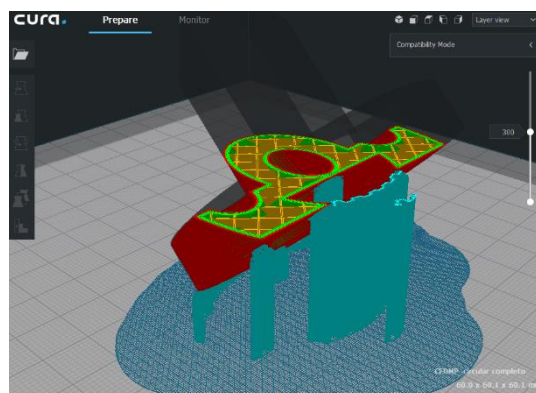


Figura 2-8 : Separação de características pelo *slicer*.

2.1.6 Processo FFF e os seus parâmetros

O processo FFF, representado na Figura 2-9, tem como base a deposição de filamento liquefeito sobre uma plataforma. A peça é construída camada sobre camada e cada camada, é obtida pela deposição de filamento de forma planar e paralela à plataforma de impressão. Segundos após a deposição, o filamento solidifica formando uma linha solida. A camada é formada por um grupo de linhas complanares. Após a deposição de uma camada, há um movimento no eixo Z, pela cabeça de impressão ou pela plataforma dependendo da geometria da máquina, e começa a deposição de outra camada. O material fundido da camada superior funde parcialmente o material depositado anteriormente de forma a garantir uma aderência suficiente entre as duas camadas [3], [5], [21], [23], [25], [26].

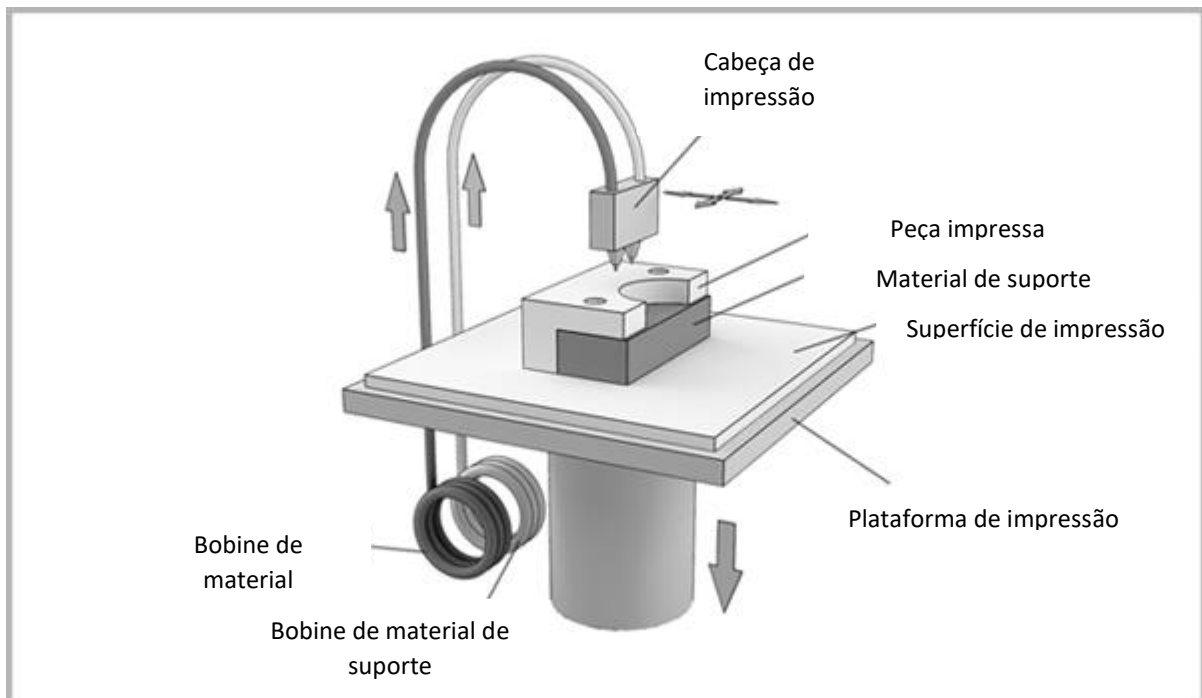


Figura 2-9: Funcionamento do processo FFF. Adaptado de [26].

Este processo permite a alteração de uma série de parâmetros. Estes parâmetros são alteráveis no *Slicer* e ajustáveis na própria máquina durante a impressão de forma a obter melhor qualidade ou impressões mais rápidas ou com menos material, consoante o pretendido.

Numa impressão FFF com o *Slicer* que foi utilizado nesta dissertação, existem vários separadores que organizam os parâmetros conforme a sua natureza, como podemos ver na Figura 2-10.

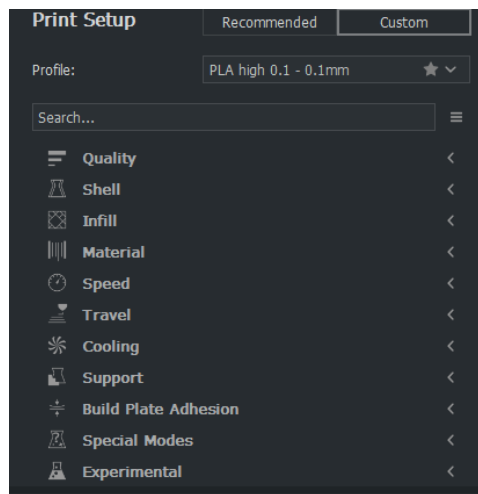


Figura 2-10: Categorias de parâmetros.

A primeira categoria, qualidade, contém os parâmetros relativos à quantidade de material extrudada como por exemplo a altura de camada, a espessura de linha e os derivados destas primeiras para casos particulares, como a altura da primeira camada e a espessura de linha para diversas características. A Figura 2-11 demonstra três exemplos diferentes de altura de camada, à esquerda 0,1 mm, ao centro 0,2 mm e à direita 0,4 mm. É facilmente visível o efeito de escada proporcional à altura de camada. Nota-se que quanto maior a altura de camada, maior a rugosidade e menor o tempo de impressão. [27]

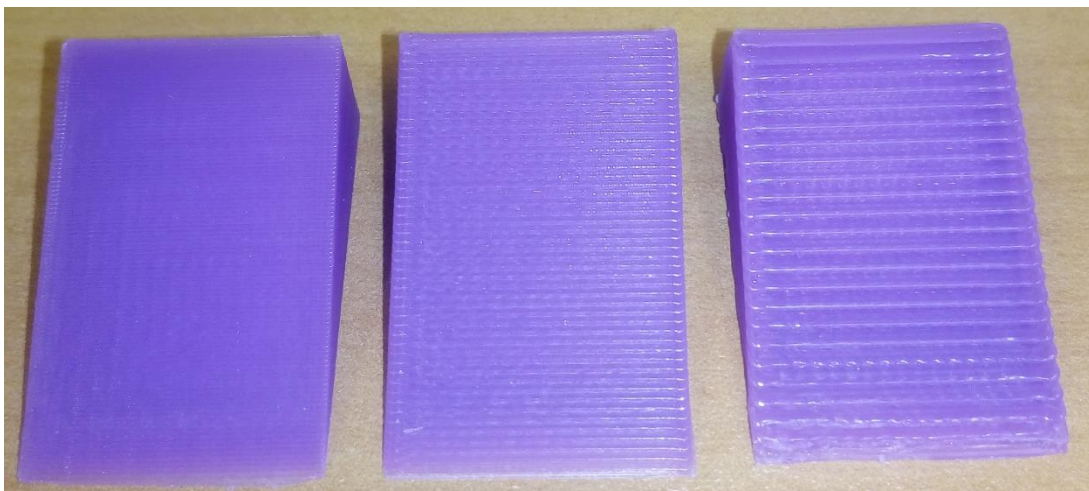


Figura 2-11: Exemplo de diversas alturas de camada.

De seguida, temos a categoria de casca. Aqui estão presentes parâmetros que ditam a quantidade de perímetros ou a quantidade de camadas de topo e de base. A quantidade de perímetros influencia a rigidez da peça. Na Figura 2-12 podem-se observar quatro peças, as duas da esquerda com 3 perímetros e as da direita com apenas um perímetro. É visível que, a parede não só fica mais fina como menos suave, visto que, as linhas do enchimento distorcem o perímetro mais fino.

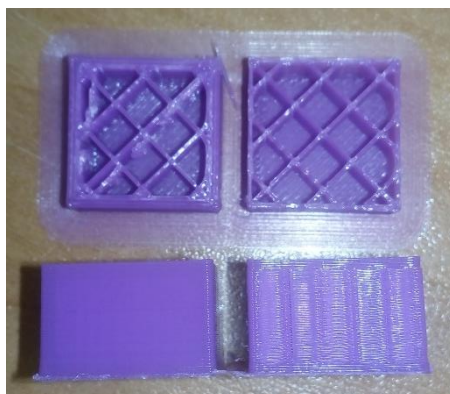


Figura 2-12: Variação na quantidade de perímetros

A terceira categoria, o enchimento, contém parâmetros que permitem definir a percentagem de enchimento e o padrão do enchimento entre outros. Na Figura 2-13 pode-se

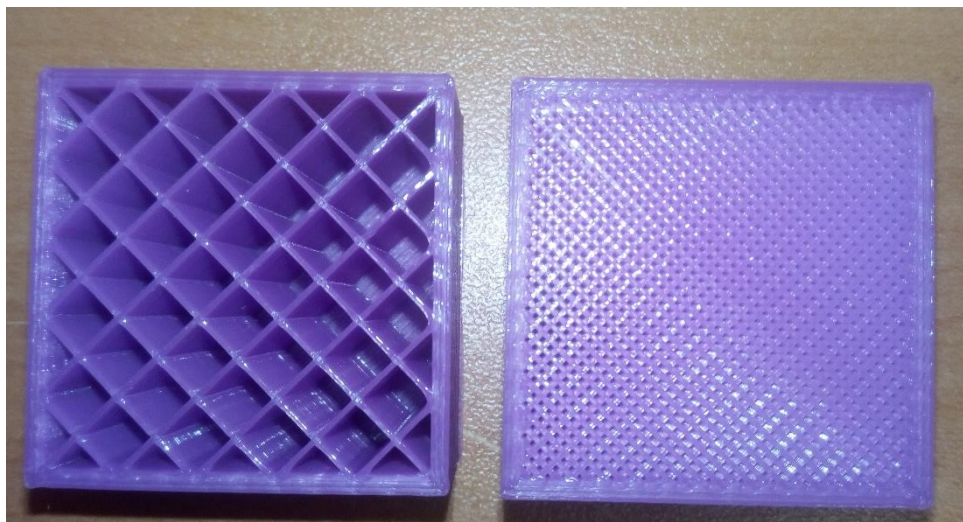


Figura 2-13: Efeito da percentagem de enchimento.

observar a diferença na percentagem de enchimento comparando a peça à esquerda, com percentagem e enchimento de 20%, com a peça à direita, com percentagem de enchimento de 50%. É facilmente visível a quantidade de material adicional que a peça à direita tem por estar mais preenchida. Na figura podemos também ver o padrão de enchimento “grelha”, um dos padrões mais utilizados pela sua simplicidade e o que é utilizado nesta dissertação.

Na categoria de material é onde se encontram os parâmetros de temperatura do *nozzle* e da mesa de impressão e os parâmetros da retração de filamento. A temperatura de impressão influencia tanto o acabamento como a aderência entre camadas. Este é um parâmetro limitado pela viscosidade do material fundido e pela estabilidade térmica do polímero. A temperatura típica para o *nozzle* situa-se entre os 180°C e os 220°C, sendo que para valores inferiores a 180°C o material fica sujeito a demasiado atrito viscoso que leva a entupimentos, e que acima de 220°C o material começa a degradar-se e a perder propriedades mecânicas e estabilidade. [28]

A velocidade é a categoria onde surgem todos os parâmetros de velocidade. Aqui há parâmetros para definir a velocidade para cada momento e geometria de impressão. A velocidade de impressão pode ter efeitos negativos na produção da peça, uma vez que, quando esta é demasiado elevada pode haver problemas de aderência à plataforma, distorções causadas pela inercia da cabeça de extrusão e outros defeitos causados pela rapidez com que a cabeça se desloca. Contudo, para peças que não necessitem de acabamentos finos, uma velocidade elevada pode reduzir significativamente o tempo de impressão. Por exemplo, nos dois provetes do CCD apresentados na Tabela 2-1, que apenas variam na velocidade de impressão, o que foi impresso ao dobro da velocidade demorou 66,7% do tempo de impressão do mais lento.

Tabela 2-1: Duração de impressão face à velocidade.

Caso	Réplica	Temperatura	Altura de camada	Velocidade de impressão	Orientação	Duração
1	1	190	100	30	5	8h21min
3	1	190	100	60	5	5h34min

A categoria de deslocações tem os parâmetros de deslocação da cabeça de extrusão quando não está a depositar, que é onde se atingem as maiores velocidades. Aqui são definidos, a velocidade, o percurso e a deslocação em Z de forma a evitar *stringing* e a minimizar o tempo de impressão.

O arrefecimento da peça contém os parâmetros de controlo do arrefecimento do material à saída do *nozzle*, tipicamente garantido por um ventilador direcionado. Estes parâmetros influenciam a rapidez do arrefecimento do material, o que tem consequências sobre o nível de aderência entre camadas e de acabamento.

O suporte é o material que se adiciona quando se constrói uma parede com ângulos pequenos face à plataforma de impressão, tipicamente até 50°, de forma a suportar o material enquanto solidifica. Na Figura 2-14 temos uma peça impressa de duas formas, com e sem suportes. À esquerda está o conjunto antes do pós-processamento ainda com os suportes na peça da direita, no centro está a peça sem suporte e à direita com o suporte removido. Podemos reparar que na peça impressa sem suporte, ao centro, há filamentos que estão fora da geometria pretendida enquanto que a peça impressa com suportes apenas tem as marcas de onde foram removidos os suportes.



Figura 2-14: Exemplo da utilização de suporte.

Quanto à aderência à plataforma, pode-se escolher entre *raft*, *brim* ou *skirt* que são sistemas que aumentam a área de contacto da peça com a plataforma de forma a que esta não se descole durante a impressão.

2.2 Tolerâncias Geométricas

2.2.1 Importância do Toleranciamento

Na produção em massa as peças devem ser intermutáveis, de forma a que quaisquer duas peças de um conjunto sejam funcionais sem ser necessário ajustá-las uma à outra [29]. Assim, independentemente do processo a ser usado, uma peça tem que ser sujeita a controlo da qualidade. Quando as tolerâncias dimensionais (diâmetros, comprimentos) não são suficientes para garantir o funcionamento de uma peça, especificam-se tolerâncias geométricas. O toleranciamento geométrico é, portanto, um meio de reduzir custos de produção, garantindo a intermutabilidade das peças e especificando a sua funcionalidade ou interação com outros elementos do conjunto [30]–[32].

As tolerâncias geométricas definem uma zona ou campo de funcionamento de determinada característica. Na Figura 2-15 podemos identificar a tolerância geométrica de coaxialidade de um veio a um cilindro que cujo eixo é o eixo referência A, que é representado pelo cilindro a vermelho. Para o cilindro ser aceite nesta aplicação, toda a sua geometria tem que estar contida dentro daquele campo [32], [33].

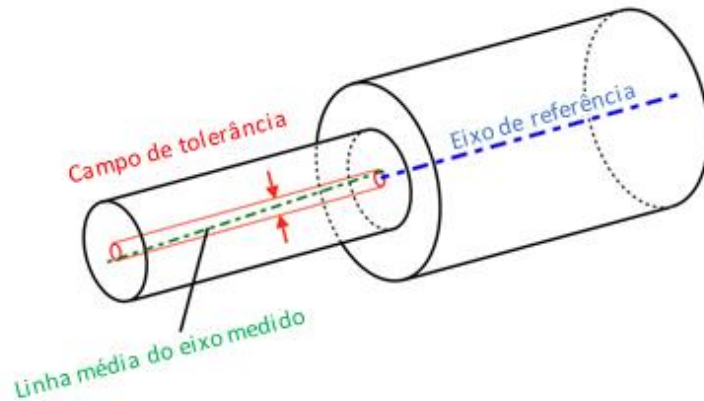


Figura 2-15: Tolerancia de coaxialidade. Adaptado de [33].

As tolerâncias geométricas, como se pode ver na Tabela 2-2, estão divididas em Tolerâncias Isoladas denominadas de Tolerâncias de Forma e em Tolerâncias Relacionadas, subdivididas em Tolerâncias de Orientação, Tolerâncias de Localização e Tolerâncias de Movimento. [32], [34], [35]

Tabela 2-2: Categorias de Tolerâncias Geométricas. Retirado de [32]

Tolerâncias		Símbolos	
Tolerâncias isoladas	Tolerâncias de forma	Rectidão	—
		Planeza	□
		Circularidade	○
		Cilindricidade	⊘
		Perfil de uma linha	⌒
		Perfil de uma superfície	⌒
Tolerâncias relacionadas	Tolerâncias de orientação	Paralelismo	//
		Perpendicularidade	⊥
		Inclinação	∕
	Tolerâncias de localização	Posição	⊕
		Concentricidade e coaxialidade	⊙
		Simetria	≡
	Tolerâncias de movimento	Movimento circular	↻
Movimento total		↻↻	

As tolerâncias de forma são tolerâncias relacionadas com um só elemento, determinando a forma que essa geometria deve respeitar. Dentro desta categoria encontram-se as tolerâncias de

retidão, planeza, circularidade, cilindridade, perfil de uma linha ou de uma superfície. [31], [34], [36].

Nas tolerâncias de orientação encontramos as tolerâncias de paralelismo, perpendicularidade e inclinação. A tolerância de paralelismo deve-se à relação entre dois planos e tem um campo compreendido por um volume paralelepípedo (Figura 2-16), a tolerância de

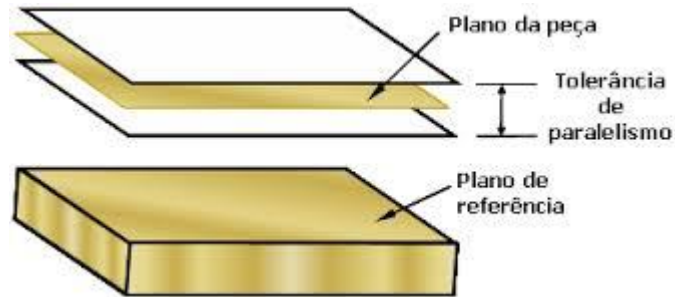


Figura 2-16: Campo de tolerância de paralelismo [37]

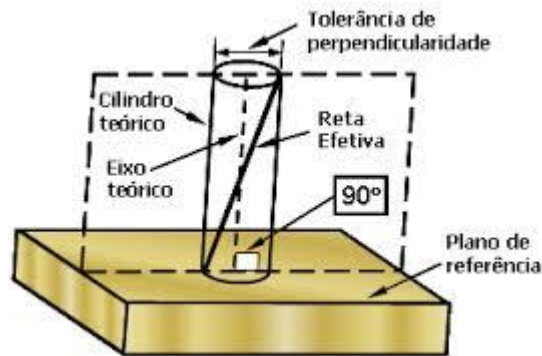


Figura 2-17: Campo de toleranciamento de perpendicularidade entre um plano e uma reta [37]

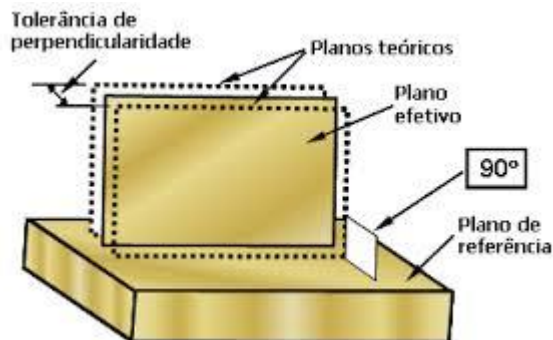


Figura 2-18: Campo de tolerância de perpendicularidade de planos [37]

perpendicularidade é um caso específico da tolerância de inclinação que tem inclinação de 90°. E, em ambos os casos o campo de tolerância é composto por um volume paralelepípedo para dois planos (Figura 2-17) e um volume cilíndrico para um plano e uma linha (Figura 2-18) [32], [34], [37].

Também foram estudadas nesta dissertação as tolerâncias de localização de coaxialidade. Estas tolerâncias têm um campo composto por um cilindro coaxial ao eixo de referência dentro do qual tem o eixo a ser toleranciado como podemos ver na Figura 2-15.

As tolerâncias de referência são tolerâncias impostas entre dois elementos, sempre com um dos elementos tomado como referência. Exemplos destas tolerâncias são a concentricidade entre dois cilindros ou furos, a perpendicularidade entre duas faces ou entre uma face e um eixo, ou a posição de um furo face a outro elemento da geometria [31], [36].

2.2.2 Máquina de Medição por Coordenadas

Devido à exatidão inerente à medição de geometrias, para estudar os desvios existentes nas peças impressas, foi usada uma Máquina de Medição por Coordenadas que é uma ferramenta que funciona num chassis com três eixos móveis e, através de uma ponteira, o apalpador, permite medir com exatidão as coordenadas de certos pontos. Esta medição é feita pelo toque do apalpador na peça a medir e posterior leitura da posição de cada eixo. O toque é detetado através de um sensor eletromagnético ligado ao apalpador. Esta máquina tem o propósito de medir a posição de certos pontos na peça e posteriormente analisá-los de forma a obter as geometrias constituídas por estes pontos [30], [38].

Depois das geometrias obtidas, o programa calcula os desvios geométricos entre as características e compara-os com a tolerância admissível avaliando a conformidade da peça. Nesta dissertação apenas interessa o valor absoluto do desvio, não existindo a necessidade de o comparar com a tolerância.

2.3 Métodos estatísticos

2.3.1 Planeamento de Experiências

Até à década de 1920, as experimentações eram executadas com base no método *um-fator-de-cada-vez*, que consiste na variação dos níveis, ou valores, de um só fator de cada vez, como o nome indica. Nesta década, em Inglaterra, Sir Ronald A. Fisher abordou um problema relacionado com a agricultura de uma forma diferente baseada em conceitos estatísticos que lhe possibilitou uma experiência mais eficiente. Entre 1930 e 1950, foram introduzidas matrizes ortogonais e o fracionamento destas nos planeamentos das experiências, permitindo assim criar o

Planeamento de Experiências fatorial fracionado e reduzir significativamente o número de casos experimentais mantendo a informação necessária. Para esta área contribuíram também, entre outros, George Box e Douglas Montgomery, que utilizaram e melhoraram o DoE e desenvolveram outros métodos de controlo e planeamento da Qualidade [39], [40].

Design of Experiments, ou Planeamento de Experiências, é uma metodologia de trabalho que permite otimizar experiências reduzindo o número de casos a um mínimo indispensável. A funcionalidade de um DoE é criar um plano experimental com um número variado de fatores e níveis de forma a prever uma resposta. O DoE permite também descobrir quais os fatores que são estatisticamente significativos para a experiência a partir de ANOVA ou de gráficos de Pareto.

Para uma experiência com mais que um fator controlável, como a executada nesta dissertação, experimenta-se todas as combinações com os diversos níveis de fatores necessárias para ter uma determinada região de resposta.

De forma a obter uma estimativa do erro experimental fazem-se réplicas, isto é, experiências com os mesmos níveis para cada fator. Permitindo assim associar o erro à experiência em si ou aos próprios fatores.

Depois da execução do DoE e de se terem obtido os valores de todas as experiências e réplicas, é aplicada uma análise de variância aos dados. A ANOVA permite distribuir a variância dos resultados pelos diversos fatores da experiência. Com esta análise, descobre-se os fatores estatisticamente significativos, permitindo que, ao passar para o próximo passo se descartem os outros fatores o que possibilita o aumento dos níveis de cada fator significativo sem aumentar o número de experiências de forma impraticável [39], [41].

2.3.2 Análise de Variância

De modo a analisar os dados produzidos pelo DoE do *Screening*, utiliza-se a tabela ANOVA.

A ANOVA é uma ferramenta que analisa duas ou mais populações comparando-as com base nos seus parâmetros e permite a distribuição da dispersão total por cada um dos fatores causadores de dispersão, descobrindo assim quais os fatores significativos. [39]

A tabela ANOVA é uma tabela que dispõe os fatores nas linhas e tem diversas colunas, mostrando, para cada fator, a Variação, graus de liberdade, os Desvios Quadráticos Médios e por fim o quociente F_o , presente na equação 1, que é comparado com o σ^2 .

$$F_o = \frac{MS_b}{MS_w} \quad (1)$$

A Variação total com $(abn-1)$ graus de liberdade, é calculada pela equação 2.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{(Y_{...})^2}{abn} \quad (2)$$

A Variação de um factor A com $(a-1)$ graus de liberdade e n níveis, equação 3.

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{bn} - \frac{(Y_{...})^2}{abn} \quad (3)$$

A Variação de um fator B com $(b-1)$ graus de liberdade e n níveis, equação 4.

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{an} - \frac{(Y_{...})^2}{abn} \quad (4)$$

A Variação da interação dos fatores A e B, equação 5.

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{n} - \frac{(Y_{...})^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad (5)$$

A variação do erro é obtida subtraindo à variação total todas as outras variações. O mesmo acontece com os graus de liberdade do erro, que são a subtração aos graus de liberdade totais dos graus de liberdade dos fatores e interações.

A Tabela 2-3 é uma tabela modelo de uma ANOVA e exemplifica a posição de cada parcela com os fatores A e B com k níveis cada e N ensaios. Desta tabela é posteriormente comparado o valor F com a tabela de distribuição de *Fisher* de forma a averiguar a significância do fator em questão.

Tabela 2-3: Exemplo de tabela ANOVA.

	Soma dos quadrados (SS)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (MS)	F
Fator A	SS_A	$a - 1$	$\frac{SS_A}{a - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_w}$
Fator B	SS_B	$b - 1$	$\frac{SS_B}{b - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_w}$
Interação AB	SS_{AB}	$(a - 1) \times (b - 1)$	$\frac{SS_{AB}}{(a - 1) \times (b - 1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_w}$
Erro	SS_w			
Total	SS_T	N-1		

2.3.3 Metodologia de Superfície de Resposta

Em processos com diversas variáveis, como a Manufatura Aditiva por FFF, é necessário um método que permita prever a resposta para uma combinação de níveis de fatores. A Metodologia de Superfície de Resposta é uma combinação de técnicas estatísticas e matemáticas que permite otimizar processos prevendo as alterações que cada parâmetro ou combinação de parâmetros produz nas respostas.

A partir da MSR, consegue-se obter o modelo empírico polinomial de segunda ordem, funções de resposta cujas variáveis são os fatores significativos. Com estas funções é possível gerar uma superfície tridimensional, a Superfície de Resposta[42].

O modelo empírico é uma aproximação polinomial à realidade estudada. Este modelo consiste numa série de coeficientes correspondentes a fatores que permitem prever a resposta do sistema consoante os parâmetros utilizados. O modelo empírico pode ser utilizado para criar uma superfície de resposta de forma a visualizar, no domínio definido, a resposta do sistema à variação dos fatores. Esta superfície permite a determinação do ponto ótimo para o domínio estudado para assim otimizar o processo como podemos ver na Figura 2-19.

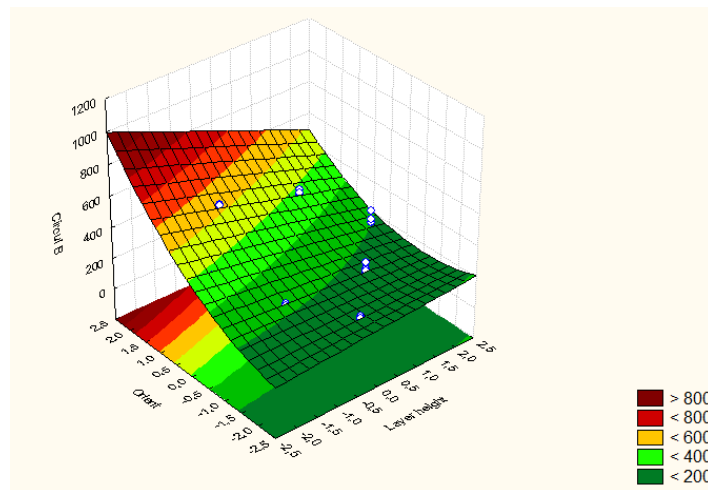


Figura 2-19: Exemplo de superfície de resposta.

