



PROGRAMA FRANCISCO EDUARDO MOURÃO SABOYA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

Análise da influência dos efeitos de forma,  
alinhamento, quantidade, área de defeitos e tipo de  
material nas propriedades mecânicas de materiais  
poliméricos produzidos por manufatura aditiva

Reinaldo Lube Filho

Niterói - RJ

2023



Reinaldo Lube Filho

Análise da influência dos efeitos de forma,  
alinhamento, quantidade, área de defeitos e tipo de  
material nas propriedades mecânicas de materiais  
poliméricos produzidos por manufatura aditiva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Antonio Henrique M. F. Thomé da Silva, D.Sc.

Universidade Federal Fluminense

Niterói - RJ

2023

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

F478a Filho, Reinaldo Lube  
Análise da influência dos efeitos de forma, alinhamento, quantidade, área de defeitos e tipo de material nas propriedades mecânicas de materiais poliméricos produzidos por manufatura aditiva / Reinaldo Lube Filho. - 2023.  
276 p.: il.

Orientador: Antonio Henrique M. F. Thomé Da Silva.  
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2023.

1. Manufatura Aditiva. 2. Impressão 3D. 3. Comportamento Mecânico. 4. Materiais Poliméricos. 5. Produção intelectual. I. Da Silva, Antonio Henrique M. F. Thomé, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD - XXX

Análise da influência dos efeitos de forma,  
alinhamento, quantidade, área de defeitos e tipo de  
material nas propriedades mecânicas de materiais  
poliméricos produzidos por manufatura aditiva

Esta dissertação é parte dos pré-requisitos para a obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Aprovada em sua forma final pela Banca Examinadora formada pelos  
professores:

---

Prof. Antonio Henrique M. F. Thomé  
da Silva, D.Sc. (Orientador)  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Heraldo Silva da Costa Mattos,  
(Ph.D.)  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Ana Lúcia Nazareth da Silva,  
(D.Sc.)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro



*Dedico este trabalho à memória  
do meu pai, Reinaldo Lube.*



# Agradecimentos

Agradeço a minha esposa, Suane, e filhos, Ravi, Iara e Tainá, pelo amor, suporte, incentivo e paciência durante todo o curso e no desenvolvimento deste trabalho. Vocês são e serão para sempre meu porto seguro.

Aos meus pais, Reinaldo Lube (em memória) e Maria Olinda, pelo amor, firmeza, dedicação e paciência foram cruciais na minha formação moral e intelectual. A minha irmã Larissa pelos incentivos.

Ao Professor e orientador Antonio Henrique, pela orientação, incentivo, confiança, amizade e, principalmente, paciência.

Aos SC Vilson e Baeta, meus orientadores técnicos no IPqM, que foram, desde o início dos trabalhos, grandes incentivadores. Obrigado pela disposição, confiança e, em especial, amizade.

Ao confrade e ex-diretor do IPqM, CMG(EN) Affonso, pelos conselhos e amizade.

À atual diretora do IPqM, CMG(EN) Carla, pela orientação, conselhos e confiança.

Ao CF(EN) Melo, que me incentivou desde o início desta jornada e sempre esteve disposto a ajudar.

Ao CT(EN) Paulo Arthur, meu braço direito na divisão de mecânica aplicada do IPqM, pela grande ajuda nas impressões e disponibilidade.

Ao SC Celso, que me ajudou na configuração de impressão dos corpos de prova, e com muita paciência, me deu uma verdadeira aula de impressão 3D. Agradeço a amizade, paciência e incentivo.

Ao SC Mathias, que me ajudou na impressão de grande parte dos corpos de provas utilizados neste trabalho, com muita dedicação e organização.

Ao SC Maurício e CC(RM-3) Fernanda Luz, que disponibilizaram o laboratório da divisão de materiais do IPqM, e me ajudaram nos inúmeros ensaios de tração, além da organização dos dados utilizados no trabalho. Ao Igor, estagiário no laboratório, que montou praticamente todos os ensaios realizados com muita paciência e dedicação.

A todos que contribuíram neste trabalho, agradeço por tudo.



*“Eu sou eu e minhas circunstâncias,  
e se não salvo a ela, não me salvo a mim.”*

*José Ortega & Gasset*



# Resumo

Na era moderna, os polímeros desempenham um papel crucial no panorama tecnológico e industrial. A capacidade dos polímeros de serem moldados em diversas formas, combinada com suas propriedades adaptativas e duráveis, tem permitido avanços significativos em inovação e sustentabilidade. Ao mesmo tempo, os avanços na pesquisa e desenvolvimento de polímeros, através do uso de tecnologias com a impressão 3D, têm impulsionado várias áreas, como a engenharia, com a prototipagem rápida de baixo custo, fabricação de peças de reposição ou a medicina, com biomateriais poliméricos sendo utilizados em implantes e dispositivos médicos inovadores. Esses materiais oferecem uma combinação única de biocompatibilidade, flexibilidade e resistência, abrindo novas fronteiras no campo da saúde. Porém, apesar de todos os avanços nas tecnologias, a presença de defeitos em polímeros, como vazios e *air gaps* (espaços vazios entre as camadas de impressões 3D), pode comprometer sua integridade estrutural, influenciando diretamente nas propriedades mecânicas desses materiais. Através da fabricação de Corpos de Prova (CP) por Manufatura Aditiva (MA) (impressão 3D) utilizando filamentos de Políácido Láctico (*PolyLactic Acid* (PLA)) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) com o objetivo geral de avaliar o desempenho desses CP, o estudo emprega um planejamento fatorial completo  $2^5$  e método *Analysis of Variance* (ANOVA), fabricando CP com 16 combinações distintas de defeitos, CP controle e grupos adicionais, com variações nos fatores de entrada. Os testes de tração, conduzidos até a ruptura, fornecem dados significativos analisados estatisticamente em termos de rigidez, tensão máxima e deformação máxima. As principais conclusões destacam que todos os fatores analisados mostraram-se significantes, sendo que a alteração do material, seguida do aumento do tamanho dos defeitos, emergem como os fatores mais impactantes na variação da rigidez. Para a Tensão Máxima, o tamanho do defeito se destaca, seguido pela mudança de material. Na Deformação Máxima, o alinhamento dos defeitos revela-se como o fator mais influente, seguido pelo tamanho dos defeitos.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva; Impressão 3D; Comportamento Mecânico; Materiais Poliméricos;.



# Abstract

In the modern era, polymers play a crucial role in the technological and industrial landscape. The ability of polymers to be molded into various forms, coupled with their adaptive and durable properties, has enabled significant advancements in innovation and sustainability. Simultaneously, advancements in polymer research and development, facilitated by technologies like 3D printing, have propelled various fields such as engineering, offering low-cost rapid prototyping and the production of spare parts, and medicine, where polymeric biomaterials are utilized in innovative implants and medical devices. These materials provide a unique combination of biocompatibility, flexibility, and strength, pushing boundaries in the healthcare sector. However, despite technological progress, the presence of defects in polymers, such as voids and air gaps (empty spaces between layers in 3D printing), can compromise their structural integrity, directly influencing the mechanical properties of these materials. Through the manufacturing of Test Specimens (TS) by Additive Manufacturing (3D printing) using Polyactic Acid (PLA) and Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) filaments, with the overall aim of evaluating the performance of these TS, the study employs a full factorial design  $2^5$  and Analysis of Variance (ANOVA) method, producing TS with 16 distinct defect combinations, control TS, and additional groups with variations in input factors. Tensile tests, conducted until failure, provide statistically analyzed data on Young's Modulus, maximum stress, and maximum strain. The primary conclusions highlight the significance of all analyzed factors, with material alteration and defect size increase emerging as the most impactful factors in Young's Modulus variation. For Maximum Stress, defect size stands out, followed by material change. In Maximum Strain, defect alignment proves to be the most influential factor, followed by defect size.

**Keywords:** Additive Manufacturing; 3D Printing; Mechanical behavior; Polimeric materials.



## Lista de ilustrações

Figura 2.1–Gráfico de barras dos valores da massa específica à temperatura ambiente para vários materiais metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos (CALLISTER, 2016). . . . .	6
Figura 2.2–Gráfico de barras dos valores da rigidez (isto é, do módulo de elasticidade) à temperatura ambiente para vários materiais metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos (CALLISTER, 2016). . . . .	6
Figura 2.3–Gráfico de barras das faixas de condutividade elétrica à temperatura ambiente para vários materiais metálicos, cerâmicos, polímeros e semicondutores (CALLISTER, 2016). . . . .	7
Figura 2.4–Classificação dos polímeros de acordo com a semelhança de propriedades. Adaptado de (BARROS, 2011). . . . .	9
Figura 2.5–Unidade estrutural do polímero PLA . . . . .	13
Figura 2.6–Unidade estrutural do polímero ABS . . . . .	15
Figura 2.7–Presença dos <i>air gaps</i> na estrutura impressa (CAVALCANTE, 2022) . . . . .	20
Figura 2.8–Estratégia inicial de um planejamento de experimentos (CALADO; MONTGOMERY, 2003). . . . .	22
Figura 2.9–Representação gráfica dos valores médios da fluidez (CALADO; MONTGOMERY, 2003). . . . .	27
Figura 2.10–Nova representação gráfica dos efeitos simples da concentração (CALADO; MONTGOMERY, 2003). . . . .	29
Figura 2.11–Nova representação gráfica dos efeitos simples da temperatura (CALADO; MONTGOMERY, 2003). . . . .	29
Figura 2.12–Nova representação gráfica dos efeitos simples da interação entre a concentração e temperatura (CALADO; MONTGOMERY, 2003). . . . .	29
Figura 2.13–Aplicações mais comuns da MA - Adaptado de LIGON et al. (2017) . . . . .	35

Figura 2.14–Visões externa e interna ao casco resistente (MENDONÇA; TELES; MENDES, 2020). . . . .	38
Figura 2.15–Conceito básico do processo de manufatura aditiva. Traduzido de LIGON et al. (2017) . . . . .	40
Figura 2.16–Etapas do processo de impressão 3D. (Próprio autor). . . . .	41
Figura 2.17–Direções de deposição de filamento em peças que sofrerão carga axial. a) [90°]. b) [45°/ 45°]. c) [0°/90°]. Adaptado de (LOVO; FORTULAN, 2016) . . . . .	43
Figura 2.18–Tipos de <i>infill</i> . (3DLAB, 2022) . . . . .	45
Figura 3.1–Rolo de filamento utilizado na <i>Creality Ender 3 Pro</i> . Fonte: (3DLAB, 2022) . . . . .	50
Figura 3.2–Desenho dos CP. (ISO 527-2, 2012) . . . . .	51
Figura 3.3–Dimensões e distribuição dos defeitos . . . . .	53
Figura 3.4–Cálculo de área do losango . . . . .	54
Figura 3.5–Distribuição dos vazios losangulares grandes no CP . . . . .	55
Figura 3.6–Distribuição dos vazios grandes descentralizados no CP . . . . .	56
Figura 3.7–Desenhos dos CPs com defeitos circulares . . . . .	59
Figura 3.8–Desenhos dos CPs com defeitos losangulares . . . . .	60
Figura 3.9–CPs impressos com defeitos circulares . . . . .	61
Figura 3.10–CPs impressos com defeitos losangulares . . . . .	62
Figura 3.11–Impressora <i>Creality Ender 3 Pro</i> . . . . .	63
Figura 3.12–Desenho dos CP conforme (ISO 527-2, 2012). . . . .	64
Figura 3.13–Imagem da direção de impressão e contorno de defeitos . . . . .	65
Figura 3.14–CP 01 montado na máquina para ensaio . . . . .	66
Figura 3.15–Curva típica de um ensaio de tração. . . . .	67
Figura 3.16–Exemplo de Histograma . . . . .	68
Figura 3.17–Exemplo de gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	69
Figura 3.18–Exemplo do gráfico de impacto das variáveis na rigidez. . . . .	70
Figura 4.1–Resultado dos testes de tração realizados por RODRÍGUEZ-PANES, CLAVER e CAMACHO (2018) . . . . .	72
Figura 4.2–Gráfico dos valores previstos x resíduos - rigidez. . . . .	73

Figura 4.3–Gráfico dos valores previstos x resíduos - caso excluído: 174 - Rigidez. . . . .	74
Figura 4.4–Gráfico de normalidade da distribuição dos resíduos - Rigidez. . . . .	75
Figura 4.5–Histograma dos resíduos - Rigidez. . . . .	76
Figura 4.6–CP 01 a 08 . . . . .	78
Figura 4.7–Impacto do material, alinhamento e tamanho do defeito na rigidez. CP com três defeitos circulares. . . . .	79
Figura 4.8–CP 09 a 16 . . . . .	82
Figura 4.9–Impacto do tamanho e alinhamento do defeito e material na rigidez. CPs com sete defeitos circulares. . . . .	83
Figura 4.10–CP 17 a 24 . . . . .	85
Figura 4.11–Impacto do alinhamento e tamanho do defeito e material na rigidez. CP com sete defeitos losangulares. . . . .	86
Figura 4.12–CP 25 a 32 . . . . .	88
Figura 4.13–Impacto do alinhamento e tamanho do defeito e material na rigidez. CP com sete defeitos losangulares. . . . .	89
Figura 4.14–Gráfico 3D Alinhamento x Quantidade x Rigidez . . . .	94
Figura 4.15–Gráfico 3D Quantidade x Material x Rigidez . . . . .	95
Figura 4.16–Gráfico 3D - Quantidade x Formato x Rigidez . . . . .	96
Figura 4.17–Gráfico 3D - Tamanho do Defeito x Formato x Rigidez .	97
Figura 4.18–Gráfico dos valores previstos x resíduos - tensão máxima.	98
Figura 4.19–Gráfico dos valores previstos x resíduos - caso excluído: 10. . . . .	99
Figura 4.20–Gráfico dos valores previstos x resíduos - caso excluído: 10. . . . .	100
Figura 4.21–Histograma dos resíduos. . . . .	101
Figura 4.22–Impacto do material, alinhamento e tamanho do defeito na tensão máxima. CPs com três defeitos circulares. . .	104
Figura 4.23–Impacto do material, alinhamento e tamanho do defeito na tensão máxima. CPs com sete defeitos losangulares. .	106

Figura 4.24-Impacto do material, alinhamento e tamanho do defeito na tensão máxima. CPs com sete defeitos losangulares. .	108
Figura 4.25-Impacto do material, alinhamento e tamanho do defeito na tensão máxima. CPs com sete defeitos losangulares. .	111
Figura 4.26-Gráfico 3D Tamanho do defeito x Material x Tensão na carga máxima . . . . .	115
Figura 4.27-Gráfico 3D Alinhamento x Tamanho do defeito x Tensão na carga máxima . . . . .	116
Figura 4.28-Gráfico 3D Alinhamento x Material x Tensão na carga máxima . . . . .	117
Figura 4.29-Gráfico dos valores previstos x resíduos - deformação máxima. . . . .	118
Figura 4.30-Gráfico dos valores previstos x resíduos - caso excluído: 172. Fonte: o autor . . . . .	119
Figura 4.31-Gráfico dos valores previstos x resíduos - caso excluído: 172. . . . .	120
Figura 4.32-Histograma dos resíduos. . . . .	121
Figura 4.33-CP ímpares de 01 a 15 - CP feitos em PLA com defeitos circulares . . . . .	124
Figura 4.34-Impacto do tamanho do defeito, quantidade e alinhamento na deformação na carga máxima. CPs feitos em PLA com defeitos circulares. . . . .	125
Figura 4.35-CP pares de 02 a 16 - CP feitos em ABS com defeitos circulares . . . . .	128
Figura 4.36-Impacto do tamanho do defeito, quantidade e alinhamento na deformação na carga máxima. CPs feitos em ABS com defeitos circulares. . . . .	129
Figura 4.37-CP ímpares de 17 a 31 - CP feitos em PLA com defeitos losangulares . . . . .	131

Figura 4.38-Impacto do tamanho do defeito, quantidade e alinhamento na deformação na carga máxima. CPs feitos em PLA com defeitos losangulares. . . . .	132
Figura 4.39-CP pares de 18 a 32 - CP feitos em ABS com defeitos losangulares . . . . .	134
Figura 4.40-Impacto do tamanho do defeito, quantidade e alinhamento na deformação na carga máxima. CPs feitos em ABS com defeitos losangulares. . . . .	135
Figura 4.41-Gráfico 3D Tamanho do defeito x Alinhamento x Deformação Máxima . . . . .	140
Figura 4.42-Gráfico 3D Quantidade de defeitos x Alinhamento x Deformação Máxima . . . . .	141
Figura 4.43-Desenhos dos CP originais que foram modificados para gerar os CP complementares . . . . .	142
Figura 4.44-CP complementar 01 . . . . .	142
Figura 4.45-CP complementar 02 . . . . .	143
Figura 4.46-CP complementar 03 . . . . .	143
Figura 4.47-CP complementar 04 . . . . .	143
Figura 4.48-CP complementar 05 . . . . .	143
Figura 4.49-CP complementar 06 . . . . .	144
Figura 4.50-CP complementar 07 . . . . .	144
Figura 4.51-CP complementar 08 . . . . .	144
Figura 4.52-CP Controle, CP32 e C01 . . . . .	145
Figura 4.53-Gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	146
Figura 4.54-Histograma dos resíduos. . . . .	147
Figura 4.55-Análise da interação entre os grupos. . . . .	148
Figura 4.56-Gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	150
Figura 4.57-Histograma dos resíduos. . . . .	151
Figura 4.58-Análise da interação entre os grupos. . . . .	152
Figura 4.59-Gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	153
Figura 4.60-Histograma dos resíduos. . . . .	155

Figura 4.61-Análise da interação entre os grupos. . . . .	156
Figura 4.62-CP Controle, CP28, C02, C03 e C04 . . . . .	157
Figura 4.63-Gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	158
Figura 4.64-Histograma dos resíduos. . . . .	159
Figura 4.65-Análise da interação entre os grupos. . . . .	160
Figura 4.66-Gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	162
Figura 4.67-Histograma dos resíduos. . . . .	163
Figura 4.68-Análise da interação entre os grupos. . . . .	164
Figura 4.69-Gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	166
Figura 4.70-Histograma dos resíduos. . . . .	167
Figura 4.71-Análise da interação entre os grupos. . . . .	168
Figura 4.72-CP Controle, CP32, C05, C06 e C07 . . . . .	170
Figura 4.73-Gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	171
Figura 4.74-Histograma dos resíduos. . . . .	172
Figura 4.75-Análise da interação entre os grupos. . . . .	173
Figura 4.76-Gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	175
Figura 4.77-Histograma dos resíduos. . . . .	176
Figura 4.78-Análise da interação entre os grupos. . . . .	177
Figura 4.79-Gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	179
Figura 4.80-Histograma dos resíduos. . . . .	180
Figura 4.81-Análise da interação entre os grupos. . . . .	181
Figura 4.82-CP Controle, CP16 e C08 . . . . .	183
Figura 4.83-Gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	184
Figura 4.84-Histograma dos resíduos. . . . .	185
Figura 4.85-Análise da interação entre os grupos. . . . .	186
Figura 4.86-Gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	188
Figura 4.87-Histograma dos resíduos. . . . .	189
Figura 4.88-Análise da interação entre os grupos. . . . .	190
Figura 4.89-Gráfico dos valores previstos x resíduos. . . . .	192
Figura 4.90-Histograma dos resíduos. . . . .	193
Figura 4.91-Análise da interação entre os grupos. . . . .	194

Figura C.1–Gráficos Experimentais PLA. . . . .	229
Figura C.2–Gráficos Experimentais ABS. . . . .	230



## Lista de tabelas

Tabela 2.1–Principais propriedades dos filamentos para impressão 3D (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017) . . . . .	12
Tabela 2.2–Exemplo de matriz de planejamento (CALADO; MONTGOMERY, 2003) . . . . .	25
Tabela 2.3–Exemplo de matriz de planejamento escalonada (CALADO; MONTGOMERY, 2003) . . . . .	26
Tabela 2.4–Tabela de referências de temperaturas de impressão (3DLAB, 2022). . . . .	47
Tabela 3.1–Ficha técnica dos filamentos utilizados na fabricação dos CP (3DLAB, 2022) . . . . .	50
Tabela 3.2–Dimensões dos CP (em mm). Traduzido de ISO 527-2 (2012). . . . .	52
Tabela 3.3–Dimensões básicas dos defeitos . . . . .	56
Tabela 3.4–Planejamento Estatístico Fatorial $2^5$ . . . . .	57
Tabela 3.5–Planejamento de Ensaios . . . . .	58
Tabela 3.6–Tabela de percentual da área útil ocupada pelo defeito no CP . . . . .	63
Tabela 3.7–Parâmetros de impressão fixados para cada material . . .	64
Tabela 4.1–Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa) . . . . .	74
Tabela 4.2–Teste de Levene para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa). . . . .	74
Tabela 4.3–Efeito de Interação das variáveis - Rigidez . . . . .	77
Tabela 4.4–Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos CP 1 a 8	80
Tabela 4.5–Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos CP 9 a 16	84
Tabela 4.6–Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos CP 17 a 24 . . . . .	87
Tabela 4.7–Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos pontos 25 a 32 . . . . .	90
Tabela 4.8–Estimativa de Efeitos . . . . .	92

Tabela 4.9–Coeficientes de Regressão . . . . .	93
Tabela 4.10–Variáveis utilizadas na equação de regressão . . . . .	93
Tabela 4.11–Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa) . . . . .	100
Tabela 4.12–Teste de Levene´s para homogeneidade de variâncias - Tensão na Carga Máxima (MPa). . . . .	100
Tabela 4.13–Efeito de Interação das variáveis - Tensão máxima . . .	102
Tabela 4.14–Tabela de testes LSD - Fisher - Tensão Máxima - compa- rativos dos CPs 01 a 08 . . . . .	105
Tabela 4.15–Tabela de testes LSD - Fisher - Tensão Máxima - compa- rativos dos CPs 09 a 16 . . . . .	107
Tabela 4.16–Tabela de testes LSD - Fisher - Tensão Máxima - compa- rativos dos CPs 17 a 24 . . . . .	109
Tabela 4.17–Tabela de testes LSD - Fisher - Tensão Máxima - compa- rativos dos CPs 25 a 32 . . . . .	112
Tabela 4.18–Estimativa de Efeitos - Tensão Máxima . . . . .	113
Tabela 4.19–Coeficientes de Regressão - Tensão Máxima . . . . .	114
Tabela 4.20–Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%) . . . . .	119
Tabela 4.21–Teste de Levene para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%). . . . .	120
Tabela 4.22–Efeito de Interação das variáveis - Deformação Máxima	122
Tabela 4.23–Tabela de testes LSD - Fisher - Deformação na Carga Máxima - comparativos dos CPs ímpares de 01 a 15 . .	126
Tabela 4.24–Tabela de testes LSD - Fisher - Deformação na Carga Máxima - comparativos dos CPs pares de 02 a 16 . . . .	130
Tabela 4.25–Tabela de testes LSD - Fisher - Deformação na Carga Máxima - comparativos dos CPs ímpares de 17 a 31 . .	133
Tabela 4.26–Tabela de testes LSD - Fisher - Deformação na Carga Máxima - comparativos dos CPs ímpares de 18 a 32 . .	136
Tabela 4.27–Estimativa de Efeitos - Deformação Máxima . . . . .	137

Tabela 4.28-Coefficientes de Regressão - Deformação Máxima . . . .	138
Tabela 4.29-Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa) . . . . .	146
Tabela 4.30-Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa) . . . . .	147
Tabela 4.31-Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C01 x CP32 . . . . .	149
Tabela 4.32-Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa) . . . . .	150
Tabela 4.33-Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa) . . . . .	151
Tabela 4.34-Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C01 x CP32 . . . . .	153
Tabela 4.35-Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%) . . . . .	154
Tabela 4.36-Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%) . . . . .	154
Tabela 4.37-Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C01 x CP32 . . . . .	156
Tabela 4.38-Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa) . . . . .	159
Tabela 4.39-Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa) . . . . .	160
Tabela 4.40-Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C02 x C03 x C04 x CP28 . . . . .	161
Tabela 4.41-Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa) . . . . .	163
Tabela 4.42-Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa) . . . . .	164
Tabela 4.43-Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C02 x C03 x C04 x CP 28 . . . . .	165

Tabela 4.44-Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias	
- Deformação Máxima (%) . . . . .	167
Tabela 4.45-Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%) . . . . .	168
Tabela 4.46-Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C02 X C03 X C04 X CP28 . . . . .	169
Tabela 4.47-Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias	
- Rigidez (MPa) . . . . .	172
Tabela 4.48-Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa) . . . . .	173
Tabela 4.49-Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C05 x C06 x C07 x CP 32 . . . . .	174
Tabela 4.50-Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias	
- Tensão Máxima (MPa) . . . . .	176
Tabela 4.51-Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa) . . . . .	177
Tabela 4.52-Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C05 x C06 x C07 x CP 32 . . . . .	178
Tabela 4.53-Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias	
- Deformação Máxima (%) . . . . .	180
Tabela 4.54-Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%) . . . . .	181
Tabela 4.55-Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C05 X C06 X C07 X CP32 . . . . .	182
Tabela 4.56-Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias	
- Rigidez (MPa) . . . . .	185
Tabela 4.57-Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa) . . . . .	186
Tabela 4.58-Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C08 x CP16 . . . . .	187

Tabela 4.59-Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias	
- Tensão Máxima (MPa) . . . . .	189
Tabela 4.60-Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Tensão	
Máxima (MPa) . . . . .	190
Tabela 4.61-Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos	
de CP Controle x C08 x CP16 . . . . .	191
Tabela 4.62-Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias	
- Deformação Máxima (%) . . . . .	193
Tabela 4.63-Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Deformação	
Máxima (%) . . . . .	193
Tabela 4.64-Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos	
de CP Controle x C08 X CP16 . . . . .	195
Tabela 4.65-Tabela de efeitos em função de cada material - Rigidez .	195
Tabela 4.66-Tabela de efeitos em função de cada material - Tensão	
Máxima . . . . .	196
Tabela 4.67-Tabela de efeitos em função de cada material - Deformação	
Máxima . . . . .	197
Tabela A.1-Tabela de resultados dos ensaios mecânicos de tração . .	209
Tabela B.1-Tabela de resultados experimentais - CP Complementares	223



# Lista de símbolos

$\delta$	Tensão
$\delta_{m\acute{a}x}$	Tensão Máxima
$\delta_{esc}$	Tensão de escoamento
$\epsilon$	Deformação
$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Deformação Máxima
$\epsilon_x$	Deformação na direção x
$\epsilon_y$	Deformação na direção y
$\epsilon_z$	Deformação na direção z
$E$	Módulo de Elasticidade ou Rigidez
$T_g$	Temperatura de Transição Vítrea
$F$	Força ou carga aplicada num corpo
$U_f$	Módulo de Resiliência
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$AL\%$	Ductilidade
$H_0$	Hipótese Nula
$H_1$	Hipótese Alternativa
$\Delta_{m\acute{o}dulo}$	Variação da rigidez
$R^2$	Coefficiente de Determinação
$\phi$	Diâmetro
$D$	Diagonal Maior do Losango
$d$	Diagonal Menor do Losango
$l_0$	Comprimento útil original de um corpo