De modo a obter um modelo empírico de segunda ordem, é necessário utilizar um tipo de *DoE* que estude cinco níveis de cada fator. Um *DoE* que cumpre este requisito é o Planeamento Composto Central. O Planeamento Composto Central é composto por planeamentos como o fatorial ou o fracionado, pelos pontos centrais e com pontos axiais que dependem do planeamento a utilizar.

Os CCD podem tomar 3 diferentes tipos: CCC, ou circunscrito, em que os pontos axiais estão equidistantes dos fatoriais e estes últimos tomam os valores de 1 e -1; CCF, ou face centrada que utiliza os valores 1 e -1 para os pontos axiais, fazendo um quadrado com os pontos fatoriais; e CCI, inscritos, que usa os pontos axiais com os valores 1 e -1 e os valores fatoriais, equidistantes ao axiais, $1/\alpha$. A Figura 2-20 apresenta os tipos de CCD.

	CCC	Esta é a forma original do CCD. Os pontos estão distanciados do centro a uma distância baseada nas propriedades e número de fatores do planeamento. Este planeamento tem simetria circular, esférica ou hiper esférica e requer 5 níveis para cada fator.
	CCF	Neste planeamento, os pontos estão no centro de cada face do espaço fatorial, logo $\alpha = \pm 1$. Este tipo requer apenas 3 níveis para cada fator
	CCI	O Planeamento CCI usa os limites dos fatores como limites dos pontos criando assim um desenho fatorial ou fracionado dentro dos limites estabelecidos. Este fator também requer 5 níveis para cada fator.

Figura 2-20: Interpretação do CCC, CCF e CCI. Adaptado de [43].

3 Metodologia

De forma a minimizar a quantidade de casos e mantendo a robustez do planeamento desta dissertação, dividiu-se a experiência em duas partes, o *Screening* e o CCD. Utilizou-se o *Screening* para distinguir os fatores que são estatisticamente significativos, que passaram à fase seguinte, daqueles que não demonstraram ser suficientemente significativos à resposta da experiência. Na segunda fase, utilizando um CCD apenas com os fatores que foram indicados como significativos na fase anterior, é possível criar uma experiência completa o suficiente para aplicar a MSR.

3.1 Design of Experiments de *Screening*

O vasto número de parâmetros existente no processo de FFF leva à necessidade de realizar uma triagem dos fatores para descobrir quais são estatisticamente significativos. Para tal, foi aplicado um DoE Fatorial com apenas 2 níveis por fator. Este é o DoE fatorial mais simples e utilizado nas experiências de *Screening* de forma a minimizar o número de ensaios. Ainda assim, foi necessário criar um DoE fatorial fracionado, uma vez que, o fatorial completo, seriam $2^6 = 64$ ensaios. Assim sendo, foi escolhido um DoE fatorial fracionado $2^{6-2} = 16$ que reduz significativamente o número de ensaios. A redução da extensão da experiência, deve-se ao facto de este ser um DoE com resolução IV, isto é, as interações de 2 fatores estão igualadas ou confundidas umas com as outras. No caso da experiência de *Screening*, o foco é descobrir quais os fatores estatisticamente significativos não invalidando o DoE por ter as interações igualadas.

No exemplo em questão, os 16 ensaios foram tais que os fatores A, B, C, D, E e F estão isolados, mas as interações entre eles que estão confundidas são:

$$A * B = C * E$$

$$A * C = B * E$$

$$A * D = E * F$$

$$A * E = B * C = D * F$$

$$A * F = D * E$$

$$B * D = C * F$$

$$B * F = C * D$$

Depois de medidos os provetes foram feitos testes para garantir a sua normalidade. Estes testes consistem na análise de gráficos de Valores Previstos vs Residuais, Valores Obtidos vs Previstos, Valores Obtidos vs Residuais e Histogramas.

Nos gráficos dos Valores Previstos vs Residuais e dos Valores Observados vs Residuais, o pretendido é ter um gráfico disperso e aleatório sem linhas de tendência.

Nos gráficos dos Valores Observados vs Previstos, é desejado que a nuvem de pontos acompanhe a linha de tendência.

Nos histogramas é procurado que a dispersão tenha uma forma aproximada à curva de distribuição normal.

Posteriormente, foi aplicada a Análise de Variância e gráficos de Pareto de forma a determinar quais os parâmetros estatisticamente significativos para a qualidade geométrica da peça em questão.

3.2 Impressão dos Provetes

Esta dissertação tem como base uma impressora que funciona com tecnologia FFF. Esta máquina é do modelo *one MKII* da marca *Blocks* (Figura 3-1) e tem as características apresentadas na Tabela 3-1. [43].

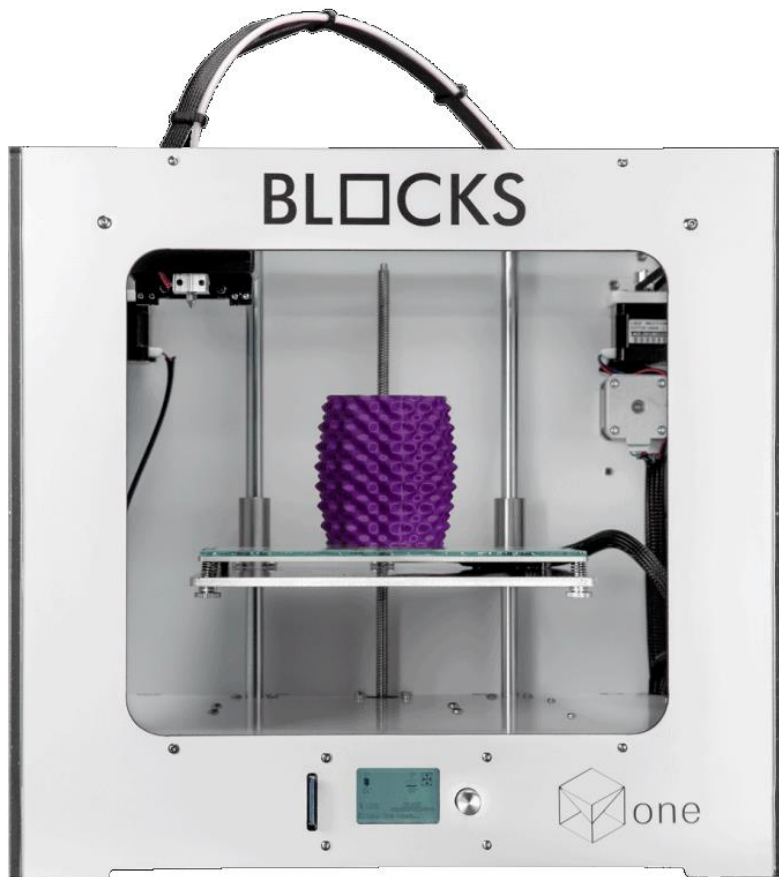


Figura 3-1: Impressora *Blocks One MK2* [44].

Tabela 3-1: Especificações da máquina *Blocks One mk2* [44].

Dimensões da plataforma de impressão	200*210*210 mm com aquecimento
Resolução de camadas	De 20 a 300 μm
Temperatura da plataforma	0°C a 100°C
Temperatura de impressão	170°C a 270°C
Diâmetro do <i>nozzle</i>	0,4 mm
Velocidade de impressão média	70 mm/s

Esta é uma máquina de impressão 3D cartesiana *coreXY*, isto é, a cabeça de extrusão é movimentada pelos eixos X e Y enquanto que o movimento pelo eixo Z é coberto pela plataforma de extrusão. A impressora utiliza a tecnologia de *Bowden*, que significa que o motor de extrusão não se encontra na cabeça de impressão, mas sim no chassis da máquina, e empurra o filamento através de um tubo de PTFE até ao *Hotend*. Isto resulta em diversas vantagens, nomeadamente ter menos massa nos eixos X e Y facilitando os movimentos da cabeça e submeter os motores a menos esforços. Por outro lado, também há desvantagens, como o facto de haver um maior espaço de filamento à compressão que compromete a utilização de filamentos flexíveis neste tipo de máquinas, assim como o desperdício de uma porção de filamento, igual ao comprimento do tubo PTFE, no fim da bobine de filamento.

3.3 Provete

Com o objetivo de um estudo sobre os desvios geométricos em peças axissimétricas foi desenvolvido o provete indicado no Anexo A Secção 1.

Como é visível na Figura 3-2, o provete é composto por um cilindro exterior, cuja superfície cilíndrica é B e as duas bases A e I, uma superfície cilíndrica C, uma superfície cónica D e dois furos concêntricos com as superfícies interiores E e K. Tem também quatro furos equidistantes do centro e espaçados por 90° , G_i . Estas superfícies são as superfícies utilizadas para calcular os desvios.

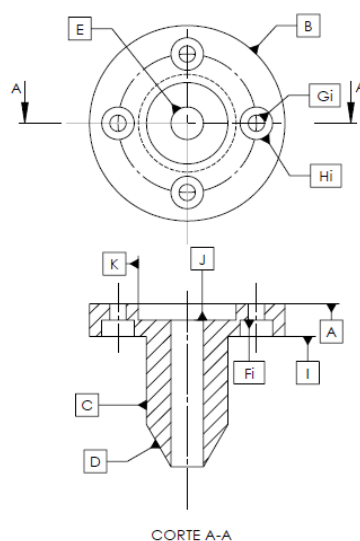


Figura 3-2: Geometrias a estudar

Devido à geometria de uma peça axissimétrica, as tolerâncias a estudar são cilindrícidades, paralelismos de eixos e faces, concentricidades e perpendicularidades de faces a eixos[31].

3.4 Controlo geométrico por Máquina de Medição por Coordenadas

A Máquina utilizada foi a Mitutoyo EURO-C544, Figura 3-3
Mitotoyo Euro-C544 [45].



Figura 3-3: Mitotoyo Euro-C544 [45].

Esta é uma máquina CNC que utiliza guias pneumáticas nos 3 eixos de forma obter um deslocamento suave. Tem um volume de medição de $505 \times 405 \times 405 \text{ mm}^3$ e uma resolução de 0,0005 mm. [44]

Este modelo tem várias opções de apalpador, sendo que nesta dissertação todas as medições foram feitas com um apalpador único com 50 mm de comprimento com ponta de rubi e haste de aço inoxidável, Figura 3-4.



Figura 3-4: Apalpador CMM.

3.5 Metodologia da Superfície de Resposta

A superfície de resposta utilizada nesta dissertação é calculada com base em modelos empíricos de segunda ordem, e utiliza apenas os fatores significativos de cada resposta. Assim, para cada resposta, foram obtidos os coeficientes de regressão que permitem formar as equações de segunda ordem, os modelos empíricos. Essas equações serão depois dispostas num gráfico tridimensional com a resposta no eixo Z e dois dos parâmetros em X e Y.

O *DoE* utilizado nesta dissertação foi um CCD circunscrito, secção 2.3.3, por ser o que permite abranger um domínio maior de cada fator.

4 Procedimento Experimental

4.1 Execução do *Screening* inicial

4.1.1 Parâmetros utilizados

De forma a iniciar a experiência, e depois de definida a metodologia, foi necessário escolher quais os parâmetros a escolher. O universo dos parâmetros FFF conta com centenas de opções e adaptações para o trabalho a realizar, mas para que a experiência não fosse impraticavelmente longa, foram escolhidos apenas seis parâmetros. Estes parâmetros foram escolhidos de forma intuitiva com fundamentos científicos.

O primeiro parâmetro a ser escolhido foi a percentagem de enchimento. Este parâmetro dita a quantidade do espaço interior da peça que é preenchido com material, por exemplo, 50% de enchimento significa que, dentro dos perímetros da peça, apenas metade do espaço está ocupado com material extrudido enquanto a outra metade está ocupada por ar. Nas peças impressas nesta dissertação o padrão de enchimento utilizado foi o padrão em grelha. O que varia com este parâmetro é a proximidade entre cada linha, quanto maior a percentagem, mais próximas as linhas se encontram umas das outras. Este parâmetro foi escolhido pela distorção térmica que poderia ter sobre a peça. Visto que o material não contrai de forma igual em todas as direções, e o enchimento não é dependente da geometria exterior, a contração térmica da peça durante o arrefecimento do material de enchimento poderia ter influência sobre a sua geometria final.

O segundo parâmetro a ser considerado foi a temperatura de extrusão. Este parâmetro foi escolhido pela mesma razão que o anterior, a distorção térmica da peça. O material utilizado é extrudido entre os 180 e os 220 °C e é posteriormente arrefecido até a temperatura ambiente. Assim, o movimento que a cabeça de impressão faz ao imprimir uma camada será ligeiramente diferente da camada depois de arrefecida, portanto, se a contração térmica não for igual em todas as direções, poderá originar empenos e defeitos geométricos.

O terceiro parâmetro a ser considerado foi a altura de camada. A altura de camada foi escolhida pelo efeito de escada que gera. Este efeito é o efeito está ilustrado na Figura 4-1. Quando se tem um plano oblíquo ao plano de impressão, formam-se umas escadas devido à maneira como as camadas progressivas vão sendo depositadas. Este efeito foi pensado pelo impacto direto que

poderia ter na circularidade de uma superfície ou no erro associado à deslocação de Z entre camadas.

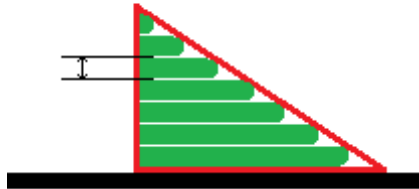


Figura 4-1: Demonstração do efeito de escada.

O quarto parâmetro a ser considerado foi a velocidade de impressão. A velocidade de impressão é a velocidade máxima a que se desloca a cabeça de extrusão durante a extrusão de material. A velocidade de impressão não é igual para cada característica, mas tipicamente, o *slicer* calcula as velocidades de forma a que sejam linearmente dependentes da velocidade máxima. A velocidade a que a cabeça se desloca foi escolhida pelo impacto que poderia ter nos movimentos reais da cabeça, isto é, quanto maior a velocidade a que a cabeça se desloca, maior o seu momento e possivelmente, maior o desvio dos movimentos reais face aos movimentos desejados.

O quinto parâmetro considerado foi a orientação da peça face à mesa de impressão. Este parâmetro é, juntamente com a altura de camada, responsável pelo efeito de escada. Tomemos o exemplo de um plano paralelo ao plano de impressão, como é o caso do plano I (Figura 3-2). Caso a impressão da peça seja tal que o plano I esteja paralelo ao plano da mesa de impressão e consequentemente ao plano XY da cabeça de impressão, não vai sofrer qualquer efeito de escada. Porém, se alterarmos apenas 5°, já se notará esse efeito, como é visível na figura 4-2. Para além do efeito de escada, a orientação da peça terá impacto na geometria da peça dependendo da qualidade geométrica da impressora, se a máquina tiver desvios consideráveis entre os seus eixos, notar-se-á uma diferença entre a geometria de uma peça impressa a diferentes orientações.



Figura 4-2: Demonstração do efeito de escada a 5°.

O sexto parâmetro considerado foi a quantidade de perímetros. A quantidade de perímetros é a quantidade de linhas que são impressas na parte exterior da peça, Secção 2.1.6. Este parâmetro foi escolhido pelo impacto que poderia ter na rigidez da parte exterior e, como os desvios exteriores dependem da superfície exterior, quanto mais rígida for esta secção, menos sofre com as contrações térmicas do enchimento e com outros fatores que poderiam afetar a sua qualidade geométrica.

4.1.2 Planeamento de Experiências

Foi criado um DoE fatorial que utilizasse os seis fatores. Um DoE fatorial completo para seis fatores, 2^6 , consiste numa experiência com 64 casos. Como para este tipo de experiência é boa prática fazer 2 réplicas para reduzir o erro experimental o valor triplicaria para 192 casos. Isto tornar-se-ia numa experiência demorada e dispendiosa, pelo que se optou por um DoE fatorial fracionado. Escolheu-se o DoE fatorial fracionado 2^{6-2} que é um DoE que iguala as interações de maior nível que, no caso de um *Screening*, não são relevantes, pois nesta parte da experiência, o importante é descobrir quais os fatores significativos, e não as interações. Assim, reduziu-se para 16 o número de casos de cada experiência que totaliza 48 casos com todas as réplicas.

Na Tabela 4-1 podemos ver quais os valores dos níveis 1 e -1 de cada parâmetro.

Tabela 4-1: Níveis do DoE de *screening*.

	-1	1
Enchimento [%]	30	90
Temperatura [°C]	190	220
Altura de Camada[μm]	100	200
Velocidade [mm/s]	30	60
Orientação [°]	-5	95
Quantidade de Perímetros	2	4

O DoE foi utilizado no *Screening* de forma aleatória para que não houvesse qualquer

dependência da ordem de impressão. No Anexo B Secção 1 está presente o DoE utilizado exposto de forma aleatória e com as 2 repetições.

4.1.3 Impressão dos Provetes do *Screening*

A partir do modelo feito em *SolidWorks* que contempla todas as características geométricas a estudar, foi feito um ficheiro gráfico de malha triangular STL, Figura 4-. Este ficheiro foi usado no Cura, ferramenta *Slicer* utilizada, para produzir os diversos ficheiros *Gcode*. Foi criado um ficheiro *Gcode* para cada caso, sendo igual entre as réplicas. Na Figura 4-3 está ilustrado, à esquerda, o modelo em *SolidWorks* e, à direita, o STL.

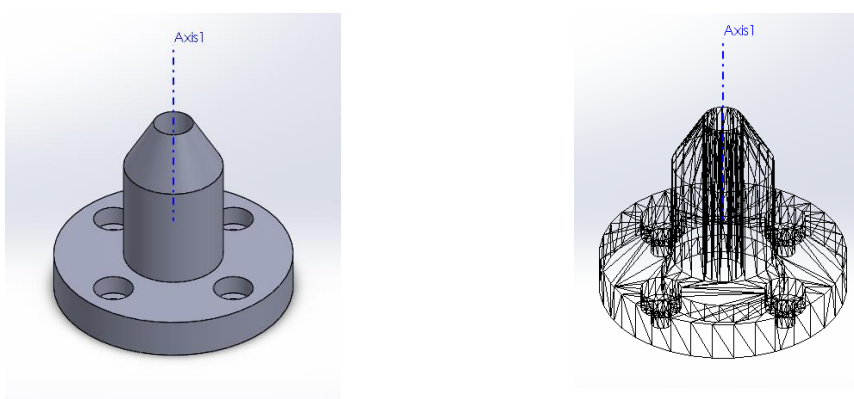


Figura 4-3: Provette em *SolidWorks* e em STL.

Posteriormente, após calibrar a impressora, foram impressos os diversos provetes, um de cada vez, utilizando filamento da mesma marca em todos os provetes, de forma a minimizar os fatores não controláveis. Todos os provetes foram impressos com *raft* e suportes. O *raft* cria 4 camadas que formam uma plataforma em que posteriormente se imprime a peça. A utilização desta característica deve-se a que esta permite que nenhuma parte da peça seja impressa diretamente na plataforma para que não fique moldada à sua superfície. Caso contrário acabaria por ter uma face moldada ao vidro, onde a peça era impressa diretamente na plataforma. Os suportes servem para suportar as geometrias que o exigam. Além disso, o suporte foi utilizado com uma interface a 100% junto à peça, isto é, o suporte em si tem enchimento de 20%, mas junto à peça passa para 100% de forma a garantir uma superfície fechada onde é depositado o material.

4.1.4 Pós-processamento

Nos processos de manufatura aditiva, como está descrito na Secção 2.1.4, o último passo é o pós-processamento, que consiste na remoção dos suportes e outras imperfeições.

Nesta geometria em específico, houve certos provetes, cujos parâmetros conduziram a suportes bastante difíceis de retirar. Exemplos disso nos provetes com orientação de -5° e nos provetes com orientação de 95° . Como podemos ver na Figura 4-4 retirada do *slicer*, a azul está todo o material de suporte e *raft*, material que tem que ser removido. Com a imensa área de contacto entre o material da peça e o de suporte visível na figura há um esforço acrescido na separação das duas características.

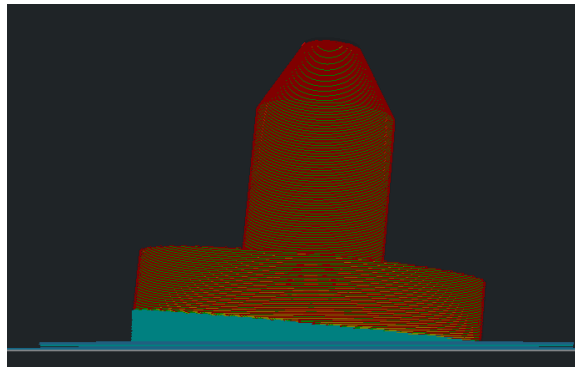


Figura 4-4: Provete impresso a -5° .

A remoção dos provetes pode, portanto, ter um impacto significativo na qualidade geométrica, visto que, em certos casos, a força necessária à sua remoção pode empenar a peça. De forma a minimizar a força aplicada, os suportes foram retirados com recurso a um formão e instrumentos de corte de maneira a separar as camadas de suporte das camadas de peça sem cortar camadas. Assim, consegue-se uma superfície da peça sem suportes agarrados e sem danos causados pela remoção destes.

A Figura 4-5 é um exemplo de um filamento causado por *stringing* que não foi retirado no pós-processamento. Este filamento causou um erro de colisão, isto é, a CMM detetou material num sítio onde não era suposto. Depois de retirar o filamento, foi medido com um micrómetro e

o resultado foi que tinha um diâmetro de 8,5 μm como se pode ver na figura. Desta forma, conseguimos ter uma ideia da sensibilidade da ferramenta.



Figura 4-5: Defeito de medição criado por stringing.

4.1.5 Medição do Provete Impresso

Após a impressão dos provetes, é necessário medir a peça e obter os desvios geométricos da mesma. Nesta dissertação, as medições foram feitas através de uma Máquina de Medição por Coordenadas que, através do seu software, mede e calcula os desvios geométricos exportando os dados de uma forma conveniente numa folha de *Excel*.

Para o *Screening* Inicial, as características consideradas relevantes foram as presentes na tabela 4-2. Estas contemplam duas posições de aperto na máquina de medição por coordenadas e estão presentes no Anexo A e as geometrias contempladas na Figura 3-2.

Tabela 4-2: Características consideradas

Categoria de tolerância	Característica	Referência
Coaxialidade	C, D e E (medidos a 0°)	B
	E e K (medidos a 180°)	B
Paralelismo	H_i (medido a 0°)	B
	J (medido a 180°)	A
Perpendicularidade	I (medido a 0°)	B
	B (medido a 180°)	A
Cilindricidades	B e C	
	B e K	

Com a complexidade da peça em questão, seria difícil medir a peça toda apenas com um aperto, portanto, foram criados dois apertos de medição, o primeiro a 0°, isto é, com a face A (Figura 4-6) encostada à mesa da CMM e a segunda a 180° que inverte a peça ficando apoiada

por um suporte impresso que encosta na face I da peça. Para apertar a peça na primeira posição foi criado o apoio A e para apertar a peça na segunda posição, o apoio B. Na segunda posição, o apoio B é apertado à mesa pelo apoio A. Os desenhos técnicos dos apoios e das montagens encontra-se no Anexo A juntamente com ilustrações das montagens.

4.1.6 Tratamento dos dados

Após a medição dos provetes, os dados são compilados num só ficheiro Excel e exportados para o *Statistica* para serem tratados de forma a determinar os parâmetros estatisticamente significativos. Na medição a 0°, há 4 paralelismos de eixos que são referentes aos furos H_1 , H_2 , H_3 e H_4 . De forma a simplificar, estudou-se a média do desvio dos quatro furos, H_i , Figura 4-6.

No início, partindo do pressuposto de que os dados seguem a distribuição normal, testaram-se os dados quanto à sua normalidade e descartaram-se aqueles que não se ajustam à curva normal. Depois foram calculados os gráficos de Pareto e as tabelas ANOVA.

4.2 Execução da Metodologia de Superfície de Resposta

4.2.1 Parâmetros utilizados

Depois de feito o *Screening* e analisados os dados, utilizaram-se para a MSR os parâmetros que foram indicados pelo *Screening* como estatisticamente significativos.

Estes parâmetros são a temperatura de extrusão, a altura de camada, a velocidade de impressão e a orientação da peça.

4.2.2 Planeamento de Experiências – Planeamento Composto

Central

Foi criado um CCD com os quatro parâmetros referidos anteriormente. Sendo um CCD circunscrito com quatro parâmetros, os diversos níveis de cada fator tomam os valores da Tabela 4-3. O coeficiente α é uma função que num CCD circunscrito de quatro parâmetros toma o valor de 2 pela equação 6. Sendo k o número de fatores.

$$\alpha = [2^k]^{1/4} \tag{6}$$

Tabela 4-3: Níveis do CCD.

	$-\alpha=-2$	-1	0	1	$\alpha=2$
Temperatura [°C]	180	190	200	210	220
Altura de Camada [μm]	50	100	150	200	250
Velocidade [mm/s]	15	30	45	60	75
Orientação [°]	-35	5	45	85	125

Este CCD consiste em 26 casos experimentais dos quais 2 são pontos centrais. Foram repetidos duas vezes totalizando 78 provetes. O CCD está disposto aleatoriamente no Anexo C Secção 1. A ordem aleatória foi utilizada na impressão e medição de forma a tornar a experiência independente da ordem.

4.2.3 Impressão de Provetes e pós-processamento

A impressão dos provetes desta experiência foi feita de forma análoga à anterior com a diferença de que todos os provetes foram feitos a partir de filamento do mesmo lote, para ter material o mais semelhante possível entre todos os provetes.

4.2.4 Medição e tratamento estatístico

A medição destes provetes foi feita da mesma forma que a experiência de *Screening* e encontra-se no Anexo C Secção 1 disposto por réplicas.

A análise dos dados medidos começa com a análise de normalidade, descartando as medições que não se ajustam à curva normal.

Depois, utilizando apenas os dados que se aproximaram da normal, criou-se uma tabela ANOVA para cada geometria medida. Isto permitiu saber quais as geometrias têm um modelo que permita prever a resposta, pois na ANOVA são calculados o R^2 e o R_a que são os coeficientes que permitem saber quão ajustado é o modelo calculado aos dados medidos.

De seguida foram feitas as Superfícies de Resposta para as geometrias cujos modelos eram adequados e encontrados os coeficientes para o modelo de segunda ordem.

5 Resultados Experimentais

5.1 Resultados de *Screening*

Após cada medição, a CMM gera um relatório com as dimensões dos elementos medidos e os desvios geométricos que forem pedidos no programa, no Anexo C Secção 2 está presente uma tabela com os dados dos desvios de todas as medições executadas.

5.1.1 Análise de Normalidade

Como referido no capítulo anterior, o primeiro passo é verificar que os dados medidos seguem a curva de distribuição normal, para tal, foram obtidos, para os dados de cada desvio medido, os gráficos dos valores previstos vs residuais, valores observados vs previstos e valores observados vs residuais.

A partir dos gráficos dos valores previstos vs residuais foi permitido descartar os desvios de coaxialidade de K face a B, a perpendicularidade da superfície planar I com o cilindro B e do cilindro B com a superfície planar A e a circularidade de K. Confirma-se também a invalidade dos dados pelos gráficos de valores observados vs previstos e de valores observados vs residuais.

Os valores medidos para os desvios acima referidos não apresentam uma distribuição normal, pelo que não permitem uma análise estatística válida. Podem também ler-se os histogramas no Anexo B Secção 3 que demonstram o comportamento errático de alguns desvios descartados.

5.1.2 ANOVA

As tabelas de Análise de Variância presentes no Anexo B Secção 4 indicam os parâmetros estatisticamente significativos para cada característica. Assim, com estas tabelas podemos afirmar que, para um nível de significância de 5% e para as características cujos dados dos desvios respeitam a normalidade, os parâmetros significativos para as características estudadas são a temperatura de extrusão, orientação da peça, velocidade de impressão e a altura de camada.

Com os dados do Anexo B Secção 4 foi possível criar a Tabela 5-1. Esta tabela apresenta os parâmetros significativos, marcados com um X, para cada geometria estudada.

Tabela 5-1: Significância dos parâmetros.

	% Enchimento	Temperatura	Altura de camada	Velocidade	Orientação	Perímetros
Cilindricidade B 0°		X			X	
Cilindricidade C		X	X		X	
Coaxialidade C-B		X			X	
Coaxialidade D-B						X
Coaxialidade E-B		X	X		X	
Paralelismo H-B					X	
Coaxialidade E-B					X	
Paralelismo J-A			X	X	X	
Cilindricidade B 180°	X			X	X	

5.1.3 Considerações

Como pudemos ver na secção anterior, segundo a ANOVA todos os parâmetros são significativos para algum desvio, em todo o caso, os ensaios estatísticos são meras aproximações sujeitas a pensamento crítico. Desta forma, podemos ver estes resultados como uma tendência e não como absolutamente determinantes.

Por esta razão, apenas foram tidos em conta a temperatura, a altura de camada, a velocidade e a orientação como parâmetros estatisticamente significativos, foram estes os utilizados na continuação da dissertação.

A percentagem de enchimento não foi utilizada pois apenas foi significativa na circularidade de B medido a 180°, uma vez que a 180° a medição abrange uma porção de camadas mais próxima ao plano A e foi assumido ser significativo devido ao efeito de pata de elefante. Este efeito é causado nas primeiras camadas de impressão pela proximidade do nozzle à plataforma de impressão porque, para garantir a aderência das primeiras camadas, a distância entre o *nozzle* e a plataforma é inferior à altura de camada. Assim, o material expande ao longo do plano XY criando uma área maior nas primeiras camadas, este efeito vai diminuindo com o aumentar de camada. Por este efeito estar relacionado com a zona e ser algo pontual, não foi considerado para o estudo em questão que tem o objetivo de obter equações gerais.

A quantidade de perímetros foi descartada por apenas surgir como significativa pela ANOVA na coaxialidade do cone D com o cilindro B. E, esta propriedade, como é visível na ANOVA no Anexo B Secção 4, é uma propriedade algo aleatória.

5.2 Resultados da MSR

Os dados medidos com a CMM são os dados presentes no Anexo C Secção 2. Estes dados foram recolhidos de forma análoga ao *Screening* e tratados pelos passos seguintes.

5.2.1 ANOVA

Analisando o CCD através da MSR começamos por obter as tabelas ANOVA para cada desvio medido para a seguir utilizar apenas os parâmetros significativos na superfície de resposta e nas equações do modelo empírico. Na Tabela ANOVA vêm presentes os valores de R^2 e R_a que permitem aferir quão ajustado está o modelo aos dados medidos.

A partir dos valores de R^2 e R_a retirados das tabelas no Anexo C Secção 3, foram descartados os desvios de coaxialidade de C, D, E e K com B, de perpendicularidade de B com A, o paralelismo de J com A e de circularidade de K. Foram descartados os desvios cujos modelos apresentavam um R_a menor que 50% pois os modelos não se ajustam de forma satisfatória aos valores medidos.

Na Tabela 5-2 estão presentes os fatores estatisticamente significativos para cada desvio segundo os resultados das ANOVA no Anexo C Secção 3. Os fatores estatisticamente significativos estão marcados por um “X” na tabela. Na tabela, os fatores estão dispostos nas colunas e equivalem às componentes linear e quadrática da temperatura, altura de camada, velocidade e orientação, respetivamente, e às interações das componentes lineares.

Tabela 5-2: Fatores significativos no MSR.

	1L	1Q	2L	2Q	3L	3Q	4L	4Q	1L by 2L	1L by 3L	1L by 4L	2L by 3L	2L by 4L	3L by 4L
Coaxialidade C			X				X							X
Coaxialidade D			X					X						
Coaxialidade E (0°)		X		X										
Paralelismo H			X				X	X	X					
Perpendicularidade I			X		X		X	X						
Cilindricidade B (0°)			X				X	X				X	X	
Cilindricidade C			X				X	X					X	
Coaxialidade K														
Coaxialidade E (180°)					X		X		X		X			
Paralelismo J			X				X	X						
Perpendicularidade B					X									
Cilindricidade B (180°)	X		X				X	X					X	
Cilindricidade K														

Os gráficos de Pareto, presentes no Anexo C Secção 5, são uma forma gráfica de averiguar o resultado da ANOVA. Cada barra representa a significância de um fator com um valor adimensional de t e é comparado com a linha vertical que tem o valor t presente na tabela *t-student*. Os valores maiores que esse valor retirado da tabela representam fatores significativos. Comparando os valores dos gráficos de Pareto com os valores da ANOVA nota-se que os fatores significativos coincidem, confirmando a ANOVA. No Anexo, apenas estão os gráficos relativos aos desvios geométricos com $R_a \geq 50\%$.

5.2.2 Análise de Normalidade

A análise de normalidade é composta pelos histogramas, gráficos de valores previstos vs observados, residuais vs previstos e residuais vs observados. Estes gráficos estão presentes no Anexo C Secção 4 e permitem concluir que todos os dados dos desvios com $R_a \geq 50\%$ estão dentro da normalidade e podem ser utilizados nos testes estatísticos.

5.2.3 Coeficientes de regressão

Com os parâmetros significativos, fez-se um modelo de segundo grau para cada desvio apenas com os coeficientes dos parâmetros significativos. Estes coeficientes são os necessários para construir o modelo empírico de previsão da resposta do sistema aos parâmetros escolhidos.

Na Tabela 5-3, encontram-se os modelos empíricos de cada desvio estudado e os coeficientes R^2 e R_a . Estes modelos, Anexo C Secção 6, contêm apenas os fatores que resultaram ser significantes nos gráficos de Pareto, Anexo C Secção 5.

Tabela 5-3: Equações dos modelos empíricos.

Desvio	Modelo empírico	R^2	R_a
Paralelismo Hi – B	$15,5X_2 + 34,0X_4 + 21,5X_4^2 - 11,5X_1X_2$	54,929	52,46
Perpendicularidade I – B	$16,6X_2 - 10,5X_3 + 9,3X_4 + 21,5X_4^2$	49,979	47,238
Cilindricidade B (0°)	$-13,0X_2 + 114,8X_4 + 27,8X_4^2 - 14,9X_2X_3 - 23,7X_2X_4$	89,028	88,266
Cilindricidade C	$-13,7X_2 + 74,8X_4 + 9,0X_4^2 - 32,2X_2X_4$	69,07	67,375
Cilindricidade B (180°)	$-18,6X_1 - 17,3X_2 + 59,8X_4 + 29,8X_4^2 - 34,6X_2X_4$	53,722	50,509

As equações dos modelos empíricos apresentadas na tabela 5-3 são específicas para todo o processo utilizado nesta dissertação. Assim, devem ser tidas em conta como uma análise qualitativa de tendências e não como equações de previsão para qualquer caso.

5.2.4 Superfícies de Resposta

Como representação gráfica das equações do modelo empírico de segundo grau, foram criadas as superfícies de resposta, presentes no Anexo C Seção 7. Estas superfícies são interessantes pois permitem de uma forma fácil identificar pontos ótimos dentro do domínio dos parâmetros significativos.

5.2.5 Considerações

Depois de analisada a normalidade dos dados, notou-se que todos os dados medidos dos desvios quem têm $R_a \geq 50\%$ eram normais e, portanto, foram todos utilizados para o cálculo dos modelos empíricos e superfícies de resposta.

Nos modelos empíricos pode-se notar uma forte presença dos parâmetros Altura de Camada e Orientação e alguma influência dos parâmetros de Temperatura e Velocidade.

6 Conclusão

6.1 Conclusões

A partir dos modelos obtidos, nota-se uma tendência de significância tanto da altura de camada como da orientação de impressão, sendo ambos os fatores causadores do efeito de escada. Disto pode-se concluir que o efeito de escada é o causador dos desvios.

No entanto, o problema não está em existir efeito de escada, mas sim na influência que o efeito de escada tem numa medição CMM. O facto de haver um conjunto de 162 pontos medidos faz com que as superfícies médias possam ter uma medição errada levando a que o desvio medido pela CMM não seja o desvio real.

Na Figura 6-1, pode-se ver uma representação gráfica da interação do efeito de escada com a leitura CMM com 3 pontos ou com 10 pontos. No exemplo em questão, do lado esquerdo, está uma geometria cuja linha média tem um declive de 0,9979, aproximadamente 45°, obtida por uma altura de camada unitária. Ao centro está uma medição que consiste em 3 pontos, daqui obteve-se uma regressão linear com declive de 0,9302 que forma um ângulo de aproximadamente 43°. À direita, uma medição obtida aumentando para 10 pontos, incluindo os anteriores, obteve-se um declive de 0,9781 e nota-se uma diferença entre o ângulo medido e o ângulo real diminuiu para 1,6 graus.

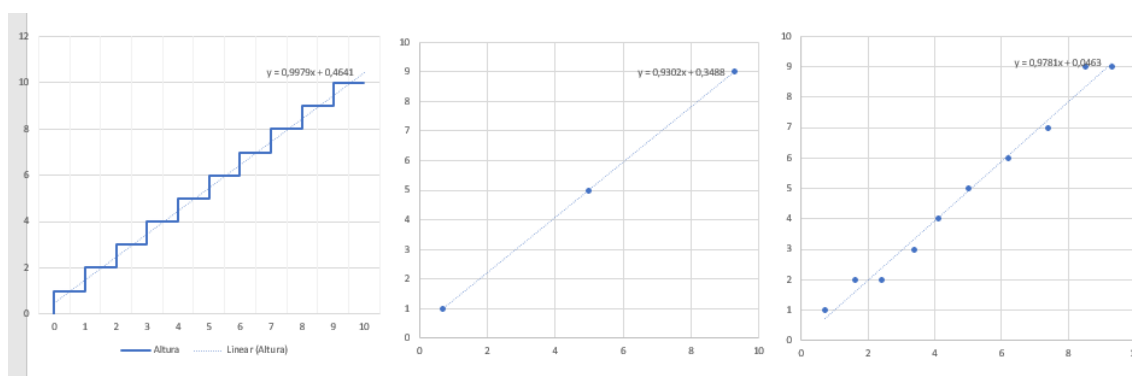


Figura 6-1: Interação da CMM com o efeito de escada.

Ponteiras planas ou cilíndricas possibilitariam medir a média da superfície. Dado que não existiam, os provetes foram medidos com uma ponteira esférica que resultou na conclusão acima.

Dos treze desvios geométricos, apenas cinco foram utilizados para a MSR devido à falta de ajuste dos modelos criados para os restantes. Contudo, à exceção da Cilindricidade de B

medida a 0°, Anexo C Secção 6, todos os desvios apresentam valores de R_a abaixo de 70% o que demonstra um ajuste não ideal à resposta do sistema. Que pode ser justificado pela aleatoriedade do processo ou pela falta de adequação do método de medição.

6.2 Propostas de trabalhos futuros

No âmbito desta dissertação seria interessante fazer o estudo dos desvios geométricos a partir de uma medição através de um Scanner 3d com tecnologia LASER ou luz estruturada. Esta tecnologia permite a obtenção de uma malha a partir de um número consideravelmente superior de pontos comparando com CMM e desta forma, obter superfícies médias com menos impacto do efeito de escada.

Referências Bibliográficas

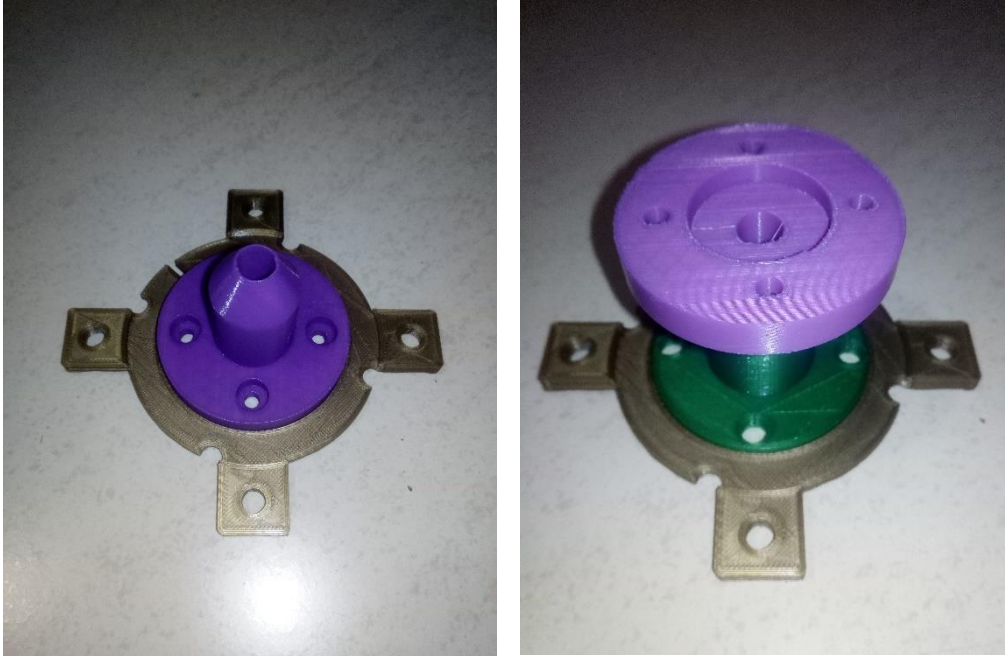
- [1] K. V. Wong and A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, Aug. 2012.
- [2] H. Yamazaki *et al.*, “Label-Free Single-Molecule Thermoscopy Using a Laser-Heated Nanopore,” *Nano Lett.*, vol. 17, no. 11, pp. 7067–7074, Nov. 2017.
- [3] ASTM, “ISO/ASTM 52900:2015(en), Additive manufacturing — General principles — Terminology,” 52900, 2015.
- [4] V. Picanço Rodrigues, E. de Senzi Zancul, C. Gonçalves Mançanares, C. Mezzeti Giordano, and M. Sergio Salerno, “Additive manufacturing: state-of-the-art and application framework,” *Rev. Gestão da Produção Operações e Sist.*, vol. 12, no. 4, pp. 1–34, Jul. 2017.
- [5] H. C. Pitágora and K. De Vasconcelos e Araújo, “CICLO DE VIDA DE PATENTES: UMA ANÁLISE DO CENÁRIO GLOBAL DA MANUFATURA ADITIVA A PARTIR DE 2009 E 2014,” *Cad. Prospecção*, vol. 11, no. 1, p. 64, Apr. 2018.
- [6] “The History of 3D Printing: From the 80s to Today.” [Online]. Available: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [7] J. Gardan, “Additive manufacturing technologies: state of the art and trends,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 54, no. 10, pp. 3118–3132, 2016.
- [8] “3D Printing Processes - Binder Jetting (Part 4/8).” [Online]. Available: https://www.engineersgarage.com/article_page/3d-printing-processes-binder-jetting-part-4-8/. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [9] H. Chen and Y. F. Zhao, “Process parameters optimization for improving surface quality and manufacturing accuracy of binder jetting additive manufacturing process,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 527–538, 2016.
- [10] B. E. Carroll, T. A. Palmer, and A. M. Beese, “Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing,” *Acta Mater.*, vol. 87, pp. 309–320, Apr. 2015.
- [11] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, “Directed Energy Deposition Processes,” in *Additive Manufacturing Technologies*, Springer New York, 2015, pp. 245–268.
- [12] C. K. Chua and K. F. Leong, *3D Printing and Additive Manufacturing*. WORLD SCIENTIFIC, 2017.
- [13] E. C. Santos, M. Shiomi, K. Osakada, and T. Laoui, “Rapid manufacturing of metal components by laser forming,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 12–13, pp. 1459–1468, Oct. 2006.
- [14] “3D Printing Processes - Powder Bed Fusion (Part 5/8).” [Online]. Available: https://www.engineersgarage.com/article_page/3d-printing-processes-powder-bed-fusion-part-5-8/. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [15] M. Feygin and S. S. Pac, “Laminated object manufacturing apparatus and method,” US5876550A, 10-Oct-1995.
- [16] “Three new 3D printing technologies for composites: CompositesWorld.” [Online]. Available: <https://www.compositesworld.com/blog/post/three-new-3d-printing-technologies-for-composites>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [17] Y. L. Yap, C. Wang, S. L. Sing, V. Dikshit, W. Y. Yeong, and J. Wei, “Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks,” *Precis. Eng.*, vol. 50, pp. 275–285, Oct. 2017.

- [18] “Introduction to Material Jetting 3D Printing | 3D Hubs.” [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [19] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, “Vat Photopolymerization Processes,” in *Additive Manufacturing Technologies*, New York, NY: Springer New York, 2015, pp. 63–106.
- [20] A. Davoudinejad, M. M. Ribo, D. B. Pedersen, A. Islam, and G. Tosello, “Direct fabrication of bio-inspired gecko-like geometries with vat polymerization additive manufacturing method,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 28, no. 8, May 2018.
- [21] N. Guo and M. C. Leu, “Additive manufacturing: technology, applications and research needs,” *Front. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 215–243, Sep. 2013.
- [22] P. K. Gokuldoss, S. Kolla, and J. Eckert, “Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting-Selection Guidelines,” *Mater. (Basel, Switzerland)*, vol. 10, no. 6, Jun. 2017.
- [23] B. Redwood, F. Schöffner, B. G. Foreword, and T. Fadell, *The 3D Printing Handbook Technologies, design and applications*. Amsterdam, The Netherlands: 3D Hubs BV.
- [24] G. L. Xiang, A. Chen, and C. Harrison, “3D Printed Hair: Fused Deposition Modeling of Soft Strands, Fibers and Bristles,” in *UIST 15*, 2015.
- [25] Z. Zhu, N. Anwer, Q. Huang, and L. Mathieu, “Machine learning in tolerancing for additive manufacturing,” *CIRP Ann.*, vol. 67, no. 1, pp. 157–160, 2018.
- [26] “FDM technology: The advantages of FDM printing | dddrop.” [Online]. Available: <https://www.dddrop.com/fdm-technology/>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [27] A. Raphaël, “Estudo do Acabamento Superficial e dos Desvios Dimensionais em Provetes Produzidos por Manufatura Aditiva,” Tese de Mestrado, DEMI, FCT-UNL, 2018.
- [28] R. B. Pereira and A. R. Morales, “Estudo do comportamento térmico e mecânico do PLA modificado com aditivo nucleante e modificador de impacto,” *Polímeros Ciência e Tecnol.*, vol. 24, no. 2, pp. 198–202, 2014.
- [29] S.-A. Tahan and S. Levesque, “Exploiting the process capability of position geometric tolerance according GD&T ASME Y14.5M,” in *2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering*, 2009, pp. 1267–1272.
- [30] D. Romano and G. Vicario, “Inspecting geometric tolerances: Uncertainty analysis in position tolerances control on Coordinate Measuring Machines,” *Stat. Methods Appl.*, vol. 11, no. 1, pp. 83–94, Feb. 2002.
- [31] American Society of Mechanical Engineers., *Dimensioning and tolerancing : engineering drawings and related documentation practices : an international standard*. American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [32] A. Mourão, *Tolerâncias geométricas - Interpretação, princípios e métodos de verificação*. Almada: DEMI, FCT-UNL, 2004.
- [33] “Concentricity | GD&T Basics.” [Online]. Available: <https://www.gdandtbasics.com/concentricity/>. [Accessed: 17-Sep-2019].
- [34] ISO, “ISO 1101:2017(en), Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out.” ISO, p. 154, 2017.
- [35] ISO, “ISO 5459:2011 - Geometrical product specifications (GPS) -- Geometrical tolerancing -- Datums and datum systems.” ISO, 2011.
- [36] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Tolerâncias geométricas-Tolerâncias de forma,” Rio de Janeiro, 1997.

- [37] Professor: Márcio Fontana Catapan, *Apostila de Desenho Mecânico 1*. Curitiba: UFPR, 2013.
- [38] “Coordinate measuring machine,” US4333238A, 31-Mar-1980.
- [39] Z. L. Pereira and J. G. Requeijo, *Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*, 1a ed. Caparica: Prefácio, 2008.
- [40] F. Yates, “Sir Ronald Fisher and the Design of Experiments,” *Biometrics*, vol. 20, no. 2, p. 307, Jun. 1964.
- [41] V.-M. T. Taavitsainen, “5 Experimental Optimization and Response Surfaces.”
- [42] D. C. Montgomery, R. H. Myers, and C. M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology*, Third edit. Wiley, 2009.
- [43] “Blocks One MKII.” [Online]. Available: <https://www.blockstec.com/onemkii.html>. [Accessed: 18-Feb-2019].
- [44] “Mitutoyo Euro-C Apex 544 CNC CMM - 1st Machinery.” [Online]. Available: <https://www.1stmachineryauctions.com/lots/mitutoyo-euro-c-apex-544-cnc-cmm>. [Accessed: 18-Sep-2019].

Anexos

Anexo A – Desenhos técnicos e ilustrações do provete e apoios

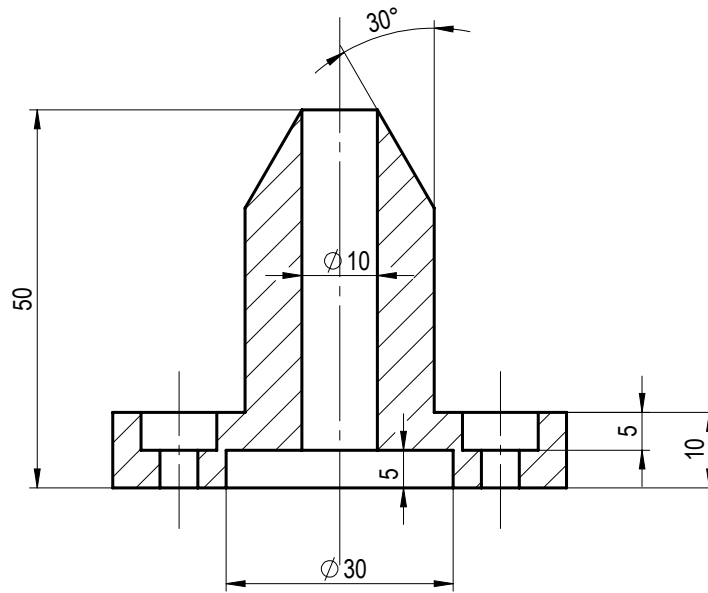


Montagens de medição a 0° e 180° repetivamente

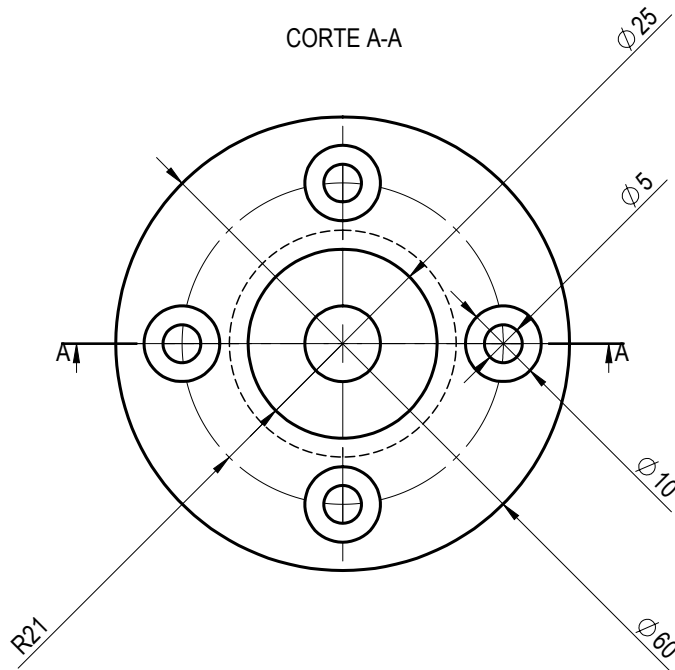
Proj.	24/05/2019
Des.	23/10/2019
Copiou	
Visto	

F.C.T.-U.N.L.

ANTÓNIO CACHAÇO



CORTE A-A



1:1

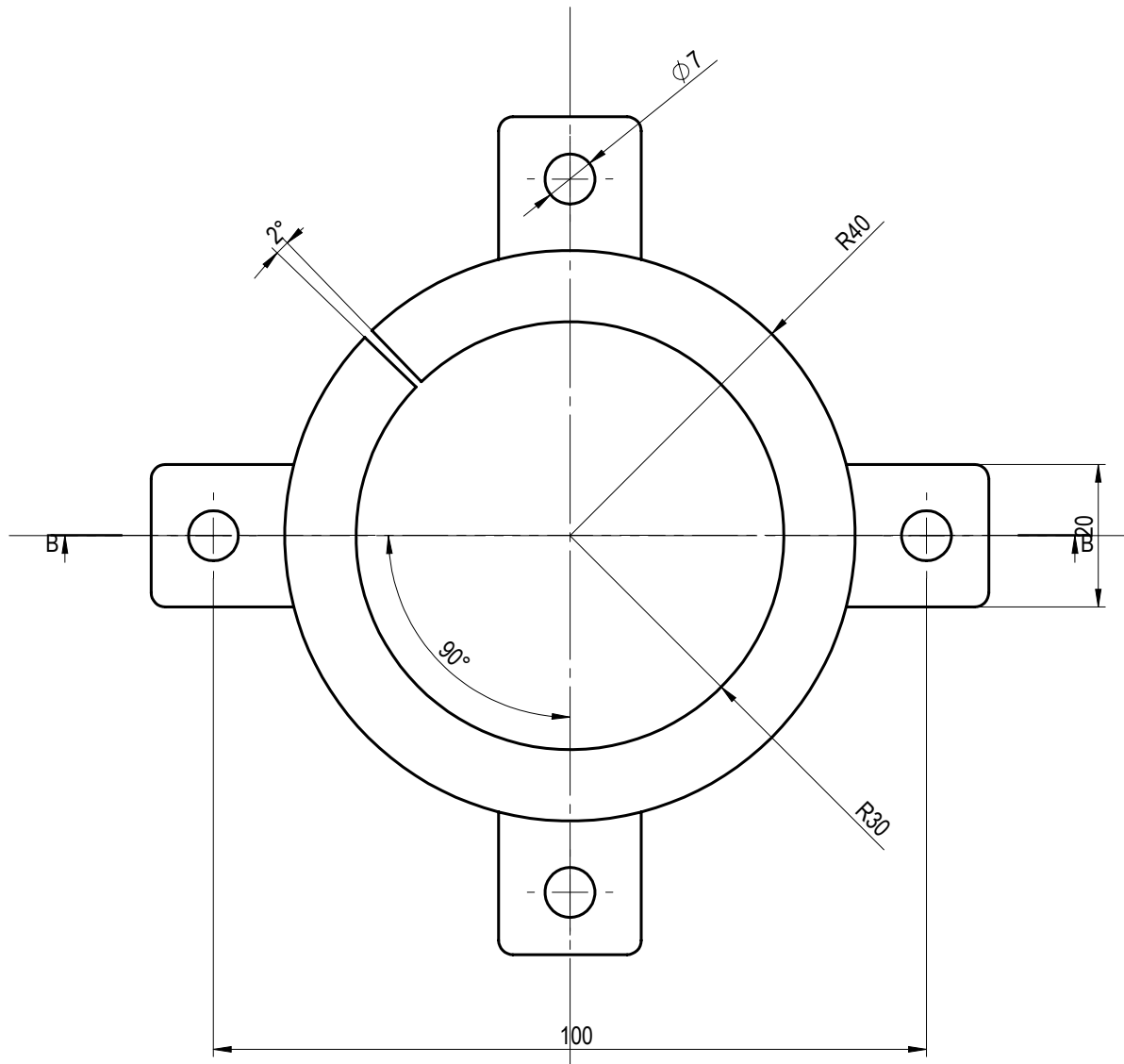
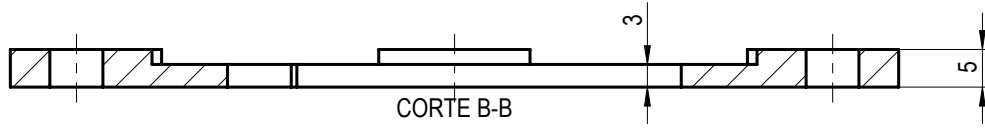
PROVETE

1

Proj. 24/05/2019
Des. 23/10/2019
Copiou
Visto

F.C.T.-U.N.L.