$l_f$	Comprimento da porção útil de um corpo, após a ruptura
$A_0$	Área inicial da seção transversal de um corpo
$A_{m\acute{a}x}$	Área Máxima
$A_{m\acute{i}n}$	Área Mínima
$A_{m\acute{a}x}^{\circ}$	Área Máxima do Defeito Circular
$A_{m\acute{i}n}^{\circ}$	Área Mínima do Defeito Circular
$A_{m\acute{a}x}^{\diamond}$	Área Máxima do Defeito Losangular
$A_{m\acute{i}n}^{\diamond}$	Área Mínima do Defeito Losangular
$A_{\acute{u}til}$	Área Útil do CP

## Lista de abreviaturas e siglas

<b>ABS</b>	Acrilonitrila Butadieno Estireno
<b>AMF</b>	<i>Additive Manufacturing Format</i>
<b>ANOVA</b>	<i>Analisis of Variance</i>
<b>AUV</b>	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
<b>CAD</b>	<i>Computer-Aided Design</i>
<b>CP</b>	Corpos de Prova
<b>DOE</b>	<i>Design of Experiments</i>
<b>FDM</b>	<i>Fused Deposition Modeling</i>
<b>IPqM</b>	Instituto de Pesquisas da Marinha
<b>LabProM</b>	Laboratório de Prototipagem Mecânica
<b>MA</b>	Manufatura Aditiva
<b>MS</b>	<i>Mean Square</i>
<b>PLA</b>	<i>PolyLactic Acid</i>
<b>SLM</b>	<i>Selective Laser Melting</i>
<b>STL</b>	<i>STereoLithography</i>



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>2</b>
1.1.1	Objetivo Geral	2
1.1.2	Objetivos Específicos	3
<b>1.2</b>	<b>Organização do trabalho</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Materiais</b>	<b>5</b>
2.1.1	Polímeros	5
2.1.2	Polímeros para Impressão 3D	9
2.1.3	Poli(ácido láctico) (PLA)	12
2.1.4	Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS)	14
<b>2.2</b>	<b>Defeitos em Materiais Poliméricos</b>	<b>16</b>
2.2.1	Defeitos típicos de materiais poliméricos	16
<b>2.3</b>	<b>Análise Estatística</b>	<b>21</b>
2.3.1	Teste de Hipóteses	22
2.3.2	Nível de Significância ( $\alpha$ )	23
2.3.3	Testes Estatísticos Paramétricos e Não Paramétricos	23
2.3.4	Planejamento Fatorial $2^k$ Completo	24
2.3.5	ANOVA	30
<b>2.4</b>	<b>Manufatura Aditiva</b>	<b>32</b>
2.4.1	Protótipos	35
2.4.2	Prototipagem Rápida, Manufatura Aditiva e Impressão 3D	39
2.4.3	Anisotropia	42
2.4.4	<i>Infill</i>	43
2.4.5	Parâmetros de Impressão	45
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>49</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b>	<b>49</b>
<b>3.2</b>	<b>Métodos</b>	<b>51</b>
<b>3.3</b>	<b>Fabricação dos CP</b>	<b>63</b>

<b>3.4</b>	<b>Ensaio de Tração</b>	<b>65</b>
<b>3.5</b>	<b>Análise Estatística</b>	<b>67</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>71</b>
<b>4.1</b>	<b>Rigidez (MPa) - <math>E</math></b>	<b>72</b>
4.1.1	Análise de interação de variáveis - Rigidez - CP 01 a 08	78
4.1.2	Análise de interação de variáveis - Rigidez - CP 09 a 16	81
4.1.3	Análise de interação de variáveis - Rigidez - CPs 17 a 24	84
4.1.4	Análise de interação de variáveis - Rigidez - CP 25 a 32	88
4.1.5	Estimativa de Efeitos, Coeficientes de Regressão e Gráficos 3D	91
<b>4.2</b>	<b>Tensão Máxima (MPa) - <math>\delta_{máx}</math></b>	<b>97</b>
4.2.1	Análise de interação de variáveis - Tensão Máxima - CPs 01 a 08	103
4.2.2	Análise de interação de variáveis - Tensão Máxima - CPs 09 a 16	105
4.2.3	Análise de interação de variáveis - Tensão Máxima - CPs 17 a 24	108
4.2.4	Análise de interação de variáveis - Tensão Máxima - CPs 25 a 32	110
4.2.5	Estimativa de Efeitos, Coeficientes de Regressão e Gráficos 3D	112
<b>4.3</b>	<b>Deformação Máxima (%) - <math>\varepsilon_{máx}</math></b>	<b>117</b>
4.3.1	Análise de interação de variáveis - Deformação na carga máxima - CPs ímpares de 01 a 15	123
4.3.2	Análise de interação de variáveis - Deformação na carga máxima - CPs pares de 02 a 16	127
4.3.3	Análise de interação de variáveis - Deformação na carga máxima - CPs ímpares de 17 a 31	130
4.3.4	Análise de interação de variáveis - Deformação na carga máxima - CPs pares de 18 a 32	133
4.3.5	Estimativa de Efeitos, Coeficientes de Regressão e Gráficos 3D	137
<b>4.4</b>	<b>CPs Complementares</b>	<b>141</b>
4.4.1	CP Controle x C01 x CP 32	145
4.4.1.1	Rigidez	145
4.4.1.2	Tensão Máxima	149
4.4.1.3	Deformação Máxima	153
4.4.2	CP Controle x C02 x C03 x C04 x CP 28	157

4.4.2.1	Rigidez . . . . .	157
4.4.2.2	Tensão Máxima . . . . .	161
4.4.2.3	Deformação Máxima . . . . .	165
4.4.3	CP Controle x C05 x C06 x C07 x CP32 . . . . .	169
4.4.3.1	Rigidez . . . . .	170
4.4.3.2	Tensão Máxima . . . . .	174
4.4.3.3	Deformação Máxima . . . . .	178
4.4.4	CP Controle x C08 x CP16 . . . . .	182
4.4.4.1	Rigidez . . . . .	183
4.4.4.2	Tensão Máxima . . . . .	187
4.4.4.3	Deformação Máxima . . . . .	191
<b>4.5</b>	<b>Análise de Materiais PLA x ABS . . . . .</b>	<b>195</b>
4.5.1	Rigidez . . . . .	195
4.5.2	Tensão Máxima . . . . .	196
4.5.3	Deformação Máxima . . . . .	197
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS</b>	
	<b>FUTUROS . . . . .</b>	<b>199</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>199</b>
5.1.1	Rigidez (MPa) . . . . .	199
5.1.2	Tensão Máxima (MPa) . . . . .	199
5.1.3	Deformação Máxima (%) . . . . .	200
5.1.4	Testes Complementares . . . . .	200
<b>5.2</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>202</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>203</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>209</b>
	<b>APÊNDICE B – CP COMPLEMENTARES . . . . .</b>	<b>223</b>
	<b>APÊNDICE C – GRÁFICOS DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS . . . . .</b>	<b>229</b>

<b>ANEXO A – ARTIGO PUBLICADO . . . . .</b>	<b>231</b>
---	------------

# 1 Introdução

De acordo com LIGON et al. (2017), com o desenvolvimento da manufatura aditiva (MA), desde o final da década de 1980, e devido ao rápido avanço e popularização desta tecnologia, já é possível observar a utilização da MA para confecção de peças, tanto em empresas como em ambientes acadêmicos e de pesquisa. Com isso, surgem diversas possibilidades de aplicação desta tecnologia, como a produção de peças personalizadas e sob demanda, a redução de custos e prazos na produção, a fabricação de objetos complexos e a prototipagem rápida, com ganhos não somente técnicos como logísticos.

Também conhecida como impressão 3D, a MA está revolucionando a forma como as coisas são produzidas, permitindo maior flexibilidade e personalização nos processos de fabricação.

A MA consiste em adicionar material, camada por camada, para criar um objeto tridimensional a partir de um modelo digital. Existem várias tecnologias de MA, como a estereolitografia (*STereoLithography* (STL)), a fusão por laser seletiva (*Selective Laser Melting* (SLM)) e a deposição de filamento fundido (*Fused Deposition Modeling* (FDM)), cada uma com suas próprias características e limitações (LIGON et al., 2017).

Apesar de todas as vantagens oferecidas pela MA, ainda existem desafios a serem superados, como a garantia da qualidade e resistência das peças produzidas, a redução dos custos dos materiais e a melhoria da velocidade de produção. No entanto, é inegável o impacto que a MA está causando em diversos setores da economia e a possibilidade de mudanças significativas no modo como produzimos e consumimos objetos.

É importante destacar que a manufatura aditiva ainda apresenta limitações e desafios em relação à qualidade e à confiabilidade das peças produzidas, especialmente quando se tratam de aplicações críticas. Porém, a tecnologia continua evoluindo e se aprimorando, o que pode aumentar ainda mais o seu potencial de aplicação em diversas áreas.

Deve-se enfatizar também que a utilização de MA para produzir peças

que serão utilizadas como produto final ou produtos funcionais exige uma análise cuidadosa da resistência mecânica. No entanto, falhas na fabricação são comuns, especialmente quando se utilizam polímeros, devido a diversos fatores associados ao controle das variáveis de processamento, como temperatura, tempo de residência, velocidade do fluxo do fundido e caminho de escoamento do polímero, entre outros. Defeitos no interior da peça produzida podem ser responsáveis por falhas catastróficas em sua utilização, pois representam concentradores de tensão e pontos de iniciação de trincas ou são mais favoráveis para o coalescimento e propagação de trincas.

Vazios são defeitos capazes de ocorrer em peças fabricadas com polímeros e compósitos de matrizes poliméricas (COSTA; ALMEIDA; REZENDE, 2005), e um estudo que avalie a influência da quantidade, dimensões e distribuição desses defeitos na peça é de extrema importância para a gestão da integridade de produtos feitos com esse tipo de material, em particular utilizando a MA como forma de fabricação. Porém, a literatura científica atual carece de trabalhos que contemplem a análise das propriedades mecânicas de peças estruturais confeccionadas com defeitos controlados para fins de análise paramétrica. Nesse contexto, considerando o surgimento de novas tecnologias, este trabalho apresenta uma proposta inovadora para avaliar estatisticamente, em termos de propriedades mecânicas fundamentais, a influência de características de defeitos controlados em peças produzidas por manufatura aditiva.

Este estudo irá, assim, contribuir para o avanço do conhecimento científico em aplicações tecnológicas em materiais poliméricos, de forma transversal em diferentes áreas de conhecimento.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho mecânico dos polímeros PLA e ABS, via processo de manufatura aditiva, utilizando o método de modelagem por fusão e deposição (FDM), popularmente conhe-

cido como impressão 3D. Foram produzidos CP de tração com defeitos controlados em sua área útil, visando verificar como a forma, alinhamento, quantidade e área desses defeitos afetam as propriedades mecânicas dos materiais em questão, à luz de análises estatísticas.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são descritos da seguinte forma:

- Produzir e preparar os CP por impressão 3D com defeitos controlados para ensaios mecânicos de tração;
- Avaliar e discutir os efeitos de forma, alinhamento, quantidade e área de defeitos e material nas propriedades mecânicas dos materiais poliméricos em questão através de análise estatística utilizando o software *Statsoft Statistica v. 10.0*, utilizando-se a ANOVA - análise de variância - e o *Design of Experiments* (DOE) - planejamento de experimentos a um nível de significância de  $\alpha = 0,05$ .

## 1.2 Organização do trabalho

O trabalho foi organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1 - apresenta breve introdução ao trabalho, buscando uma contextualização para o projeto está sendo desenvolvido, além dos objetivos propostos.
- Capítulo 2 - apresenta os fundamentos teóricos sobre os materiais e defeitos típicos de materiais poliméricos, apresentação dos principais polímeros utilizados na MA, fundamentos teóricos da análise estatística utilizada neste trabalho e um histórico e conceitos da MA.
- Capítulo 3 - apresenta a metodologia utilizada para a fabricação e testes dos CP, além do tratamento estatístico de dados.
- Capítulo 4 - apresenta os resultados e discussões. Foram apresentados os dados obtidos após os testes, tratados estatisticamente.

- Capítulo 5 - apresenta as conclusões e sugere linhas de pesquisa para trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica, base para o desenvolvimento desta dissertação. Serão apresentados os conceitos gerais acerca de:

- Polímeros;
- Polímeros mais usados na MA;
- Defeitos típicos de materiais poliméricos;
- Análise estatística;
- Manufatura aditiva.

### 2.1 Materiais

#### 2.1.1 Polímeros

De acordo com LIMA et al. (2021), polímero é um termo que deriva do grego, *poli*, que significa muitas e *meros*, unidades de repetição. São macromoléculas constituídas por unidades menores, os monômeros, formadas por uma única unidade que se repete, o *mero*, e ligados entre si através de ligações covalentes, e que dão origem a longas cadeias, podendo ser de origem natural (biopolímeros) ou sintética (produzidos em laboratório).

Segundo JAHNO (2005) e CALLISTER (2016), os polímeros são materiais que, usualmente, apresentam uma baixa densidade relativa (Figura 2.1), baixa rigidez ( $E$  - módulo de elasticidade)(Figura 2.2), baixa condutividade elétrica (Figura 2.3) e térmica e são sintetizados por reações de polimerização a partir de reagentes monoméricos.

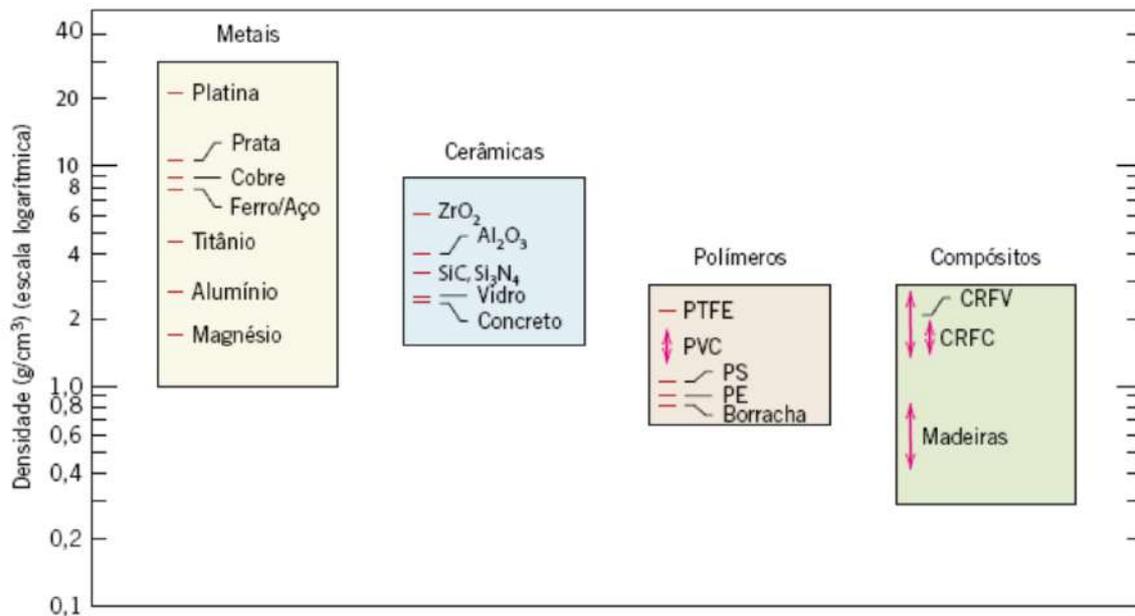


Figura 2.1 – Gráfico de barras dos valores da massa específica à temperatura ambiente para vários materiais metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos (CALLISTER, 2016).

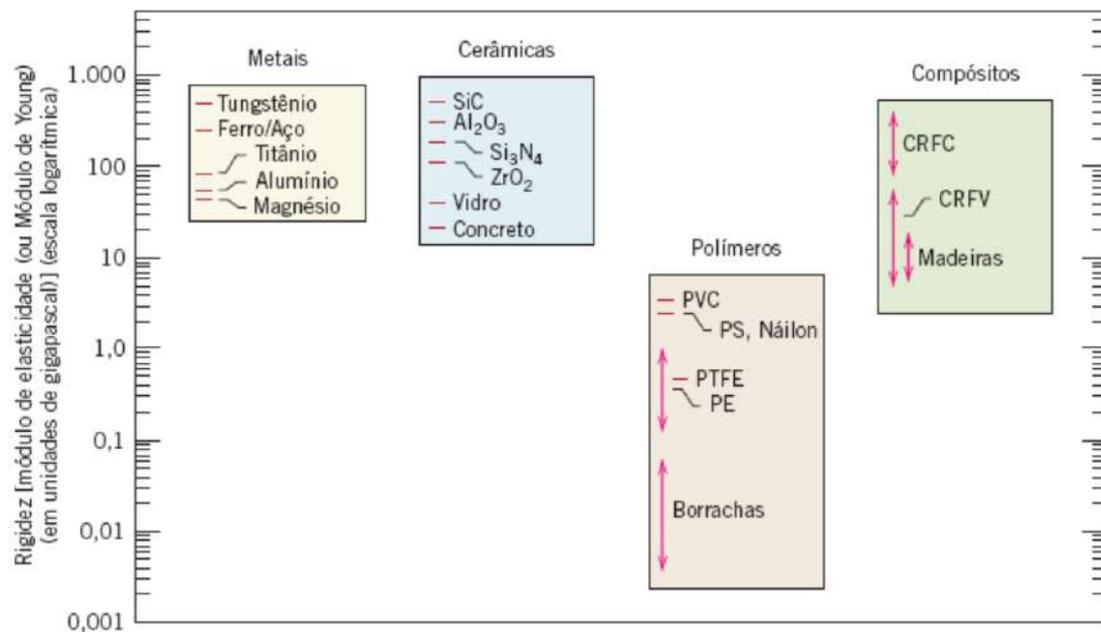


Figura 2.2 – Gráfico de barras dos valores da rigidez (isto é, do módulo de elasticidade) à temperatura ambiente para vários materiais metálicos, cerâmicos, polímeros e compósitos (CALLISTER, 2016).

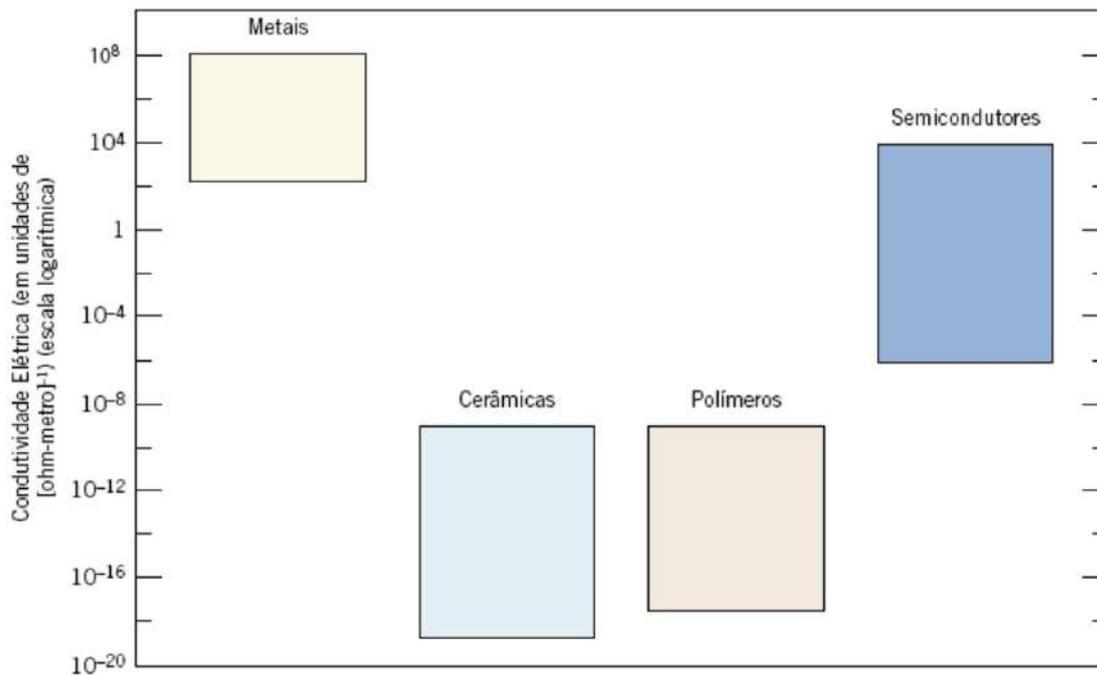


Figura 2.3 – Gráfico de barras das faixas de condutividade elétrica à temperatura ambiente para vários materiais metálicos, cerâmicos, polímeros e semicondutores (CALLISTER, 2016).

Os principais grupos de polímeros são divididos da seguinte forma:

a. Termoplásticos - Plásticos

São polímeros que permitem fusão por aquecimento e solidificação por resfriamento, possibilitando o seu tratamento e moldagem repetidas vezes, desde que sejam reaquecidos. Eles são facilmente maleáveis e usados para produção de filmes, fibras e embalagens. Os termoplásticos são recicláveis pelos processos típicos de reciclagem via aquecimento.

Exemplos: polietileno, poliestireno e poliéster.

b. Termofixos/Termorrígidos - Resinas

Os termorrígidos ou termofixos são aqueles que, por aquecimento, assumem estrutura tridimensional via ligações cruzadas, tornando-se insolúveis e infusíveis. Após isso, eles não conseguem voltar à sua forma original. Eles dão origem à estruturas rígidas e duráveis, como

peças de automóveis, em geral rígidas e de menor alongamento que os termoplásticos.

Alguns exemplos são: resina epóxi, ester-vinílica, fenólica.

#### c. Elastômeros - Borrachas

Os elastômeros podem ser naturais ou sintéticos. Sua principal característica é a elevada elasticidade o que significa que possuem uma elevada capacidade de deformação, mesmo para pequenas tensões (BARROS, 2011).

A borracha natural é obtida da árvore seringueira *Hevea Brasiliensis*, através de cortes no seu tronco. Com isso, obtêm-se um líquido branco, o látex.

As borrachas sintéticas são formadas pela adição de dois ou mais tipos de monômeros (copolímero) a partir de ligações cruzadas.

Exemplos: borrachas nitrílicas (NBR, HNBR) e borrachas fluoradas (FKM, FEPM, FFKM).

#### d. Fibras Sintéticas

Fibras sintéticas são materiais polímeros produzidos pelo processo de estiramento, alinhando-se usualmente às cadeias poliméricas. As fibras sintéticas são por exemplo representadas pelo poliéster, a poliamida, o acrílico, o polipropileno e as aramidas.

Na Figura 2.4, os polímeros são classificados de acordo com a procedência, o que reflete a sua estrutura molecular (BARROS, 2011). Na indústria, em geral os polímeros sintéticos são preferidos aos naturais em função de suas propriedades comparativamente superiores.

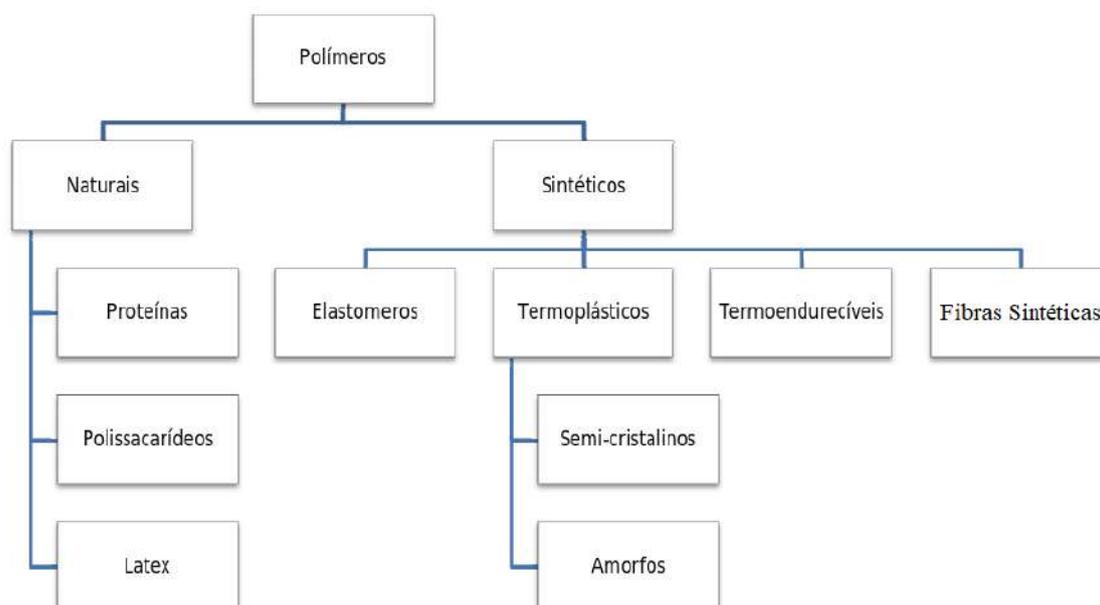


Figura 2.4 – Classificação dos polímeros de acordo com a semelhança de propriedades. Adaptado de (BARROS, 2011).

### 2.1.2 Polímeros para Impressão 3D

A utilização de polímeros para impressão 3D é cada vez mais comum, dada a sua versatilidade e a disponibilidade de diferentes materiais com propriedades diversas. Aqui serão apresentados os principais polímeros utilizados para impressão 3D em máquinas de FDM, incluindo suas características e aplicações.

De acordo com BESKO, BILYK e SIEBEN (2017), segue uma breve descrição dos materiais poliméricos mais utilizados nas impressoras 3D:

- PLA (poli (ácido láctico)): é um dos polímeros mais populares para impressão 3D, pois é fácil de usar e não tóxico. É feito a partir de fontes renováveis, como amido de milho, e é biodegradável. O PLA é rígido e resistente, com alta estabilidade dimensional e baixo encolhimento, sendo utilizado em objetos que exigem alta precisão e detalhes. No entanto, ele é sensível ao calor e pode deformar em temperaturas superiores a 60°C.

- ABS (acrilonitrila butadieno estireno): é um copolímero termoplástico obtido a partir de três monômeros (acrilonitrila butadieno estireno). É o segundo material mais utilizado em impressoras 3D devido à sua resistência mecânica, rigidez, durabilidade e menor custo. É um material resistente a impactos e altas temperaturas, além de ser fácil de ser usinado e trabalhado. No entanto, ele pode emitir vapores tóxicos durante a impressão, exigindo a utilização de equipamentos de proteção.
- Poliamida 6 (nylon 6): é um polímero resistente e flexível utilizado em impressoras 3D para produção de peças resistentes e duráveis. Ele apresenta alta resistência à abrasão, impacto e fadiga, além de ser leve e resistente à umidade. É um material mais difícil de ser impresso, exigindo temperaturas elevadas e cuidados especiais durante a impressão.
- PETG (poli(tereftalato de polietileno glicol)): é um polímero resistente e durável, com propriedades semelhantes às do PET (tereftalato de polietileno). É resistente a impactos e altas temperaturas, além de apresentar alta transparência e brilho. É um material versátil e fácil de imprimir, com baixa taxa de encolhimento e pouca deformação.
- TPU (poliuretano termoplástico): polímero flexível e elástico, utilizado para produzir peças de alta resistência a impactos e deformação. Ele apresenta alta flexibilidade, baixa taxa de encolhimento e grande variedade de cores. É um material mais difícil de ser impresso, exigindo ajustes de temperatura e velocidade durante a impressão.
- Policarbonato (PC): é um polímero termoplástico utilizado em impressoras 3D para produção de peças resistentes a impactos e altas temperaturas. Ele apresenta alta transparência, brilho e resistência ao fogo. É um material resistente a produtos químicos, abrasão e riscos, com alta resistência à tração e rigidez. No entanto, é um material mais

difícil de ser impresso, exigindo temperaturas elevadas e cuidados especiais durante a impressão.