ANTÓNIO CACHAÇO



1:1

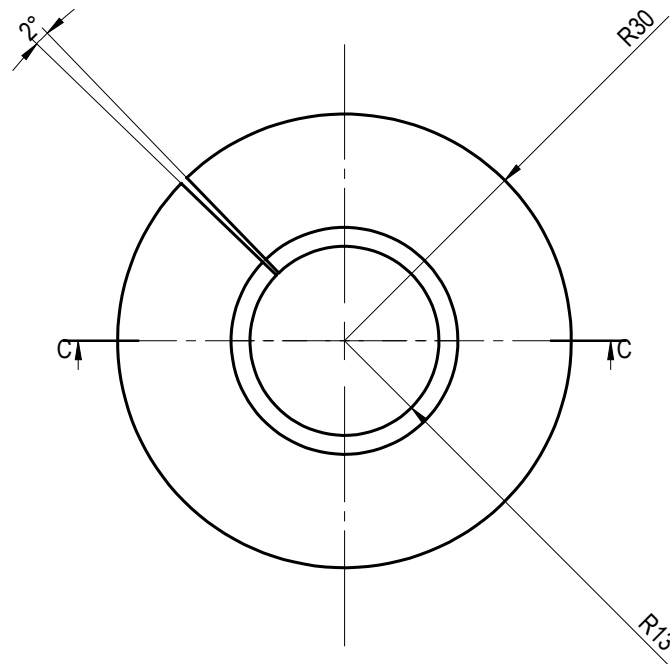
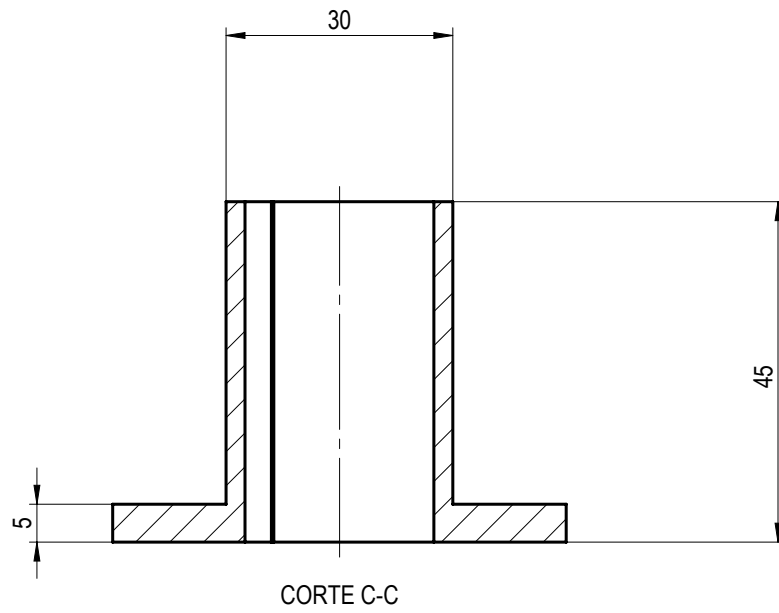
APOIO A

2

Proj.	24/05/2019
Des.	23/10/2019
Copiou	
Visto	

F.C.T.-U.N.L.

ANTÓNIO CACHAÇO



1:1

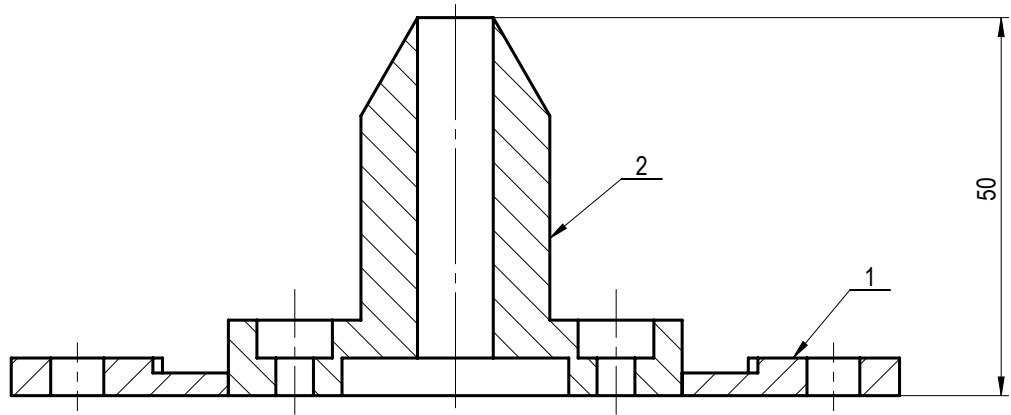
APOIO B

3

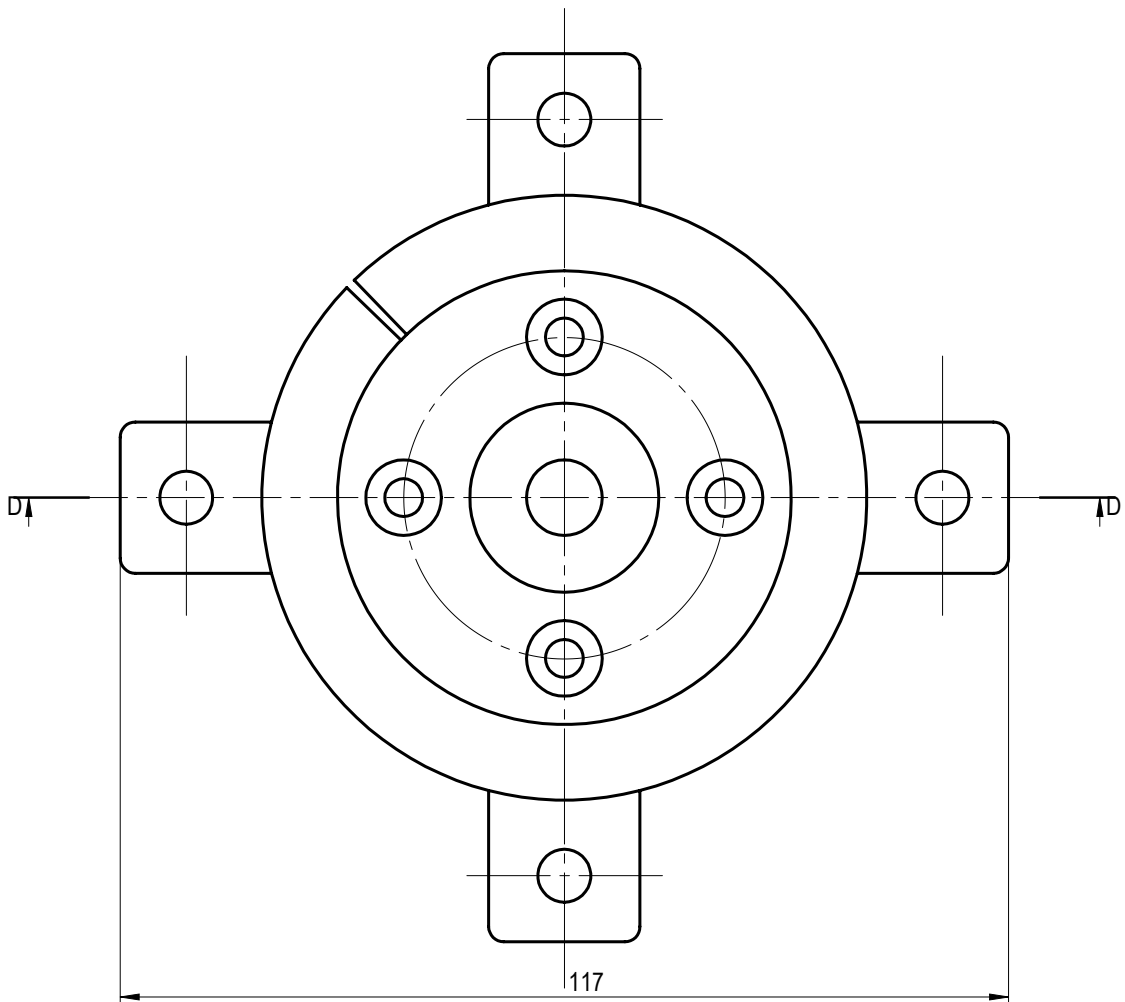
Proj.	24/05/2019
Des.	23/10/2019
Copiou	
Visto	

F.C.T.-U.N.L.

ANTÓNIO CACHAÇO



CORTE D-D



1	PROVETE			2			
1	APOIO A			1			
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO NºMOLDE NºMATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

1:1

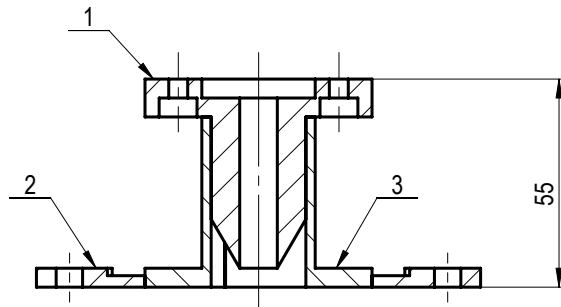
MEDIÇÃO 0°

4

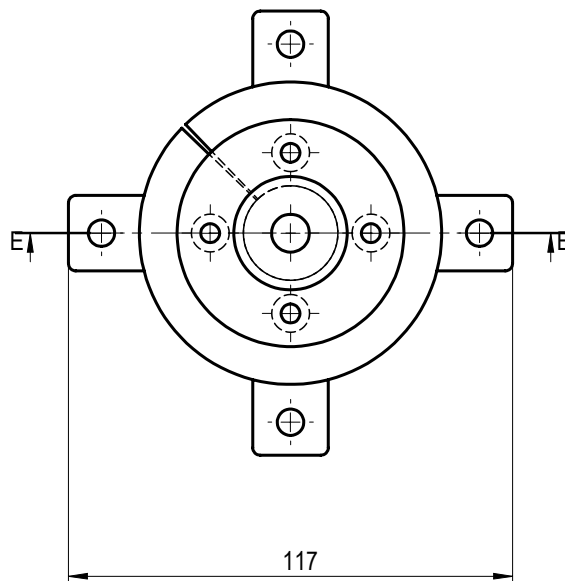
Proj.	24/05/2019
Des.	23/10/2019
Copiou	
Visto	

F.C.T.-U.N.L.

ANTÓNIO CACHAÇO



CORTE E-E



1	APOIO B			3			
1	APOIO A			2			
1	PROVETE			1			
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº NORMA Nº DESENHO	MATERIAL	Nº REF	PRODUTO SEMI ACABADO NºMOLDE NºMATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

1:2

MEDIÇÃO 180°

5

Anexo B - Screening

Secção 1 - Planeamentos de experiência

Planeamento de Experiências Fatorial Fracionado 6-2 com 2 repetições no espaço codificado.

	Réplica	A	B	C	D	E	F
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	1	-1
3	1	-1	1	-1	-1	1	1
4	1	1	1	-1	-1	-1	1
5	1	-1	-1	1	-1	1	1
6	1	1	-1	1	-1	-1	1
7	1	-1	1	1	-1	-1	-1
8	1	1	1	1	-1	1	-1
9	1	-1	-1	-1	1	-1	1
10	1	1	-1	-1	1	1	1
11	1	-1	1	-1	1	1	-1
12	1	1	1	-1	1	-1	-1
13	1	-1	-1	1	1	1	-1
14	1	1	-1	1	1	-1	-1
15	1	-1	1	1	1	-1	1
16	1	1	1	1	1	1	1
17	2	-1	-1	-1	-1	-1	-1
18	2	1	-1	-1	-1	1	-1
19	2	-1	1	-1	-1	1	1
20	2	1	1	-1	-1	-1	1
21	2	-1	-1	1	-1	1	1
22	2	1	-1	1	-1	-1	1
23	2	-1	1	1	-1	-1	-1
24	2	1	1	1	-1	1	-1
25	2	-1	-1	-1	1	-1	1
26	2	1	-1	-1	1	1	1
27	2	-1	1	-1	1	1	-1

	Réplica	A	B	C	D	E	F
28	2	1	1	-1	1	-1	-1
29	2	-1	-1	1	1	1	-1
30	2	1	-1	1	1	-1	-1
31	2	-1	1	1	1	-1	1
32	2	1	1	1	1	1	1
33	3	-1	-1	-1	-1	-1	-1
34	3	1	-1	-1	-1	1	-1
35	3	-1	1	-1	-1	1	1
36	3	1	1	-1	-1	-1	1
37	3	-1	-1	1	-1	1	1
38	3	1	-1	1	-1	-1	1
39	3	-1	1	1	-1	-1	-1
40	3	1	1	1	-1	1	-1
41	3	-1	-1	-1	1	-1	1
42	3	1	-1	-1	1	1	1
43	3	-1	1	-1	1	1	-1
44	3	1	1	-1	1	-1	-1
45	3	-1	-1	1	1	1	-1
46	3	1	-1	1	1	-1	-1
47	3	-1	1	1	1	-1	1
48	3	1	1	1	1	1	1

Planeamento da Experiência com o valores reais de cada fator.

	Réplica	% Enchimento	Temperatura [°C]	Altura de Camada [mm]	Velocidade [mm/s]	Orientação [°]	Número de Perímetros
1	1	30	190	0,1	30	-5	2
2	1	90	190	0,1	30	95	2
3	1	30	220	0,1	30	95	4
4	1	90	220	0,1	30	-5	4
5	1	30	190	0,2	30	95	4
6	1	90	190	0,2	30	-5	4
7	1	30	220	0,2	30	-5	2
8	1	90	220	0,2	30	95	2
9	1	30	190	0,1	60	-5	4
10	1	90	190	0,1	60	95	4
11	1	30	220	0,1	60	95	2
12	1	90	220	0,1	60	-5	2
13	1	30	190	0,2	60	95	2
14	1	90	190	0,2	60	-5	2
15	1	30	220	0,2	60	-5	4

	Réplica	% Enchimento	Temperatura [°C]	Altura de Camada [mm]	Velocidade [mm/s]	Orientação [°]	Número de Perímetros
16	1	90	220	0,2	60	95	4
17	2	30	190	0,1	30	-5	2
18	2	90	190	0,1	30	95	2
19	2	30	220	0,1	30	95	4
20	2	90	220	0,1	30	-5	4
21	2	30	190	0,2	30	95	4
22	2	90	190	0,2	30	-5	4
23	2	30	220	0,2	30	-5	2
24	2	90	220	0,2	30	95	2
25	2	30	190	0,1	60	-5	4
26	2	90	190	0,1	60	95	4
27	2	30	220	0,1	60	95	2
28	2	90	220	0,1	60	-5	2
29	2	30	190	0,2	60	95	2
30	2	90	190	0,2	60	-5	2
31	2	30	220	0,2	60	-5	4
32	2	90	220	0,2	60	95	4
33	3	30	190	0,1	30	-5	2
34	3	90	190	0,1	30	95	2
35	3	30	220	0,1	30	95	4
36	3	90	220	0,1	30	-5	4
37	3	30	190	0,2	30	95	4
38	3	90	190	0,2	30	-5	4
39	3	30	220	0,2	30	-5	2
40	3	90	220	0,2	30	95	2
41	3	30	190	0,1	60	-5	4
42	3	90	190	0,1	60	95	4
43	3	30	220	0,1	60	95	2
44	3	90	220	0,1	60	-5	2
45	3	30	190	0,2	60	95	2
46	3	90	190	0,2	60	-5	2
47	3	30	220	0,2	60	-5	4
48	3	90	220	0,2	60	95	4

Planeamento da Experiência disposto aleatoriamente.

	Réplica	% Enchimento	Temperatura [°C]	Altura de Camada [mm]	Velocidade [mm/s]	Orientação [°]	Número de Perímetros
34	3	90	190	0,1	30	95	2
27	2	30	220	0,1	60	95	2
44	3	90	220	0,1	60	-5	2
11	1	30	220	0,1	60	95	2
6	1	90	190	0,2	30	-5	4
20	2	90	220	0,1	30	-5	4
21	2	30	190	0,2	30	95	4
46	3	90	190	0,2	60	-5	2
37	3	30	190	0,2	30	95	4
48	3	90	220	0,2	60	95	4
14	1	90	190	0,2	60	-5	2
25	2	30	190	0,1	60	-5	4
23	2	30	220	0,2	30	-5	2
22	2	90	190	0,2	30	-5	4
42	3	90	190	0,1	60	95	4
17	2	30	190	0,1	30	-5	2
12	1	90	220	0,1	60	-5	2
7	1	30	220	0,2	30	-5	2
47	3	30	220	0,2	60	-5	4
35	3	30	220	0,1	30	95	4
33	3	30	190	0,1	30	-5	2
39	3	30	220	0,2	30	-5	2
38	3	90	190	0,2	30	-5	4
43	3	30	220	0,1	60	95	2
28	2	90	220	0,1	60	-5	2
36	3	90	220	0,1	30	-5	4
18	2	90	190	0,1	30	95	2
41	3	30	190	0,1	60	-5	4
24	2	90	220	0,2	30	95	2
45	3	30	190	0,2	60	95	2
10	1	90	190	0,1	60	95	4
2	1	90	190	0,1	30	95	2
9	1	30	190	0,1	60	-5	4
4	1	90	220	0,1	30	-5	4
40	3	90	220	0,2	30	95	2
30	2	90	190	0,2	60	-5	2
26	2	90	190	0,1	60	95	4
32	2	90	220	0,2	60	95	4

	Réplica	% Enchimento	Temperatura [°C]	Altura de Camada [mm]	Velocidade [mm/s]	Orientação [°]	Número de Perímetros
16	1	90	220	0,2	60	95	4
3	1	30	220	0,1	30	95	4
13	1	30	190	0,2	60	95	2
1	1	30	190	0,1	30	-5	2
19	2	30	220	0,1	30	95	4
5	1	30	190	0,2	30	95	4
15	1	30	220	0,2	60	-5	4
8	1	90	220	0,2	30	95	2
29	2	30	190	0,2	60	95	2
31	2	30	220	0,2	60	-5	4

Secção 2 - Tabelas dos desvios medidos para o *Screening*

Desvios medidos a 0° [µm].

Nº do Caso	Réplica	Cilindricidade B (0°)	Cilindricidade C	Coaxialidade C-B	Coaxialidade D-B	Coaxialidade E-B	Paralelismo H-B	Perpendicularidade I-B
1	1	137	131	1144	929	1065	71,25	30
2	1	324	235	539	1978	3426	98,75	168
3	1	282	212	654	1745	1736	71	56
4	1	150	92	2044	1431	2610	23	158
5	1	371	338	1381	734	3502	129,75	182
6	1	238	165	906	1179	1318	172	98
7	1	165	89	1702	962	2730	159	135
8	1	378	204	265	349	3653	220,5	164
9	1	122	74	1104	719	1052	47,75	41
10	1	426	329	1780	1657	4080	176,75	151
11	1	311	230	634	486	1092	101,75	50
12	1	142	48	1975	1724	661	37,75	131
13	1	434	304	1134	629	3953	111,5	94
14	1	166	93	822	1275	1011	45,75	131
15	1	150	126	1613	1031	1419	61,25	100
16	1	467	207	372	3413	4185	248,25	102
17	1	133	55	1204	374	1406	47,75	35
18	1	541	300	762	837	2195	50,5	81
19	1	228	207	1381	2027	1429	298,5	146
20	1	177	51	2595	1592	2209	50,25	156
21	1	361	291	244	752	5374	141,5	113
22	1	195	199	686	1719	947	51,5	85
23	1	172	158	2198	1903	1692	97	139

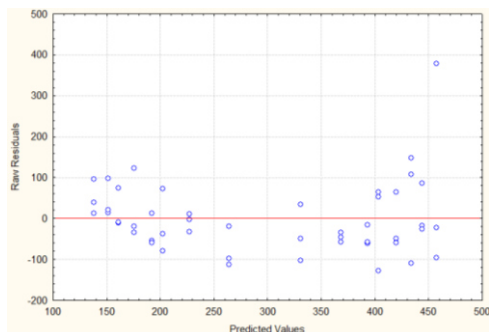
Nº do Caso	Réplica	Cilindricidade B (0º)	Cilindricidade C	Coaxialidade C-B	Coaxialidade D-B	Coaxialidade E-B	Paralelismo H-B	Perpendicularidade I-B
24	1	332	256	671	174	1383	179,25	162
25	1	164	55	1342	1000	1168	58	33
26	2	530	313	1257	719	2592	293,75	160
27	2	323	235	323	565	2719	147	122
28	2	156	71	2248	1131	645	123,5	112
29	2	361	394	1036	773	7368	179	124
30	2	151	126	965	1205	1393	126	63
31	2	152	160	2082	1425	746	95,5	278
32	2	275	280	834	1297	3330	260	100
33	3	205	117	620	587	686	82,75	37
34	3	581	279	873	1464	2527	70,75	246
35	3	365	232	486	677	650	141,5	90
36	3	235	95	2495	2031	2156	185,25	202
37	3	484	327	607	2704	5592	205,5	236
38	3	224	137	812	1449	4723	48	74
39	3	249	164	1858	914	1549	78,25	179
40	3	335	293	717	712	1485	265,5	89
41	3	275	105	2114	1484	1719	151,5	157
42	3	418	268	1291	727	2573	141	93
43	3	334	269	1178	1983	1972	264,25	119
44	3	298	119	2863	1154	1683	141,25	244
45	3	836	155	1213	1608	4713	306,5	284
46	3	245	102	1471	313	484	96	84
47	3	236	168	3012	1416	1771	75,75	197
48	3	456	229	292	801	3244	368,25	173

Desvios medidos a 180° [µm].

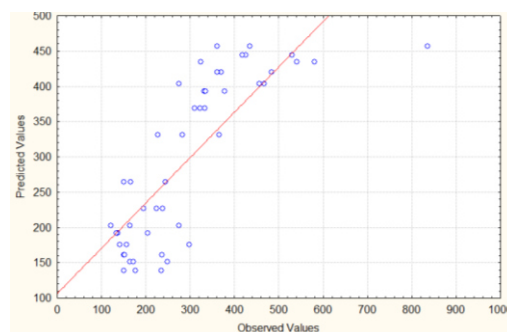
Nº do Caso	Réplica	Coaxialidade K-B	Coaxialidade E-B	Paralelismo J-A	Perpendicularidade B-A	Cilindricidade B (180º)	Cilindricidade K
1	1	1347	1770	206	302	142	165
2	1	4408	1250	118	432	510	203
3	1	2997	2267	282	721	316	148
4	1	11844	2453	257	453	219	169
5	1	5165,5	929	171	307	346	360
6	1	5347	1788	192	471	225	138
7	1	8640	1340	251	45	137	214
8	1	14475	919	334	617	374	450
9	1	4827	285	155	78	146	249
10	1	5686	3142	111	104	561	233
11	1	6082	1332	108	61	306	239
12	1	9626	741	171	156	231	214
13	1	10519	3824	109	524	542	559
14	1	5207	1135	264	326	179	323
15	1	5819	1969	146	1026	251	320
16	1	11558	1671	157	421	612	358
17	1	9145	478	218	316	153	235
18	1	3191	2137	50	132	625	280
19	1	1066	1987	90	156	360	295
20	1	13479	3872	263	753	230	618
21	1	6188	681	259	266	311	327
22	1	9832	1472	342	117	146	225
23	1	4568	153	306	167	144	384
24	1	3766	5057	456	45	318	503
25	1	1145	951	193	111	233	221
26	2	2329	775	62	419	396	232
27	2	2217	1873	55	78	346	206
28	2	9495	3131	236	269	218	243,5
29	2	2025	3307	127	43	494	515
30	2	7259	1062	205	296	337	405
31	2	6592	1955	244	231	177	317
32	2	10720,5	3309	85	624	492	266
33	3	5535	680	273	188	211	215
34	3	5230	529	66	222	448	368
35	3	4125	851	209	203	307	263
36	3	2415	2869	210	647	230	363
37	3	4143	1059	167	193	806	393
38	3	229403	1445	330	117	237	528

Nº do Caso	Réplica	Coaxialidade K-B	Coaxialidade E-B	Paralelismo J-A	Perpendicularidade B-A	Cilindricidade B (180º)	Cilindricidade K
39	3	1188	1083	122	183	252	295
40	3	8742	1718	102	626	297	362
41	3	10508	564	172	123	332	430
42	3	6335	3996	171	80	699	216
43	3	2219	1439	116	102	310	351
44	3	9364	2834	252	278	654	273
45	3	6868	6851	141	1410	397	443
46	3	15954	428	314	408	260	567
47	3	5046	2643	136	120	262	323
48	3	9883	7503	123	866	608	174

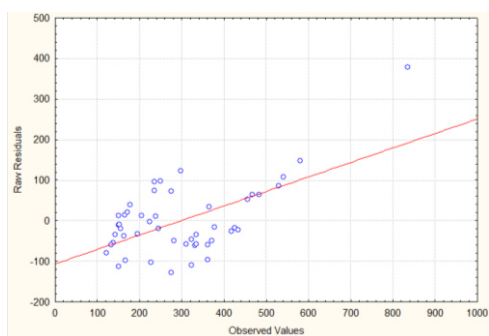
Secção 3 - Análises de Normalidade dos valores medidos



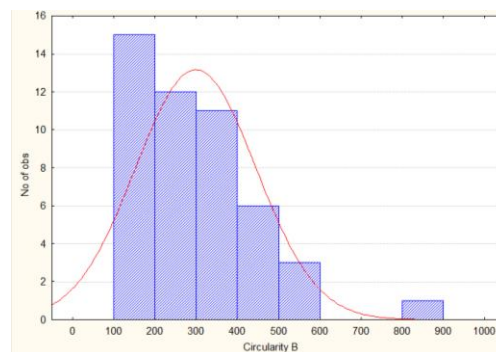
Valores Previstos vs Resíduos - Cilindricidade B.



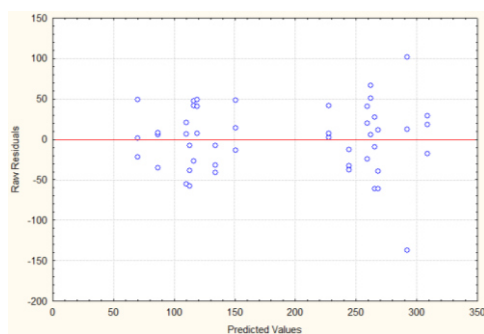
Valores Observados vs Previstos - Cilindricidade.



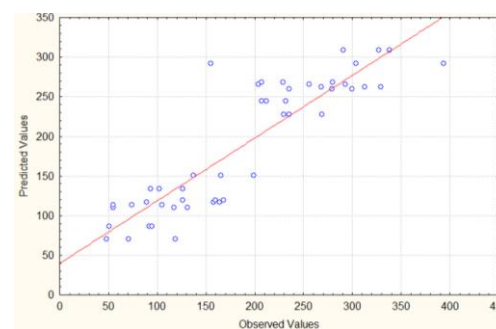
Valores Observados vs Resíduos - Cilindricidade B.



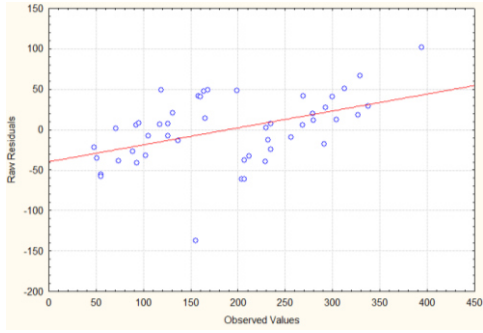
Histograma - Cilindricidade B.



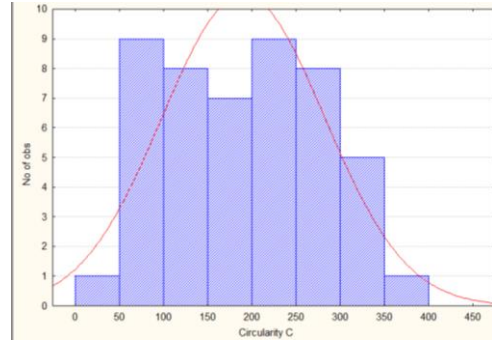
Valores Previstos vs Resíduos - Cilindricidade C.



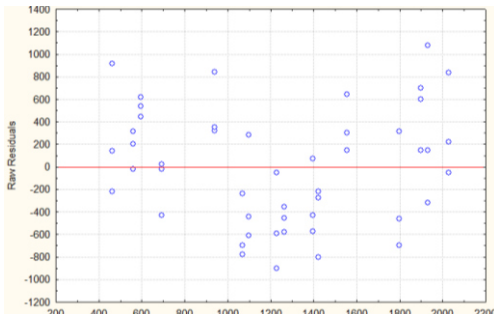
Valores Observados vs Previstos - Cilindricidade C.



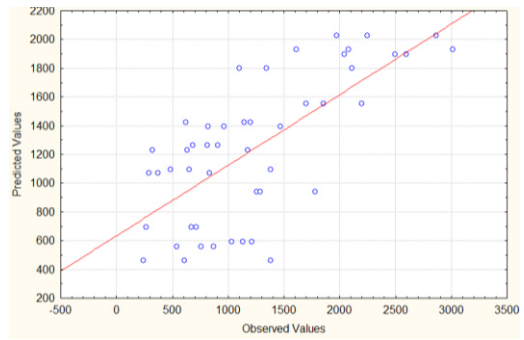
Valores Observados vs Resíduos - Cilindricidade C.



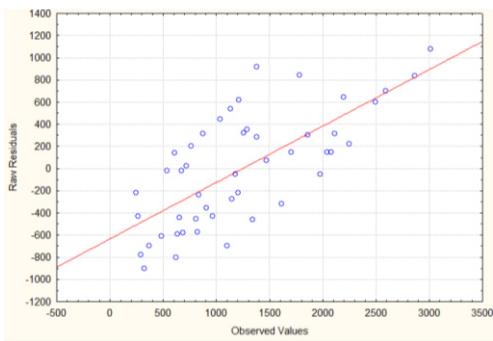
Histograma - Cilindricidade C.



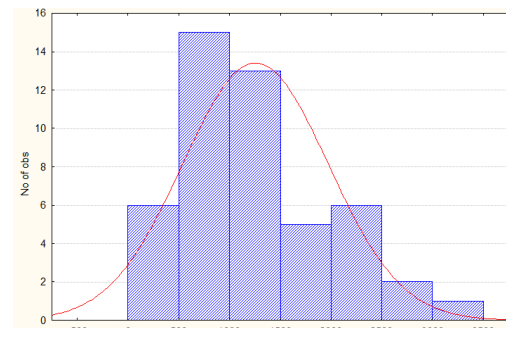
Valores Previstos vs Resíduos - Coaxialidade C-B.



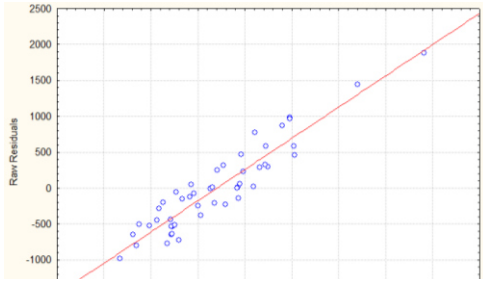
Valores Observados vs Previstos - Coaxialidade C-B.



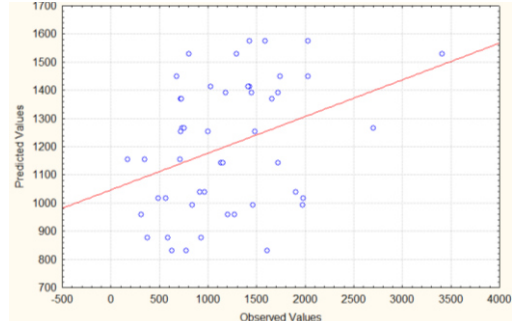
Valores Observados vs Resíduos - Coaxialidade C-B.



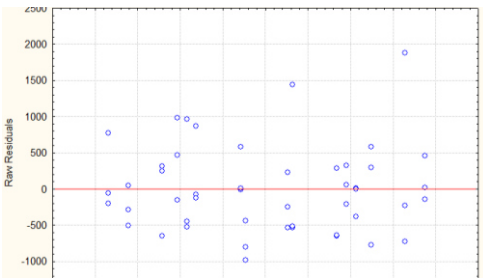
Histograma - Coaxialidade C-B.



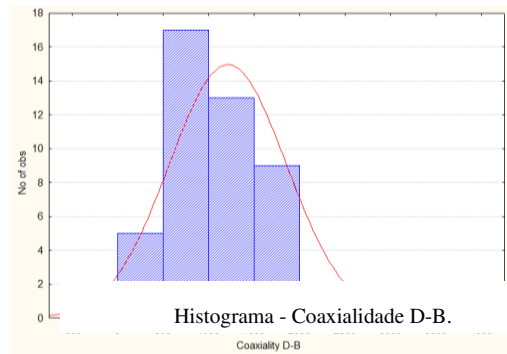
Valores Observados vs Resíduos - Coaxialidade D-B.



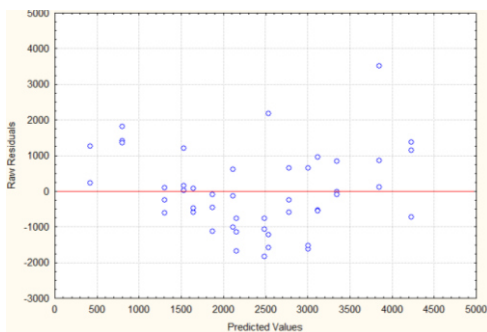
Valores Observados vs Previstos - Coaxialidade D-B.



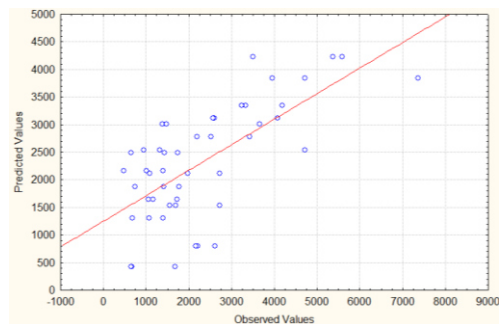
Valores Previstos vs Resíduos - Coaxialidade D-B.



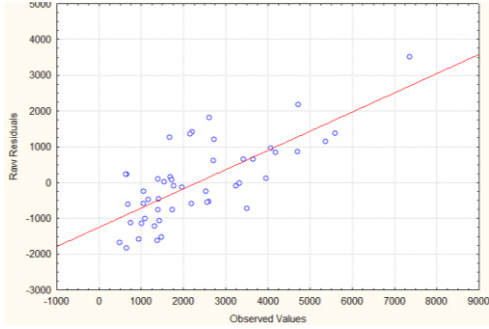
Histograma - Coaxialidade D-B.



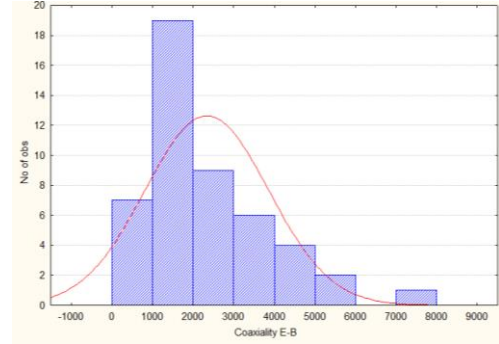
Valores Previstos vs Resíduos - Coaxialidade E-B.



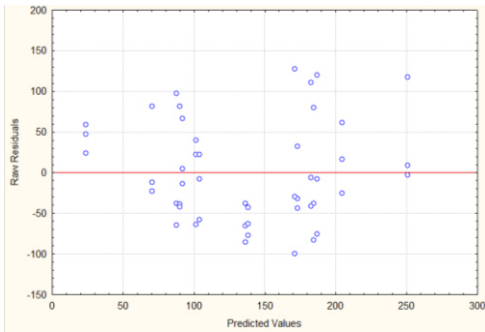
Valores Observados vs Previstos - Coaxialidade E-B.



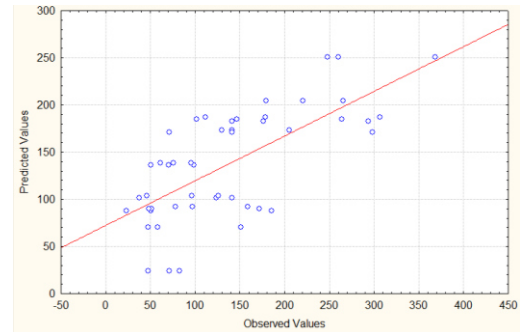
Valores Observados vs Resíduos - Coaxialidade E-B.



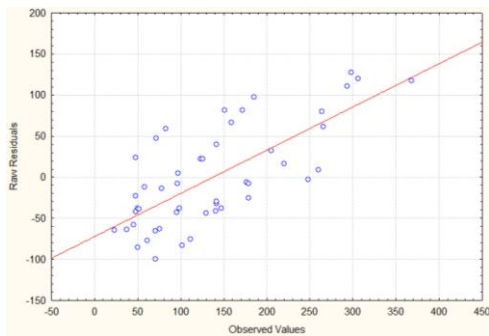
Histograma - Coaxialidade E-B.



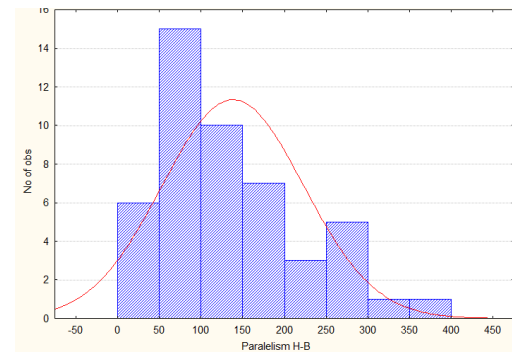
Valores Previstos vs Resíduos - Paralelismo H-B.



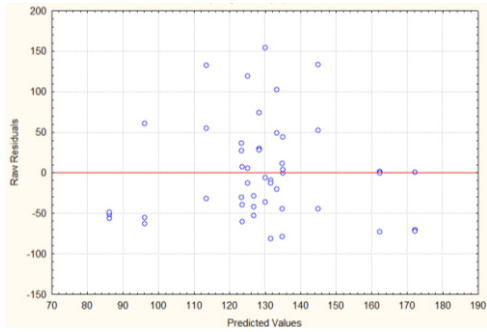
Valores Observados vs Previstos - Paralelismo H-B.



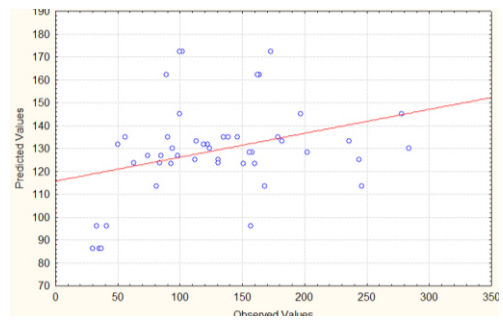
Valores Observados vs Resíduos - Paralelismo H-B.



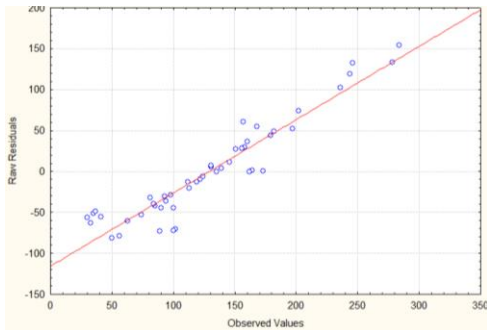
Histograma - Paralelismo H-B.



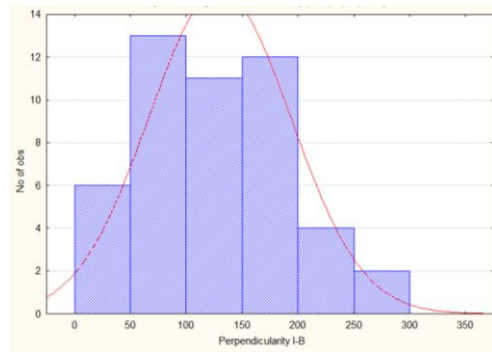
Valores Previstos vs Resíduos - Perpendicularidade I-B.



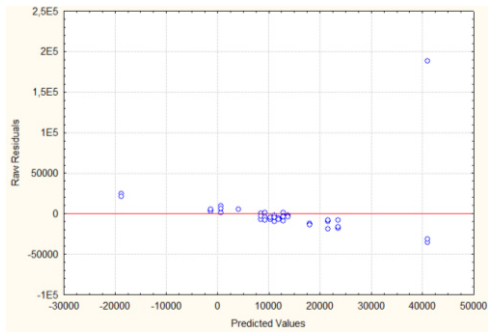
Valores Observados vs Previstos - Perpendicularidade I-B.



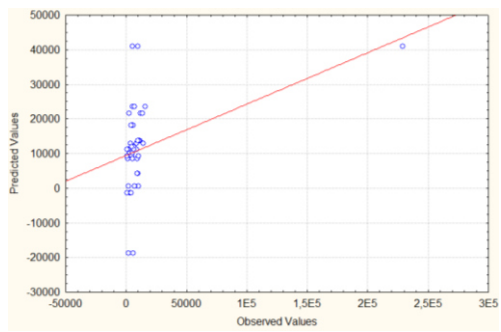
Valores Obseados vs Resíduos - Perpendicularidade I-B.



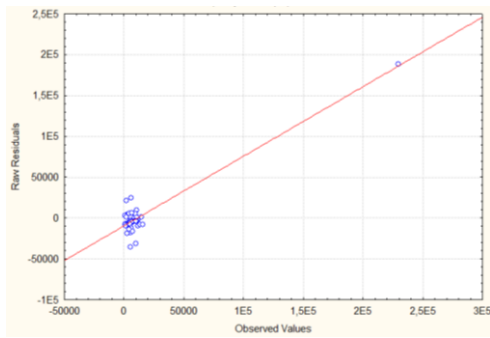
Histograma - Perpendicularidade I-B.



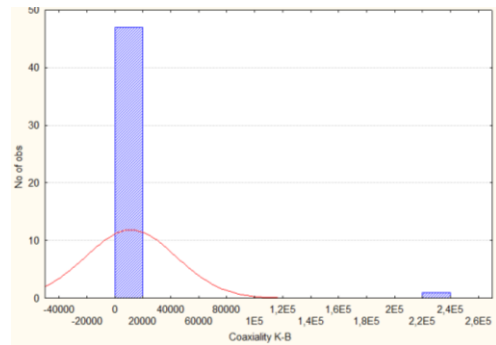
Valores Previstos vs Resíduos - Coaxialidade K-B.



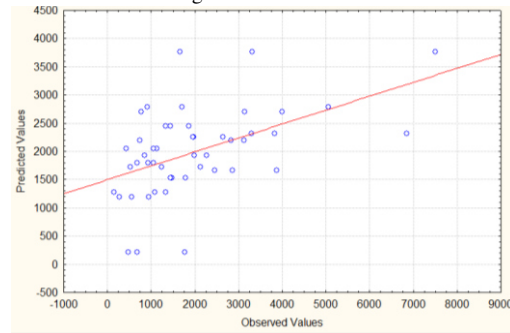
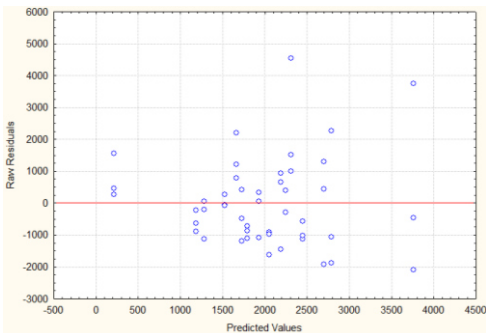
Valores Observados vs Previstos - Coaxialidade K-B.



Valores Observados vs Resíduos - Coaxialidade K-B.

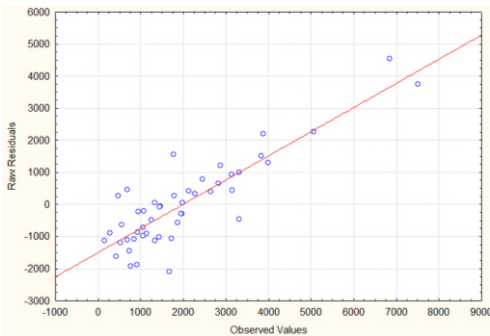


Histograma - Coaxialidade K-B.

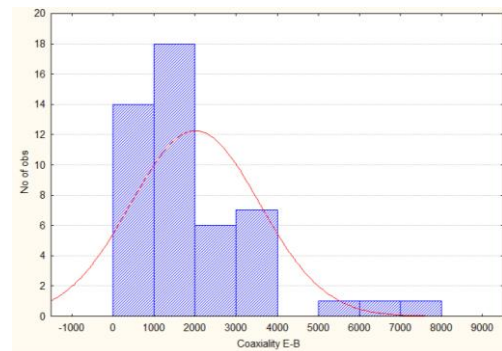


Valores Previstos vs Resíduos - Coaxialidade E-B.

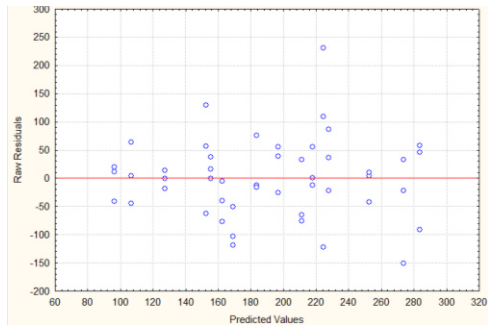
Valores Observados vs Previstos - Coaxialidade E-B.



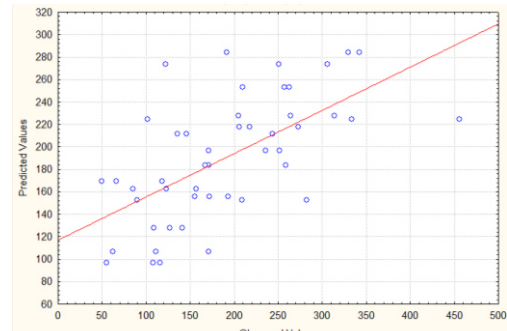
Valores Observados vs Resíduos - Coaxialidade E-B.



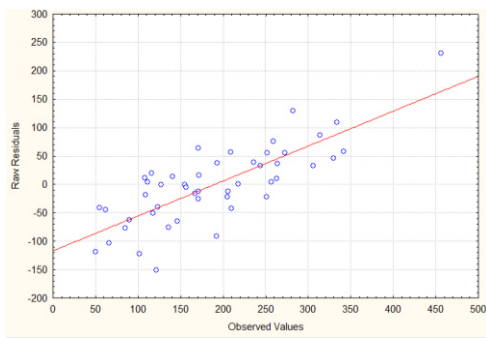
Histograma - Coaxialidade E-B.



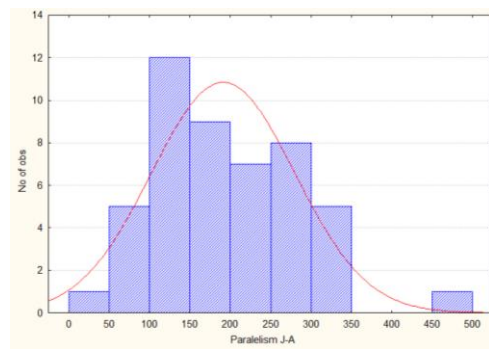
Valores Previstos vs Resíduos – Paralelismo J-A.



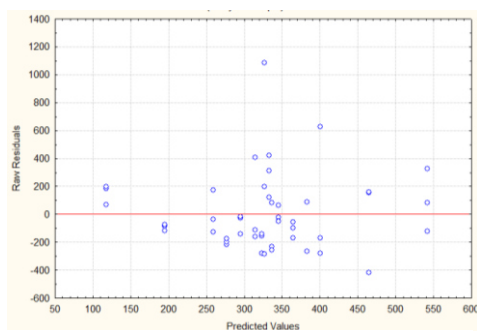
Valores Observados vs Previstos - Paralelismo J-A.



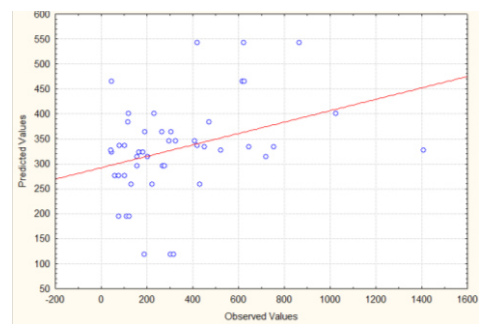
Valores Observados vs Resíduos - Paralelismo J-A.



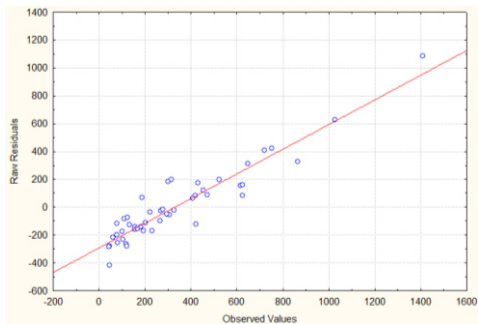
Histograma - Paralelismo J-A.



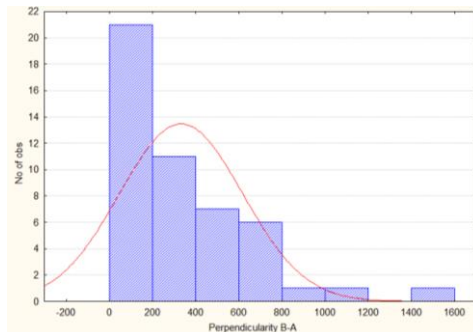
Valores Previstos vs Resíduos - Perpendicularidade B-A.



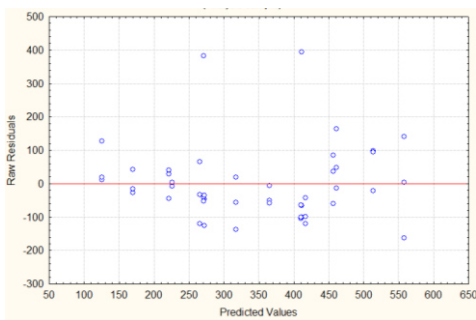
Valores Observados vs Previstos - Perpendicularidade B-A.



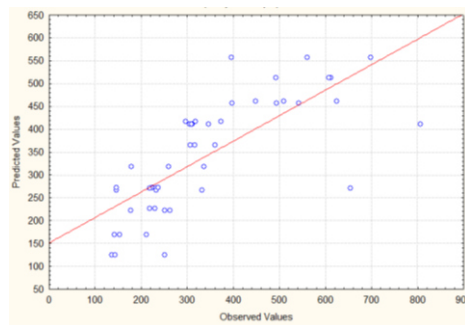
Valores Observados vs Resíduos - Perpendicularidade B-A.



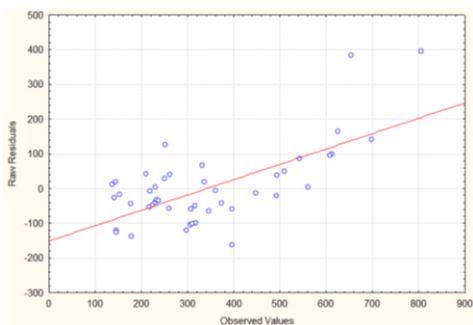
Histograma - Perpendicularidade B-A.



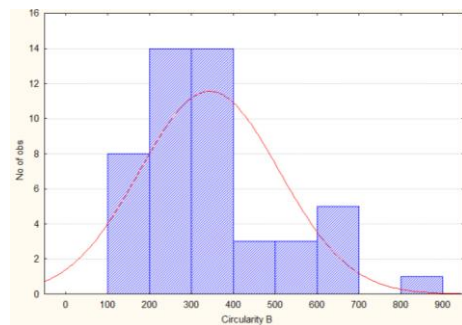
Valores Previsos vs Resíduos - Cilindricidade B.



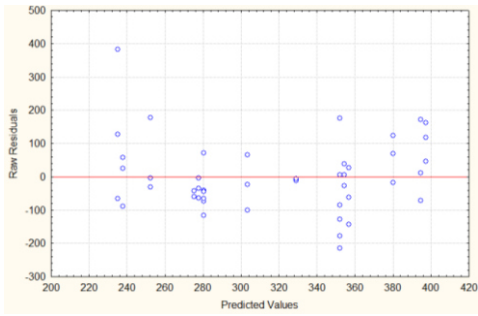
Valores Observados vs Previstos - Cilindricidade B.



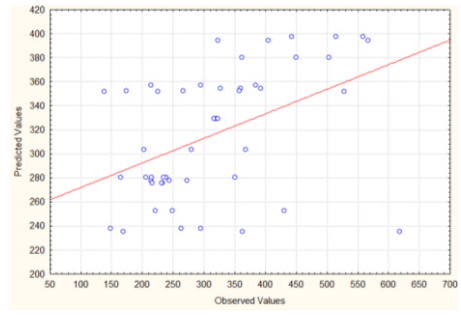
Valores Observados vs Resíduos - Cilindricidade B.



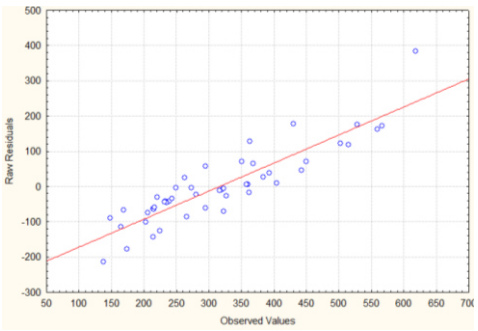
Histograma - Cilindricidade B.



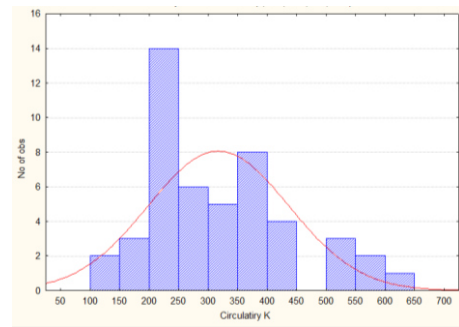
Valores Previstos vs Resíduos - Cilindricidade K.



Valores Observados vs Previstos - Cilindricidade K.



Valores Observados vs Resíduos - Cilindricidade K.



Histograma - Cilindricidade K.

Secção 4 - Tabelas ANOVA

Tabela ANOVA Cilindricidade B (0°).

	Graus de liberdade	Cilindricidade B 0° SS	Cilindricidade B 0° MS	Cilindricidade B 0° F	Cilindricidade B 0° p
Intercepção	1	4254252	4254252	490,5536	0,000000
% Enchimento	1	7252	7252	0,8362	0,365824
Temperatura	1	50311	50311	5,8013	0,020594
Altura de Camada	1	6912	6912	0,7970	0,377197
Velocidade	1	6674	6674	0,7696	0,385458
Orientação	1	566805	566805	65,3578	0,000000
Altura de Camada	1	2241	2241	0,2584	0,613914
Erro	41	355566	8672		
Total	47	995762			

Tabela ANOVA Cilindricidade C.

	Graus de liberdade	Cilindricidade C SS	Cilindricidade C MS	Cilindricidade C F	Cilindricidade C p
Intercepção	1	1720283	1720283	859,4214	0,000000
% Enchimento	1	230	230	0,1147	0,736531
Temperatura	1	10121	10121	5,0563	0,029975
Altura de Camada	1	14805	14805	7,3964	0,009541
Velocidade	1	581	581	0,2903	0,592963
Orientação	1	283208	283208	141,4853	0,000000
Altura de Camada	1	1131	1131	0,5650	0,456531
Erro	41	82069	2002		
Total	47	392144			

Tabela ANOVA Coaxialidade C-B.

	Graus de liberdade	Coaxialidade C-B SS	Coaxialidade C-B MS	Coaxialidade C-B F	Coaxialidade C-B p
Intercepção	1	74498342	74498342	250,6040	0,000000
% Enchimento	1	11072	11072	0,0372	0,847922
Temperatura	1	1757588	1757588	5,9123	0,019492
Altura de Camada	1	753254	753254	2,5339	0,119109
Velocidade	1	778007	778007	2,6171	0,113385
Orientação	1	8292550	8292550	27,8952	0,000005
Altura de Camada	1	183645	183645	0,6178	0,436400
Erro	41	12188282	297275		
Total	47	23964397			

Tabela ANOVA Coaxialidade D-B.

	Graus de liberdade	Coaxialidade D-B SS	Coaxialidade D-B MS	Coaxialidade D-B F	Coaxialidade D-B p
Intercepção	1	69499720	69499720	170,3334	0,000000
% Enchimento	1	175692	175692	0,4306	0,515363
Temperatura	1	355008	355008	0,8701	0,356396
Altura de Camada	1	1680	1680	0,0041	0,949144
Velocidade	1	9861	9861	0,0242	0,877219
Orientação	1	385	385	0,0009	0,975633
Altura de Camada	1	1960208	1960208	4,8042	0,034126
Erro	41	16728891	408022		
Total	47	19231726			

Tabela ANOVA Coaxialidade E-B 0°.

	Graus de liberdade	Coaxialidade E-B SS	Coaxialidade E-B MS	Coaxialidade E-B F	Coaxialidade E-B p
Interceção	1	259544405	259544405	183,3814	0,000000
% Enchimento	1	139752	139752	0,0987	0,754938
Temperatura	1	6838790	6838790	4,8320	0,033639
Altura de Camada	1	11518921	11518921	8,1387	0,006761
Velocidade	1	4602	4602	0,0033	0,954804
Orientação	1	29972602	29972602	21,1772	0,000040
Altura de Camada	1	1553041	1553041	1,0973	0,300995
Erro	41	58028355	1415326		
Total	47	108056063			

Tabela ANOVA Paralelismo H-B.