- Tritan (3DLAB, 2022) e (OSIMITZ et al., 2012): é um copolímero feito dos seguintes monômeros: di-metiltereftalato (DMT), 1,4-ciclohexanodimetanol (CHDM) e 2,2,4,4-tetrametil-1,3-ciclobutano-diol (TMCD). Trata-se de um termoplástico utilizado em impressoras 3D para produção de peças resistentes, duráveis e transparentes. Apresenta alta resistência a impactos e temperatura, além de ser resistente a produtos químicos e riscos. É um material fácil de ser impresso, com baixa taxa de encolhimento e pouca deformação, sendo é comumente utilizado na área de engenharia para a fabricação de peças mecânicas.

Em suma, esses são alguns dos materiais poliméricos mais utilizados em impressoras 3D. Cada um possui características específicas que os tornam adequados para diferentes aplicações, como resistência mecânica, rigidez, flexibilidade, temperatura de impressão, toxicidade, usinabilidade, aplicação, temperatura de trabalho, dentre outras. A escolha do material polimérico para impressão 3D deve ser feita com base nas características requeridas pela peça a ser produzida, levando em consideração fatores como custo, disponibilidade e tempo de produção, além das condições de cenário de aplicação da peça final, como temperatura, pressão, contato com fluidos de serviço ou produtos químicos.

A Tabela 2.1 resume de forma qualitativa comparativamente as principais características dos filamentos utilizados para impressão 3D (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> O Tritan não foi contemplado na tabela pois não foi analisado no estudo citado.

Tabela 2.1 – Principais propriedades dos filamentos para impressão 3D (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017)

<b>Propriedades</b>	<b>PLA</b>	<b>ABS</b>	<b>PETG</b>	<b>NYLON</b>	<b>TPU</b>	<b>PC</b>
Ecológico	alto	baixo	alto	baixo	alto	alto
Brilho	médio	baixo	alto	médio	médio	alto
Transparência	médio	baixo	alto	baixo	médio	alto
Rigidez/Dureza	médio	alto	alto	alto	baixo	alto
Resistência Impactos	baixo	médio	alto	alto	alto	alto
Flexibilidade	baixo	médio	médio	médio	alto	médio
Contração/WARP	baixo	alto	médio	baixo	médio	baixo
Precisão/Detalhes	alto	baixo	médio	alto	médio	alto
Qualidade de Superfície	alto	baixo	alto	alto	médio	alto
Resistência/Atritos	baixo	médio	alto	alto	médio	alto
Resistência Química	médio	baixo	alto	alto	alto	alto
Resistência Temp.	baixo	alto	médio	alto	médio	alto
Usinabilidade	baixo	alto	baixo	alto	baixo	médio
Densidade	baixo	médio	baixo	baixo	médio	alto
Temp. de Impressão	médio	alto	alto	alto	alto	alto
Temp. Mesa Aquecida	baixo	alto	médio	alto	baixo	alto
Preço por $m^3$ /grama/hora	baixo	médio	médio	baixo	baixo	alto

### 2.1.3 Poli(ácido lático) (PLA)

O PLA é um polímero composto por moléculas de ácido lático, um ácido orgânico derivado biologicamente obtido a partir de recursos renováveis. Segundo LASPRILLA, MARTINEZ e HOSS (2011), trata-se de uma molécula quiral<sup>2</sup> existente na forma de dois estereoisômeros, ácido L e D-lático, que podem ser quimicamente biossintetizados. Derivado de fontes naturais renováveis contendo amido ou açúcar, como milho, trigo, cana-de-açúcar, beterraba ou batata, o ácido lático é usado para sintetizar o PLA.

Na MA, o PLA tem sido uma escolha popular para a produção de protótipos, peças funcionais e até mesmo produtos finais, devido às suas propriedades mecânicas e de processamento. É um material que pode ser facilmente processado em impressoras 3D devido ao seu baixo ponto de fusão, o que permite a impressão em temperaturas relativamente baixas.

<sup>2</sup> Uma molécula é quiral se pode conservar essa relação de assimetria, assim como as mãos esquerda e direita (objeto-imagem).

Outra vantagem é que ele pode ser facilmente colorido ou pigmentado, o que o torna ideal para produção de peças coloridas ou personalizadas.

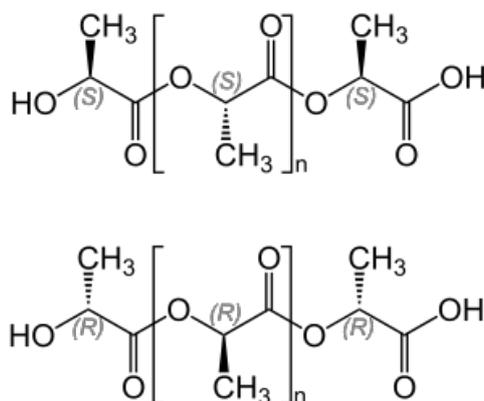


Figura 2.5 – Unidade estrutural do polímero PLA

De acordo com PEREIRA e MORALES (2014), estudos de saúde mostraram que o nível de ácido lático que migra para os alimentos a partir de embalagens produzidas com PLA é menor do que a quantidade de ácido lático usada como ingrediente em muitos alimentos. Assim, dentre os polímeros biodegradáveis, o PLA é o que apresenta o maior potencial para substituição aos polímeros derivados do petróleo na indústria de embalagens.

Apesar de suas muitas vantagens, o material possui algumas limitações na MA. Por exemplo, sua baixa temperatura de fusão pode resultar em peças com baixa resistência térmica, o que pode limitar sua aplicação onde se exigem alta resistência a temperaturas relativamente elevadas, possuindo uma tendência à deformação, sendo este um limitador em aplicações que exigem tolerâncias restritas.

No entanto, essas limitações não têm impedido o uso do PLA na MA, sendo este um dos materiais mais populares.

O PLA começa a amolecer em temperaturas acima de 60°C ( $T_g$ ) e possui temperatura de fusão em torno dos 180°C (3DLAB, 2022). Isso pode limitar o uso do PLA em aplicações que envolvam altas temperaturas, como a produção de peças para motores e outros componentes automotivos. Além disso, também pode ser suscetível à degradação UV, o que pode limitar a

sua utilização em aplicações ao ar livre ou em ambientes com exposição direta à luz solar.

No entanto, a pesquisa continua a ser conduzida para melhorar as propriedades do PLA e superar seus desafios. Novas formulações e processos estão sendo desenvolvidos para melhorar a resistência ao calor, resistência à degradação UV e resistência ao impacto do PLA. Além disso, a combinação do PLA com outros materiais, como fibras de vidro ou carbono, pode melhorar suas propriedades mecânicas e torná-lo mais adequado para aplicações específicas.

Em conclusão, o PLA é um material de base popular na manufatura aditiva devido às suas propriedades mecânicas, disponibilidade, facilidade de uso, biocompatibilidade e bioreabsorção. Embora tenha algumas limitações, pesquisas em andamento estão trabalhando para melhorar suas propriedades e expandir seu uso em aplicações mais exigentes. A utilização do PLA na MA é um exemplo do potencial na produção de peças de alta qualidade e sustentáveis.

As propriedades dos filamentos e peças finalizadas podem ser observadas na Tabela 3.1.

#### 2.1.4 Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS)

De acordo com DANIEL et al. (2022), o ABS é um polímero termoplástico amorfo com ótimas propriedades mecânicas, como resistência ao impacto, tenacidade, dureza e rigidez quando comparado com outros polímeros comuns, tendo se tornado popular na MA por sua versatilidade. Em geral, as peças feitas em ABS podem ser usadas em uma faixa de temperatura entre 20 – 80°C (MOORE, 1973), podendo, portanto, ser utilizado em aplicações que envolvam altas temperaturas, como componentes automotivos ou peças a serem utilizadas ao ar livre, por exemplo.

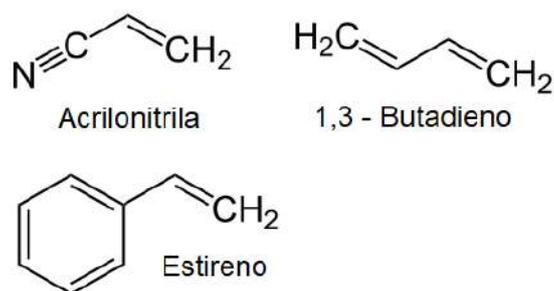


Figura 2.6 – Unidade estrutural do polímero ABS

O ABS é um material termoplástico que pode ser processado por meio de diferentes técnicas, como injeção, extrusão e impressão 3D. Na impressão 3D, o ABS é um dos materiais mais populares e amplamente utilizados, em função de sua resistência e faixa de temperatura de impressão, sendo compatível com a maioria das impressoras 3D FDM disponíveis no mercado.

A impressão 3D com ABS requer uma temperatura de impressão mais alta em comparação com outros materiais, como o PLA, geralmente entre 220 e 250°C. Mesmo sendo um material popular na impressão 3D, seu uso como matéria-prima nas impressoras não é tão trivial como o PLA, exigindo certos cuidados, tanto na configuração, como no preparo da impressora e do ambiente de impressão, uma vez que trata-se de um material com grande coeficiente de retração, podendo se deformar com o resfriamento rápido (fenômeno conhecido como *warping*).

O ABS pode ser facilmente processado após a impressão 3D, com lixamento, pintura e perfuração. A maioria das tintas e colas aderem bem ao ABS, o que o torna uma escolha popular para aplicações de acabamento.

Segundo BESKO, BILYK e SIEBEN (2017), uma desvantagem do ABS é sua emissão de gases tóxicos durante o processo de impressão, por isso, é importante que a impressão 3D seja realizada em um ambiente bem ventilado (porém, de preferência, com a impressora fechada, para evitar o *warping*).

Em resumo, o ABS é um material popular na manufatura aditiva devido às suas propriedades mecânicas, durabilidade, resistência a altas temperaturas e relativa facilidade de processamento. No entanto, é importante

considerar suas desvantagens, como a deformação da peça e a emissão de gases tóxicos durante o processo de impressão.

## 2.2 Defeitos em Materiais Poliméricos

### 2.2.1 Defeitos típicos de materiais poliméricos

Segundo COSTA, ALMEIDA e REZENDE (2005), um problema comum na fabricação de compósitos poliméricos é a formação de defeitos como regiões ricas em resina, fibras onduladas e distorcidas, inclusões e vazios.

Um dos principais defeitos encontrados em polímeros e compósitos de matriz polimérica é a presença de vazios, sendo extremamente difícil evitá-los. Esses defeitos podem comprometer o comportamento estrutural das peças, uma vez que são pontos potenciais de concentração de tensão, além de favorecer a absorção de água, aumentando os vazios pré-existentes (WOLFF, 1993).

Em termofixos, esses defeitos podem ser induzidos por bolhas de ar presas durante o processo de fabricação, que podem ser formadas por diversos motivos, tais como subprodutos voláteis presentes no material durante o processo de cura da matriz, ar preso no material ou erros de fabricação, como vazamentos na bolsa de vácuo ou problemas na fonte de vácuo. Apesar de vários estudos realizados em compósitos de matriz polimérica, com a maioria deles focando na resistência ao cisalhamento interlaminar, ainda não há consenso sobre a magnitude do efeito da porosidade nas propriedades mecânicas desses materiais, devido ao grande número de parâmetros envolvidos no problema (COSTA; ALMEIDA; REZENDE, 2005). Ainda de acordo com o mesmo estudo, o tipo de carga de reforço, sua natureza (estática ou dinâmica) e a técnica de inspeção utilizada também são fatores significativos. Por exemplo, o uso de diferentes frequências no equipamento de ultrassom resulta em diferentes valores de atenuação. Portanto, apenas os resultados obtidos a partir da caracterização de compósitos produzidos e testados de forma semelhante podem ser comparados diretamente.

Segundo SOUZA et al. (2012), a família de técnicas de inspeção mais utilizada em materiais compósitos é a de ensaios não destrutivos, que avaliam a qualidade de materiais acabados ou semi-acabados para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, sem alterar suas características ou interferir em seu uso posterior.

Os principais tipos de ensaios não-destrutivos que podem ser utilizados em materiais compósitos são:

- **Inspeção Visual:** É um método simples e de baixo custo que não requer equipamento especial, apenas a experiência do inspetor. É amplamente utilizado para avaliar a qualidade de qualquer tipo de peça ou componente, incluindo juntas soldadas, revestimentos, superfícies e peças de grande porte.
- **Emissão Acústica:** É uma técnica que consiste em detectar ondas sonoras geradas por defeitos em materiais. É útil para detectar defeitos em materiais compósitos, como delaminação, trincas e falhas de adesão.
- **Termografia:** É uma técnica que utiliza câmeras infravermelhas para detectar variações de temperatura em materiais. É útil para detectar defeitos em materiais compósitos, como delaminação, trincas e falhas de adesão.
- **Holiday Detector:** É uma técnica que utiliza um detector de faíscas para detectar falhas em revestimentos de materiais compósitos. É útil para detectar falhas de adesão e porosidade em revestimentos.
- **Ultrassom:** É uma técnica que utiliza ondas sonoras de alta frequência para detectar defeitos em materiais. É útil para detectar defeitos em materiais compósitos, como delaminação, trincas e falhas de adesão.
- **Radiografia:** É uma técnica que utiliza raios-X ou raios gama para detectar defeitos em materiais. É útil para detectar defeitos em materiais compósitos, como delaminação, trincas e falhas de adesão.

- Tomografia Computadorizada: É uma técnica que utiliza raios-X ou raios gama para criar imagens tridimensionais de objetos. É útil para detectar defeitos em materiais compósitos, como delaminação, trincas e falhas de adesão.
- Holografia: É uma técnica que utiliza lasers para criar imagens tridimensionais de objetos. É útil para detectar defeitos em materiais compósitos, como delaminação, trincas e falhas de adesão.
- Shearografia: É uma técnica que utiliza interferometria óptica para detectar defeitos em materiais. É útil para detectar defeitos em materiais compósitos, como delaminação, trincas e falhas de adesão.

De acordo com ELKOLALI et al. (2022), no caso de materiais compósitos de matriz polimérica, a presença de vazios em um material não apenas afeta suas propriedades mecânicas, mas também pode causar danos às fibras devido à abrasão entre elas. Além disso, a presença de vazios aumenta a vulnerabilidade do material à penetração de água e aos efeitos do intemperismo, o que é especialmente crítico em aplicações marítimas. Por esses motivos, é importante ter conhecimento sobre o conteúdo de vazios para garantir a qualidade de um processo de fabricação e prever as propriedades do componente produzido.

Tratando-se do volume do vazio, COSTA, ALMEIDA e REZENDE (2005) faz uma observação onde, ao invés de se tratar de um ponto, o conteúdo vazio é uma medida associada a um volume finito de material, sendo, portanto, possível realizar uma medida e capturar algum tipo de valor médio em um determinado volume, sem reter as informações sobre a forma, tamanho e distribuição dos vazios. No entanto, essas características desempenham um papel importante na determinação do efeito dos vazios no comportamento mecânico do material, que no caso dos compósitos de matriz polimérica, são controladas principalmente pelo material da matriz, tipo de reforço e problema de fabricação que originou os defeitos.

Segundo ELKOLALI et al. (2022), durante o processo de cura da matriz polimérica (para o caso de matrizes termorrígidas), os vazios tendem a assumir uma forma predominantemente esférica, devido à fase de gelificação<sup>3</sup> pela qual a matriz passa. Embora existam vários métodos disponíveis para reduzir o conteúdo de vazios durante a fabricação, como a cura em autoclave e o ensacamento a vácuo, é importante ressaltar que os vazios não podem ser completamente eliminados. No entanto, esses métodos podem ajudar a reduzir tanto o tamanho quanto o volume total dos vazios no material, o que pode melhorar significativamente suas propriedades.

Por meio de testes ultrassônicos, STONE e CLARKE (1975) observou que aproximadamente 1,5% do conteúdo de vazios são principalmente vazios induzidos por voláteis, enquanto o restante, se houver, é causado pelo aprisionamento de bolhas de ar entre as lâminas.

Um critério de aceitação com relação às descontinuidades excessivamente conservador faz com que muitas peças que poderiam funcionar satisfatoriamente sejam descartadas desnecessariamente, aumentando os custos de fabricação. Normas como a API 20T (2022), por exemplo, trazem parâmetros para aceitação de defeitos em compósitos. Por outro lado, se os efeitos deletérios dos defeitos forem subestimados, pode ocorrer falha em serviço de algumas peças. Ambas as situações são evitadas por uma escolha criteriosa do nível aceitável de defeitos na peça. Isso deve ser baseado em critérios de fratura confiáveis apoiados por extensa caracterização experimental e uma compreensão aprofundada do efeito dos defeitos no comportamento mecânico do laminado (COSTA; ALMEIDA; REZENDE, 2005).

Relativo às peças fabricadas via MA, de acordo com FILHO et al. (2023), AHN et al. (2002) e CAVALCANTE (2022) os parâmetros de controle do processo que provavelmente podem afetar as propriedades mecânicas das peças impressas são:

- *Bead Width* (Largura do Cordão): Este parâmetro se refere à largura

<sup>3</sup> A gelificação é o processo pelo qual um líquido é convertido em gel.

do filamento de material depositado pela cabeça de impressão da impressora 3D durante cada passagem.

- *Air Gap* (Espaço de Ar): O *air gap* são os espaços vazios entre as camadas, conforme mostrados na Figura 2.7.
- *Model Build Temperature* (Temperatura de Construção do Modelo): A temperatura de construção do modelo se refere à temperatura da plataforma de construção da impressora 3D. Ela é ajustada de acordo com o tipo de material sendo usado. Manter a temperatura adequada é crucial para a aderência do material à plataforma e para evitar deformações durante a impressão.
- *Raster Orientation* (Orientação do Raster): A orientação do raster se refere à direção em que as camadas do objeto são impressas.
- *Color* (Cor): Este parâmetro se refere à cor do filamento de material usado na impressão 3D. Embora a cor em si não afete as propriedades mecânicas ou estruturais do objeto impresso, ela é importante para fins estéticos e de identificação.

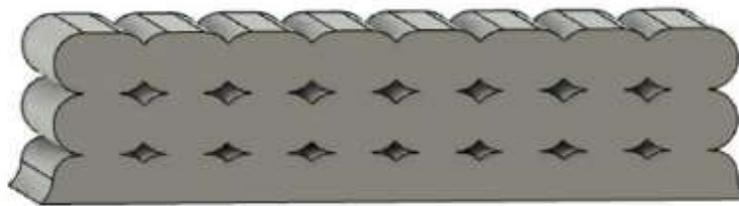


Figura 2.7 – Presença dos *air gaps* na estrutura impressa (CAVALCANTE, 2022)

É importante entender e ajustar esses parâmetros de acordo com o material e o objeto que está sendo impresso para obter os melhores resultados em termos de qualidade e funcionalidade. Os parâmetros podem variar dependendo da impressora 3D e do software de fatiamento utilizado.

## 2.3 Análise Estatística

A Estatística (ou ciência Estatística) é um conjunto de técnicas e métodos de pesquisa que, entre outros tópicos, envolve o planejamento do experimento a ser realizado, a coleta qualificada dos dados, a inferência, o processamento, a análise e a disseminação das informações.

De acordo com MONTGOMERY e RUNGER (2003), o campo da estatística lida com a coleta, a apresentação, a análise e o uso dos dados para tomar decisões, resolver problemas e planejar produtos e processos. As técnicas estatísticas podem ser uma ajuda poderosa no planejamento de novos produtos e sistemas, melhorando os projetos existentes e planejando, desenvolvendo e melhorando os processos de produção. Métodos estatísticos são ainda usados para nos ajudar a entender a variabilidade dos resultados de teste das amostras de interesse <sup>4</sup>.

No caso da análise de dados, antes de mais nada, é importante a realização de um planejamento dos experimentos que serão executados, quais os objetivos com estes experimentos, como será controlada a qualidade dos dados que serão obtidos e como estes dados serão processados e analisados.

Segundo CALADO e MONTGOMERY (2003), os três princípios básicos de um planejamento de experimentos são:

- **Replicação:** a realização de experimentos com réplicas é importante por dois motivos principais: obtenção do erro experimental e, caso a média de uma amostra seja utilizada para estimar o efeito de um fator no experimento, a replicação permite a obtenção de uma estimativa mais precisa deste fator;
- **Aleatoriedade:** garante a distribuição equânime de todos os fatores não considerados;
- **Blocagem:** técnica extremamente importante, usada industrialmente com objetivo de aumentar a precisão de um experimento. Como

---

<sup>4</sup> Variabilidade são as sucessivas observações de um sistema ou fenômeno que não produzem exatamente o mesmo resultado.

exemplo, para simplificar o entendimento desta técnica, quando um experimento é realizado por duas pessoas em momentos diferentes, o tratamento dos dados é separado em dois blocos, evitando uma possível não homogeneidade na coleta destes dados.

Os métodos básicos de um bom planejamento experimental tem como objetivos a seleção de um melhor modelo na série de modelos plausíveis e a estimação eficiente de parâmetros no modelo selecionado (CALADO; MONTGOMERY, 2003). A Figura 2.8 abaixo ilustra uma estratégia inicial a ser adotada no planejamento de experimentos.

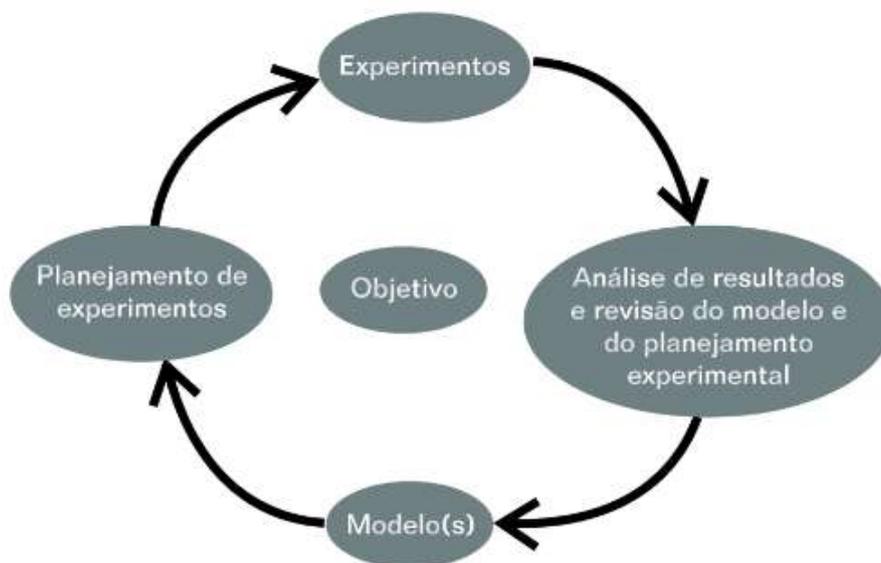


Figura 2.8 – Estratégia inicial de um planejamento de experimentos (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

Esta é a fase de planejamento pré experimental, essencial para o sucesso das análises a serem realizadas posteriormente.

### 2.3.1 Teste de Hipóteses

De acordo com SIEGEL e JR (1975), a hipótese nula ( $H_0$ ) é o primeiro passo no processo de tomada de decisão. Ela é formulada como uma hipótese de “não-efeito”, sendo intencionada à rejeição, ou seja, à negação

do ponto que se deseja confirmar. Já a  $H_1$  é a hipótese contrária (alternativa), onde, se a  $H_0$  é rejeitada, esta é automaticamente não rejeitada.

Deve-se deixar claro que, apesar da possibilidade de não rejeição da  $H_1$ , isso não significa que ela é verdadeira. Nos é permitido apenas fazer afirmações probabilísticas com relação às hipóteses.

### 2.3.2 Nível de Significância ( $\alpha$ )

Para realizar um teste de hipótese adequado, segundo SIEGEL e JR (1975), é imprescindível estabelecer tanto a  $H_0$  quanto a  $H_1$ . Além disso, é crucial determinar o nível de significância do teste, o qual consiste no processo decisório em que se especificam previamente todos os conjuntos de possíveis amostras que apresentem uma incompatibilidade significativa com  $H_0$  (ou que sejam tão extremas) a ponto de a probabilidade de a amostra que observamos estar inserida entre essas ser muito baixa, se  $H_0$  for verdadeira. Esta probabilidade é o que chamamos de nível de significância ( $\alpha$ ).

Os valores usuais para  $\alpha$  são 0,05 e 0,01 (5% e 1%), ou seja, a probabilidade de ocorrência de um evento  $H_0$  é menor ou igual ao  $\alpha$  escolhido, caso esta seja verdadeira, sendo esta escolha subjetiva, dependente da motivação do pesquisador ou algum procedimento próprio, onde quanto maior o valor de  $\alpha$ , menos criterioso é o teste. Os valores citados são usuais, porém podem-se usar outros, tanto mais criteriosos (0,005 ou 0,001, por exemplo) quanto menos (0,08 ou 0,1), a depender da necessidade do estudo.

O propósito da escolha do  $\alpha$  é a definição da ocorrência de um evento raro sob  $H_0$ , na eventualidade da sua confirmação.

### 2.3.3 Testes Estatísticos Paramétricos e Não Paramétricos

Relativo ao teste estatístico paramétrico, de acordo com SIEGEL e JR (1975), trata-se de um teste que especifica certas condições das respostas na população da qual a amostra da pesquisa foi retirada, e, uma vez que essas condições não são testadas ordinariamente, elas são assumidas como válidas. Ao contrário, o teste não-paramétrico se baseia em um modelo

que especifica condições muito gerais e nenhuma da forma específica da distribuição da qual a amostra foi extraída.

Os testes paramétricos, por um lado, são muito precisos e confiáveis, especialmente quando se tratam de variáveis que estão dentro de um intervalo específico. Além disso, eles permitem um maior controle dos resultados e garantem que as conclusões sejam mais precisas, porém, possuem limitações, entre elas a necessidade de que as variáveis satisfaçam diversos requisitos, podendo, caso isso não ocorra, comprometer os resultados. Os principais requisitos comumente testados são:

- Variância homogênea (homocedasticidade) - podendo ser testada pelos testes de Cochran-Bartlet ou Levene's;
- Distribuição normal dos resíduos<sup>5</sup> - podendo ser testada pelos testes de Shapiro-Wilks ou Liliefors.

Os testes não-paramétricos são mais flexíveis quando se tratam de distribuições de variáveis, podendo tratar inclusive as que não sigam uma distribuição normal, podendo gerar resultados confiáveis e sendo utilizados quando não é possível ou não se desejam assumir as condições necessárias para se aplicar um teste paramétrico. Em função das condições de aplicabilidade, são menos suscetíveis a erros e são mais fácil entendimento. Por outro lado, possuem menor precisão em relação aos testes paramétricos, e seus resultados podem ser menos confiáveis quando as amostras são pequenas.