	Graus de liberdade	Paralelismo H-B SS	Paralelismo H-B MS	Paralelismo H-B F	Paralelismo H-B p
Interceção	1	906675,2	906675,2	210,6207	0,000000
% Enchimento	1	2552,1	2552,1	0,5928	0,445733
Temperatura	1	13002,1	13002,1	3,0204	0,089731
Altura de Camada	1	14910,8	14910,8	3,4638	0,069908
Velocidade	1	10770,0	10770,0	2,5019	0,121395
Orientação	1	114563,0	114563,0	26,6130	0,000007
Altura de Camada	1	3234,1	3234,1	0,7513	0,391116
Erro	41	176495,9	4304,8		
Total	47	335527,9			

Tabela ANOVA Perpendicularidade I-B.

	Graus de liberdade	Perpendicularidade I-B SS	Perpendicularidade I-B MS	Perpendicularidade I-B F	Perpendicularidade I-B p
Interceção	1	801867,0	801867,0	194,3713	0,000000
% Enchimento	1	1302,1	1302,1	0,3156	0,577308
Temperatura	1	7600,3	7600,3	1,8423	0,182106
Altura de Camada	1	6721,3	6721,3	1,6292	0,208991
Velocidade	1	140,1	140,1	0,0340	0,854709
Orientação	1	3434,1	3434,1	0,8324	0,366908
Altura de Camada	1	520,1	520,1	0,1261	0,724365
Erro	41	169143,0	4125,4		
Total	47	188861,0			

Tabela ANOVA Coaxialidade K-B.

	Graus de liberdade	Coaxialidade K-B SS	Coaxialidade K-B MS	Coaxialidade K-B F	Coaxialidade K-B p
Interceção	1	5,930141E+09	5,930141E+09	5,790537	0,020704
% Enchimento	1	1,844798E+09	1,844798E+09	1,801368	0,186933
Temperatura	1	8,473081E+08	8,473081E+08	0,827361	0,368353
Altura de Camada	1	1,455225E+09	1,455225E+09	1,420967	0,240099
Velocidade	1	8,246560E+08	8,246560E+08	0,805242	0,374770
Orientação	1	1,340350E+09	1,340350E+09	1,308796	0,259248
Altura de Camada	1	1,002685E+09	1,002685E+09	0,979081	0,328230
Erro	41	4,198847E+10	1,024109E+09		
Total	47	4,930350E+10			

Tabela ANOVA Coaxialidade E-B (180°).

	Graus de liberdade	Coaxialidade E-B SS	Coaxialidade E-B MS	Coaxialidade E-B F	Coaxialidade E-B p
Intercepção	1	190033064	190033064	90,08794	0,000000
% Enchimento	1	4665651	4665651	2,21182	0,144608
Temperatura	1	4338620	4338620	2,05679	0,159113
Altura de Camada	1	2564563	2564563	1,21577	0,276623
Velocidade	1	6699844	6699844	3,17616	0,082127
Orientação	1	9456313	9456313	4,48290	0,040347
Altura de Camada	1	599651	599651	0,28427	0,596793
Erro	41	86486115	2109417		
Total	47	114810755			

Tabela ANOVA Paralelismo J-A.

	Graus de liberdade	Paralelismo J-A SS	Paralelismo J-A MS	Paralelismo J-A F	Paralelismo J-A p
Intercepção	1	1735461	1735461	316,0188	0,000000
% Enchimento	1	7880	7880	1,4349	0,237853
Temperatura	1	1813	1813	0,3301	0,568715
Altura de Camada	1	22490	22490	4,0953	0,049553
Velocidade	1	42068	42068	7,6603	0,008433
Orientação	1	66678	66678	12,1416	0,001188
Altura de Camada	1	111	111	0,0202	0,887631
Erro	41	225157	5492		
Total	47	366196			

Tabela ANOVA Perpendicularidade B-A.

	Graus de liberdade	Perpendicularidade B-A SS	Perpendicularidade B-A MS	Perpendicularidade B-A F	Perpendicularidade B-A p
Interceção	1	5222581	5222581	63,52955	0,000000
% Enchimento	1	77201	77201	0,93910	0,338192
Temperatura	1	72308	72308	0,87958	0,353809
Altura de Camada	1	195713	195713	2,38073	0,130524
Velocidade	1	4701	4701	0,05718	0,812203
Orientação	1	45080	45080	0,54837	0,463204
Altura de Camada	1	39733	39733	0,48332	0,490843
Erro	41	3370492	82207		
Total	47	3805226			

Tabela ANOVA Cilindricidade B (180°).

	Graus de liberdade	Cilindricidade B (180°) SS	Cilindricidade B (180°) MS	Cilindricidade B (180°) F	Cilindricidade B (180°) p
Interceção	1	5594454	5594454	401,7733	0,000000
% Enchimento	1	69388	69388	4,9832	0,031119
Temperatura	1	24526	24526	1,7613	0,191802
Altura de Camada	1	9	9	0,0007	0,979632
Velocidade	1	60138	60138	4,3189	0,043993
Orientação	1	557930	557930	40,0685	0,000000
Altura de Camada	1	7931	7931	0,5696	0,454740
Erro	41	570901	13924		
Total	47	1290821			

Tabela ANOVA Cilindricidade K.

	Graus de liberdade	Cilindricidade K SS	Cilindricidade K MS	Cilindricidade K F	Cilindricidade K p
Interceção	1	4799726	4799726	372,7346	0,000000
% Enchimento	1	1245	1245	0,0967	0,757382
Temperatura	1	4830	4830	0,3751	0,543625
Altura de Camada	1	112085	112085	8,7042	0,005227
Velocidade	1	649	649	0,0504	0,823484
Orientação	1	1996	1996	0,1550	0,695865
Altura de Camada	1	14928	14928	1,1593	0,287906
Erro	41	527959	12877		
Total	47	663693			

Anexo C - Planejamento Composto Central

Secção 1 - Planejamentos de experiência

Planeamento Composto Central com 4 fatores completo.

	Réplica	A	B	C	D
1	1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	1
3	1	-1	-1	1	-1
4	1	-1	-1	1	1
5	1	-1	1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	1
7	1	-1	1	1	-1
8	1	-1	1	1	1
9	1	1	-1	-1	-1
10	1	1	-1	-1	1
11	1	1	-1	1	-1
12	1	1	-1	1	1
13	1	1	1	-1	-1
14	1	1	1	-1	1
15	1	1	1	1	-1
16	1	1	1	1	1
17	1	-2	0	0	0
18	1	2	0	0	0
19	1	0	-2	0	0
20	1	0	2	0	0
21	1	0	0	-2	0
22	1	0	0	2	0
23	1	0	0	0	-2
24	1	0	0	0	2
25 (C)	1	0	0	0	0
26 (C)	1	0	0	0	0
27	2	-1	-1	-1	-1
28	2	-1	-1	-1	1
29	2	-1	-1	1	-1
30	2	-1	-1	1	1
31	2	-1	1	-1	-1
32	2	-1	1	-1	1
33	2	-1	1	1	-1
34	2	-1	1	1	1
35	2	1	-1	-1	-1

	Réplica	A	B	C	D
36	2	1	-1	-1	1
37	2	1	-1	1	-1
38	2	1	-1	1	1
39	2	1	1	-1	-1
40	2	1	1	-1	1
41	2	1	1	1	-1
42	2	1	1	1	1
43	2	-2	0	0	0
44	2	2	0	0	0
45	2	0	-2	0	0
46	2	0	2	0	0
47	2	0	0	-2	0
48	2	0	0	2	0
49	2	0	0	0	-2
50	2	0	0	0	2
51 (C)	2	0	0	0	0
52 (C)	2	0	0	0	0
53	3	-1	-1	-1	-1
54	3	-1	-1	-1	1
55	3	-1	-1	1	-1
56	3	-1	-1	1	1
57	3	-1	1	-1	-1
58	3	-1	1	-1	1
59	3	-1	1	1	-1
60	3	-1	1	1	1
61	3	1	-1	-1	-1
62	3	1	-1	-1	1
63	3	1	-1	1	-1
64	3	1	-1	1	1
65	3	1	1	-1	-1
66	3	1	1	-1	1
67	3	1	1	1	-1
68	3	1	1	1	1
69	3	-2	0	0	0
70	3	2	0	0	0
71	3	0	-2	0	0
72	3	0	2	0	0
73	3	0	0	-2	0
74	3	0	0	2	0
75	3	0	0	0	-2
76	3	0	0	0	2
77 (C)	3	0	0	0	0

	Réplica	A	B	C	D
78 (C)	3	0	0	0	0

Planeamento Composto Central com os valores reais dos fatores.

	Réplica	Temperatura [°C]	Altura de camada [mm]	Velocidade [mm/s]	Orientação [°]
1	1	190	0,1	30	5
2	1	190	0,1	30	85
3	1	190	0,1	60	5
4	1	190	0,1	60	85
5	1	190	0,2	30	5
6	1	190	0,2	30	85
7	1	190	0,2	60	5
8	1	190	0,2	60	85
9	1	210	0,1	30	5
10	1	210	0,1	30	85
11	1	210	0,1	60	5
12	1	210	0,1	60	85
13	1	210	0,2	30	5
14	1	210	0,2	30	85
15	1	210	0,2	60	5
16	1	210	0,2	60	85
17	1	180	0,15	45	45
18	1	220	0,15	45	45
19	1	200	0,05	45	45
20	1	200	0,25	45	45
21	1	200	0,15	15	45
22	1	200	0,15	75	45
23	1	200	0,15	45	-35
24	1	200	0,15	45	125
25 (C)	1	200	0,15	45	45
26 (C)	1	200	0,15	45	45
27	2	190	0,1	30	5
28	2	190	0,1	30	85
29	2	190	0,1	60	5
30	2	190	0,1	60	85
31	2	190	0,2	30	5
32	2	190	0,2	30	85
33	2	190	0,2	60	5
34	2	190	0,2	60	85
35	2	210	0,1	30	5
36	2	210	0,1	30	85
37	2	210	0,1	60	5
38	2	210	0,1	60	85

	Réplica	Temperatura [°C]	Altura de camada [mm]	Velocidade [mm/s]	Orientação [°]
39	2	210	0,2	30	5
40	2	210	0,2	30	85
41	2	210	0,2	60	5
42	2	210	0,2	60	85
43	2	180	0,15	45	45
44	2	220	0,15	45	45
45	2	200	0,05	45	45
46	2	200	0,25	45	45
47	2	200	0,15	15	45
48	2	200	0,15	75	45
49	2	200	0,15	45	-35
50	2	200	0,15	45	125
51 (C)	2	200	0,15	45	45
52 (C)	2	200	0,15	45	45
53	3	190	0,1	30	5
54	3	190	0,1	30	85
55	3	190	0,1	60	5
56	3	190	0,1	60	85
57	3	190	0,2	30	5
58	3	190	0,2	30	85
59	3	190	0,2	60	5
60	3	190	0,2	60	85
61	3	210	0,1	30	5
62	3	210	0,1	30	85
63	3	210	0,1	60	5
64	3	210	0,1	60	85
65	3	210	0,2	30	5
66	3	210	0,2	30	85
67	3	210	0,2	60	5
68	3	210	0,2	60	85
69	3	180	0,15	45	45
70	3	220	0,15	45	45
71	3	200	0,05	45	45
72	3	200	0,25	45	45
73	3	200	0,15	15	45
74	3	200	0,15	75	45
75	3	200	0,15	45	-35
76	3	200	0,15	45	125
77 (C)	3	200	0,15	45	45
78 (C)	3	200	0,15	45	45



Provetes das três repetições do CCD

Secção 2 – Tabelas dos desvios medidos para a MSR

Desvios medidos a 0° [µm].

Nº do Caso	Réplica	Cilindricidade B (0°)	Cilindricidade C	Coaxialidade C-B	Coaxialidade D-B	Coaxialidade E-B	Paralelismo H-B	Perpendicularidade I-B
1	1	623	527	1466	89,75	46	200	92
2	1	614	1757	1904	168,75	62	537	394
3	1	795	347	695	43,25	65	205	89
4	1	800	321	735	108,25	28	467	313
5	1	1805	1845	1920	52,75	137	259	94
6	1	402	611	546	238,5	65	392	336
7	1	1352	1219	851	102,75	83	170	89
8	1	566	1077	651	196,25	103	318	230
9	1	1284	1356	739	32,25	103	194	106
10	1	298	664	1539	115	147	383	398
11	1	1227	635	1214	55,75	86	145	90
12	1	554	744	670	134,25	103	510	299
13	1	2617	2187	1579	91	158	200	106
14	1	160	599	4283	188,25	127	407	202
15	1	316	549	1096	54,25	47	187	108
16	1	1702	1597	2669	83,75	95	422	247
17	1	852	726	805	112,75	101	254	150
18	1	1069	944	809	48,25	80	247	135
19	1	935	789	20	54	91	247	114
20	1	501	642	1048	225,75	100	338	156
21	1	634	643	925	24,25	93	229	116
22	1	950	1090	5053	38,75	67	226	160
23	1	207	222	695	88,75	83	161	122
24	1	1864	2043	3157	266,25	233	515	228
25 (C)	1	471	471	1036	68,75	86	258	123
26 (C)	1	1013	484	5407	59,5	105	252	138
27	2	1175	689	376	23,5	74	228	70
28	2	672	877	1463	117,75	61	504	382
29	2	386	338	953	43,25	69	191	87
30	2	455	373	1735	99,75	113	579	417
31	2	1716	1639	2013	91,5	172	219	96
32	2	413	191	2002	213,75	96	397	206
33	2	1493	774	1083	178,5	128	151	128
34	2	299	482	745	172,25	112	451	240
35	2	1163	1431	717	40,75	106	178	94
36	2	379	1780	1354	175	94	456	305
37	2	1042	658	613	88,75	36	201	96

Nº do Caso	Réplica	Cilindricidade B (0º)	Cilindricidade C	Coaxialidade C-B	Coaxialidade D-B	Coaxialidade E-B	Paralelismo H-B	Perpendicularidade I-B
38	2	714	230	1307	135,25	126	503	426
39	2	2160	2323	1447	89,5	154	202	110
40	2	626	820	587	120,5	182	413	199
41	2	1759	2165	1135	54,5	126	162	96
42	2	2002	1985	639	113,5	107	293	280
43	2	1140	916	1743	73,5	131	253	91
44	2	959	455	1045	22,75	149	258	130
45	2	141	260	1110	54,5	37	271	111
46	2	1362	602	1047	68,25	83	262	136
47	2	227	627	1138	78,75	85	271	123
48	2	545	325	842	105	41	250	169
49	2	354	1152	564	81	136	179	92
50	2	1312	3099	1653	106	170	560	199
51 (C)	2	713	1163	891	100,5	57	281	127
52 (C)	2	996	393	4805	86,75	53	285	148
53	3	1442	1273	1663	70,5	101	239	94
54	3	634	855	1235	84	111	462	343
55	3	797	127	421	28,25	51	223	79
56	3	430	1835	2217	132,75	78	575	353
57	3	2403	2182	1335	137,25	167	256	101
58	3	1058	1063	994	154,75	142	410	245
59	3	1722	1324	588	49,75	97	183	112
60	3	608	1030	1140	146,75	106	428	248
61	3	1296	1129	686	26,75	95	194	118
62	3	417	368	874	130,5	104	455	268
63	3	1640	1298	1157	47,5	72	185	78
64	3	192	667	346	225	112	467	323
65	3	1461	1647	329	218,25	99	203	91
66	3	874	427	1284	444,75	119	431	239
67	3	809	444	1186	93,5	105	172	124
68	3	411	407	650	105,75	111	369	200
69	3	316	613	104	77,75	34	239	143
70	3	597	604	636	56,25	68	294	108
71	3	127	243	2328	79,75	43	242	113
72	3	1621	1669	883	79	181	281	164
73	3	557	576	124	27,25	67	253	119
74	3	611	257	5007	27,75	47	269	138
75	3	946	258	1275	66,25	146	167	88
76	3	1709	3476	1557	182,25	227	617	212
77 (C)	3	995	1115	600	53	59	257	118
78 (C)	3	812	712	547	31,75	60	256	132

Desvios medidos a 180° [µm].

Nº do Caso	Réplica	Coaxialidad e K-B	Coaxialidad e E-B	Paralelismo J-A	Perpendicularidad e B-A	Cilindricidad e B (180°)	Cilindricidad e K
1	1	5648	2906	79	782	249	23
2	1	3391	453	59	477	487	32
3	1	16217	1211	84	340	186	85
4	1	6122	289	42	8	508	15
5	1	2507	2682	361	141	286	73
6	1	9770	624,5	240,5	349,5	352,5	44
7	1	2367	431	176	35	191	55
8	1	1850	1158	269	640	422	23
9	1	3193	2728	222	852	222	27
10	1	2602	529	128	366	484	73
11	1	1424	543	169	269	151	93
12	1	9867	874	120	348	469	44
13	1	11922	2960	128	221	247	32
14	1	4005	973	216	1225	377	16
15	1	9775	2769	160	697	192	61
16	1	18794	1561	158	497	346	98
17	1	4621	585	67	595	463	21
18	1	1406	349	253	386	248	9
19	1	13561	2892	235	447	379	160
20	1	7883	1114	389	106	296	21
21	1	2320	988	214	424	242	15
22	1	2751	1039	161	235	382	42
23	1	1267	412	447	474	236	19
24	1	5978	828	68	553	176	39
25 (C)	1	5147	2500	158	124	320	22
26 (C)	1	9389	678	109	46	287	79
27	2	2439	2363	53	616	253	1
28	2	3519	1574	204	554	515	55
29	2	9105	1613	303	317	198	107
30	2	1830	1449	104	266	509	5
31	2	1016	2630	160	213	258	53
32	2	6864	2708	100	678	435	6
33	2	12240	1536	385	7	195	21
34	2	4343	1300	224	40	379	29
35	2	4064	2225	105	849	221	29
36	2	542	1315	189	722	401	35
37	2	971	699	69	186	179	19

Nº do Caso	Réplica	Coaxialidad e K-B	Coaxialidad e E-B	Paralelismo J-A	Perpendicularidad e B-A	Cilindricidad e B (180º)	Cilindricidad e K
38	2	3634	576	221	457	400	41
39	2	3544	4793	134	203	255	54
40	2	2252	803	305	91	335	24
41	2	6594	3284	170	73	304	16
42	2	676	456	144	137	346	24
43	2	1490	605	132	267	343	33
44	2	1785	2977	44	668	273	1
45	2	1650	1864	115	559	352	18
46	2	5625	1197	143	175	245	75
47	2	5486	1095	92	31	280	28
48	2	11248	684	50	55	272	80
49	2	9908	1288	938	292	238	41
50	2	3878	1627	141	661	138	30
51 (C)	2	4518	733	114	625	308	15
52 (C)	2	8408	1797	105	97	266	25
53	3	2986	1312	79	261	249	25
54	3	1111	1019	53	226	468	22
55	3	1816	1672	109	230	162	18
56	3	1533	738	165	580	528	36
57	3	136	430	185	66	217	44
58	3	3450	262	174	492	333	28
59	3	4855	1374	130	276	206	36
60	3	1739	685	210	507	420	0
61	3	2579	2396	54	73	224	38
62	3	2903	1430	104	253	429	60
63	3	633	1505	127	502	167	1
64	3	5023	270	142	308	449	4
65	3	6901	3688	103	919	271	39
66	3	2412	1193	217	416	352	12
67	3	8628	3053	128	270	327	15
68	3	3505	639	217	39	379	12
69	3	14138	2274	52	111	442	73
70	3	1598	886	183	80	297	14
71	3	8939	2031	121	530	368	45
72	3	2632	1810	205	390	275	32
73	3	5114	838	130	577	252	7
74	3	4623	654	112	74	389	6
75	3	4392	988	297	296	189	40
76	3	4214	992	60	386	145	24

Nº do Caso	Réplica	Coaxialidad e K-B	Coaxialidad e E-B	Paralelism o J-A	Perpendicularidad e B-A	Cilindricidad e B (180º)	Cilindricidad e K
77 (C)	3	3456	1072	137	805	292	17
78 (C)	3	13387	640	73	207	265	64

Secção 3 - Análises de variância dos dados

ANOVA; Var.:Coax C; R-sqr=.2891; Adj.:.13112 (DadosCCDCMMoutliers)
4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=278493,6
DV: Coax C

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	118666	1	118666	0,42610	0,516285
Temp (Q)	40819	1	40819	0,14657	0,703122
(2)Layer height(L)	2888406	1	2888406	10,37153	0,002025
Layer height(Q)	16350	1	16350	0,05871	0,809337
(3)Speed (L)	79933	1	79933	0,28702	0,594023
Speed (Q)	49636	1	49636	0,17823	0,674335
(4)Orient (L)	1471470	1	1471470	5,28368	0,024855
Orient (Q)	412091	1	412091	1,47971	0,228357
1L by 2L	4740	1	4740	0,01702	0,896615
1L by 3L	192660	1	192660	0,69179	0,408697
1L by 4L	527	1	527	0,00189	0,965450
2L by 3L	70917	1	70917	0,25465	0,615583
2L by 4L	274065	1	274065	0,98410	0,324984
3L by 4L	1280207	1	1280207	4,59690	0,035896
Error	17545098	63	278494		
Total SS	24680180	77			

Tabela ANOVA Coaxialidade C-B

ANOVA; Var.:Coax D; R-sqr=.35127; Adj.:.2071 (DadosCCDCMMoutliers)
4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=372852,1
DV: Coax D

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	50536	1	50536	0,135538	0,713992
Temp (Q)	12147	1	12147	0,032580	0,857341
(2)Layer height(L)	2167536	1	2167536	5,813392	0,018833
Layer height(Q)	8880	1	8880	0,023817	0,877845
(3)Speed (L)	1101252	1	1101252	2,953589	0,090598
Speed (Q)	12747	1	12747	0,034188	0,853901
(4)Orient (L)	795586	1	795586	2,133784	0,149054
Orient (Q)	3674394	1	3674394	9,854831	0,002578
1L by 2L	15787	1	15787	0,042341	0,837635
1L by 3L	71495	1	71495	0,191751	0,662961
1L by 4L	453283	1	453283	1,215717	0,274397
2L by 3L	60883	1	60883	0,163290	0,687514
2L by 4L	1244691	1	1244691	3,338297	0,072422
3L by 4L	1381596	1	1381596	3,705479	0,058752
Error	23489682	63	372852		
Total SS	36208482	77			

Tabela ANOVA Coaxialidade D-B

ANOVA; Var.:Coax E; R-sqr=,18289; Adj: ,0013 (DadosCCDCMMoutliers)
4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=1213404,
DV: Coax E

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	29081	1	29081	0,023966	0,877466
Temp (Q)	7301178	1	7301178	6,017106	0,016948
(2)Layer height(L)	245584	1	245584	0,202392	0,654341
Layer height(Q)	5344945	1	5344945	4,404919	0,039850
(3)Speed (L)	1149886	1	1149886	0,947653	0,334040
Speed (Q)	93611	1	93611	0,077147	0,782111
(4)Orient (L)	2906059	1	2906059	2,394964	0,126736
Orient (Q)	2460783	1	2460783	2,028000	0,159358
1L by 2L	793359	1	793359	0,653830	0,421790
1L by 3L	170289	1	170289	0,140340	0,709201
1L by 4L	68177	1	68177	0,056186	0,813398
2L by 3L	407930	1	407930	0,336186	0,564107
2L by 4L	136427	1	136427	0,112433	0,738505
3L by 4L	65638	1	65638	0,054094	0,816840
Error	76444435	63	1213404		
Total SS	93554175	77			

Tabela ANOVA Coaxialidade E-B (0°)

ANOVA; Var.:Paral Hi; R-sqr=,61/09; Adj: ,532 (DadosCCDCMMoutliers)
4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=1576,909
DV: Paral Hi

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	2601,0	1	2601,01	1,64943	0,203739
Temp (Q)	350,2	1	350,16	0,22205	0,639107
(2)Layer height(L)	17274,8	1	17274,76	10,95483	0,001547
Layer height(Q)	4895,7	1	4895,73	3,10464	0,082921
(3)Speed (L)	165,8	1	165,77	0,10512	0,746839
Speed (Q)	68,4	1	68,44	0,04340	0,835646
(4)Orient (L)	83011,1	1	83011,15	52,64170	0,000000
Orient (Q)	30535,7	1	30535,70	19,36428	0,000043
1L by 2L	6376,8	1	6376,78	4,04385	0,048616
1L by 3L	76,9	1	76,89	0,04876	0,825953
1L by 4L	313,9	1	313,91	0,19907	0,657006
2L by 3L	2224,3	1	2224,28	1,41053	0,239426
2L by 4L	5224,0	1	5223,97	3,31279	0,073494
3L by 4L	64,8	1	64,75	0,04106	0,840071
Error	99345,2	63	1576,91		
Total SS	259450,4	77			

Tabela ANOVA Paralelismo H-B

ANOVA; Var.:Perp I; R-sqr=,61448; Adj:,52881 (DadosCCDCMMoutlyers)
 4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=855,0485
 DV: Perp I

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	2178,0	1	2178,00	2,54722	0,115493
Temp (Q)	1665,0	1	1665,01	1,94727	0,167781
(2)Layer height(L)	19800,5	1	19800,50	23,15717	0,000010
Layer height(Q)	1047,3	1	1047,31	1,22486	0,272617
(3)Speed (L)	7938,0	1	7938,00	9,28368	0,003375
Speed (Q)	69,6	1	69,59	0,08138	0,776369
(4)Orient (L)	6234,7	1	6234,72	7,29166	0,008886
Orient (Q)	29260,6	1	29260,65	34,22104	0,000000
1L by 2L	2080,3	1	2080,33	2,43300	0,123815
1L by 3L	456,3	1	456,33	0,53369	0,467767
1L by 4L	2408,3	1	2408,33	2,81660	0,098248
2L by 3L	1260,8	1	1260,75	1,47448	0,229173
2L by 4L	2268,7	1	2268,75	2,65336	0,108322
3L by 4L	2106,7	1	2106,75	2,46390	0,121499
Error	53868,1	63	855,05		
Total SS	139728,4	77			

Tabela ANOVA Perpendicularidade I-B

ANOVA; Var.:Cilind B; R-sqr=,9059; Adj:,88498 (DadosCCDCMMoutlyers)
 4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=1775,281
 DV: Circul B

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	5287,3	1	5287,3	2,9783	0,089289
Temp (Q)	754,2	1	754,2	0,4248	0,516906
(2)Layer height(L)	12090,1	1	12090,1	6,8103	0,011309
Layer height(Q)	3182,8	1	3181,8	1,7923	0,185457
(3)Speed (L)	1160,0	1	1160,0	0,6534	0,421933
Speed (Q)	177,7	1	176,7	0,0995	0,753455
(4)Orient (L)	948294,0	1	948294,0	534,1656	0,000000
Orient (Q)	50468,1	1	50468,1	28,4282	0,000001
1L by 2L	2626,5	1	2625,5	1,4789	0,228479
1L by 3L	111,0	1	111,0	0,0625	0,803344
1L by 4L	305,0	1	305,0	0,1718	0,679911
2L by 3L	10651,5	1	10650,5	5,9993	0,017104
2L by 4L	26933,7	1	26932,7	15,1709	0,000240
3L by 4L	5655,0	1	5655,0	3,1854	0,079112
Error	111843,3	63	1775,3		
Total SS	1188506,4	77			

Tabela ANOVA Circularidade B (0°)

ANOVA; Var.: Cilind C; R-sqr=,71186; Adj: 64/83 (DadosCCDCMMoutliers)
 4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=3127,75
 DV: Circul C

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	696,9	1	696,9	0,2228	0,638539
Temp (Q)	3715,6	1	3715,6	1,1879	0,279897
(2)Layer height(L)	13448,0	1	13448,0	4,2996	0,042216
Layer height(Q)	5200,1	1	5200,1	1,6626	0,201972
(3)Speed (L)	1369,4	1	1369,4	0,4378	0,510590
Speed (Q)	6635,5	1	6635,5	2,1215	0,150212
(4)Orient (L)	402902,7	1	402902,7	128,8155	0,000000
Orient (Q)	13556,8	1	13556,8	4,3344	0,041418
1L by 2L	10,1	1	10,1	0,0032	0,954901
1L by 3L	574,1	1	574,1	0,1835	0,669805
1L by 4L	2914,1	1	2914,1	0,9317	0,338116
2L by 3L	320,3	1	320,3	0,1024	0,750008
2L by 4L	49665,3	1	49665,3	15,8789	0,000178
3L by 4L	161,3	1	161,3	0,0516	0,821070
Error	197048,3	63	3127,8		
Total SS	683857,3	77			

Tabela ANOVA Circularidade C

ANOVA; Var.:Coax K; R-sqr=,13598; Adj:0, (DadosCCDCMMoutlyers)
 4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=169479E2
 DV: Coax K

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	6,319605E+06	1	6319605	0,372884	0,543633
Temp (Q)	4,297965E+07	1	42979652	2,535985	0,116283
(2)Layer height(L)	6,109260E+06	1	6109260	0,360473	0,550398
Layer height(Q)	3,830772E+06	1	3830772	0,226032	0,636126
(3)Speed (L)	4,230314E+07	1	42303135	2,496067	0,119139
Speed (Q)	2,111271E+07	1	21112711	1,245741	0,268607
(4)Orient (L)	7,230771E+06	1	7230771	0,426647	0,516016
Orient (Q)	2,672100E+07	1	26721002	1,576654	0,213880
1L by 2L	4,437707E+07	1	44377071	2,618439	0,110625
1L by 3L	4,230469E+04	1	42305	0,002496	0,960311
1L by 4L	2,899359E+06	1	2899359	0,171075	0,680563
2L by 3L	1,420275E+05	1	142028	0,008380	0,927351
2L by 4L	6,954019E+04	1	69540	0,004103	0,949128
3L by 4L	2,800917E+06	1	2800917	0,165266	0,685731
Error	1,067719E+09	63	16947914		
Total SS	1,235750E+09	77			

Tabela ANOVA Coaxialidade K-B

ANOVA; Var.:Coax E; R-sqr=,39701; Adj:,26301 (DadosCCDCMMoutlyers)
 4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=650230,6
 DV: Coax E

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	1484508	1	1484508	2,28305	0,135795
Temp (Q)	176478	1	176478	0,27141	0,604215
(2)Layer height(L)	343275	1	343275	0,52793	0,470170
Layer height(Q)	1944848	1	1944848	2,99101	0,088625
(3)Speed (L)	3293675	1	3293675	5,06540	0,027907
Speed (Q)	88150	1	88150	0,13557	0,713962
(4)Orient (L)	9684767	1	9684767	14,89436	0,000270
Orient (Q)	1983	1	1983	0,00305	0,956130
1L by 2L	2930655	1	2930655	4,50710	0,037690
1L by 3L	226394	1	226394	0,34817	0,557259
1L by 4L	3062068	1	3062068	4,70920	0,033780
2L by 3L	228321	1	228321	0,35114	0,555590
2L by 4L	910390	1	910390	1,40010	0,241152
3L by 4L	1517452	1	1517452	2,33371	0,131605
Error	40964527	63	650231		
Total SS	67935163	77			

Tabela ANOVA Coaxialidade E-B (180°)

ANOVA; Var.:Paral J; R-sqr=.33715; Adj.:.18985 (DadosCCDCMMoutlyers)
 4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=6334,644
 DV: Paral J

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	796,7	1	796,67	0,12576	0,724050
Temp (Q)	2,9	1	2,88	0,00045	0,983066
(2)Layer height(L)	69844,5	1	69844,53	11,02580	0,001498
Layer height(Q)	20199,5	1	20199,49	3,18873	0,078960
(3)Speed (L)	302,2	1	302,17	0,04770	0,827819
Speed (Q)	45,5	1	45,51	0,00718	0,932719
(4)Orient (L)	25745,6	1	25745,59	4,06425	0,048069
Orient (Q)	38217,3	1	38217,29	6,03306	0,016809
1L by 2L	15069,8	1	15069,80	2,37895	0,127989
1L by 3L	5929,6	1	5929,63	0,93606	0,336992
1L by 4L	15105,3	1	15105,26	2,38455	0,127549
2L by 3L	1615,9	1	1615,88	0,25509	0,615279
2L by 4L	649,0	1	649,01	0,10245	0,749964
3L by 4L	2140,0	1	2140,01	0,33783	0,563161
Error	399082,6	63	6334,64		
Total SS	602068,8	77			

Tabela ANOVA Paralelismo J-A

ANOVA; Var.:Perp B A; R-sqr=.21685; Adj.:.04281 (DadosCCDCMMoutlyers)
 4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=62900,8
 DV: Perp B A

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	66826	1	66825,6	1,062396	0,306610
Temp (Q)	8956	1	8956,1	0,142385	0,707189
(2)Layer height(L)	154893	1	154892,5	2,462489	0,121603
Layer height(Q)	15572	1	15572,0	0,247565	0,620527
(3)Speed (L)	397906	1	397906,3	6,325934	0,014462
Speed (Q)	14337	1	14337,1	0,227932	0,634714
(4)Orient (L)	76995	1	76995,4	1,224077	0,272769
Orient (Q)	68631	1	68631,3	1,091103	0,300218
1L by 2L	13855	1	13855,0	0,220268	0,640456
1L by 3L	13250	1	13250,1	0,210651	0,647837
1L by 4L	66640	1	66640,3	1,059450	0,307276
2L by 3L	3737	1	3736,5	0,059403	0,808234
2L by 4L	152156	1	152156,4	2,418990	0,124882
3L by 4L	17	1	16,9	0,000269	0,986966
Error	3962751	63	62900,8		
Total SS	5059987	77			

Tabela ANOVA Perpendicularidade B-A

ANOVA; Var.: Cilind B; R-sqr=.59986; Adj;.51094 (DadosCCDCMMoutlyers)
 4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=5085,012
 DV: Circul B

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	24920,3	1	24920,3	4,90073	0,030473
Temp (Q)	20007,1	1	20007,1	3,93453	0,051666
(2)Layer height(L)	21649,3	1	21649,3	4,25748	0,043204
Layer height(Q)	9200,3	1	9200,3	1,80930	0,183414
(3)Speed (L)	737,9	1	737,9	0,14512	0,704528
Speed (Q)	4405,0	1	4405,0	0,86627	0,355542
(4)Orient (L)	257462,9	1	257462,9	50,63173	0,000000
Orient (Q)	20500,6	1	20500,6	4,03157	0,048949
1L by 2L	6359,5	1	6359,5	1,25064	0,267677
1L by 3L	166,9	1	166,9	0,03282	0,856825
1L by 4L	10193,8	1	10193,8	2,00467	0,161741
2L by 3L	1686,3	1	1686,3	0,33161	0,566762
2L by 4L	57304,6	1	57304,6	11,26932	0,001340
3L by 4L	9647,5	1	9647,5	1,89724	0,173261
Error	320355,7	63	5085,0		
Total SS	800603,6	77			

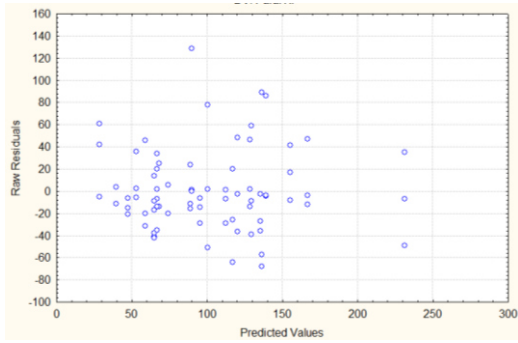
Tabela ANOVA Cilindricidade B (180°)

ANOVA; Var.: Cilind C; R-sqr=.15116; Adj;0, (DadosCCDCMMoutlyers)
 4 factors, 1 Blocks, 78 Runs; MS Residual=830,4149
 DV: Circul C

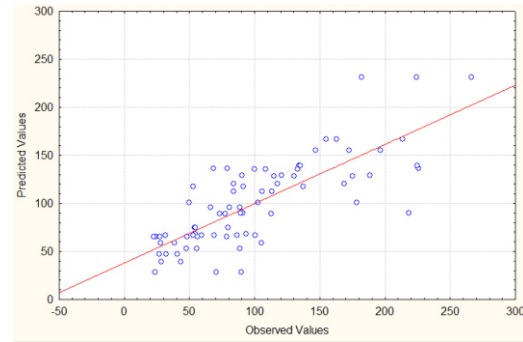
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temp (L)	425,35	1	425,347	0,512210	0,476828
Temp (Q)	505,70	1	505,698	0,608970	0,438098
(2)Layer height(L)	960,68	1	960,681	1,156868	0,286218
Layer height(Q)	1429,94	1	1429,940	1,721959	0,194202
(3)Speed (L)	396,68	1	396,681	0,477690	0,492010
Speed (Q)	205,83	1	205,834	0,247869	0,620313
(4)Orient (L)	806,68	1	806,681	0,971419	0,328097
Orient (Q)	96,52	1	96,516	0,116226	0,734299
1L by 2L	50,02	1	50,021	0,060236	0,806921
1L by 3L	25,52	1	25,521	0,030733	0,861400
1L by 4L	1463,02	1	1463,021	1,761795	0,189191
2L by 3L	143,52	1	143,521	0,172830	0,679021
2L by 4L	402,52	1	402,521	0,484723	0,488852
3L by 4L	567,19	1	567,188	0,683017	0,411669
Error	52316,14	63	830,415		
Total SS	616327,2	77			

Tabela ANOVA Cilindricidade K

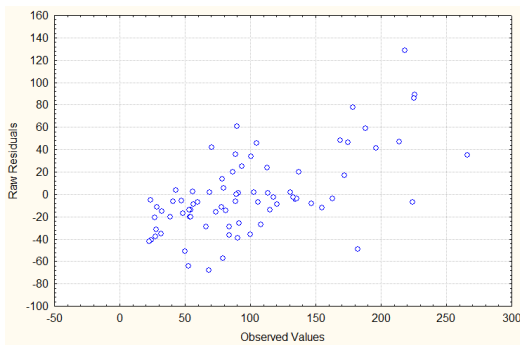
Secção 4 - Análise de Normalidade



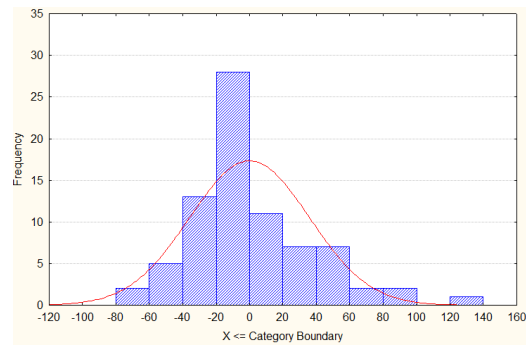
Valores Previstos vs Resíduos - Paralelismo H-B



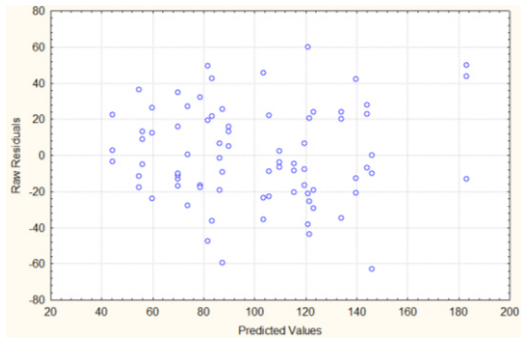
Valores Observados vs Previstos - Paralelismo H-B



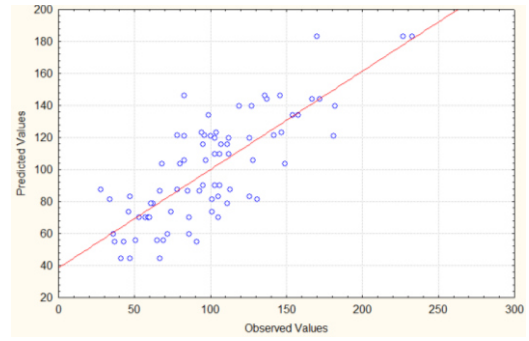
Valores Observados vs Resíduos - Paralelismo H-B



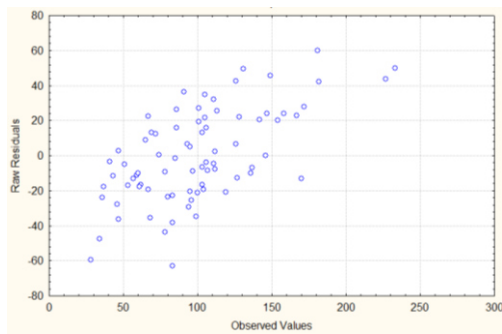
Histograma - Paralelismo H-B



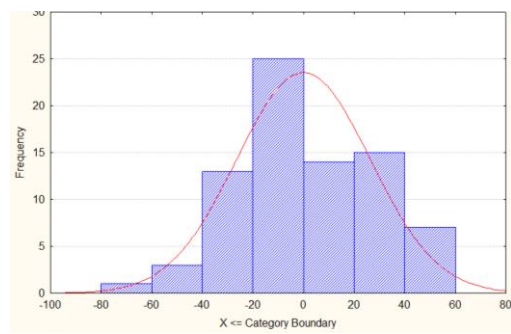
Valores Previstos vs Resíduos - Perpendicularidade I-B



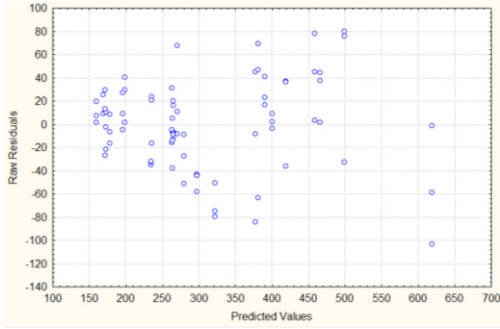
Valores Observados vs Previstos – Perpendicularidade I-B



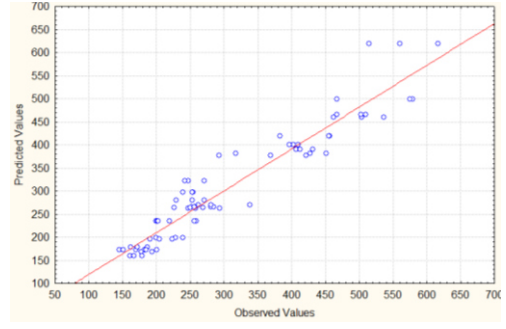
Valores Observados vs Resíduos - Perpendicularidade I-B



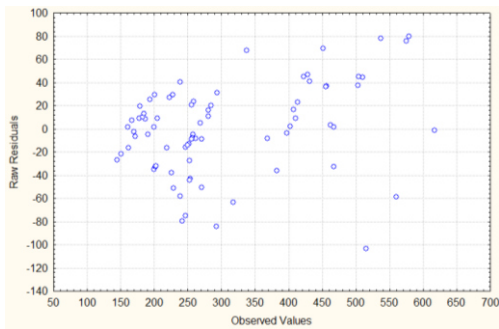
Histograma - Perpendicularidade I-B



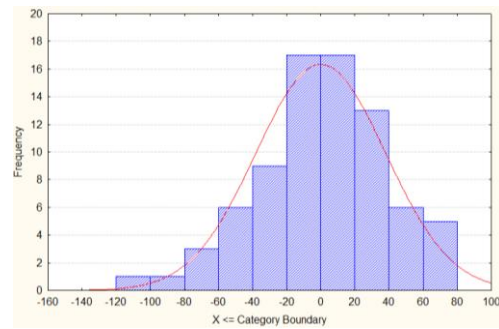
Valores Previstos vs Resíduos - Cilindricidade B (0°)



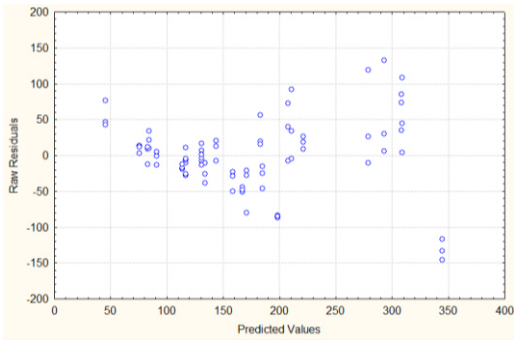
Valores Observados vs Resíduos - Cilindricidade B (0°)



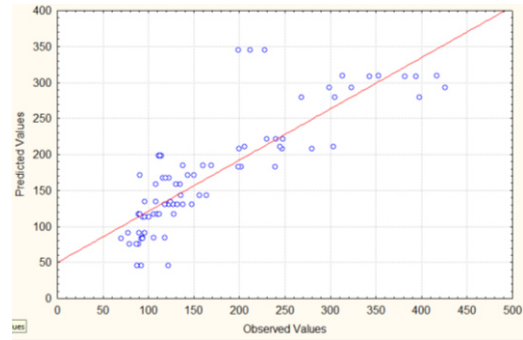
Valores Observados vs Resíduos - Cilindricidade B (0°)



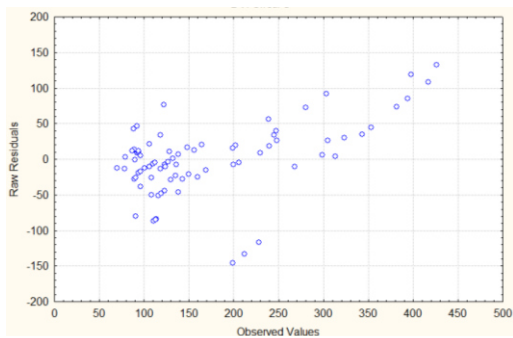
Histograma - Cilindricidade B (0°)



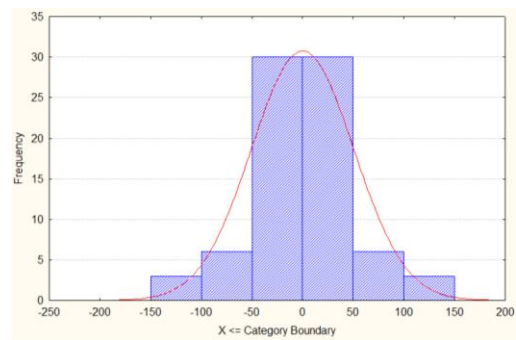
Valores Previstos vs Resíduos - Cilindricidade C



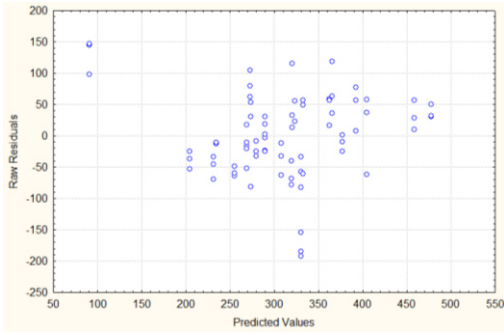
Valores Observados vs Previstos - Cilindricidade C



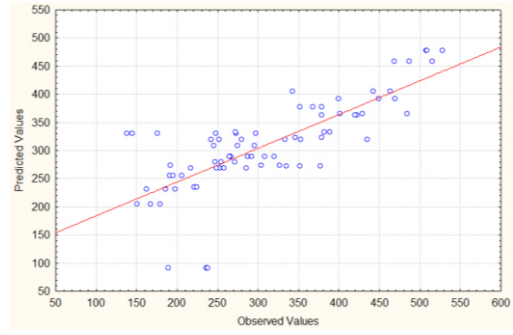
Valores Observados vs Resíduos - Cilindricidade C



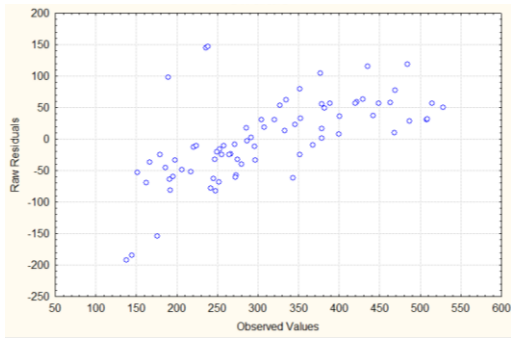
Histograma - Cilindricidade C



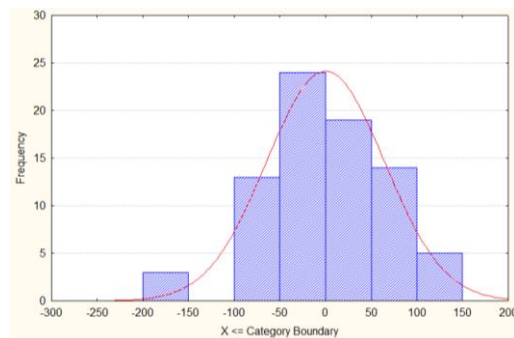
Valores Previstos vs Resíduos - Cilindricidade B (180°)



Valores Observados vs Previstos - Cilindricidade B (180°)



Valores Observados vs Resíduos - Cilindricidade B (180°)



Histograma - Cilindricidade B (180°)

Secção 5 - Gráficos de Pareto

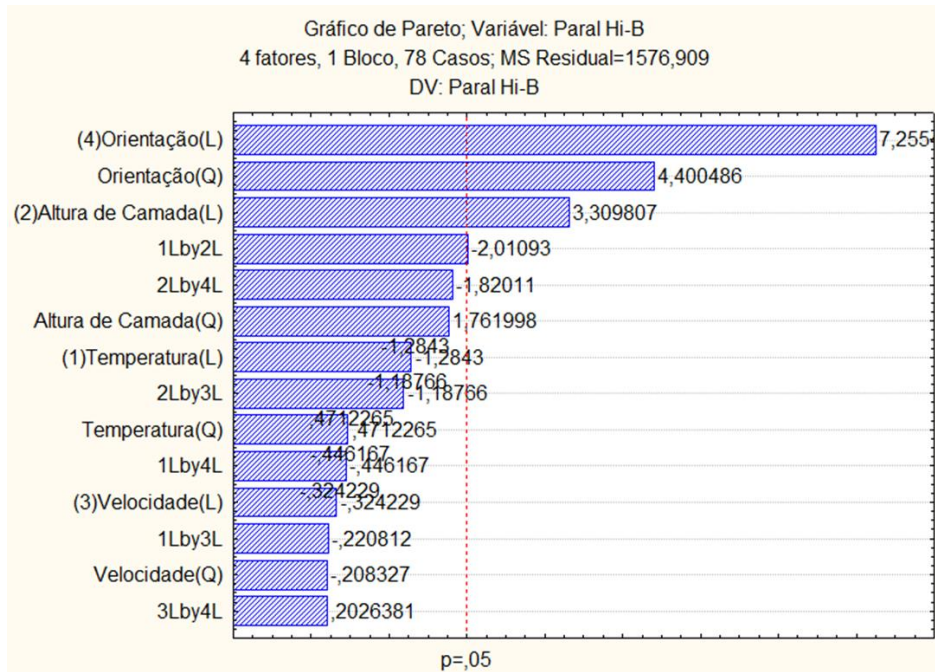


Gráfico de Pareto - Paralelismo Hi-B

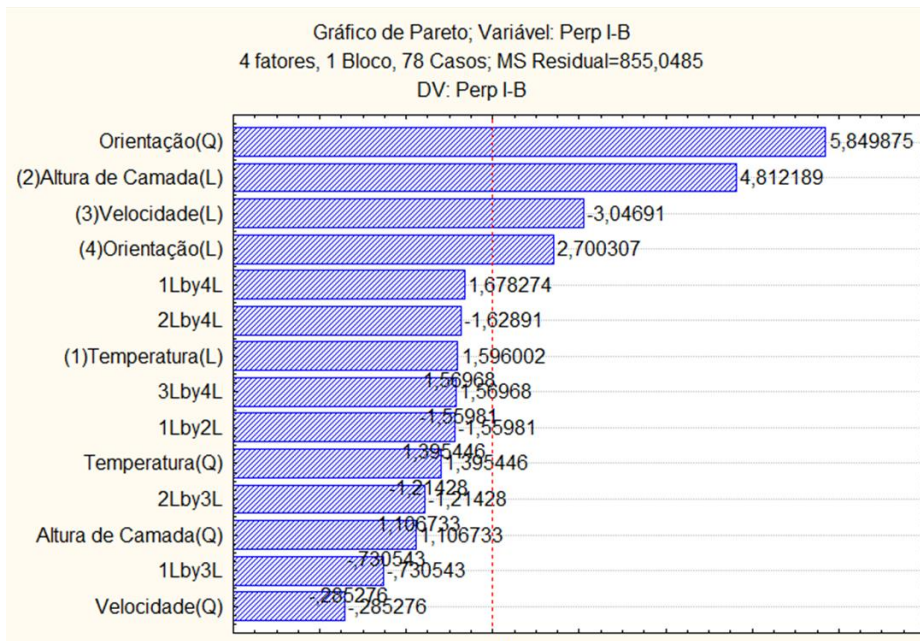


Gráfico de Pareto - Perpendicularidade I-B

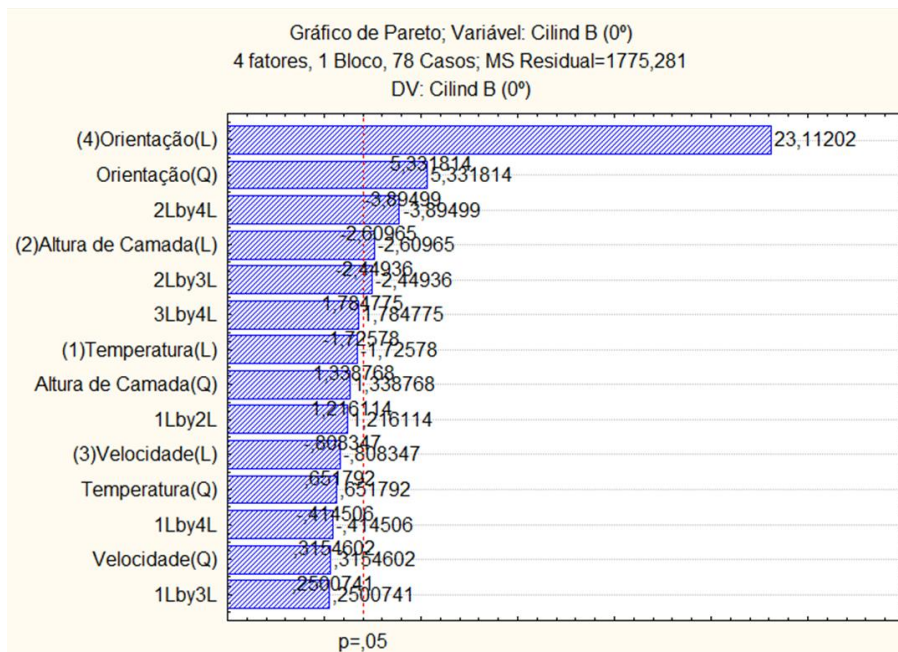


Gráfico de Pareto - Cilindricidade B (0°)

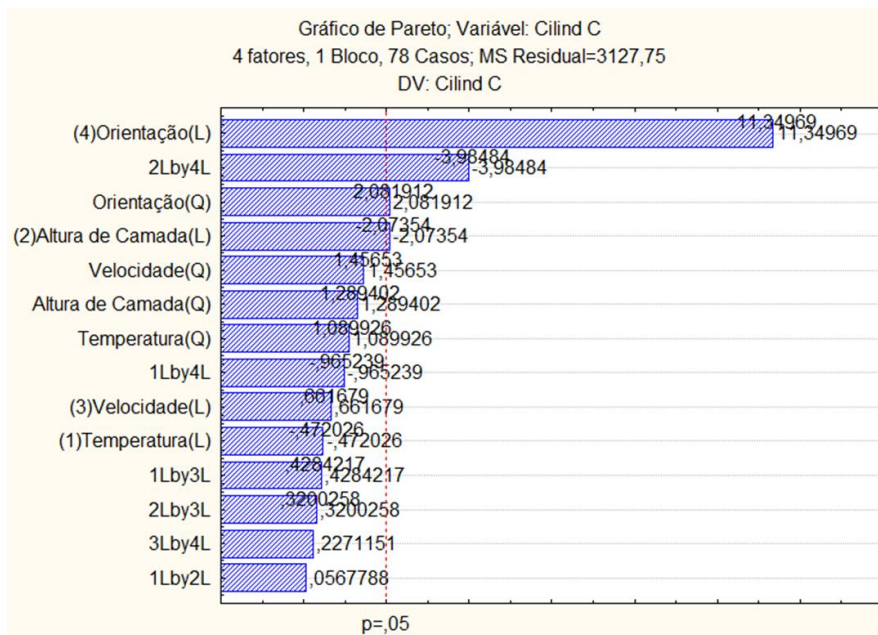


Gráfico de Pareto - Cilindricidade C

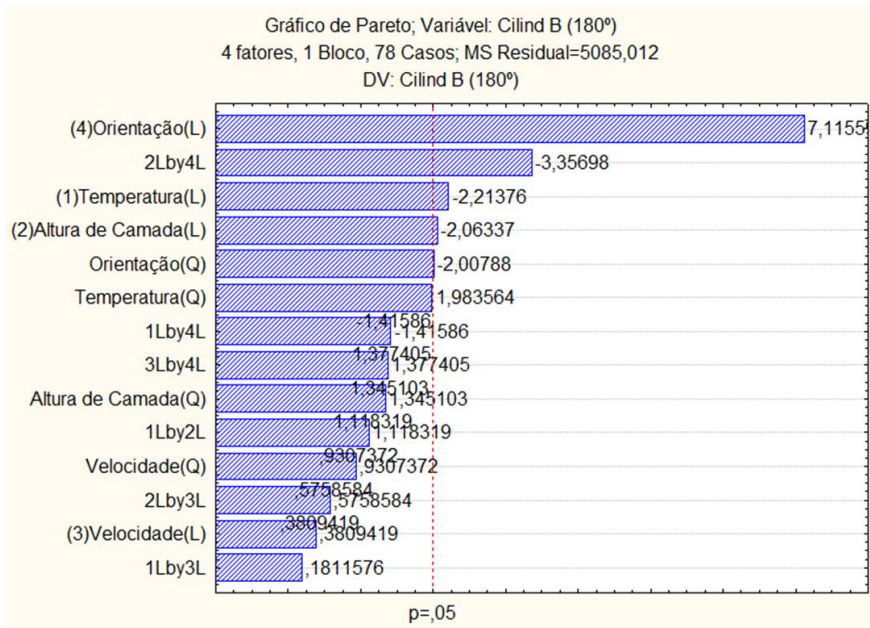


Gráfico de Pareto - Cilindricidade B (180°)