### 2.3.4 Planejamento Fatorial $2^k$ Completo

De acordo com CALADO e MONTGOMERY (2003), o planejamento fatorial completo de dois níveis é representado por  $2^k$ , onde 2 é o número de níveis e  $k$  o número de fatores. O resultado da equação  $2^k$  é o número de experimentos a serem realizados. Por exemplo, sendo então  $k = 4$ , teremos

<sup>5</sup> Segundo COOK e WEISBERG (1982), resíduos são usados em diversos procedimentos destinados a detectar vários tipos de desacordo entre os dados e um modelo assumido. Nestes modelos, o resíduo é a diferença entre o valor observado e o valor médio que o modelo prevê para aquela observação, sendo estes valores especialmente úteis em procedimentos de regressão e ANOVA, uma vez que indicam até que ponto um modelo explica a variação nos dados observados.

$2^4 = 16$ , ou seja, 16 experimentos diferentes (não considerando o número de réplicas).

Este tipo de planejamento completo é muito útil nos estágios iniciais de um trabalho experimental, onde se têm muitas variáveis a serem investigadas.

É muito comum que se utilizem variáveis escalonadas (ou escaladas/codificadas) para a realização dos experimentos, onde os valores originais são convertidos em  $-1$  e  $+1$ , nos níveis inferior e superior, respectivamente. O escalonamento pode ser feito utilizando as seguintes equações:

$$x_i^- = \frac{X_i^- - \bar{X}_i}{\frac{X_i^+ - X_i^-}{2}} = -1 \quad (2.1)$$

$$x_i^+ = \frac{X_i^+ - \bar{X}_i}{\frac{X_i^+ - X_i^-}{2}} = +1 \quad (2.2)$$

onde  $X_i^-$  e  $X_i^+$  são os valores originais do fator  $i$  (níveis inferior e superior, respectivamente) e  $\bar{X}_i$  o valor médio original entre os níveis.

Utilizando um exemplo de CALADO e MONTGOMERY (2003), onde tem-se o interesse de estudar a fluidez (variável de resposta) de uma substância em função de sua temperatura e concentração (fatores). Supondo que foi obtida a Tabela 2.2 para o experimento em questão:

Tabela 2.2 – Exemplo de matriz de planejamento (CALADO; MONTGOMERY, 2003)

Experimento	Concentração (%)	Temperatura (°C)	Fluidez
1	13,5	124	$\bar{y}_1 = 60,2$
2	14,5	124	$\bar{y}_2 = 67,6$
3	13,5	128	$\bar{y}_3 = 73,2$
4	14,5	128	$\bar{y}_4 = 76,2$

Utilizando as equações de escalonamento, temos os seguintes valores calculados:

$$c^- = \frac{13,5 - 14}{14,5 - 13,5} = -1$$

$$c^+ = \frac{14,5 - 14}{14,5 - 13,5} = +1$$

$$t^- = \frac{124 - 126}{128 - 124} = -1$$

$$t^+ = \frac{128 - 126}{128 - 124} = +1$$

Assim a tabela escalonada será apresentada conforme abaixo, de forma mais prática:

Tabela 2.3 – Exemplo de matriz de planejamento escalonada (CALADO; MONTGOMERY, 2003)

Experimento	Concentração (%)	Temperatura (°C)	Fluidez
1	-1	-1	$\bar{y}_1 = 60,2$
2	+1	-1	$\bar{y}_2 = 67,6$
3	-1	+1	$\bar{y}_3 = 73,2$
4	+1	+1	$\bar{y}_4 = 76,2$

Segundo MONTGOMERY e RUNGER (2003), uma vantagem importante dos experimentos fatoriais é a possibilidade de detectar interação entre os fatores.

Uma outra forma prática de mostrar os efeitos de interação é graficamente. A Figura 2.9 abaixo é a representação gráfica dos valores médios da fluidez do exemplo dado acima (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

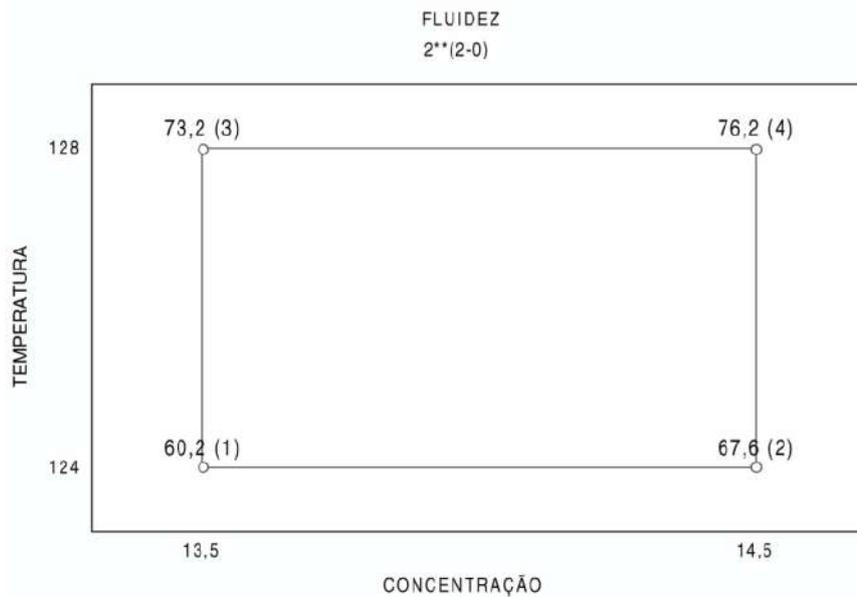


Figura 2.9 – Representação gráfica dos valores médios da fluidez (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

Através desta Figura é possível verificar que as diferenças de  $\bar{y}_4 - \bar{y}_3$  e  $\bar{y}_2 - \bar{y}_1$  são as estimativas de efeitos da variação de concentração de 14,5% para 13,5% (nas temperaturas mais alta e mais baixa, respectivamente), sendo conhecidas como efeitos simples de concentração nas temperaturas. Desta forma tem-se que:

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{\bar{y}_4 - \bar{y}_3}{2} + \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{2} \\
 &= \frac{\bar{y}_4 + \bar{y}_2}{2} - \frac{\bar{y}_3 + \bar{y}_1}{2}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$\bar{y}_+ = \frac{\bar{y}_4 + \bar{y}_2}{2} \tag{2.4}$$

$$\bar{y}_- = \frac{\bar{y}_3 + \bar{y}_1}{2} \tag{2.5}$$

Temos então o chamado efeito principal da concentração, que é representado pela seguinte equação:

$$C = \bar{y}_+ - \bar{y}_- \quad (2.6)$$

Já a soma dos efeitos simples representa o contraste, que é conhecido como *efeito total da concentração* e é, na realidade, o dobro do efeito principal, representando a soma da variável resposta quando multiplicados pelo correspondente valor escalonado do fator de estudo. No caso o contraste da concentração (*Contraste<sub>conc.</sub>*) é dado por:

$$\begin{aligned} \text{Contraste}_{conc.} &= 2 \cdot C & (2.7) \\ &= 2 \cdot \left( \frac{\bar{y}_4 + \bar{y}_2}{2} - \frac{\bar{y}_3 + \bar{y}_1}{2} \right) \\ &= \bar{y}_4 - \bar{y}_3 + \bar{y}_2 - \bar{y}_1 \end{aligned}$$

A soma quadrática para a concentração é dada por:

$$SQ_{conc.} = \frac{(\text{Contraste}_{conc.})^2}{abn} \quad (2.8)$$

onde:  $a$  – é o número de níveis;

$b$  – o número de fatores; e

$n$  – a quantidade de réplicas.

A Figura 2.10 representa graficamente, através das setas, os efeitos simples da concentração, de onde podem ser calculados o efeito principal, o contraste e a soma quadrática para a concentração. Todos estes cálculos podem ser feitos modificando o sentido das setas e recalculando para, respectivamente, o efeitos simples da temperatura e da interação entre a concentração e temperatura, como pode ser observado nas Figuras 2.11 e 2.12 abaixo.

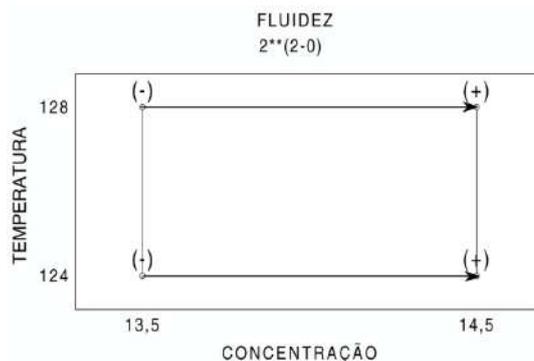


Figura 2.10 – Nova representação gráfica dos efeitos simples da concentração (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

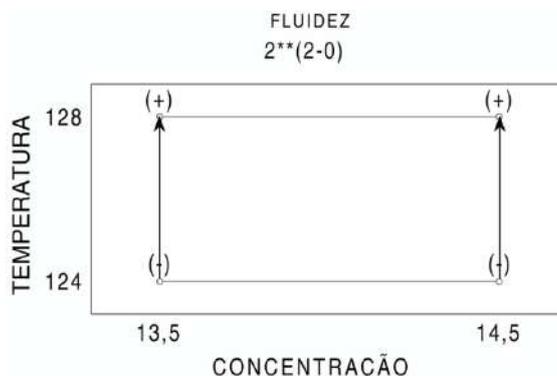


Figura 2.11 – Nova representação gráfica dos efeitos simples da temperatura (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

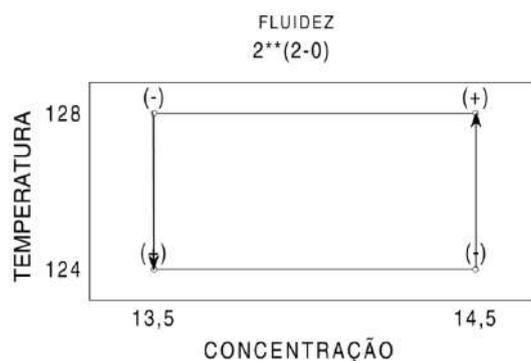


Figura 2.12 – Nova representação gráfica dos efeitos simples da interação entre a concentração e temperatura (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

Uma vez calculados todos os efeitos simples, é possível calcular a soma quadrática total ( $SQ_T$ ) e a soma quadrática do erro ( $SQ_E$ ) são dados por:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{itt}^2}{abn} \quad (2.9)$$

onde  $y_{itt}$  é a soma de todas as observações com  $abn$  graus de liberdade.

$$SQ_E = SQ_T - SQ_{conc.} \quad (2.10)$$

### 2.3.5 ANOVA

Conforme argumentado por ANJOS (2005), o método ANOVA (Análise de Variâncias) é um procedimento analítico que se baseia na decomposição da variação presente em um conjunto de observações em partes atribuíveis a causas conhecidas - tais como tratamentos e blocos - e a uma parte decorrente de causas desconhecidas, como erro experimental ou resíduo. Em outras palavras, a ANOVA é uma técnica estatística poderosa que permite examinar a influência de diferentes fatores em um conjunto de dados, tornando-se uma ferramenta essencial em muitas áreas de pesquisa.

Importante ressaltar que o planejamento de experimentos, tal como apresentado na seção anterior é um caso particular da ANOVA para fatores estruturados cada um a 2 níveis.

Os pressupostos fundamentais, de acordo com ANJOS (2005), para a validação da ANOVA devem ser:

- a. Os efeitos principais devem ser aditivos.

Nos experimentos científicos, é comum utilizar modelos matemáticos para descrever as observações. Um destes modelos é o modelo linear aditivo, onde cada observação é representada pela equação:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.11)$$

No trabalho em questão foram adotados os modelos lineares pela sua simplicidade e histórica ( $R^2$ ) a problemas de engenharia abordados pela metodologia ANOVA. Contudo, modelos não lineares ou modelagens mais complexas podem ser adotadas se desejado.

Este modelo é aditivo, o que significa que cada um dos efeitos que compõem a equação deve se somar. Em outras palavras, cada observação é composta pela média global ( $\mu$ ), o efeito específico de cada grupo ( $\tau_i$ ) e um erro aleatório ( $\varepsilon_{ij}$ ).

Embora esta seja uma condição importante para a realização de testes estatísticos, ela nem sempre é cumprida. Isso pode afetar o nível de significância do teste e, conseqüentemente, a interpretação dos resultados. Uma maneira de contornar este problema é por meio de transformações da variável resposta, como o uso de logaritmos. Desta forma, a equação pode ser ajustada para atender às condições necessárias e obter resultados mais confiáveis e precisos.

- b. Os erros de observação devem ser independentes.

A validade de uma análise depende da independência dos erros em cada observação, seja para tratamentos similares ou diferentes. Nessa perspectiva, é essencial que os efeitos de tratamentos sejam independentes, ou seja, sem qualquer tipo de correlação ou associação entre si. Esse aspecto pode ser verificado com a ausência de covariância entre os erros de duas observações distintas, como expresso por

$$\text{cov}(\varepsilon_{ij}, \varepsilon'_{ij}) = 0 \quad (2.12)$$

- c. Os erros devem ser normalmente distribuídos.

Para uma análise de variância ser válida, os erros precisam seguir uma distribuição normal de probabilidade e serem provenientes da mesma população. Dessa forma, é necessário que todos os erros das

observações apresentem a mesma distribuição de probabilidade. Caso contrário, é possível utilizar a transformação dos dados para solucionar essa questão.

d. Os erros devem ter variância comum (homocedasticidade).

Para que os testes de análise de variância sejam válidos, é necessário que os componentes do erro sejam todos estimados de uma mesma população. Isso significa que cada tratamento deve ter uma variância aproximadamente igual. Essa suposição pode ser verificada por meio do teste F máximo ou F de Hartley, se o número de repetições for o mesmo em todos os tratamentos. Caso contrário, o teste de Bartlett pode ser usado. Quando as variâncias não são homogêneas, isso é referido como heterocedasticidade.

Para verificar essas suposições na prática, a análise de resíduos é realizada, com as metodologias utilizadas neste trabalho sendo apresentadas posteriormente na seção de metodologia.

Por fim, para comparação de pares de intervalos de dados, vários testes podem ser selecionados, sendo alguns dos mais comuns os testes de Fisher LSD, Student-Newman-Keuls e o teste de Tukey.

## 2.4 Manufatura Aditiva

Nos últimos anos, a utilização da MA como meio de produção vem crescendo em grande escala, impulsionada pela popularização das impressoras e principalmente pelo avanço de novas tecnologias que trouxeram acessibilidade, rapidez, praticidade e variedade de configuração geométrica para a fabricação de modelos reais. Neste contexto, a MA mostra-se como uma ferramenta poderosa no desenvolvimento de novos produtos, uma vez que permite a transformação de ideias de projeto em protótipos (ou até produtos finalizados) oferecendo uma maior tangibilidade à construção de produtos, inclusive com níveis avançados de complexidade.

Segundo MANÇANARES (2016), a MA apresenta diversas vantagens em relação a sua aplicação e em relação às técnicas de manufatura tradicional, como o custo, utilização mais eficiente de matéria-prima, a complexidade das peças, benefícios logísticos, dentre outros.

Alguns exemplos de aplicação da impressão 3D incluem:

- Prototipagem: a tecnologia é amplamente utilizada em processos de desenvolvimento de produto para testar e validar designs antes da produção em massa.
- Fabricação de peças sob medida: a impressão 3D permite a criação de próteses, implantes dentários, órgãos artificiais e outros objetos personalizados para o paciente.
- Produção de peças de reposição: em vez de esperar semanas ou até meses para que uma peça sobressalente seja entregue, é possível imprimir rapidamente a peça necessária.
- Produção de ferramentas: a impressão 3D pode ser usada para criar ferramentas personalizadas para a linha de produção, economizando tempo e dinheiro.
- Criação de peças de arte e joias: a precisão e a capacidade de criar formas complexas tornam a tecnologia ideal para artistas e designers criarem peças únicas.
- No campo da medicina, a MA tem sido utilizada para a confecção de próteses personalizadas, órgãos artificiais e modelos anatômicos para planejamento cirúrgico. Na indústria automotiva, a MA é utilizada para a produção de peças de baixo volume e alta complexidade. E na área da moda, tem sido explorada para a criação de roupas e acessórios únicos e personalizados.

O estudo realizado por KHALEED et al. (2019) demonstrou que a manufatura aditiva pode ser uma alternativa viável para a fabricação de hélices

em plástico ABS. O estudo utilizou o método dos elementos finitos para avaliar o desempenho da peça produzida e verificou que, mesmo considerando os defeitos comuns da manufatura aditiva, como a presença de vazios, estes eram poucos e muito pequenos, não afetando significativamente a integridade da peça.

Isso demonstra que a manufatura aditiva pode ser uma opção para a fabricação de peças mecânicas, como hélices, desde que sejam adotadas medidas para garantir a qualidade e a integridade da peça produzida. A escolha adequada do material, o controle das variáveis de processamento e a realização de testes de qualidade são fundamentais para garantir a confiabilidade das peças produzidas.

Em seu trabalho, CHAMPION, JAMSHIDI e JOORDENS (2016) apresentou um caso de uso da manufatura aditiva na construção de uma caixa para fixação e armazenamento de sensores em um Veículo Autônomo Subaquático *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV). O principal desafio da aplicação foi assegurar a estanqueidade da caixa de junção durante as manobras realizadas pelo veículo.

Para garantir a estanqueidade da caixa, foram utilizados materiais e técnicas específicas de impressão 3D, como o uso de materiais resistentes à água e a utilização de técnicas de impressão que garantiram uma alta qualidade e precisão na produção da peça. Além disso, foram realizados testes de resistência e estanqueidade para garantir que a peça atendesse às especificações exigidas.

O estudo demonstrou que a manufatura aditiva pode ser uma opção viável para a produção de peças utilizadas em ambientes extremos, como no caso do AUV, onde a resistência e a estanqueidade são fundamentais para o sucesso da operação. Além disso, a manufatura aditiva permitiu a produção de peças personalizadas e com um tempo de produção reduzido, o que pode ser vantajoso em muitas aplicações.

Com base no estudo de LIGON et al. (2017), pode-se observar que a impressão 3D é amplamente utilizada em diversas áreas. De acordo com

o gráfico apresentado na Figura 2.13, dentre as principais aplicações da impressão 3D, destaca-se a impressão de peças funcionais, que já corresponde a cerca de 29% de todo o uso das impressoras. Essa informação indica que a impressão 3D tem se mostrado uma tecnologia cada vez mais relevante e com potencial para revolucionar a produção de produtos finais em diferentes setores.

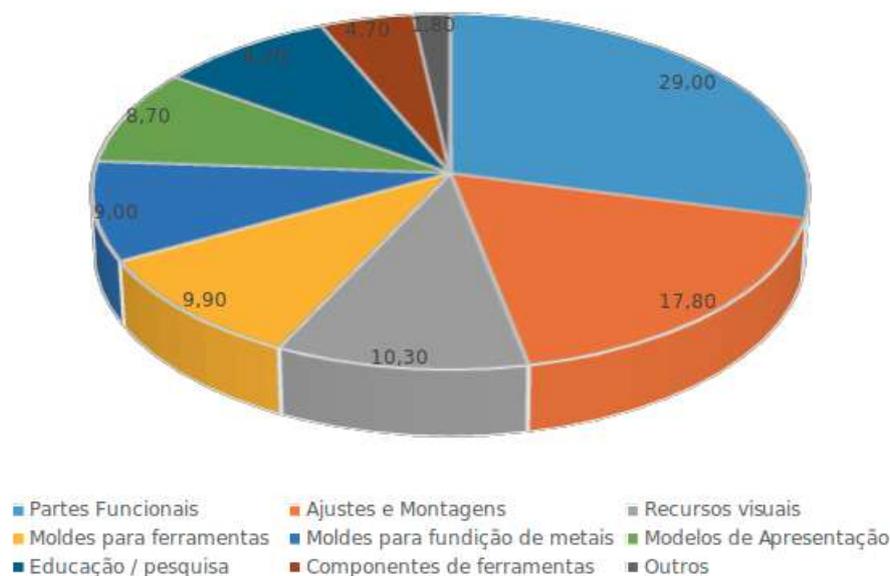


Figura 2.13 – Aplicações mais comuns da MA - Adaptado de LIGON et al. (2017)

### 2.4.1 Protótipos

De acordo com BAXTER (1998), as fases iniciais do desenvolvimento de um projeto sempre necessitam de um volume menor de investimento que na fase de produção. Os protótipos vêm primeiro e a razão para a construção de protótipos é a possibilidade de transformar a ideia em um “modelo real”, sendo possível avaliar a viabilidade técnica e financeira do produto, antes mesmo da fase de produção definitiva.

Para VOLPATO (2007), o protótipo pode ser caracterizado como:

#### a. Físico ou visual

Representa uma prova de conceito para que uma ideia possa ser testada rapidamente em relação a sua forma e encaixe, porém, sem a obrigação

de aplicar o material final;

b. Analítico ou virtual

Protótipo feito em computador, realizado por meio de software que simula a forma e as propriedades físicas da peça;

c. Parcial ou focalizado

Representação parcial com alguns componentes similares ao material final a fim de testar seus aspectos funcionais; e

d. Completo ou funcional

Modelo funcional em escala real para ser encaminhado para a produção em série, permitindo, inclusive, a confecção de peças ferramentais como moldes e matrizes.

Os protótipos podem ser utilizados em diversas fases no processo de desenvolvimento de produtos, entre as quais se destacam AVIZ, GUERRA e GUERRA (2012):

a. Aprendizagem

O objetivo dos protótipos é, principalmente, responder questões de projeto, funcionando como uma ferramenta de aprendizagem a cada integração em que são utilizados;

b. Comunicação

Desempenham o papel principal no compartilhamento de ideias e atuam como facilitadores para a troca de informações num ambiente de projeto onde há uma equipe com grande diversidade de habilidades e pontos de vista. A comunicação em todos os níveis fica facilitada principalmente quando se utilizam protótipos físicos, pois a representação física de um produto é muito mais fácil de ser entendida do que um desenho técnico ou uma descrição verbal;

c. Integração

Os protótipos promovem e melhoram a integração entre os membros de uma organização multicultural e multifuncional, por atuarem como um meio de comunicação e entendimento comum e, também, como uma base de dados em um processo de desenvolvimento de produtos. A possibilidade de se executar montagens nos estágios iniciais do processo de desenvolvimento de produtos aumenta o nível de integração e promove a solução de problemas de projeto;

d. Marco de projeto

Os protótipos podem ser utilizados como marcos no processo de desenvolvimento de produtos por meio do estabelecimento de objetivos a serem alcançados, possibilitando a demonstração de progresso e reforçando o uso de cronogramas. Um cronograma que prevê protótipos serve como um coordenador de atividades de subsistemas paralelos.

Enquanto o uso da MA na fabricação de protótipos continua tendo sua importância, a fabricação de peças finais é o tipo de aplicação que mais cresce (LIGON et al., 2017).

MENDONÇA, TELES e MENDES (2020) apresentou uma proposta de fabricação de um AUV com casco submarino estanque, resistente e estável, utilizando a MA para fabricação deste casco, peças estruturais e as utilizadas para fixação dos componentes eletrônicos (Figura 2.14). Deste modo, a otimização e o desenvolvimento de peças com geometria complexa, por meio de MA, possibilitam a obtenção de produtos híbridos em relação ao processo de fabricação tradicional, agregando conhecimento científico para indústria e a sociedade.

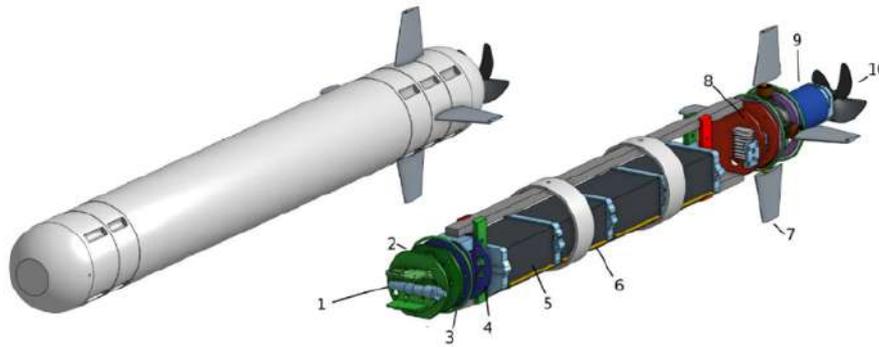


Figura 2.14 – Visões externa e interna ao casco resistente (MENDONÇA; TELES; MENDES, 2020).

Em relação a testes utilizados para aplicação de peças e componentes utilizados, a norma API 20T (2022) especifica requisitos para a produção, controle de qualidade e documentação de componentes de polímero produzidos por manufatura aditiva para uso nas indústrias de petróleo e gás, visando garantir a qualidade e a confiabilidade dos componentes. Esses testes incluem:

- Testes de dimensões e tolerâncias: Esses testes são realizados para garantir que as dimensões e tolerâncias do componente estejam dentro dos limites especificados.
- Testes de propriedades mecânicas: Esses testes são realizados para garantir que as propriedades mecânicas do componente, como resistência à tração, resistência à compressão e resistência à flexão, atendam aos requisitos especificados.
- Testes de propriedades físicas: Esses testes são realizados para garantir que as propriedades físicas do componente, como densidade, permeabilidade e condutividade térmica, atendam aos requisitos especificados.
- Testes de desempenho: Esses testes são realizados para avaliar o desempenho do componente em condições operacionais específicas.

A norma API 20T (2022) pode ser aplicada a uma ampla gama de componentes de polímero produzidos por manufatura aditiva, incluindo:

- Aplicações estruturais: Componentes que suportam cargas mecânicas, como dutos, válvulas e flanges.
- Aplicações de vedação: Componentes que impedem o vazamento de fluidos, como juntas e vedações.
- Aplicações de isolamento: Componentes que impedem a perda de calor ou frio, como isolamento térmico e isolamento acústico.

#### 2.4.2 Prototipagem Rápida, Manufatura Aditiva e Impressão 3D

O termo prototipagem rápida ou *rapid prototyping (RP)* refere-se a uma classe de tecnologias que podem construir modelos físicos, de modo automático, a partir de um modelo gerado num sistema *Computer-Aided Design (CAD)* (GORNI, 2001). O processo de adição de material, chamado inicialmente, de acordo com BOURELL et al. (2001), como Fabricação de Sólidos de Forma Livre (SFF), foi desenvolvido na década de 80 visando encurtar o tempo de execução e montagem de maquetes topográficas. Estes equipamentos possibilitam a construção de geometrias complexas, sem a necessidade da utilização de qualquer tipo de ferramenta de construção do tipo moldes, ou seja, constroem-se os objetos de forma livre.

Conforme VOLPATO et al. (2017), o processo de fabricação por MA tem início com a modelagem da peça em software 3D. Em seguida, a peça é “fatiada” eletronicamente, obtendo-se as “curvas de nível” 2D que definirão, em cada camada, onde será ou não adicionado material. A fabricação da peça física é realizada através de uma impressora 3D, que percorre um caminho determinado pelo software, empilhando o material camada sobre camada, gerando um contínuo de material a partir da sobreposição de camadas fundidas, iniciando na base até atingir o seu topo.

A Figura 2.15 (LIGON et al., 2017) mostra, de modo simplificado, como ocorre o processo de adição de material, gerando modelos reais a partir de modelos virtuais desenvolvidos no computador.

- a. Modelagem tridimensional, gerando-se um modelo geométrico 3D da peça (por exemplo, em um sistema CAD);
- b. A obtenção do modelo geométrico 3D num formato específico para MA, geralmente representado por uma malha de triângulos, em um padrão adequado (por exemplo, STL, *Additive Manufacturing Format* (AMF), ou outro).
- c. Planejamento do processo para a fabricação por camada (fatiamento e definição de estruturas de suporte e estratégias de deposição de material);
- d. Fabricação da peça no equipamento de MA; e
- e. Pós-processamento, que varia bastante de acordo com a tecnologia (pode envolver limpeza, etapas adicionais de processamento e acabamento com processos tradicionais de usinagem por remoção).

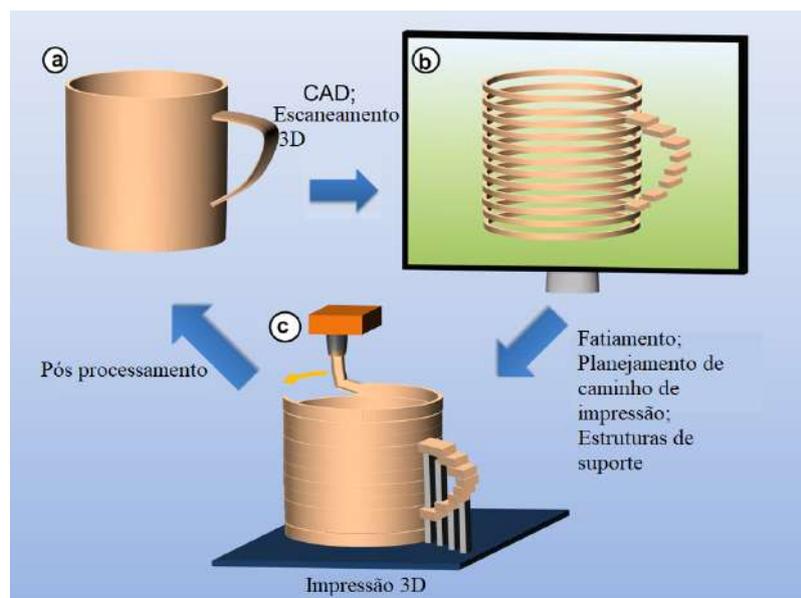


Figura 2.15 – Conceito básico do processo de manufatura aditiva. Traduzido de LIGON et al. (2017)

De uma forma geral e mais detalhada, as etapas do processo compreendem (VOLPATO et al., 2017):

As fases do processo de MA por camadas estão demonstradas na Figura 2.16.

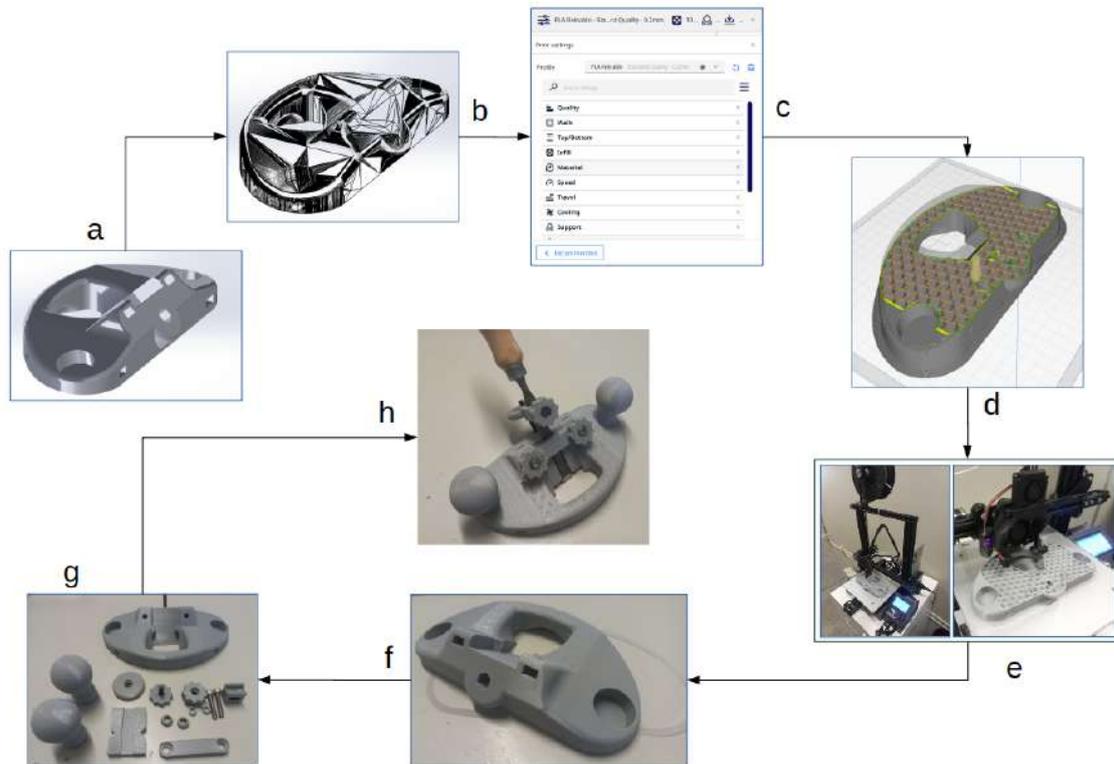


Figura 2.16 – Etapas do processo de impressão 3D. (Próprio autor).

Como pode ser observado na Figura 2.16, temos:

- a. Realização do desenho da peça a ser impressa em *software* 3D;
- b. No mesmo *software* o arquivo .STL é gerado;
- c. No *software* utilizado para fatiamento são realizadas as definições de impressão (temperatura do bico e mesa, velocidade de impressão, *infill*, etc.);
- d. Depois de definidos os parâmetros de impressão é realizado o fatiamento eletrônico da peça no *software*, onde é gerado o arquivo .*gcode* e são gravados todos os parâmetros que serão lidos na impressora;

- e. Impressão da peça;
- f. Após a impressão a peça é retirada, onde é realizado o pós processamento (limpeza de rebarbas e suportes);
- g. Separação dos componentes para montagem final (se houver);
- h. Finalização do processo com a peça impressa devidamente montada e pronta para uso.

### 2.4.3 Anisotropia

Uma característica muito importante que impacta diretamente a resistência mecânica das peças fabricadas em 3D é a anisotropia<sup>6</sup> de fabricação da peça. De acordo com LOVO e FORTULAN (2016) e CHACÓN et al. (2017) a direção das camadas influencia diretamente na resistência da peça. Em seu artigo, LOVO e FORTULAN (2016) realizou teste de tração em peças impressas e foi observado que num CP fabricado com deposição de material nas direções opostas ao carregamento [ $90^\circ$ ] (Figura 2.17a) resistiram a 40% do valor obtido para a matéria-prima utilizada no estudo, na direção cruzada ao carregamento [ $45^\circ/45^\circ$ ], 78% (Figura 2.17b) e nas direções [ $0^\circ/90^\circ$ ] (Figura 2.17c) 85%.

A direção de impressão é um parâmetro que pode ser facilmente controlado pelo software gerador do arquivo .gcode. No entanto, é importante frisar que a posição da peça no software de impressão deve ser considerada cuidadosamente, visando uma impressão de qualidade. Como evidenciado nas Figuras 2.17a e 2.17c, a deposição do material na mesma direção da carga aplicada foi determinante para a obtenção de uma maior resistência mecânica da peça. Portanto, é fundamental compreender a importância da direção da impressão e sua relação com a qualidade final da peça impressa.

<sup>6</sup> Característica de alguns materiais cujas propriedades se alteram ou se modificam dependendo das direções em que são medidas; opõe-se à isotropia, às propriedades dos materiais que se mantêm iguais em todas as direções.

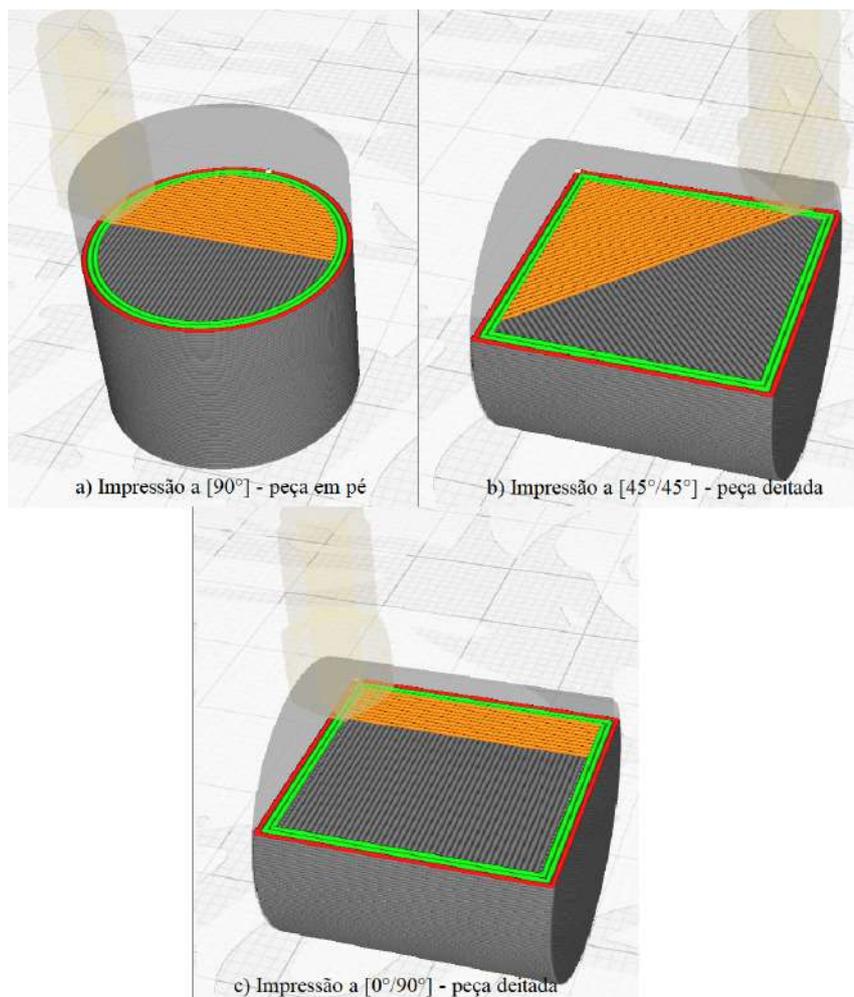


Figura 2.17 – Direções de deposição de filamento em peças que sofrerão carga axial. a) [90°]. b) [45°/45°]. c) [0°/90°]. Adaptado de (LOVO; FORTULAN, 2016)

#### 2.4.4 *Infill*

Segundo ALOYAYDI, S. e ALAREQI (2020) o *infill* é a estrutura interna de um objeto impresso em 3D que preenche o espaço entre as paredes externas. É muito importante porque afeta a resistência e a estabilidade do objeto impresso, fornecendo inclusive uma base sólida para as camadas superiores, podendo ser configurado com diferentes padrões e densidades, o que pode afetar as propriedades mecânicas do objeto impresso. A variação da densidade afeta tanto a resistência mecânica quanto o tempo de impressão e peso final do objeto (além da quantidade de material usado na fabricação. Por exemplo, um *infill* mais denso pode tornar o objeto mais forte, mas

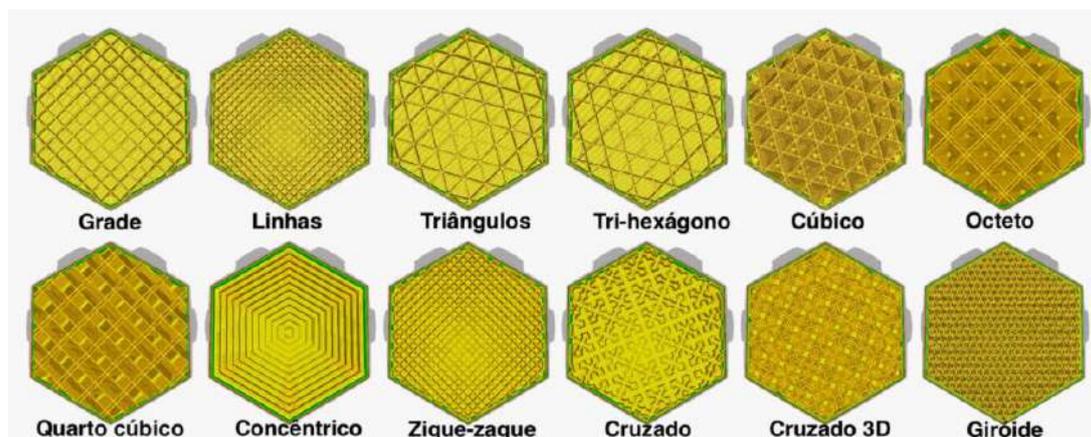
também pode aumentar o tempo de impressão e o uso de material. Já um *infill* menos denso pode tornar o objeto mais leve, mas também pode torná-lo menos resistente, sendo de suma importância a escolha do tipo e percentual de *infill* adequado para cada aplicação específica.

Ainda conforme ALOYAYDI, S. e ALAREQI (2020), existem diversos padrões de preenchimento disponíveis, cada um com suas próprias características e propriedades. Existem diversos padrões de preenchimento disponíveis, cada um com suas próprias características e propriedades.

A densidade de preenchimento refere-se à quantidade de espaço interno ocupado pelo preenchimento em relação ao espaço total do objeto. É expressa como uma porcentagem, sendo 0% equivalente a um objeto oco e 100% a um objeto sólido. A escolha da densidade de preenchimento depende da finalidade da peça, seja requisito de resistência, peso ou restrição ao consumo de material.

A maioria dos softwares de fatiamento (*slicing*) permite ajustar o padrão e a densidade de preenchimento. Geralmente, uma densidade maior resulta em uma peça mais resistente, mas também requer mais tempo e material para imprimir. É possível também especificar no software áreas específicas da peça com densidades de preenchimento diferentes, podendo oferecer à peça uma maior resistência num ponto específico, combinando com redução de peso e consumo de material em outros pontos, onde o requisito mecânico não é tão necessário.

Na imagem da Figura 2.18 é possível observar alguns tipos de *infill* mais utilizados (3DLAB, 2022).

Figura 2.18 – Tipos de *infill*. (3DLAB, 2022)

#### 2.4.5 Parâmetros de Impressão

Os *softwares* utilizados para fatiamento de peças para impressão 3D são essenciais para garantir que a impressão ocorra de forma precisa e eficiente. Existem diversas opções disponíveis no mercado, cada uma com suas funcionalidades e características.

Entre os *softwares* mais utilizados está o Cura, desenvolvido pela *Ulti-maker*. Trata-se de um *software open source* e gratuito, compatível com diversas impressoras 3D. O Cura conta com recursos como ajuste de velocidade de impressão, configuração de parâmetros de suporte e ajuste de temperatura de impressão, tornando-o uma opção completa e acessível.

Outra opção popular é o *Simplify3D*, um *software* pago que oferece recursos avançados para a configuração de impressões 3D, como a possibilidade de gerar suportes personalizados para a peça e a criação de estruturas de preenchimento personalizadas. O *Simplify3D* é considerado um dos *softwares* mais precisos e eficientes para a fatiamento de peças, sendo utilizado por profissionais da área.

Além desses, há também opções como o *PrusaSlicer*, que é um *software* gratuito e *open source* desenvolvido pela *Prusa Research*, empresa conhecida por seus modelos populares de impressoras 3D. O *PrusaSlicer* oferece recursos como a geração de suportes personalizados e a configuração de parâmetros específicos para cada camada da impressão.

Independentemente do *software* escolhido, é importante lembrar que o processo de fatiamento é fundamental para garantir a qualidade da impressão 3D. Cada *software* conta com sua própria interface e conjunto de recursos, e é importante escolher um que atenda às necessidades do projetista e da impressora 3D utilizada.

Todos esses *softwares* também incluem parâmetros importantes para a impressão 3D, como a qualidade da camada, espessura da parede, densidade de preenchimento, velocidade de impressão, além dos principais parâmetros, como temperaturas de bico de impressão, onde o filamento é fundido ou amolecido e depositado na mesa de impressão (ou camada impressa). Outro parâmetro de temperatura importante é a da mesa de impressão. Conforme 3DLAB (2022) uma temperatura baixa demais pode afetar a aderência da peça na própria mesa, enquanto uma temperatura alta demais pode causar um fenômeno conhecido como pé de elefante, que faz com que as primeiras camadas da impressão sejam fundidas e o peso da peça as comprima, deformando a peça. Em geral a temperatura ideal é logo acima da  $T_g$  do material.

Portanto, para uma impressão 3D de qualidade, é importante ajustar esses parâmetros em função do material utilizado. Por exemplo, materiais como PLA e ABS têm necessidades diferentes em termos de temperatura do bico de impressão e de mesa.

Além disso, outros materiais como nylon, PETG, TPU e outros também têm suas próprias especificidades de impressão. Por exemplo, o nylon é um material resistente a impactos e pode ser impresso com alta densidade de preenchimento, desde que a temperatura de impressão seja ajustada corretamente. Já o TPU é um material flexível e requer menor velocidade de impressão para evitar desgaste da extrusora.

Portanto, é essencial considerar os parâmetros ideais para cada material utilizado e ajustar os mesmos no software de fatiamento escolhido para garantir uma impressão 3D de qualidade.

A Tabela 2.4 abaixo, de acordo com (3DLAB, 2022), serve como refe-

rencial de temperaturas de impressão.

Tabela 2.4 – Tabela de referências de temperaturas de impressão (3DLAB, 2022).

Material	Temperatura	
	Extrusor	Mesa
PLA	195 a 220°C	ambiente até 70°C
ABS	220 a 240°C	110°C
PETG	245 a 260°C	85°C
TPU	225 a 245°C	ambiente até 70°C



## 3 Metodologia

Neste capítulo, serão apresentadas as metodologias utilizadas para a fabricação dos CP e realização dos ensaios mecânicos de tração.

### 3.1 Materiais

Os CP são peças utilizadas em testes de resistência mecânica, e sua fabricação por impressora 3D é uma técnica relativamente nova.

A escolha dos materiais PLA e ABS para impressão dos CP foi em função de:

- Popularidade na impressão 3D, sendo estes os materiais mais fáceis de se encontrar a venda e mais difundidos entre os
- Disponibilidade no laboratório onde foram realizadas as impressões (Laboratório de Prototipagem Mecânica (LabProM));
- Aplicabilidade, por serem termoplásticos que apresentam boa resistência e rigidez, sendo usados na indústria em diversas aplicações.

Conforme 3DLAB (2022), o PLA, em função de sua origem natural e fontes renováveis, é utilizado, por exemplo, na indústria de sacolas plásticas biodegradáveis e copos descartáveis, e o ABS, em função de suas propriedades, tem forte utilização na indústria, como na fabricação de brinquedos e automotiva, entre outras.

A impressora utiliza para impressão filamentos no material escolhido, com diâmetro de 1,75mm, adquiridos em rolos de 1 kg - Figura 3.1.

Na ficha técnica dos materiais (Tabela 3.1), é possível verificar as propriedades da matéria prima e dos corpos de provas impressos (não se tratam, contudo, dos CP desta dissertação).

Tabela 3.1 – Ficha técnica dos filamentos utilizados na fabricação dos CP (3DLAB, 2022)

Matéria Prima		
Propriedades Físicas	ABS	PLA
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,04	1,24
Temp. Fusão (°C)	200 - 220	165 - 180
Tg (°C)	99	55 - 60
Propriedades Mecânicas	-	-
Tensão de Ruptura (MPa)	39	-
Tensão de Escoamento (MPa)	-	51
Rigidez (MPa)	2160	2315
Resistência a Flexão (MPa)	67	-
Resistência a Tração (MPa)	-	50
Resistência a Impacto IZOD (J/m)	294	-
Alongamento (%)	-	3,31
Corpos de Prova Impressos		
Propriedades Mecânicas	ABS	PLA
Tensão de Escoamento (MPa)	14,7	24,8
Rigidez (MPa)	1335,9	1896
Tensão de Ruptura (MPa)	29	46
Alongamento (%)	7,08	3,69
Dureza (Shore D)	74	85
Temperatura HDT (°C)	86,13	55,11
Tolerância dimensional (mm)	+/- 0,05	+/- 0,05
Características de Impressão 3D		
Temp. de Impressão (°C)	210 – 250	195 – 220
Temp. da Mesa (°C)	90 – 120	55 – 70
Cooler Resfriamento de Peça	Indicado 20% e Impressora Fechada	Indicado
Enrolamento	Eletrônico	Eletrônico
Cor	Uniforme Opaca	Uniforme

Figura 3.1 – Rolo de filamento utilizado na *Creativity Ender 3 Pro*. Fonte: (3DLAB, 2022)

Os materiais para impressão foram gentilmente disponibilizados pelo Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), que dispõe de um laboratório de prototipagem rápida - LabProM - e todos os corpos de provas foram impressos neste laboratório.

## 3.2 Métodos

Para o projeto em questão, foi realizado um planejamento experimental fatorial completo para a produção de CP padronizados segundo norma ISO 527-2 (2012), CP tipo 1A. A escolha do CP em questão teve como base sua área útil, capaz de comportar defeitos artificiais de diferentes geometrias, tamanhos e em diferentes disposições.

O objetivo da análise estatística é determinar quais fatores de entrada, relacionados ao material ou as características dos defeitos, influenciam significativamente (para  $\alpha = 0,05$ ) as propriedades mecânicas dos CP ensaiados.

Os ensaios destrutivos de tração foram realizados nos diferentes CP para analisar a influência dos defeitos, inseridos de forma controlada em sua área útil, em função do formato, alinhamento, quantidade e área destes defeitos, além do material utilizado. Esses fatores de entrada são, portanto, avaliados a partir de um planejamento fatorial completo do tipo  $2^5$ , que permite avaliar o efeito de cada um deles isoladamente (efeitos principais) e em conjunto (efeitos de interação).

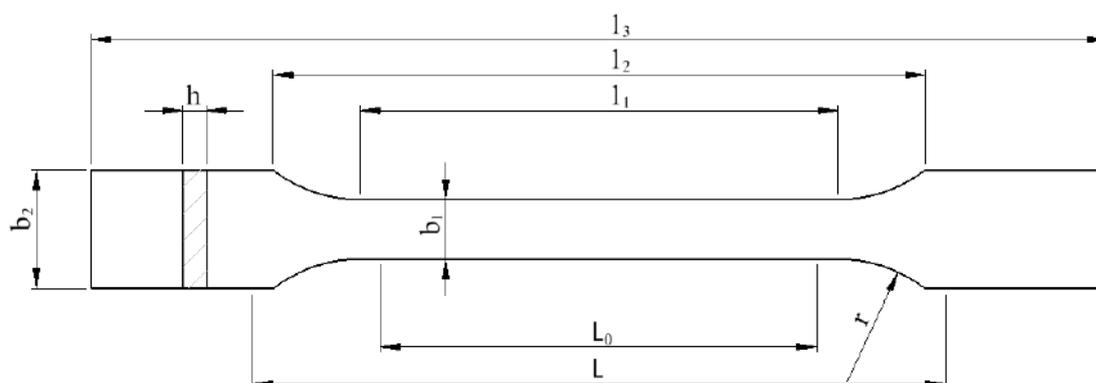


Figura 3.2 – Desenho dos CP. (ISO 527-2, 2012)

As dimensões dos CP são apresentados na Tabela 3.2, a seguir.

Tabela 3.2 – Dimensões dos CP (em mm). Traduzido de ISO 527-2 (2012).

Tipo de Amostra		1A
$l_3$	Comprimento total <sup>a</sup>	170
$l_1$	Comprimento de porções estreitas de lados paralelos	$80 \pm 2$
$r$	Raio	$24 \pm 1$
$l_2$	Distância entre porções largas de lados paralelo <sup>b</sup>	$109,3 \pm 3,2$
$b_2$	Largura nas extremidades	$20,0 \pm 0,2$
$b_1$	Largura na porção estreita	$10,0 \pm 0,2$
$h$	Espessura preferida	$4,0 \pm 0,2$
$L_0$	Comprimento do medidor (preferencial)	$75,0 \pm 0,5$
	Comprimento do medidor (aceitável se necessário para controle de qualidade ou quando especificado)	$50,0 \pm 0,5$
$L$	Distância inicial entre garras	$115 \pm 1$

<sup>a</sup> O comprimento total recomendado de  $170\text{mm}$  do tipo 1A é consistente com ISO 294-1 e ISO 10724-1. Para alguns materiais, o comprimento das abas pode precisar ser estendido (por exemplo,  $l_3 = 200\text{mm}$ ) para evitar quebra ou deslizamento nas mandíbulas da máquina de teste.

<sup>b</sup>  $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$ , resultante de  $l_1$ ,  $r$ ,  $b_1$  e  $b_2$ , mas dentro das tolerâncias indicadas.

Os fatores de entrada para serem avaliados nesse trabalho foram então definidos como defeitos passantes que seriam produzidos controladamente na área útil do CP (calculada pela equação 3.1) durante a impressão 3D dos CP, sendo suas geometrias escolhidas conforme apresentado a seguir:

- Círculo - Um dos tipos de defeitos de maior incidência nos polímeros e compósitos é do tipo bolha. Assim, o furo circular será usado para representar este tipo de defeito;
- Losango (FLAMM et al., 2011) - uma forma de defeito reconhecida, em função de seus ângulos, como um grande concentrador de tensão, simulando possivelmente uma trinca ou defeito com maiores concentradores de tensão ou decorrentes de *air gaps* em peças impressas.

A área útil do CP foi determinada conforme equação 3.1:

$$\begin{aligned}
 A_{\text{útil}} &= L_0 \times b_1 \\
 &= 750\text{mm}^2
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Inicialmente, levando em consideração a dimensão  $b_1 = 10\text{mm}$  na área útil do CP (Tabela 3.2), foi definido um diâmetro máximo ( $\phi_{m\acute{a}x}$ ) para o defeito circular, sendo o mesmo para a diagonal menor do losango maior ( $d_{m\acute{a}x}$ ) de  $6\text{mm}$ , como mostra a Figura 3.3.

Na determinação das dimensões do círculo e losango, procurou-se determinar uma  $A_{m\acute{a}x}$  e uma  $A_{m\acute{i}n}$ , distribuindo as dimensões no círculo e losango de forma que  $A_{m\acute{i}n}^{\circ} = A_{m\acute{i}n}^{\diamond}$  e  $A_{m\acute{a}x}^{\circ} = A_{m\acute{a}x}^{\diamond}$ , permitindo, para cada área, avaliar o efeito da geometria.

Conforme exemplo da Figura 3.3, é possível verificar, tanto a distribuição dos defeitos grandes desalinhados na área útil do CP, como as dimensões básicas e as áreas dos defeitos maiores. Percebe-se também que os defeitos estão posicionados pelo centro nos mesmos locais em cada um dos CP.