Secção 6 - Coeficientes da Regressão

Coeficientes de Regressão: Var. Paral H-B; R-sqr= 54929; Adj. 5246 (DadosCCDCMMoutlyers)						
4 fatores, 1 Blocos, 78 casos, MS Residual=1601,869						
DV: Paral H-B						
Factor	Regressn Coeff.	Std Err.	t(73)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	79,4077	6,175738	12,85802	0,000000	67,0995	91,71597
(2)Altura de Camada(L)	15,4896	4,716798	3,28392	0,001574	6,0890	24,89015
(4)Orientação(L)	33,9549	4,716798	7,19871	0,000000	24,5543	43,35543
Orientação(Q)	21,5027	4,545220	4,73084	0,000011	12,4441	30,56134
2L by 2L	-11,5260	5,776874	-1,99520	0,049753	-23,0393	-0,01275

Coeficientes de Regressão – Paralelismo H-B

Coeficientes de Regressão: Var. Perp I-B; R-sqr= 49979; Adj. 47238 (DadosCCDCMMoutlyers)						
4 fatores, 1 Blocos, 78 Casos, MS Residual=957,4404						
DV: Perp I-B						
Factor	Regressn Coeff.	Std Err.	t(73)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	80,2381	4,774537	16,80542	0,000000	70,7225	89,75373
(2)Altura de Camada(L)	16,5833	3,646613	4,54760	0,000021	9,3156	23,85102
(3)Velocidade(L)	-10,5000	3,646613	-2,87938	0,005225	-17,7677	-3,23231
(4)Orientação(L)	9,3056	3,646613	2,55184	0,012809	2,0379	16,57324
Orientação(Q)	21,5060	3,513964	6,12014	0,000000	14,5026	28,50927

Coeficientes de Regressão – Perpendicularidade I- B

Coeficientes de Regressão: Var. Cilind B (0°); R-sqr= 89028; Adj. 88266 (DadosCCDCMMoutlyers)						
4 fatores, 1 Blocos, 78 Casos, MS Residual=1811,191						
DV: Cilind B (0°)						
Factor	Regressn Coeff.	Std Err.	t(72)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	280,1786	6,566856	42,66556	0,000000	267,0878	293,2694
(2)Altura de Camada(L)	-12,9583	5,015519	-2,58365	0,011806	-22,9566	-2,9601
(4)Orientação(L)	114,7639	5,015519	22,88176	0,000000	104,7656	124,7621
Orientação(Q)	27,8482	4,833075	5,76201	0,000000	18,2137	37,4828
2L by 3L	-14,8958	6,142731	-2,42495	0,017820	-27,1411	-2,6505
2L by 4L	-23,6875	6,142731	-3,85618	0,000248	-35,9328	-11,4422

Coeficientes de Regressão – Cilindricidade B (0°)

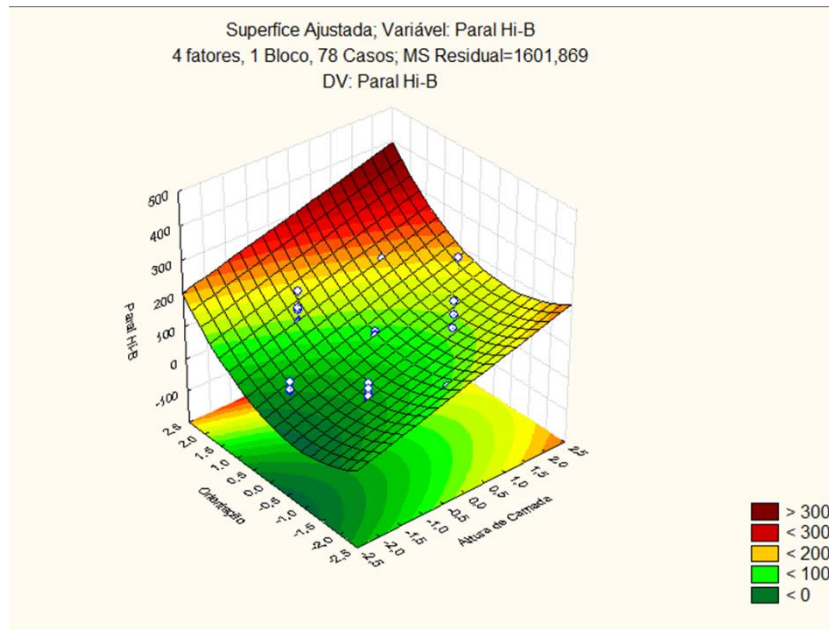
Coeficientes de Regressão: Var. Cilind C; R-sqr= 6907; Adj. 67375 (DadosCCDCMMoutlyers)						
4 fatores, 1 Blocos, 78 Casos, MS Residual=2897,483						
DV: Cilind C						
Factor	Regressn Coeff.	Std Err.	t(73)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	164,8810	8,305882	19,85111	0,000000	148,3274	181,4346
(2)Altura de Camada(L)	-13,6667	6,343723	-2,15436	0,034512	-26,3097	-1,0236
(4)Orientação(L)	74,8056	6,343723	11,79206	0,000000	62,1625	87,4486
Orientação(Q)	9,0317	6,112964	1,47747	0,143850	-3,1514	21,2149
2L by 4L	-32,1667	7,769442	-4,14015	0,000092	-47,6511	-16,6822

Coeficientes de Regressão – Cilindricidade C

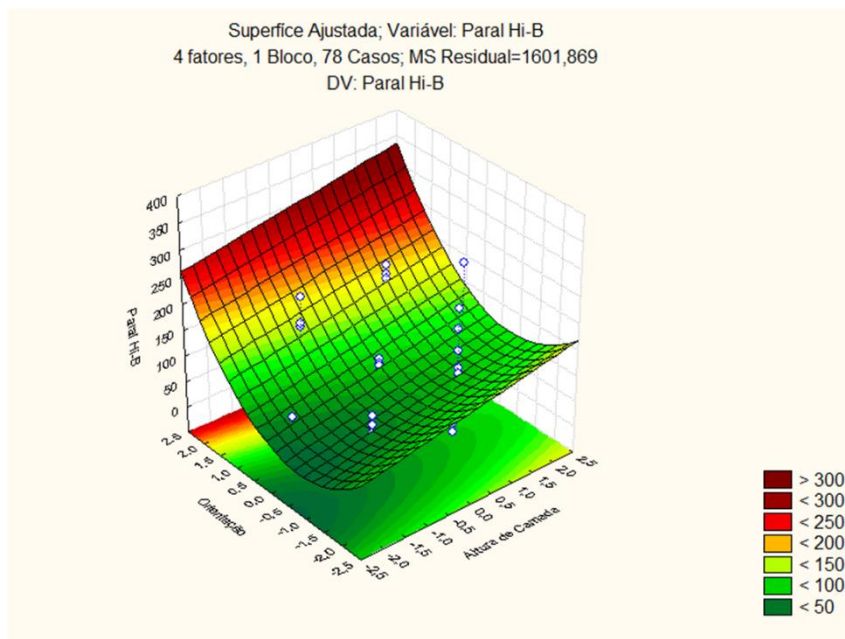
Coeficientes de Regressão: Var. Cilind B (180°); R-sqr= 53722; Adj. 50509 (DadosCCDCMMoutlyers)						
4 fatores, 1 Blocos, 78 Casos, MS Residual=5145,838						
DV: Cilind B (180°)						
Factor	Regressn Coeff.	Std Err.	t(72)	p	-95, % Cnf.Limt	+95, % Cnf.Limt
Mean/Interc.	337,6369	11,06887	30,50328	0,000000	315,5715	359,7023
(1)Temperatura(L)	-18,8042	8,45399	-2,20064	0,030970	-35,4569	-1,7514
(2)Altura de Camada(L)	-17,3403	8,45399	-2,05113	0,043893	-34,1930	-0,4876
(4)Orientação(L)	59,7998	8,45399	7,07342	0,000000	42,9469	76,6513
Orientação(Q)	-29,7803	8,14647	-3,65660	0,000484	-46,0199	-13,5406
2L by 4L	-34,5521	10,35398	-3,33708	0,001342	-55,1924	-13,9118

Coeficientes de Regressão – Cilindricidade B (180°)

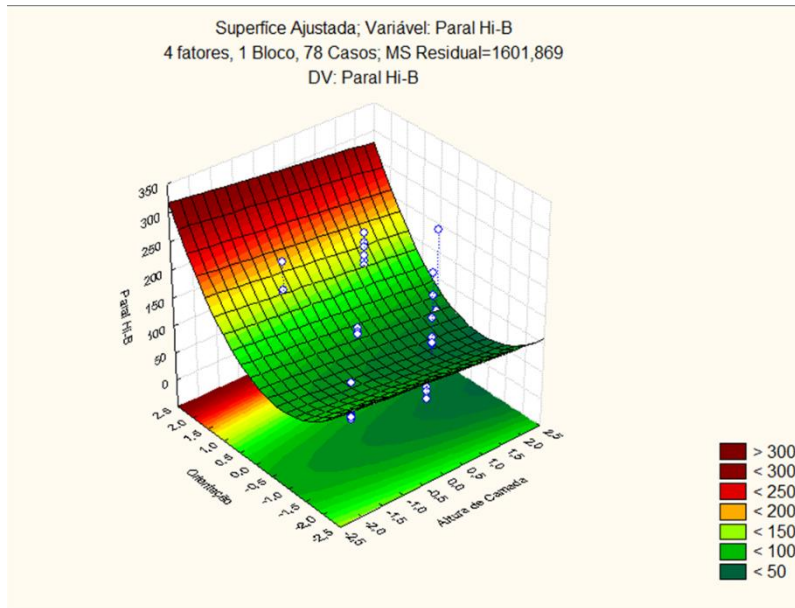
Secção 7 - Superfícies de Resposta



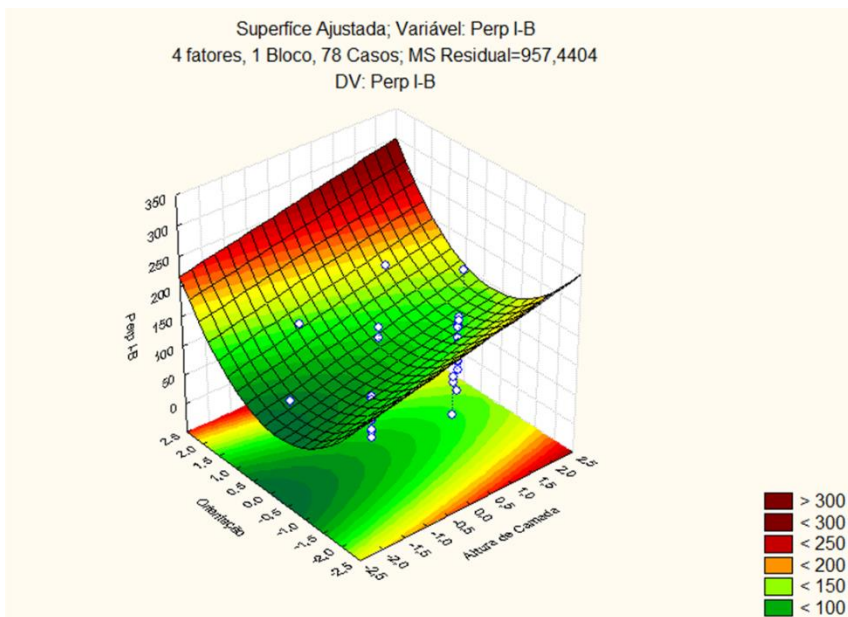
Superfície de Resposta Paralelismo H-B com
Temperatura = -2



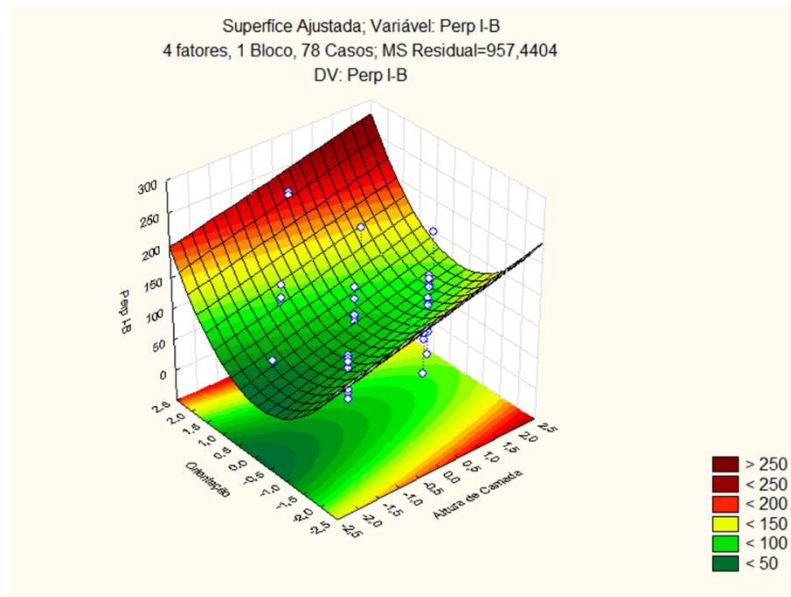
Superfície de Resposta Paralelismo H-B com
Temperatura = 0



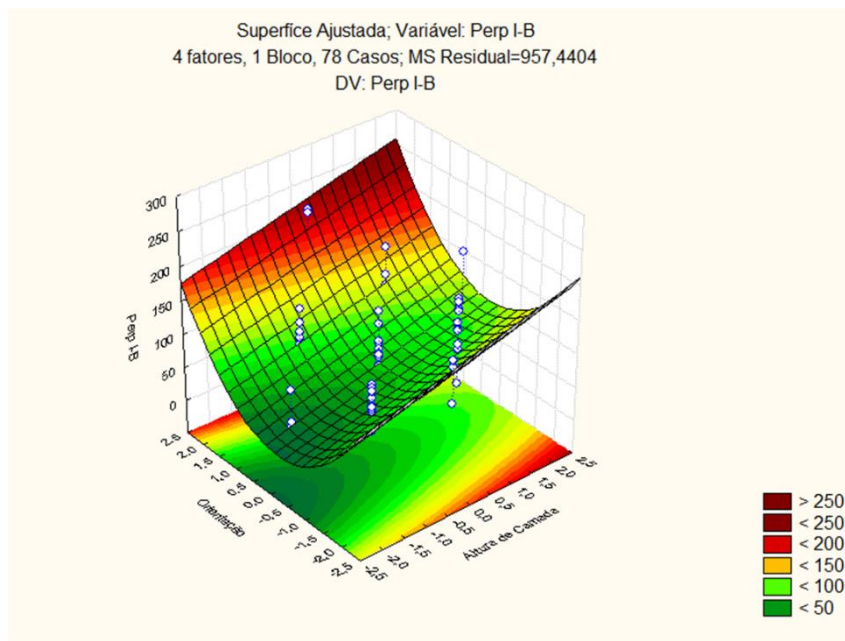
Superfície de Resposta Paralelismo H-B com
 Temperatura = 2



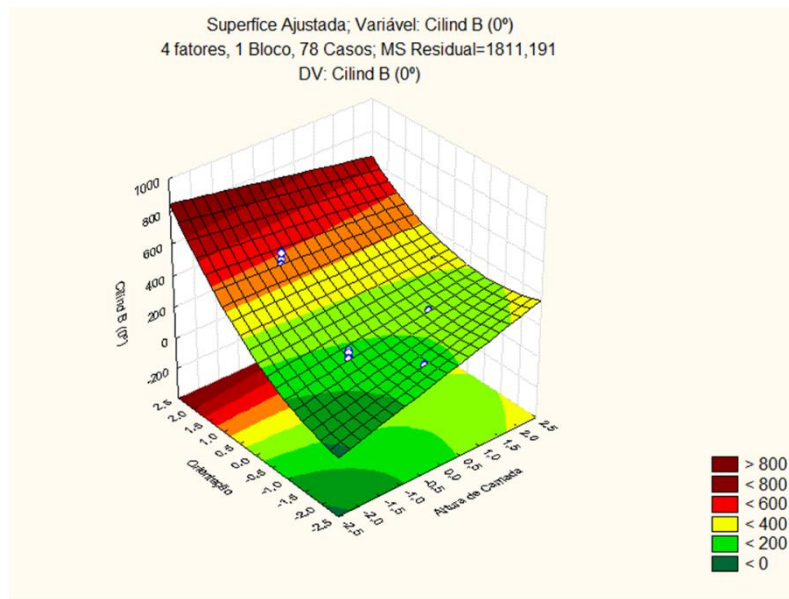
Superfície de Resposta Perpendicularidade I-B com
 Velocidade = -2



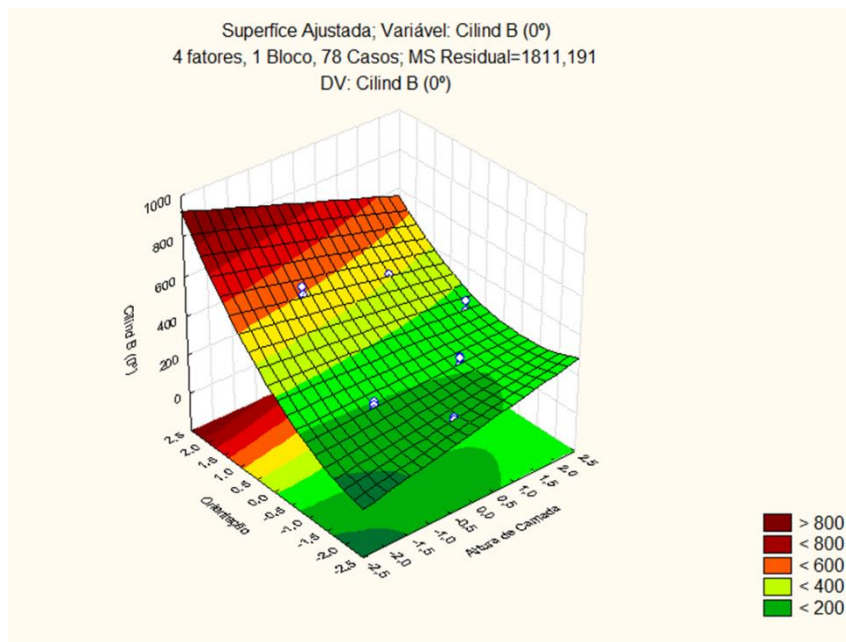
Superfície de Resposta Perpendicularidade I-B com
 Velocidade = 0



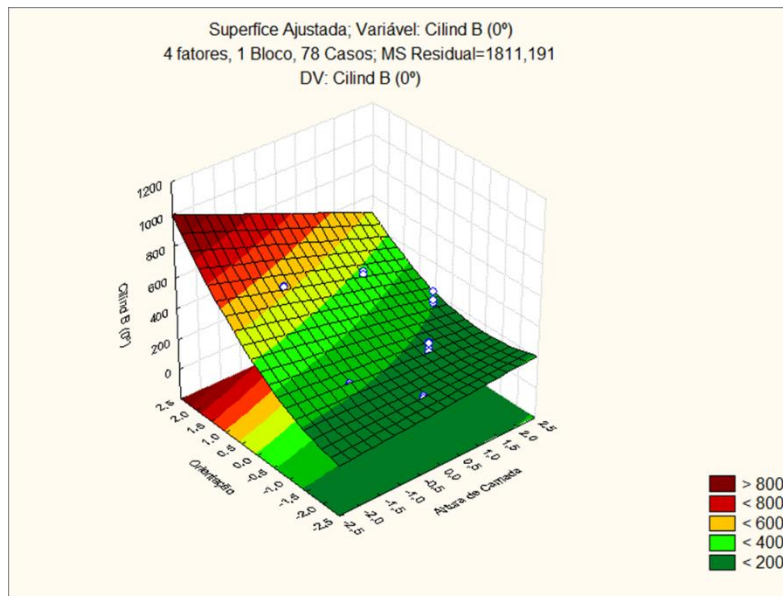
Superfície de Resposta Perpendicularidade I-B com
 Velocidade = 2



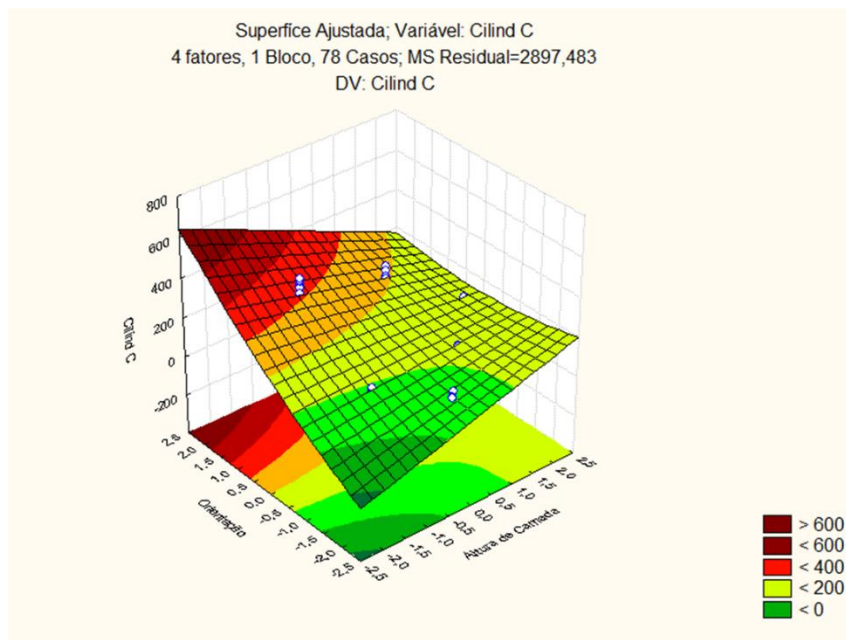
Superfície de Resposta Cilindricidade B (0°) com Velocidade = -2



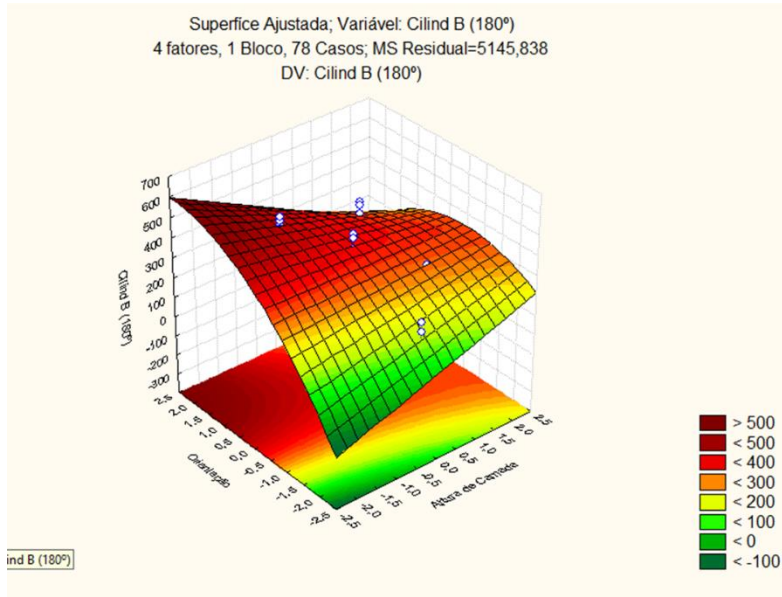
Superfície de Resposta Cilindricidade B (0°) com Velocidade = 0



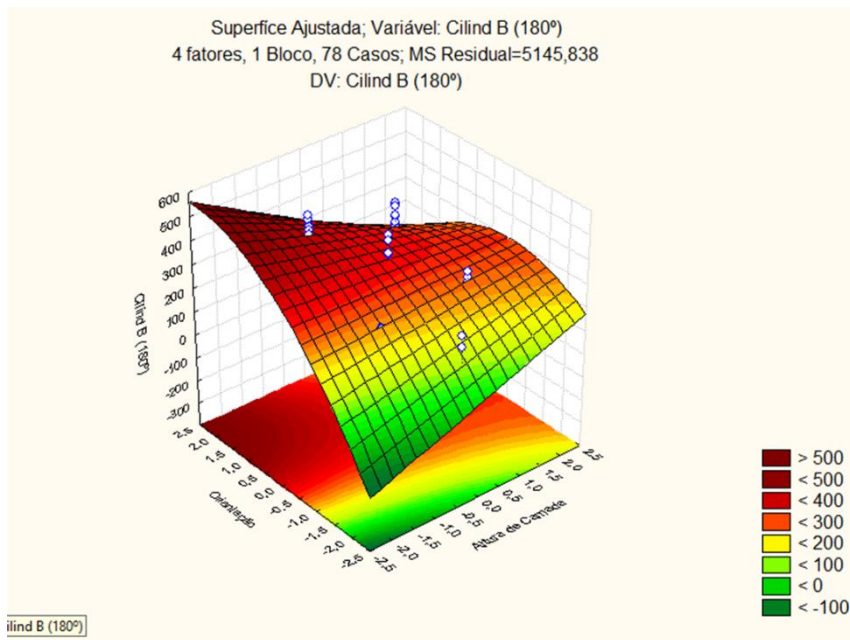
Superfície de Resposta Cilindricidade B (0°) com Velocidade = 2



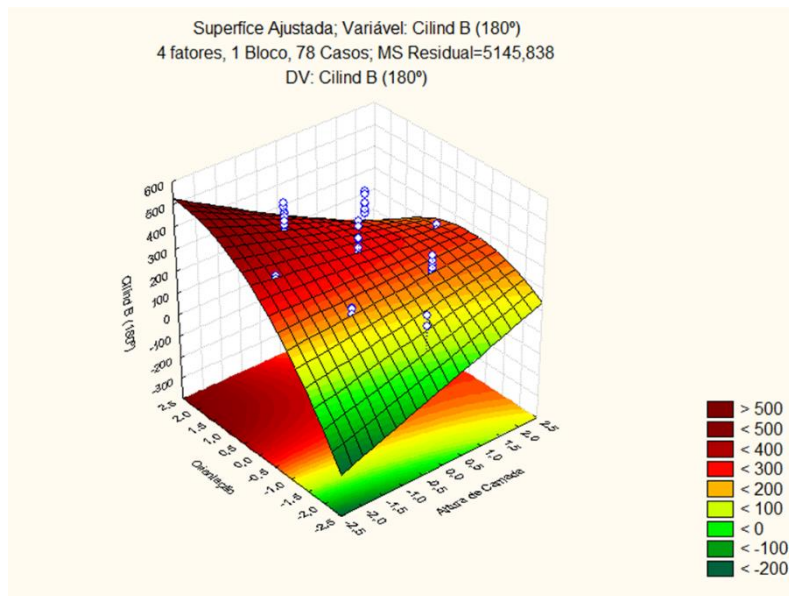
Superfície de Resposta Cilindricidade C



Superfície de Resposta Cilindricidade B (180°) com
 Temperatura = -2



Superfície de Resposta Cilindricidade B (180°) com
 Temperatura = 0



Superfície de Resposta Cilindricidade B (180°) com
Temperatura = 2