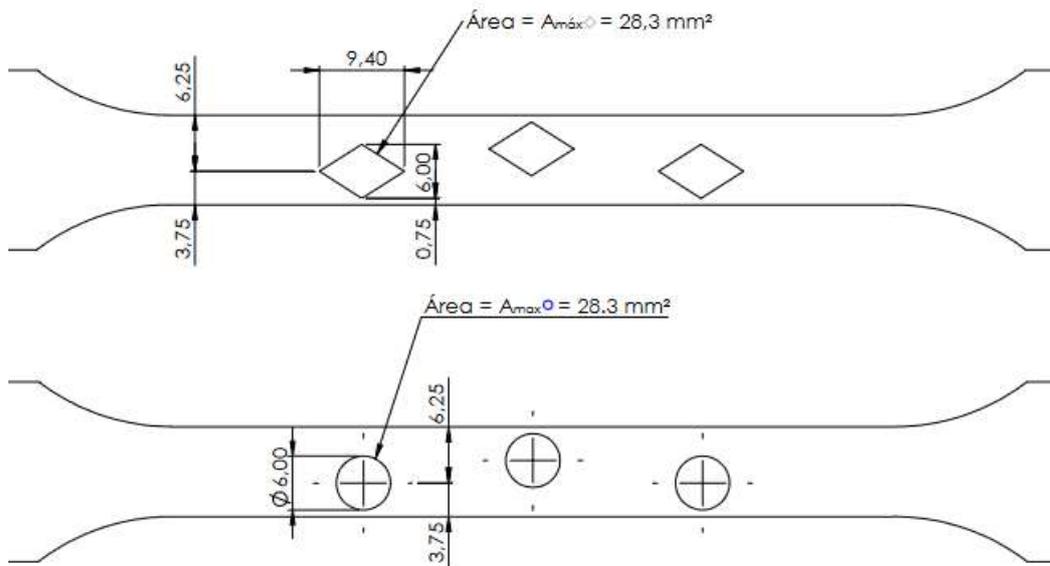


Figura 3.3 – Dimensões e distribuição dos defeitos

A partir destes dados, foram definidos os seguintes valores: O  $\phi_{m\acute{a}x}$  define a área do círculo maior. Conforme já convencionalizado, as áreas dos defeitos são as mesmas, logo:

$$A_{m\acute{a}x}^{\circ} = A_{m\acute{a}x}^{\diamond} = A_{m\acute{a}x} = \frac{\pi \times \phi_{min}^2}{4} \approx 28,3\text{mm}^2$$

Conforme Figura 3.4, através da equação da área do losango, utilizando o valor da diagonal menor do losango maior ( $d_{m\acute{a}x} = 6mm$ ), podemos calcular o valor de sua diagonal maior ( $D_{m\acute{a}x}$ ).

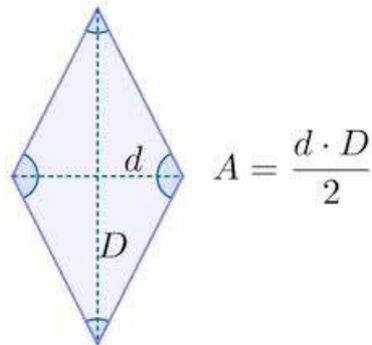


Figura 3.4 – Cálculo de área do losango

Assim:

$$D_{m\acute{a}x} = \frac{2 \times A_{m\acute{a}x}}{d_{m\acute{a}x}} \approx 9,4mm \quad (3.2)$$

Foi então convencionado que a área menor ( $A_{m\acute{m}n}$ ) será 1/5 da  $A_{m\acute{a}x}$ , logo:

$$A_{m\acute{m}n} = \frac{A_{m\acute{a}x}}{5} \approx 5,7mm^2 \quad (3.3)$$

O critério utilizado para definição da quantidade de defeitos é apresentado a seguir:

- Primeiramente, foi considerado o comprimento útil do CP, onde seriam posicionados os defeitos mais extremos ( $L_0 = 75mm$ , conforme Tabela 3.2);
- Depois, para definir a maior quantidade de defeitos, foi feita a divisão entre o comprimento útil do CP e a maior dimensão de defeitos (diagonal do losango maior,  $D_{m\acute{a}x} = 9,4mm$ ), definida anteriormente. O

resultado deve ser o número inteiro menor ou igual ao cálculo realizado. Assim, temos  $75/9,4 = 7,98$ , logo a quantidade máxima de vazios é de 7 defeitos <sup>1</sup>, conforme Figura 3.5;

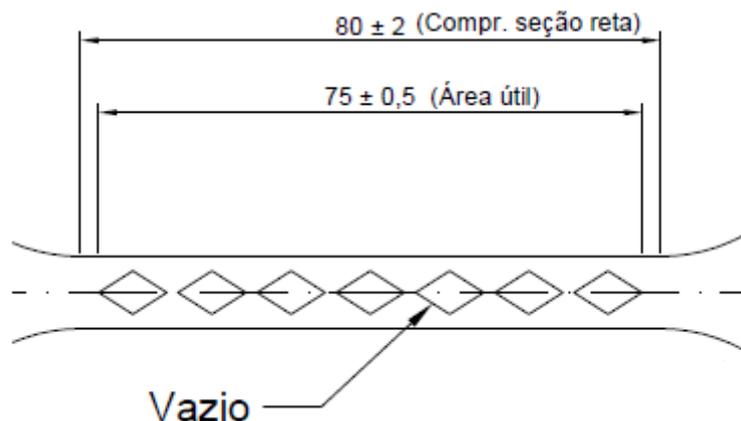


Figura 3.5 – Distribuição dos vazios losangulares grandes no CP

- A quantidade mínima de furos foi definida como o número inteiro menor ou igual à metade da maior quantidade de vazios, ou seja,  $7/2 = 3,5$ , sendo adotado, portanto, 3 defeitos.

Outro critério a ser considerado é o alinhamento entre os defeitos tendo em vista que o coalescimento de defeitos alinhados é tipicamente associado aos processos de propagação de trincas. Foram, então, inseridos defeitos alinhados na metade da largura do CP (linha de centro por simetria) e, para os defeitos não alinhados, foi definido que seriam distribuídos em duas linhas (distribuídos em zig-zag) separadas a  $1,25\text{mm}$  do centro do CP, conforme Figura 3.6.

<sup>1</sup> No caso, mesmo que a quantidade calculada em função do comprimento útil seja muito próxima de 8, caso fosse adotada esta quantidade, ultrapassaria o comprimento útil do CP.

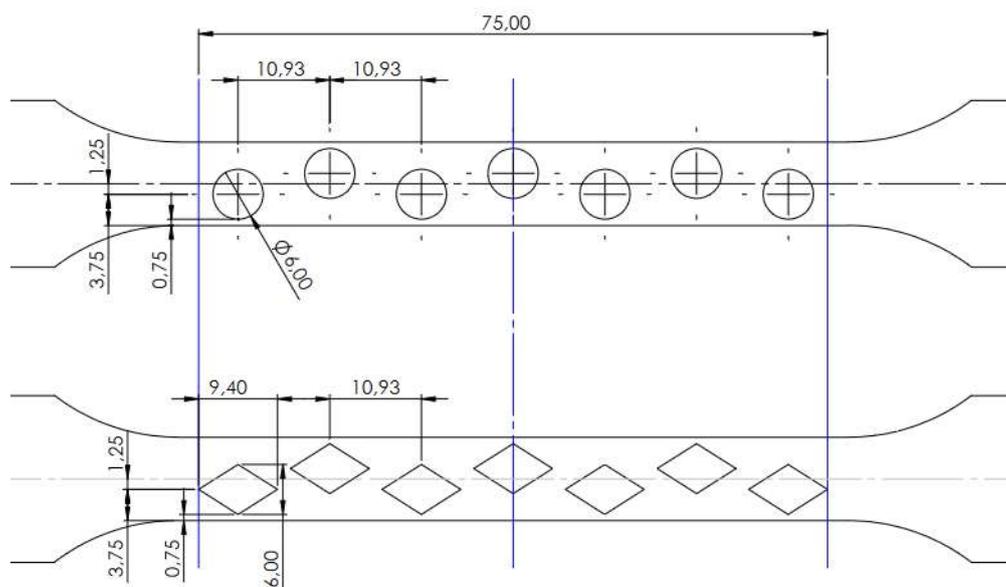


Figura 3.6 – Distribuição dos vazios grandes descentralizados no CP

Através dos dados calculados acima, foi possível definir as dimensões dos vazios a serem inseridos nos CP, além das quantidades de defeitos a serem inseridas em cada modelo de CP. Foi então gerada a Tabela 3.3, que compila todos estes parâmetros, onde temos as dimensões básicas, como diâmetros dos defeitos circulares e diagonais dos losangos.

Tabela 3.3 – Dimensões básicas dos defeitos

			Área (mm <sup>2</sup> )	Dimensão alinhada ao comprimento do CP (mm)
Círculo	$\phi_{m\acute{a}x}$ (mm)	6	28,3	6
	$\phi_{m\grave{m}n}$ (mm)	2,68	5,7	2,68
Losango	$D_{m\acute{a}x}$ (mm)	9,4	28,3	9,4
	$d_{m\acute{a}x}$ (mm)	6,0		
	$D_{m\grave{m}n}$ (mm)	4,20	5,7	4,2
	$d_{m\grave{m}n}$ (mm)	2,69		

Os dados foram então compilados na Tabela 3.4, abaixo, que serve como guia de planejamento estatístico fatorial completo de 5 fatores em 2 níveis cada ( $2^5$ ).

Utilizando como base a Tabela 3.4, foi possível enumerar os experimentos a serem realizados. O *software Statistica* não admite textos na tabela entrada de cálculos, portanto, foi realizada a substituição dos textos por

+1 e -1, utilizando como parâmetro para substituição, a Tabela 3.4. Nos pontos de entrada que já eram numéricos, os valores foram mantidos.

Tabela 3.4 – Planejamento Estatístico Fatorial 2<sup>5</sup>

Fatores de Entrada	Nível Inferior (-1)	Nível Superior (+1)
Formato	Círculo	Losango
Quantidade	3	7
Área/Tamanho do Defeito [mm <sup>2</sup> ]	5,7	28,3
Distribuição	Não Alinhado	Alinhado
Material	PLA	ABS

Foi, então, gerada a Tabela 3.5, onde é possível prever todas as combinações possíveis de planejamento fatorial 2<sup>5</sup> dos experimentos, ou seja, 32 combinações de testes, onde foram feitos 16 grupos diferentes de CP para dois materiais. Deve-se ressaltar que, para cada experimento da tabela, foram impressos 6 CP em PLA (material -1) e 5 em ABS (material +1)<sup>2</sup>, o que satisfaz a norma ISO 527-1 (2012), que determina que a quantidade mínima de testes para cada experimento é de 5 unidades.

A codificação de -1 para o material PLA e +1 para o material ABS tem por objetivo apenas a categorização numérica dos materiais, sem remeter a qualquer hierarquia de desempenho.

<sup>2</sup> A quantidade diferente foi em função de o autor ter impresso, numa primeira leva, 3 peças em PLA para teste e verificação da viabilidade dos experimentos. No caso foi feito um arquivo configurado para impressão em PLA com 3 peças para cada experimento, e, uma vez verificada a viabilidade, os arquivos foram reimpressos. Para o ABS foi feito diretamente um arquivo com 5 unidades, que era a intenção inicial, inclusive para o PLA.

Tabela 3.5 – Planejamento de Ensaios

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Distribuição	Material
1	-1	3	5,7	-1	-1
2	-1	3	5,7	-1	1
3	-1	3	5,7	1	-1
4	-1	3	5,7	1	1
5	-1	3	28,3	-1	-1
6	-1	3	28,3	-1	1
7	-1	3	28,3	1	-1
8	-1	3	28,3	1	1
9	-1	7	5,7	-1	-1
10	-1	7	5,7	-1	1
11	-1	7	5,7	1	-1
12	-1	7	5,7	1	1
13	-1	7	28,3	-1	-1
14	-1	7	28,3	-1	1
15	-1	7	28,3	1	-1
16	-1	7	28,3	1	1
17	1	3	5,7	-1	-1
18	1	3	5,7	-1	1
19	1	3	5,7	1	-1
20	1	3	5,7	1	1
21	1	3	28,3	-1	-1
22	1	3	28,3	-1	1
23	1	3	28,3	1	-1
24	1	3	28,3	1	1
25	1	7	5,7	-1	-1
26	1	7	5,7	-1	1
27	1	7	5,7	1	-1
28	1	7	5,7	1	1
29	1	7	28,3	-1	-1
30	1	7	28,3	-1	1
31	1	7	28,3	1	-1
32	1	7	28,3	1	1

Além dos 16 modelos de CP desenhados (Figuras 3.7 e 3.8), foram impressos mais 10 unidades de um modelo específico, o chamado “controle”, cuja diferença é que não foram inseridos defeitos no comprimento útil do CP, representando uma condição de integridade de referência.

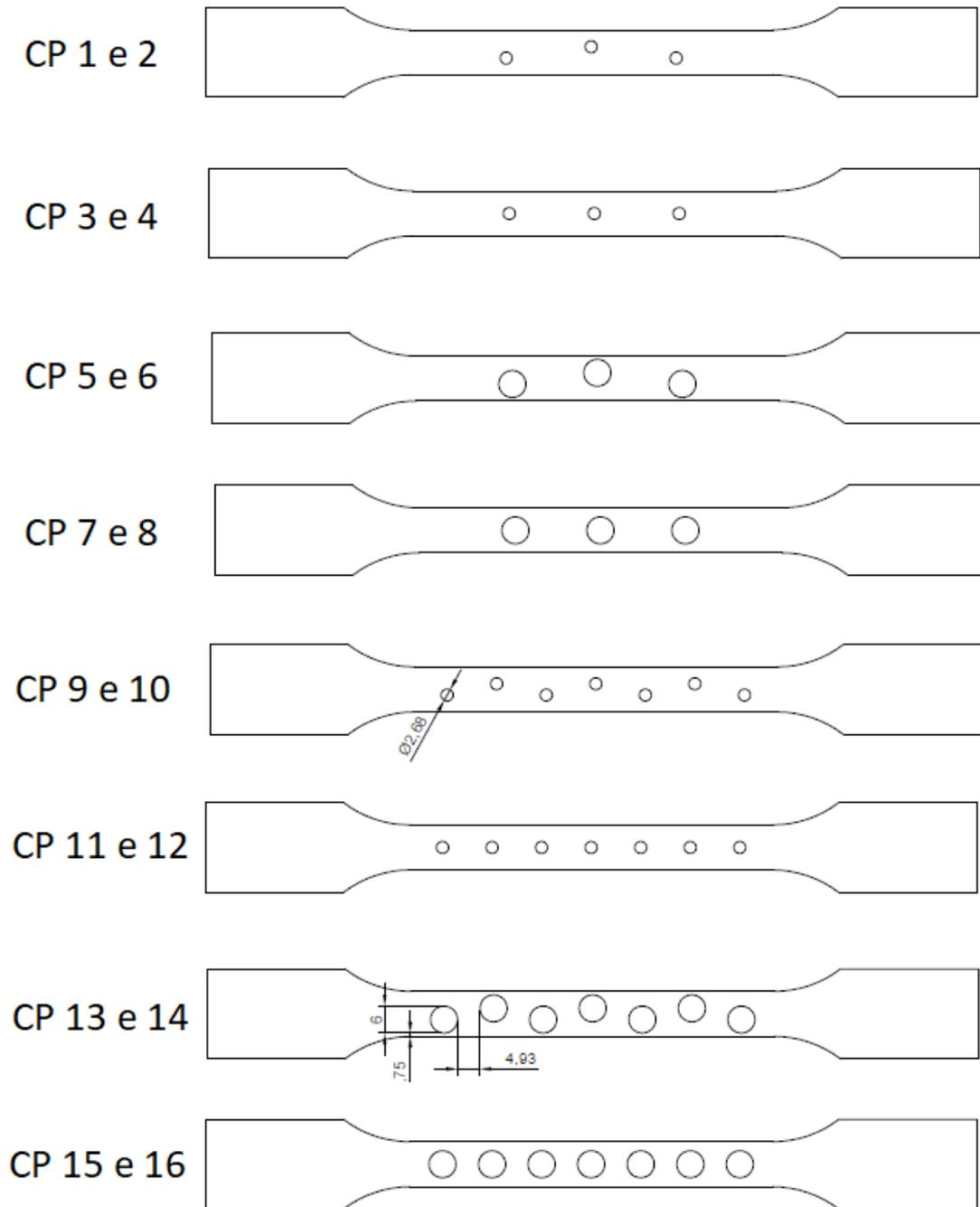


Figura 3.7 – Desenhos dos CPs com defeitos circulares

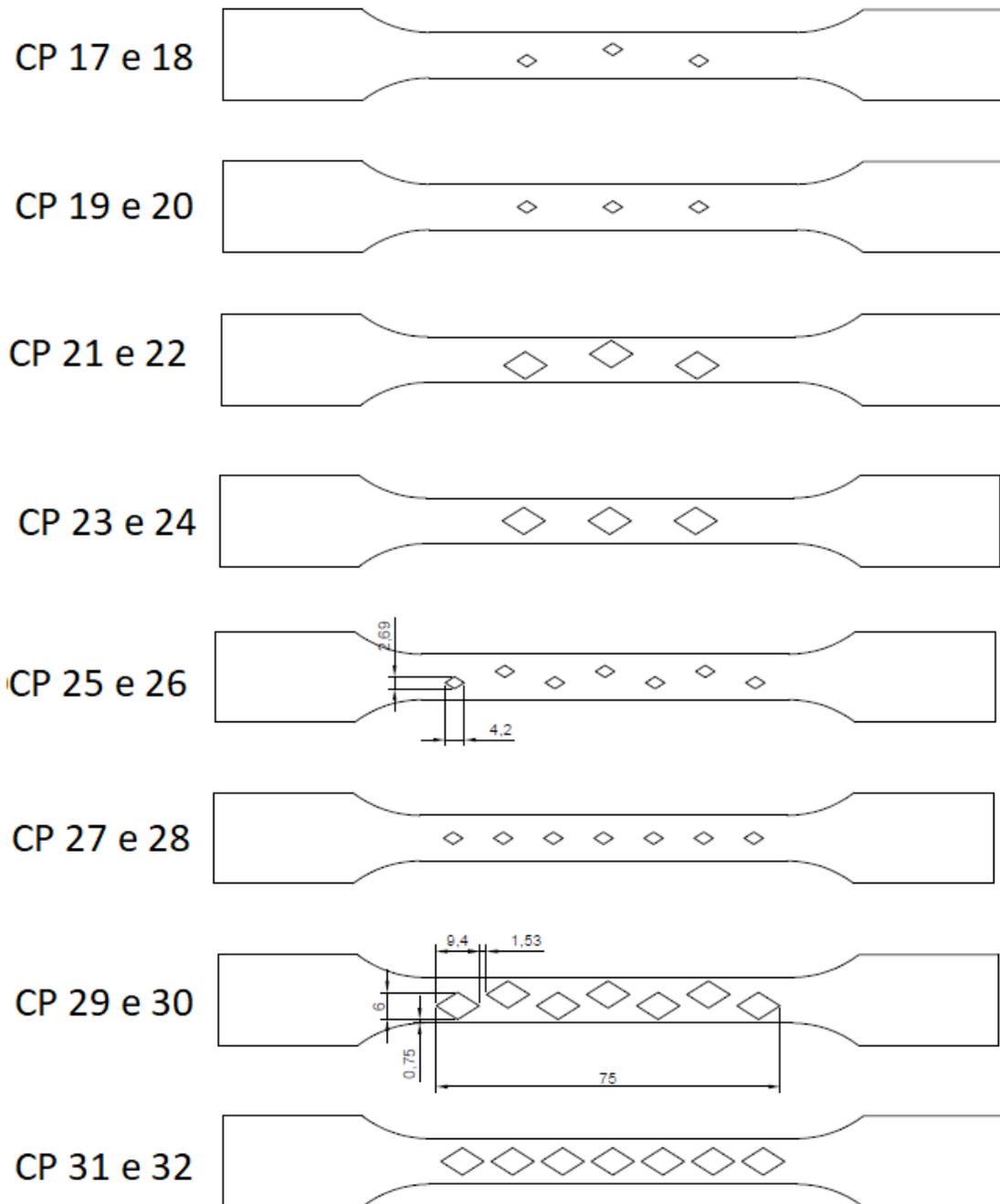


Figura 3.8 – Desenhos dos CPs com defeitos losangulares

Nas Figuras 3.9 e 3.10, é possível observar os CP impressos.



Figura 3.9 – CPs impressos com defeitos circulares



Figura 3.10 – CPs impressos com defeitos losangulares

A tabela 3.6 mostra o percentual da área útil que os defeitos ocupam nos CP.

Tabela 3.6 – Tabela de percentual da área útil ocupada pelo defeito no CP

CP (Figuras 3.7 e 3.8)	Formato	Quantidade	Área (mm <sup>2</sup> )	Área total de defeito (mm <sup>2</sup> )	Área útil - área de defeitos (mm <sup>2</sup> )	% do defeito na área útil
1, 2, 3 e 4	círculo	3	5,7	16,96	783,04	2,12%
5, 6, 7 e 8	círculo	7	5,7	39,58	760,42	4,95%
9, 10, 11 e 12	círculo	3	28,3	84,82	715,18	10,60%
13, 14, 15 e 16	círculo	7	28,3	197,91	602,09	24,74%
17, 18, 19 e 20	losango	3	5,7	16,96	783,04	2,12%
21, 22, 23 e 24	losango	7	5,7	39,58	760,42	4,95%
25, 26, 27 e 28	losango	3	28,3	84,82	715,18	10,60%
29, 30, 31 e 32	losango	7	28,3	197,91	602,09	24,74%

### 3.3 Fabricação dos CP

Os corpos de prova foram padronizados conforme Figura 3.2 (ISO 527-2, 2012), utilizando as dimensões especificados na coluna 1A da Tabela 3.2 e fabricados em impressora 3D (marca *Creality ENDER-3 Pro* - Figura 3.11) que utiliza a tecnologia de FDM.

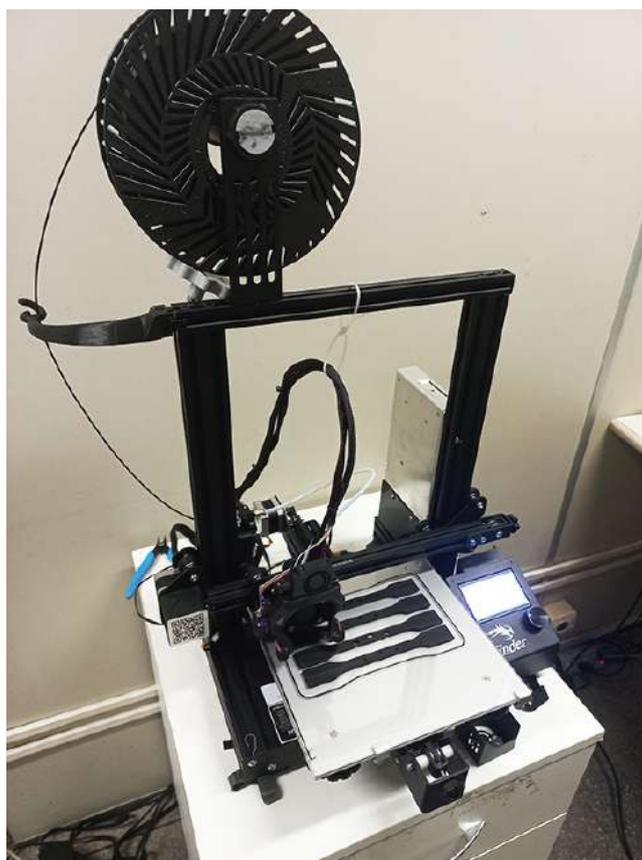


Figura 3.11 – Impressora *Creality Ender 3 Pro*.

A Tabela 3.7, abaixo, mostra os parâmetros de impressão básicos de impressão dos CP

Tabela 3.7 – Parâmetros de impressão fixados para cada material

Parâmetro	ABS	PLA
Altura de Camada (mm)	0,2	0,2
Espessura de Parede (mm)	0,4	0,4
Quantidade de Paredes	4	4
Infill (%)	100	100
Temperatura de Bico (°C)	225	205
Temperatura de Mesa (°C)	110	60
Velocidade de Impressão (mm/s)	60	60

A Figura 3.2 é o desenho padrão da norma ISO 527-2 (2012), onde foi utilizado, conforme já especificado, a coluna 1A da Tabela 3.2, tendo como resultados o desenho da Tabela 3.3. É possível observar nesta figura que foi inserida a representação de vazios, sendo este desenho apenas para ilustrar um CP típico.

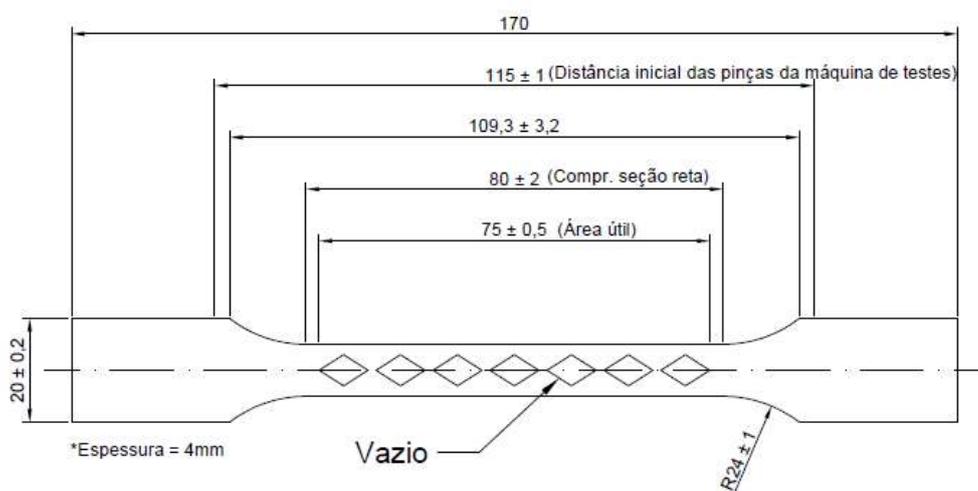


Figura 3.12 – Desenho dos CP conforme (ISO 527-2, 2012).

Todos os CP foram confeccionados com 100% de *infill* e direção de impressão axial, na direção do carregamento, onde o próprio software de fatiamento faz o contorno de cada defeito, como pode ser observado na Figura 3.13.

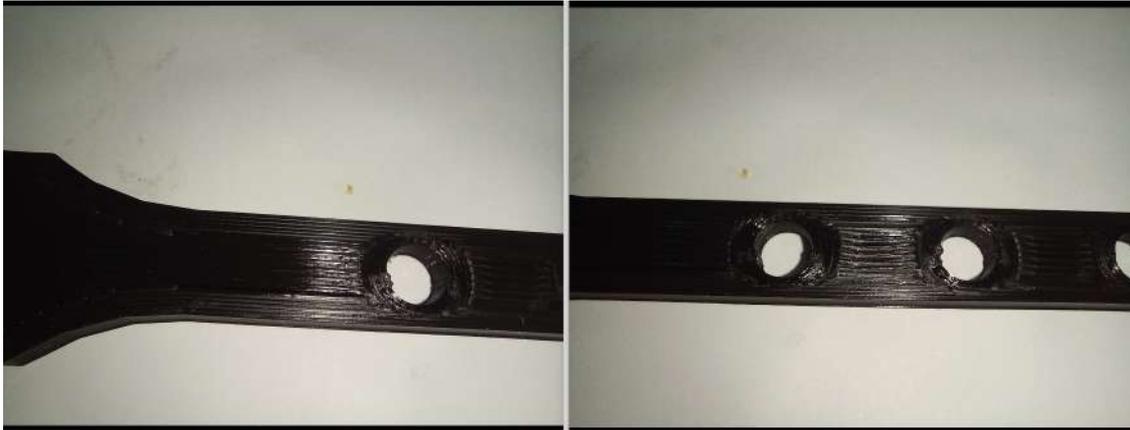


Figura 3.13 – Imagem da direção de impressão e contorno de defeitos

### 3.4 Ensaio de Tração

O procedimento utilizado para a realização dos ensaios foi conforme norma ISO 527-2 (2012), em uma máquina de ensaios Filizola, modelo BME-20kN, pertencente ao Laboratório de Materiais do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM). Foi utilizada a distância entre pinças de  $115\text{mm}$  conforme Figura 3.12 e Tabela 3.2. Na Figura 3.14 é possível observar um CP montado para realização de um ensaio.



Figura 3.14 – CP 01 montado na máquina para ensaio

Foi utilizada célula de carga de  $20kN$  e a medida de deformação foi realizada com extensômetro. Para o ensaio em si, foram adotadas duas metodologias de testes complementares, de acordo com as diretrizes das seções 5.1.2 e 9.6 da norma ISO 527-1 (2012). Primeiramente, para determinação da rigidez, foi adotada com uma velocidade de deslocamento de  $10mm/min$  até o limite de alongamento de  $0,25\%$ . Uma vez determinada a rigidez, para o restante de teste adotou-se uma velocidade de  $50mm/min$  até a ruptura do CP.

As variáveis de resposta adotadas para este trabalho foram, para o ensaio de tração, algumas das mais comumente utilizadas no projeto de produtos poliméricos, a saber, rigidez, tensão máxima e deformação máxima. Um exemplo de gráfico típico obtido em teste de tração pode ser observado na

Figura 3.15.

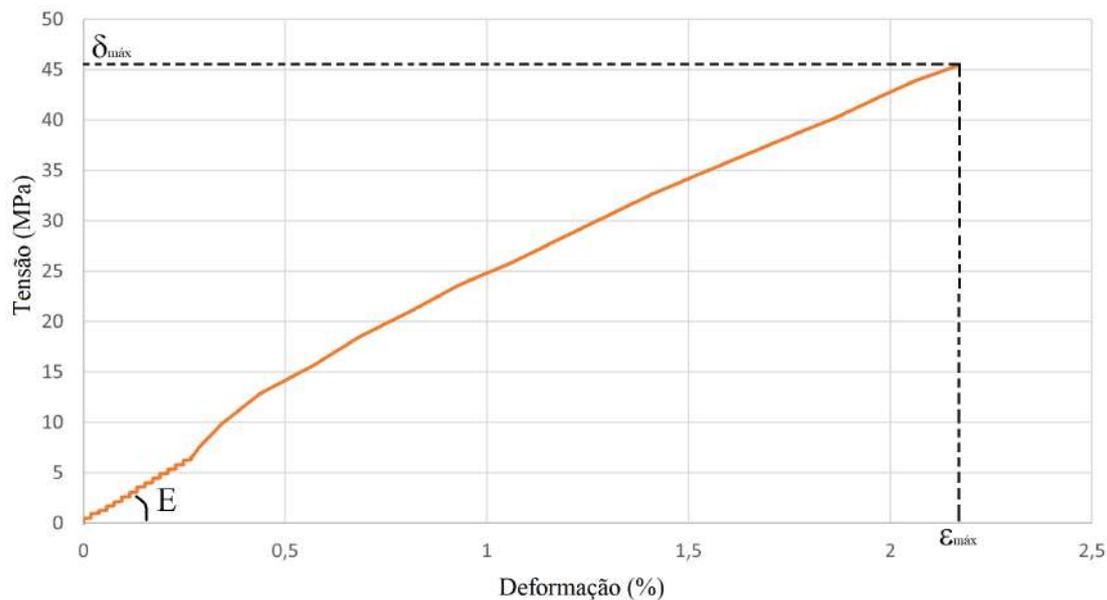


Figura 3.15 – Curva típica de um ensaio de tração.

### 3.5 Análise Estatística

Para a análise estatística, foi utilizado o software *Statistica V. 10.0* via ANOVA e DOE. Para o uso da estatística paramétrica, foram verificadas inicialmente as premissas ( $H_0$ ) de normalidade dos resíduos e homocedasticidade.

A premissa de normalidade dos resíduos foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors a um nível de significância de  $\alpha = 0,05$ . Os testes estão destacados no exemplo da Figura 3.16.

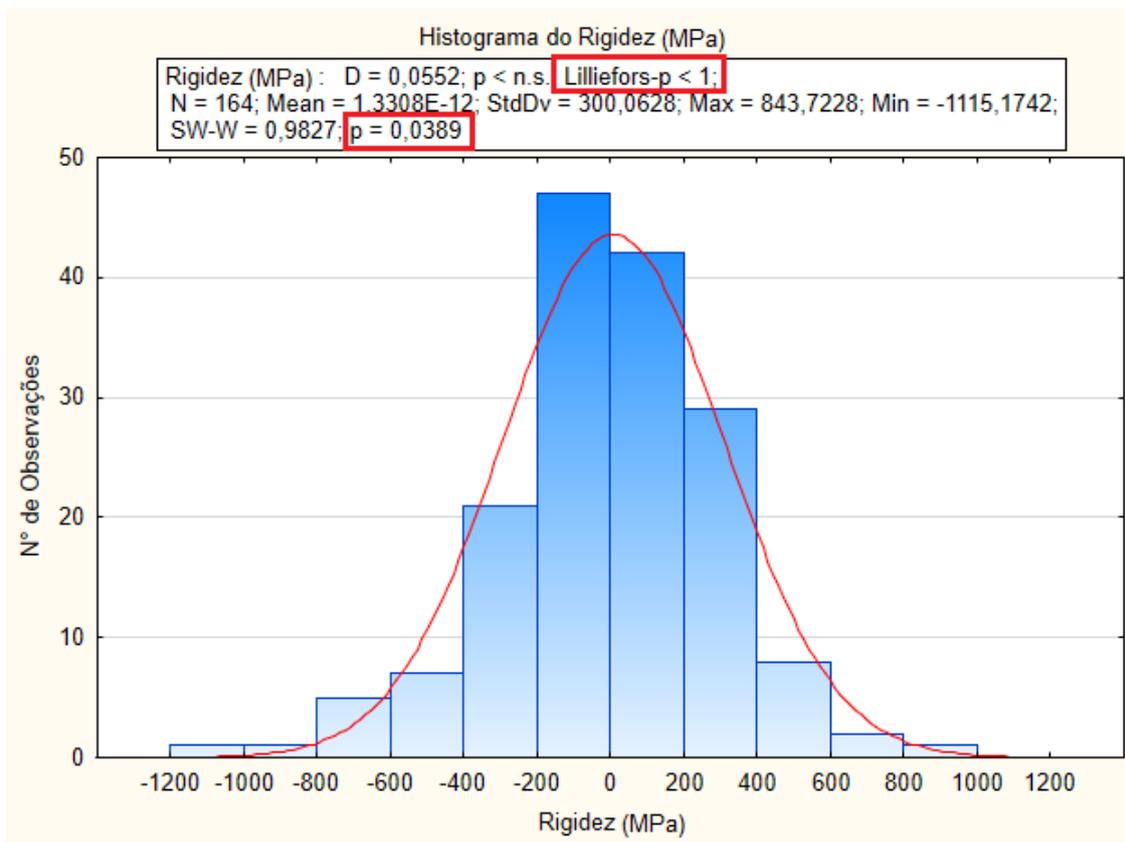


Figura 3.16 – Exemplo de Histograma

A premissa de homocedasticidade foi avaliada a partir do gráfico resíduos x valores preditos (Figura 3.17) e/ou pelos testes de Cochran-Bartlet o Levene's ao nível de significância de  $\alpha = 0,05$ .

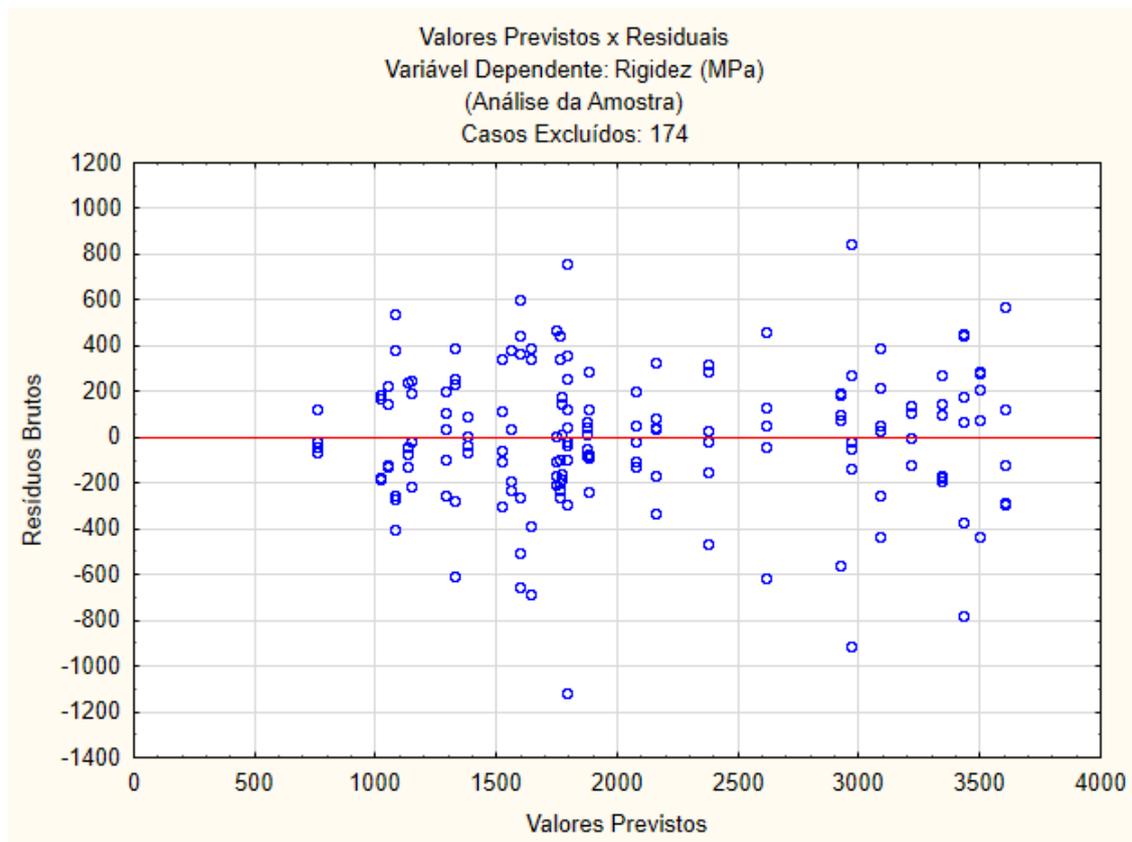


Figura 3.17 – Exemplo de gráfico dos valores previstos x resíduos.

A  $H_0$  relativa à significância de cada um dos fatores de entrada e suas interações foi realizada a partir da estatística  $p$ , utilizando-se um nível de significância de  $\alpha = 0,05$ .

A comparação entre os efeitos de maior ou menor proporção na variável de respostas foi realizada a partir da *Mean Square* (MS) - Média Quadrática - e/ou a partir do cálculo dos efeitos em si estatisticamente. A  $H_0$  associada à comparação de um par de intervalos de resultados foi avaliada com base no teste de Fisher LSD a um nível de significância de  $\alpha = 0,05$  e no gráfico bidimensional de linhas dispostos em dois eixos das abcissas. No exemplo do gráfico da Figura 3.18, é analisado o impacto do tamanho do defeito (linhas) em função do material (eixo x superior) e rigidez (eixo y) em cada gráfico, e cada um para um tipo de alinhamento de defeitos (eixo x inferior), tendo como fatores fixados o formato (circular) e quantidade de defeitos (3).

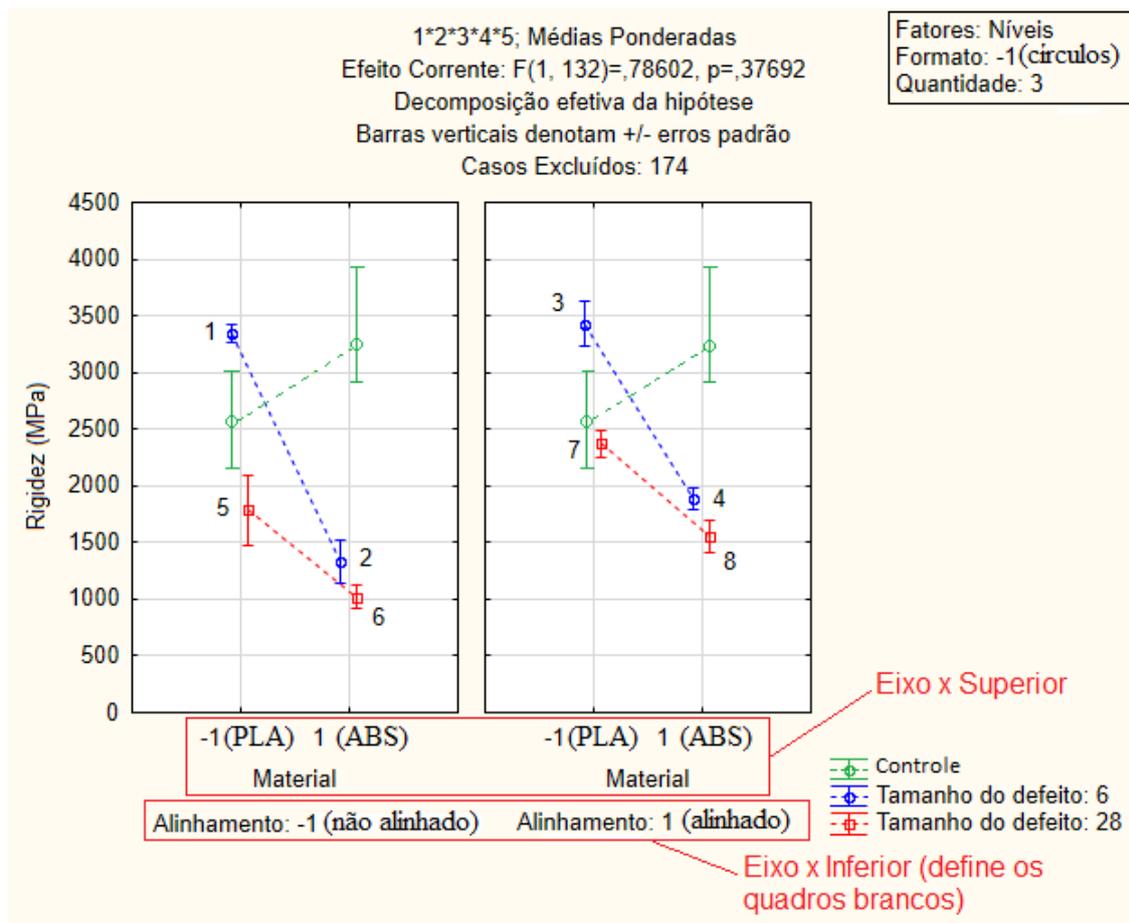


Figura 3.18 – Exemplo do gráfico de impacto das variáveis na rigidez.

## 4 Resultados e discussões

Neste capítulo, serão desenvolvidas as análises estatísticas dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos. Cada ensaio gerou, além da curva de tensão x deformação, três propriedades dos CP, a saber: Rigidez (MPa), Tensão Máxima (MPa) e Deformação Máxima (%).

Para cada uma das propriedades obtidas, considerando as 32 combinações testadas (além dos grupos controle), foi então utilizada a estatística paramétrica por meio da metodologia de Análise de Variâncias (ANOVA), utilizando o planejamento de experimentos  $2^5$  pelo pacote de análise DOE do *Statistica*, visando estimar o efeitos de todos os fatores e suas interações.

Todos os gráficos e tabelas que foram obtidos no *software Statistica* com base na Tabela 3.5 são apresentados na Tabela A.1 do apêndice A. Na Tabela B.1 do apêndice B está a tabela referente aos resultados de testes dos CP complementares.

Além disso, nos testes realizados foram gerados os gráficos experimentais C.1 e C.2 do apêndice C, utilizando os dados obtidos na máquina de ensaios. Todos os CP romperam-se na região útil.

No estudo realizado por RODRÍGUEZ-PANES, CLAVER e CAMACHO (2018), onde foram analisados os resultados comparativos de ensaios de tração entre CP impressos feitos em PLA e ABS, foi observado que, em geral, as peças feitas com PLA apresentaram valores mais altos de rigidez, ou seja, uma performance mais rígida, enquanto as peças feitas com ABS apresentaram valores mais altos de tensão nominal na ruptura e deformação, ou seja, uma ductilidade maior.

Mais especificamente, em relação à rigidez, os valores médios obtidos foram de 2,8 GPa para o PLA e 2,2 GPa para o ABS. Já em relação à tensão nominal na quebra, os valores médios foram de 47 MPa para o ABS e 38 MPa para o PLA. Quanto à deformação máxima, os valores médios foram de 5,5% para o ABS e 4,5% para o PLA.

A Figura 4.1 mostra o gráfico do estudo realizado por RODRÍGUEZ-PANES, CLAVER e CAMACHO (2018).

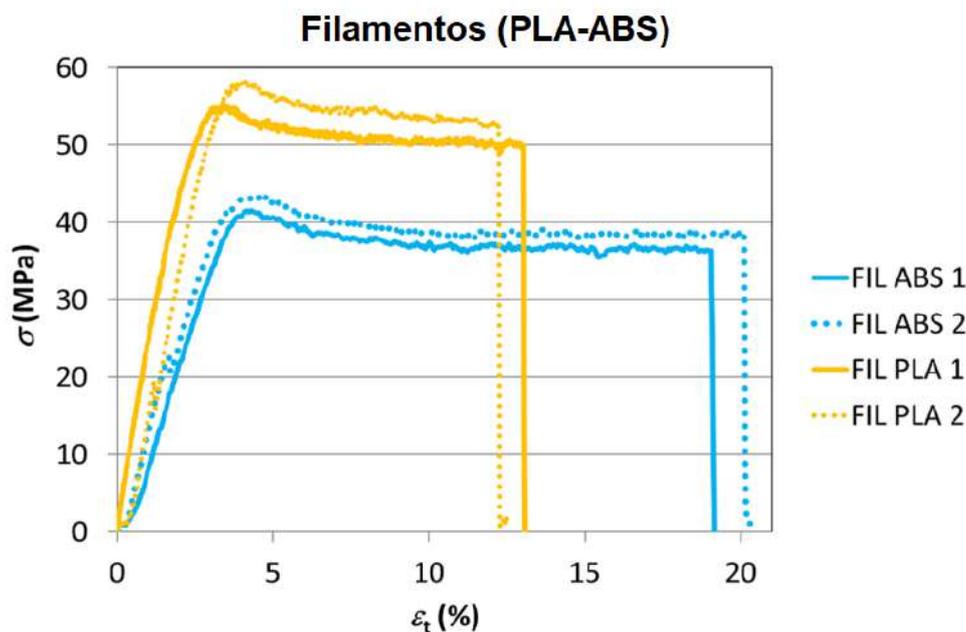


Figura 4.1 – Resultado dos testes de tração realizados por RODRÍGUEZ-PANES, CLAVER e CAMACHO (2018)

É importante ressaltar que esses valores variaram dependendo dos casos analisados, ou seja, dos diferentes parâmetros de fabricação utilizados.

#### 4.1 Rigidez (MPa) - $E$

Analisando o gráfico da Figura 4.2, é possível verificar os valores previstos da variável de resposta no eixo  $x$  e os resíduos brutos no eixo  $y$ , onde são considerados todos os ensaios realizados, sem desconsiderar os possíveis *outliers*<sup>1</sup>.

Na figura, é possível observar que o ponto 174 é o que mais se separa da nuvem de pontos e visivelmente se destaca, sendo este o ponto que mais se distanciou do comportamento médio do grupo ao qual está inserido. Visando não prejudicar o tratamento estatístico da amostra, este foi considerado um *outlier* e posteriormente retirado da análise.

<sup>1</sup> Para (BARNETT; LEWIS, 1993), os *outliers* surgem em função de erros de medição (que poderão ocorrer na coleta dos dados), erros humanos (como a digitação de dados incorretos), erros de execução (decorrentes de dados adquiridos da amostragem de mais de uma população) ou observações de uma única população (quando esta apresenta uma variabilidade expressiva).

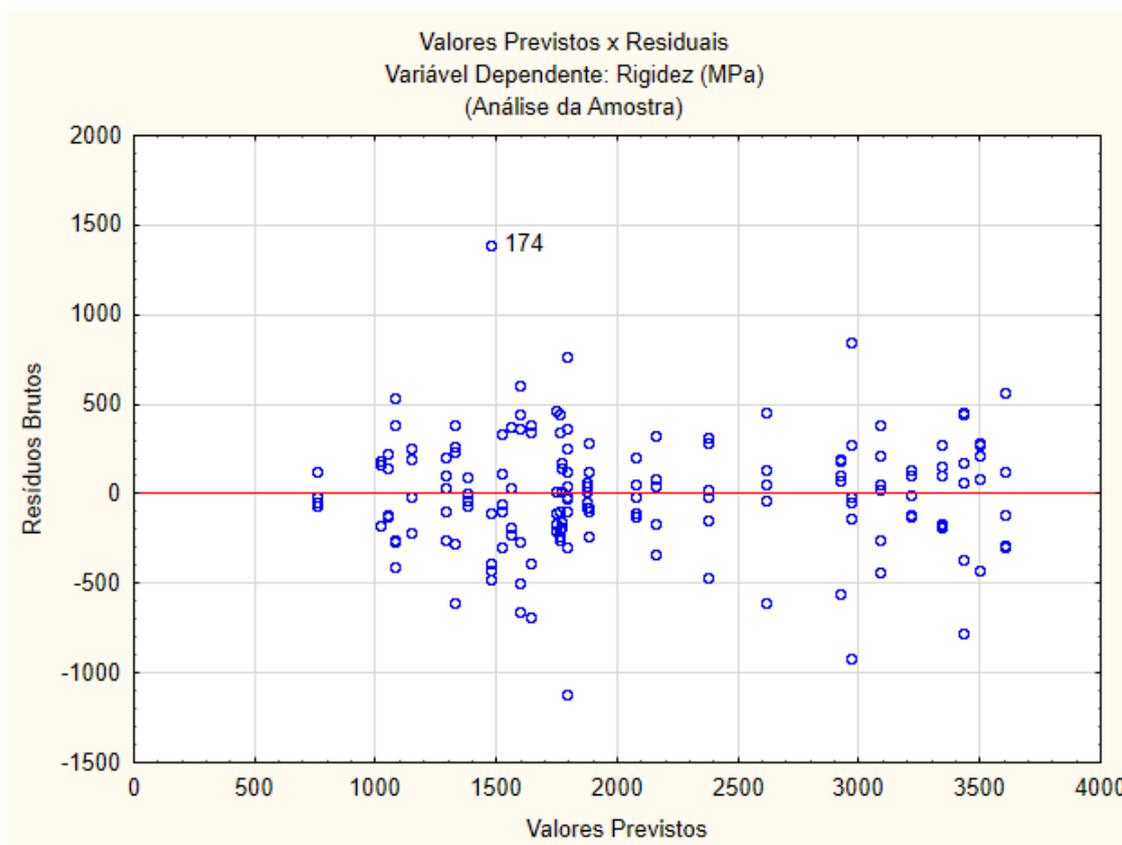


Figura 4.2 – Gráfico dos valores previstos x resíduos - rigidez.

Foi, então, realizada a verificação de dados em função das premissas da estatística paramétrica, quais sejam:

- Homogeneidade das variâncias (homocedasticidade); e
- Normalidade dos resíduos.

Após a exclusão do ponto 174 (*outlier*) da análise, obtivemos a Figura 4.3, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma aparentemente homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição similar dos pontos acima e abaixo do eixo das abcissas. Isto indica, possivelmente, o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

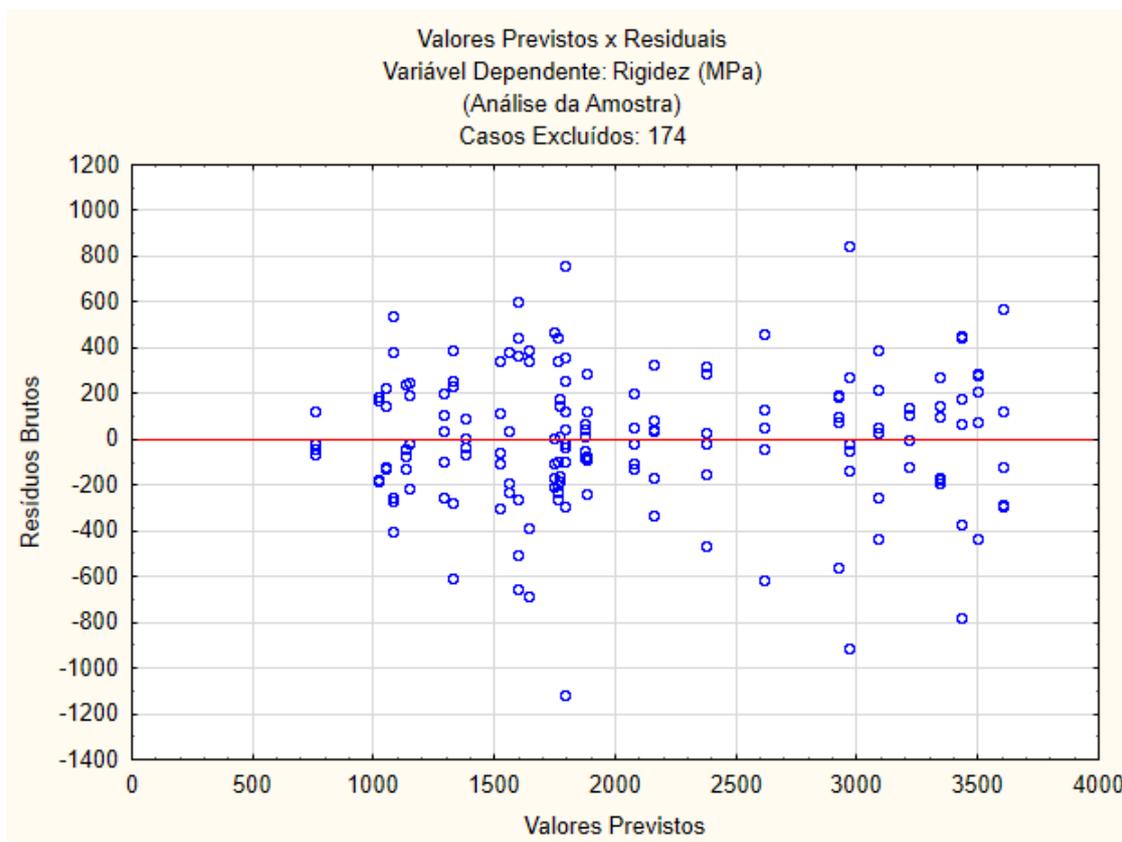


Figura 4.3 – Gráfico dos valores previstos x resíduos - caso excluído: 174 - Rigidez.

Relativo à homocedasticidade dos resíduos, foram utilizados dois testes: Cochran-Bartlett e Levene’s (tabelas 4.1 e 4.2).

Tabela 4.1 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa)

Testes de Homogeneidade de Variâncias (dadosANOVA)					
Efeito: 1*2*3*4*5					
Casos excluídos: 174					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Rigidez (MPa)	125,6151	0,141367	62,62710	31	0,000654

Tabela 4.2 – Teste de Levene para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa).

Teste de Levene’s para Homogeneidade de Variâncias (dadosANOVA)				
Efeito: 1*2*3*4*5				
Graus de Liberdade para todos os F’s: 31, 132				
	MS Effect	MS Error	F	p
Rigidez (MPa)	69703,66	30085,75	2,316833	0,000541

Os testes consideram a  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias, ou seja, que as variâncias são homogêneas.

Verifica-se em ambos os testes que  $p < 0,05$ , indicando que a premissa foi rejeitada para a base de dados em questão, porém não necessariamente inviabilizam-se os testes realizados, uma vez que a Figura 4.3 já mostrou ausência de tendências notáveis, além das análises de Monte Carlo historicamente mostrarem que os erros acumulados em uma análise paramétrica sem atendimento completo dos parâmetros são toleráveis.

Analisando o gráfico de normalidade da Figura 4.4, observa-se que os resíduos acompanham a linha de tendência (vermelha) de valor normal esperado, indicando possivelmente uma distribuição normal dos resíduos, condição esta que deverá ser verificada, posteriormente, através de outros testes.

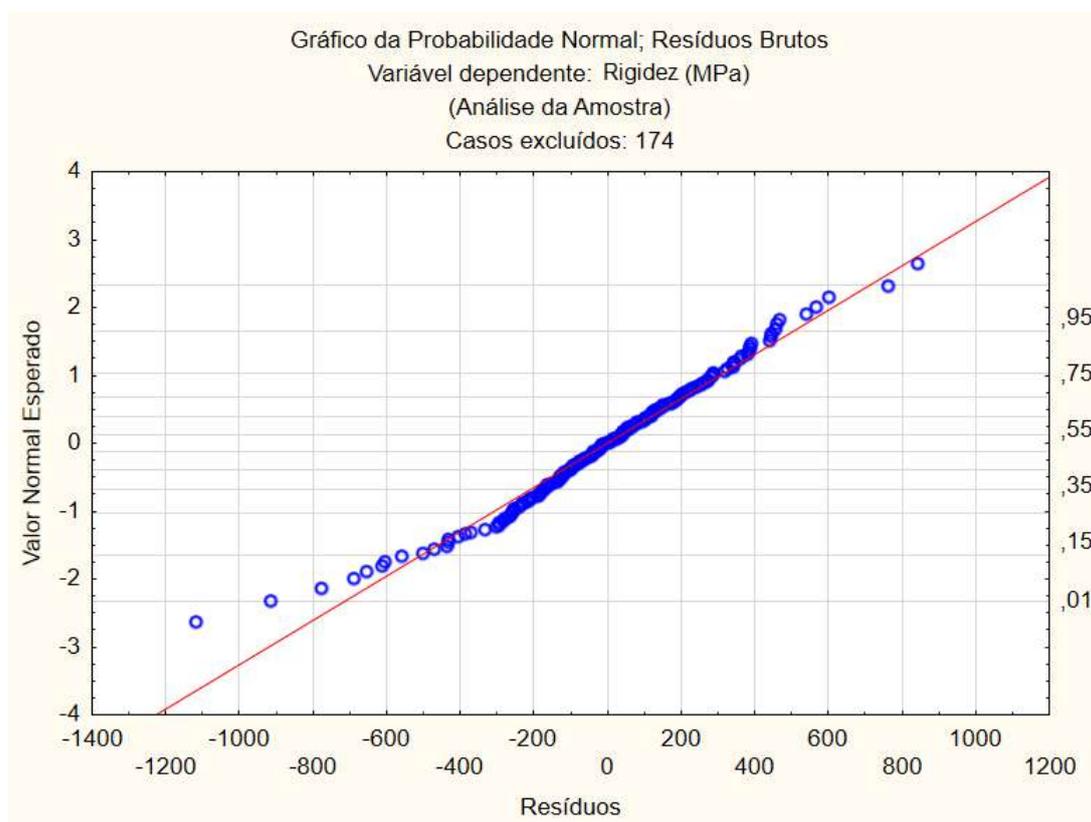


Figura 4.4 – Gráfico de normalidade da distribuição dos resíduos - Rigidez.

No histograma dos resíduos da Figura 4.5, são apresentados os resultados de alguns testes de normalidade, cujos resultados são discutidos a seguir.

Nestes testes, se considera a  $H_0$  de que não há diferença entre a distribuição dos resíduos e uma distribuição normal. A  $H_0$  foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir:

- Lilliefors- $p = 1$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,039$ : apesar do teste rejeitar a  $H_0$  ( $p < 0,05$ ), por prudência na análise, ela não será rejeitada por estar muito próxima de 0,05, ponto onde a  $H_0$  não seria rejeitada de forma irrestrita. Além disso, o fato de não ter sido rejeitada no outro teste é suficiente para aceitação da condição de normalidade como aprovada.

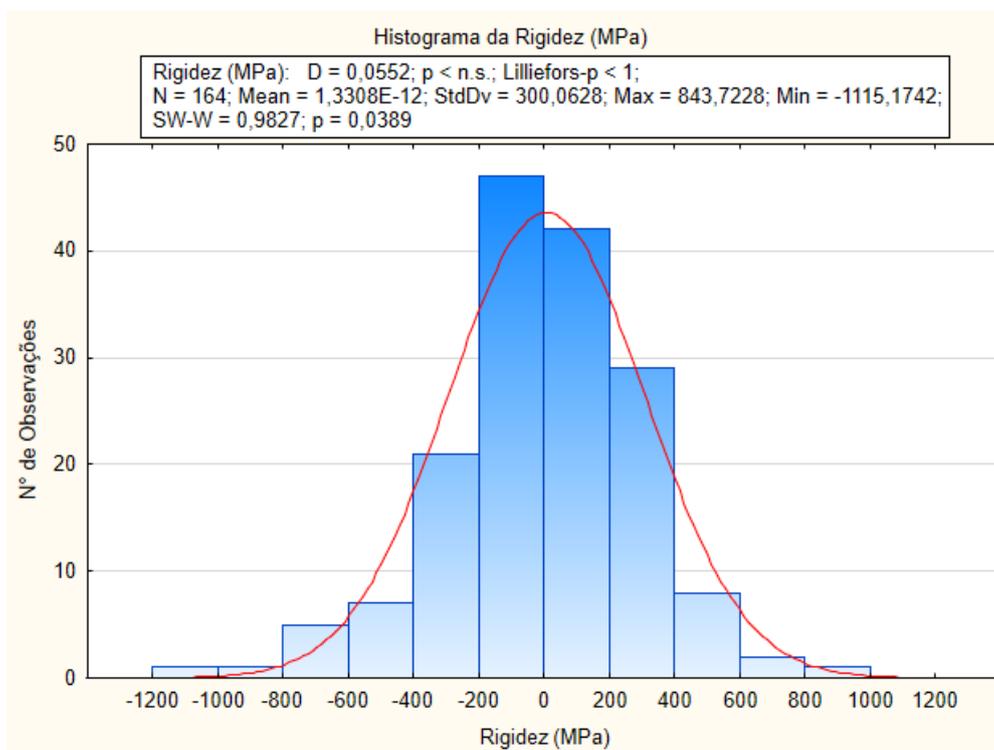


Figura 4.5 – Histograma dos resíduos - Rigidez.

Partindo da  $H_0$  de que os fatores de entrada não influenciam na rigidez, e analisando a Tabela 4.3, referente aos efeitos principais e de interação dos fatores de entrada, observa-se que a  $H_0$  relativa ao formato não é rejeitada ( $p > 0,05$ ), ou seja, dos efeitos isolados, apenas o formato não tem influência estatística na rigidez.

Tabela 4.3 – Efeito de Interação das variáveis - Rigidez

Resultados univariados para cada visualização de dados (dadosANOVA)			
Parametrização restrita a Sigma			
Decomposição efetiva da hipótese			
Casos excluídos: 174			
Effect	Rigidez (MPa) SS	Rigidez (MPa) MS	Rigidez (MPa) p
Intercept *	652520575	652520575	0,000000
Formato (1)	392073	392073	0,062606
Quantidade (2)	2481844	2481844	0,000006
Área/Tamanho do defeito (3)	32348923	32348923	0,000000
Alinhamento (4)	5612561	5612561	0,000000
Material (5)	60184370	60184370	0,000000
(1)x(2)	1786	1786	0,899349
(1)x(3)	2935	2935	0,871174
(2)x(3)	53334	53334	0,489775
(1)x(4)	166884	166884	0,222701
(2)x(4)	274285	274285	0,118655
(3)x(4)	3741	3741	0,854744
(1)x(5)	25522	25522	0,632650
(2)x(5)	178449	178449	0,207427
(3)x(5)	5616881	5616881	0,000000
(4)x(5)	4109	4109	0,847854
(1)x(2)x(3)	129043	129043	0,283299
(1)x(2)x(4)	98121	98121	0,349229
(1)x(3)x(4)	88581	88581	0,373702
(2)x(3)x(4)	255981	255981	0,131571
(1)x(2)x(5)	22138	22138	0,656168
(1)x(3)x(5)	4069	4069	0,848590
(2)x(3)x(5)	230	230	0,963814
(1)x(4)x(5)	543020	543020	0,028830
(2)x(4)x(5)	12477	12477	0,738157
(3)x(4)x(5)	268324	268324	0,122698
(1)x(2)x(3)x(4)	12618	12618	0,736743
(1)x(2)x(3)x(5)	461409	461409	0,043633
(1)x(2)x(4)x(5)	13018	13018	0,732756
(1)x(3)x(4)x(5)	63847	63847	0,449925
(2)x(3)x(4)x(5)	63234	63234	0,452102
(1)x(2)x(3)x(4)x(5)	87392	87392	0,376919
Error	14676141	111183	
Total	127115753		

\* Dado associado a uma média global, semelhante a um coeficiente limiar do modelo, não sendo usado para interpretação (não tem sentido físico)

Mesmo assim, sugere-se interpretar esse resultado com cautela, tendo em vista a proximidade em relação ao nível de significância adotado ( $\alpha = 0,05$ ). Uma amostragem maior, por exemplo, poderia conduzir à rejeição de  $H_0$  também para este fator de entrada.

Para o caso dos outros fatores de entrada (quantidade, área, alinhamento e material) verifica-se que a  $H_0$  é rejeitada, ou seja, as variáveis influenciam na rigidez ( $p \ll 0,05$ ).

Em relação aos efeitos de interação das variáveis, é possível verificar que praticamente nenhum dos efeitos têm influência sobre a rigidez (exceto algumas como área do defeito x material), o que nos permitiria fazer uma análise dos fatores de forma praticamente independente em experimentos futuros.

#### 4.1.1 Análise de interação de variáveis - Rigidez - CP 01 a 08

Serão analisados neste item os CP 01 a 08 (Figura 4.6), que se tratam dos CP com 3 defeitos circulares, em todas as variações de área de defeito, alinhamento e material.

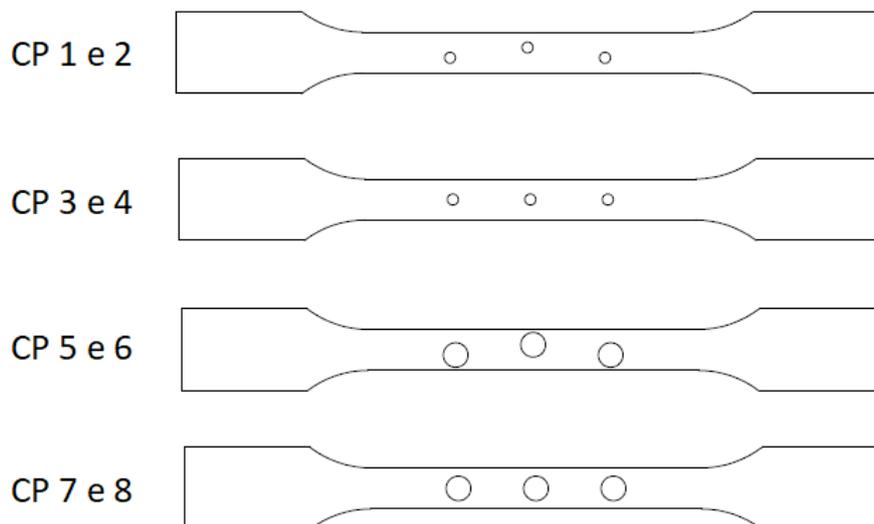


Figura 4.6 – CP 01 a 08

A partir do gráfico da Figura 4.7 é realizada a análise da rigidez (eixo  $y$ ) e material (eixo  $x$  superior), onde no primeiro gráfico, à esquerda, temos uma

distribuição dos CP com defeitos não alinhados e o gráfico à direita para os CP com defeitos alinhados eixo  $x$  inferior), tanto para o CP com defeito de tamanho menor (azul) quanto para o com defeito maior (vermelho), além do CP controle (verde).

Como a análise completa conta com 5 fatores de entrada, para esta análise foram fixados os seguintes fatores:

- Formato dos defeitos: círculos (-1)
- Quantidade de defeitos: 3

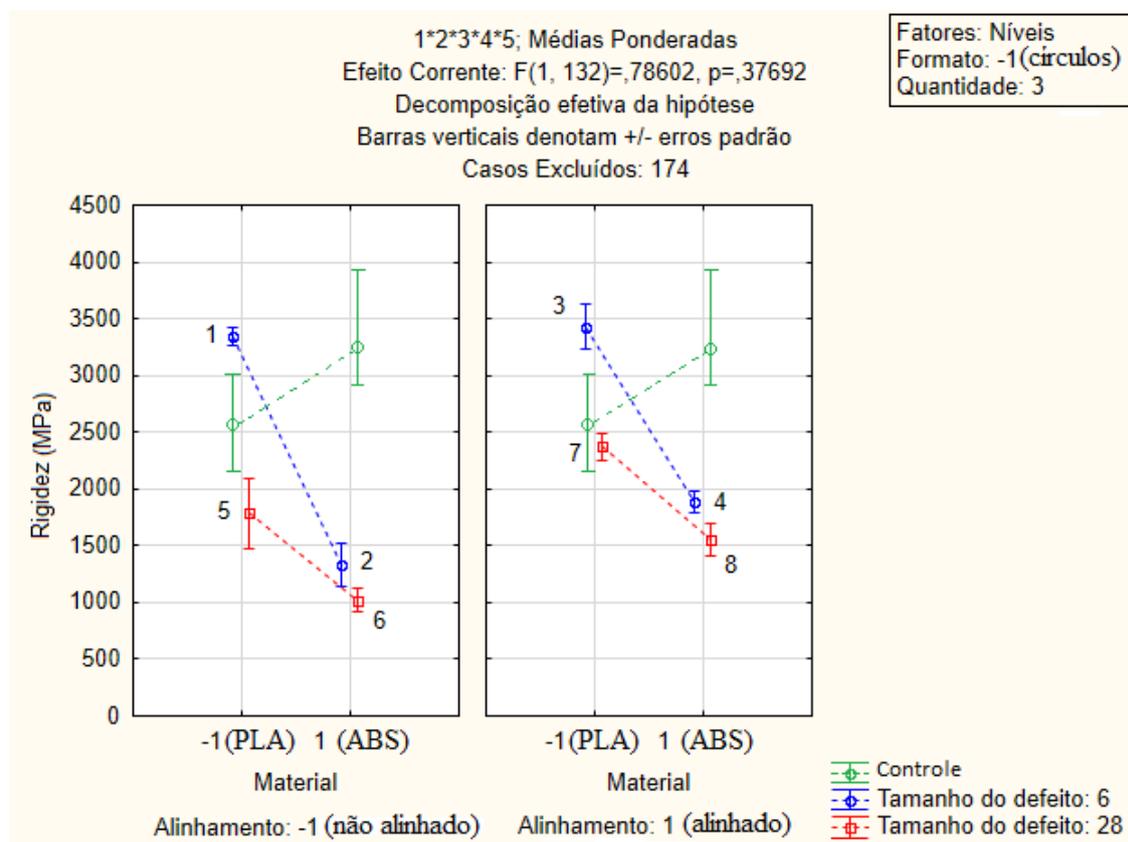


Figura 4.7 – Impacto do material, alinhamento e tamanho do defeito na rigidez. CP com três defeitos circulares.

É possível observar em ambos os gráficos que, alterando o material (de PLA (-1) para ABS (1)), a rigidez para os CP com defeitos diminui (o contrário acontece com os CP controle - sem defeitos). No caso dos defeitos menores, é possível observar que a queda no valor da rigidez é mais acentuada que nos defeitos maiores em ambos os gráficos.

Realizando uma verificação mais profunda, através da Tabela 4.4 (teste Fisher LSD), é possível analisar estatisticamente em relação à  $H_0$  adotada se há diferença nos pares de resultados para os intervalos comparados.

Tabela 4.4 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos CP 1 a 8

Teste LSD; variável Rigidez (MPa) (dados ANOVA)									
Probabilidades para testes Post Hoc									
Erro: Entre MSE = 1112E2, df = 132,00									
Casos excluídos: 174									
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{1}	{2}	{3}	{4}
						3340,7	1327,8	3429,3	1883,5
1	-1	3	6	-1	-1		0,000000	0,646247	0,000000
2	-1	3	6	-1	1	0,000000		0,000000	0,009427
3	-1	3	6	1	-1	0,646247	0,000000		0,000000
4	-1	3	6	1	1	0,000000	0,009427	0,000000	
5	-1	3	28	-1	-1	0,000000	0,030100	0,000000	0,658996
6	-1	3	28	-1	1	0,000000	0,169165	0,000000	0,000172
7	-1	3	28	1	-1	0,000002	0,000001	0,000000	0,016977
8	-1	3	28	1	1	0,000000	0,310963	0,000000	0,144766
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{5}	{6}	{7}	{8}
						1790,2	1018,6	2371,7	1555,4
1	-1	3	6	-1	-1	0,000000	0,000000	0,000002	0,000000
2	-1	3	6	-1	1	0,030100	0,169165	0,000001	0,310963
3	-1	3	6	1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
4	-1	3	6	1	1	0,658996	0,000172	0,016977	0,144766
5	-1	3	28	-1	-1		0,000754	0,004644	0,295658
6	-1	3	28	-1	1	0,000754		0,000000	0,024430
7	-1	3	28	1	-1	0,004644	0,000000		0,000226
8	-1	3	28	1	1	0,295658	0,024430	0,000226	

Será realizada nesta análise um recorte dos pares não significativos, ou seja, onde  $p > 0,05$  (a  $H_0$  não é rejeitada).

Portanto, para os CP com 3 defeitos circulares, as seguintes comparações não foram consideradas significativas:

- CP 1 e 3 ( $p = 0,65$ ) - para os CP feitos em PLA, com defeito de  $5,7mm^2$ , o alinhamento dos defeitos não influenciou na rigidez. Contudo, para CP feitos em PLA com defeitos maiores,  $28,3mm^2$ , o alinhamento já se mostrou significativo (comparativos dos CP 5x7,  $p = 0,0046$ );
- CP 2 e 6 ( $p = 0,17$ ) - para os CP feitos em ABS e com defeitos desalinhados, o tamanho dos defeitos não influenciou na rigidez, vide

proximidade dos pontos na Figura 4.7. Neste caso, mesmo defeitos pequenos já levaram à queda da rigidez;

- CP 4 e 8 ( $p = 0,14$ ) - para os CP feitos em ABS e com defeitos alinhados, o tamanho dos defeitos não influenciou na rigidez, tal como mostrado na Figura 4.7;
- O comparativo entre os CP 2 x 8 temos dois CP feitos em ABS com defeitos circulares, sendo um CP com defeitos de  $5,7mm^2$  e desalinhados estatisticamente igual a um CP com defeitos de  $28,3mm^2$  e alinhados.

Novamente, analisando o gráfico da Figura 4.7 é possível perceber que, para o PLA, a mudança de tamanho do defeito de  $5,7mm^2$  para  $28,3mm^2$  parece ter muito mais efeito que para o ABS por isso o efeito de interação Área (3) x Material (5) foi significativo, conforme verificado na Tabela 4.3, onde  $p = 0,00$ .

Um efeito inesperado a ser observado é a rigidez do PLA com defeitos menores ser maior que a rigidez do CP controle (sem defeitos provocados). Pela curva da Figura C.1 (apêndice B), que se tratam dos gráficos dos ensaios para os CP feitos em PLA, é possível observar que de fato a rigidez se comportou desta forma para uma parte dos CP ensaiados (cerca de metade dos CP. Por outro lado, o mesmo não foi observado para os CP feito em ABS, conforme pode ser visto na Figura C.2 (apêndice B).

#### 4.1.2 Análise de interação de variáveis - Rigidez - CP 09 a 16

Analisando agora os CP 09 a 16 (Figura 4.8), que se tratam dos CP com 7 defeitos circulares, em todas as variações de área de defeito, alinhamento e material.

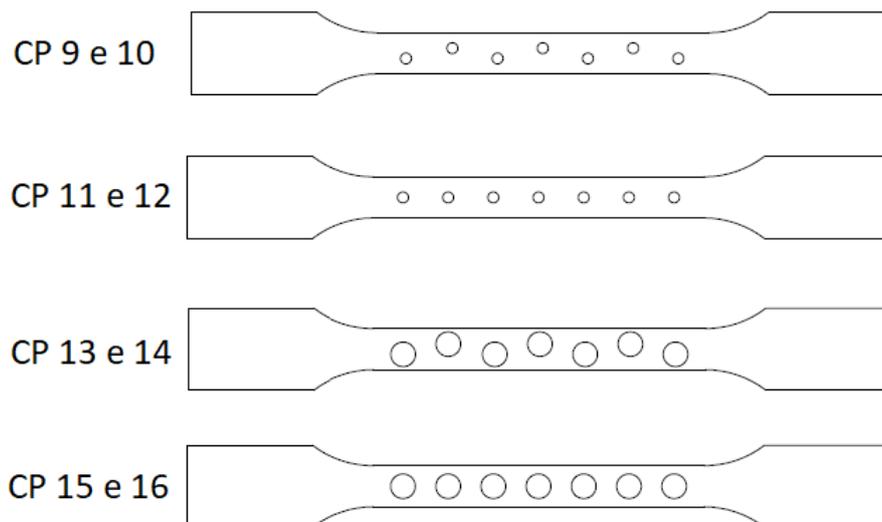


Figura 4.8 – CP 09 a 16

A partir do gráfico da Figura 4.9 é realizada a análise da rigidez (eixo  $y$ ) e tamanho do defeito (eixo  $x$  superior), onde no primeiro gráfico, à esquerda, é de uma distribuição dos CP com defeitos não alinhados (-1) e o gráfico à direita para os CP com defeitos alinhados (1) (eixo  $x$  inferior), tanto para o material PLA (azul) quanto para o ABS (vermelho). Como os CP controle não possuem defeitos inseridos, eles foram representados como pontos (com seus desvios), sendo para o CP controle feito em ABS, o ponto verde, e roxo para o feito em PLA.

Como a análise completa conta com 5 fatores de entrada, para esta foram fixados os seguintes fatores de entrada:

- Formato dos defeitos: círculos (-1)
- Quantidade de defeitos: 7

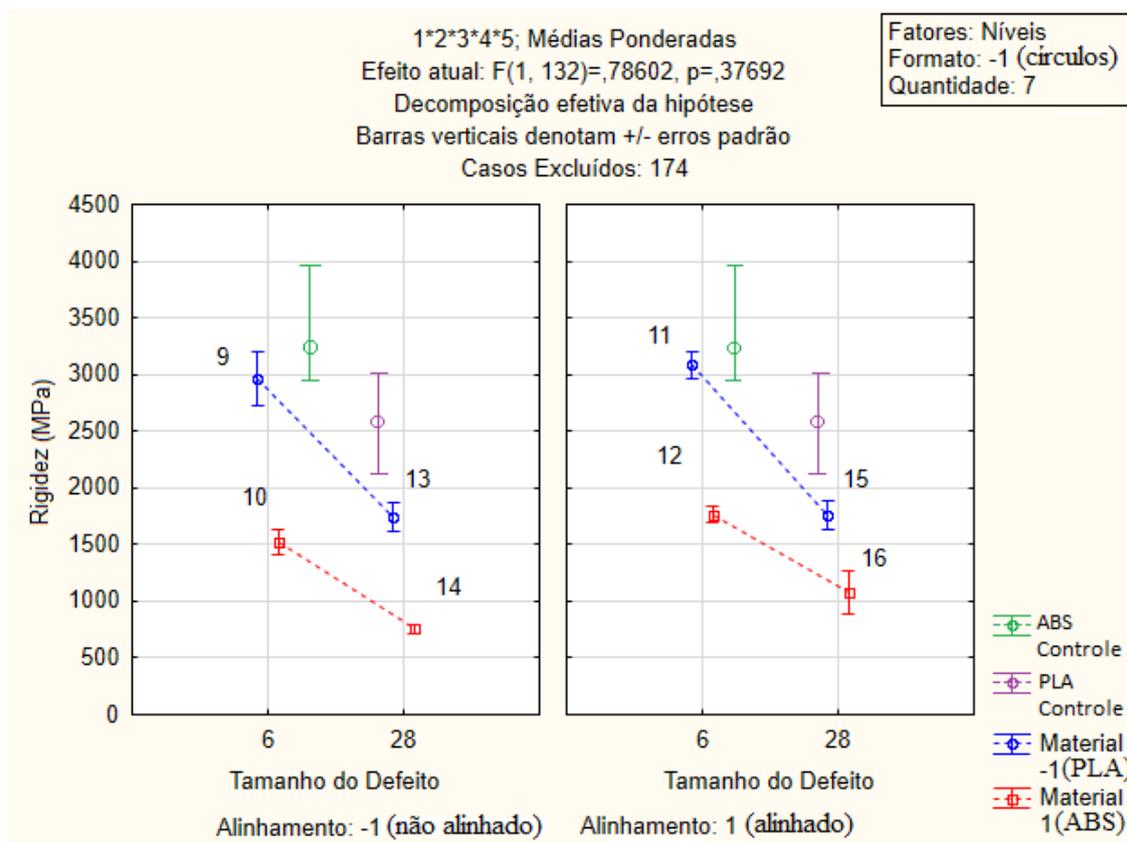


Figura 4.9 – Impacto do tamanho e alinhamento do defeito e material na rigidez. CPs com sete defeitos circulares.

É possível observar em ambos os gráficos que o aumento do tamanho do defeito do CP com a rigidez tende a diminuir. No caso dos CP controle feitos em ABS, a rigidez apresenta um valor muito maior que os CP feitos com defeitos (diferença de aproximadamente  $1800MPa$  entre o CP controle e CP com defeitos de  $5,7mm^2$  e em torno de  $2500MPa$  para os CP com defeitos de  $28,3mm^2$ ). Já para o PLA, a rigidez para defeitos menores apresentou um valor médio maior que o CP controle (diferença em torno de  $400MPa$ ) e para defeitos maiores, a rigidez apresentou um valor menor que o CP controle.

Através do teste LSD Fisher (Tabela 4.5), serão analisadas as comparações entre os pares de CP, partindo da  $H_0$  de que não há diferença no par estudado.

Tabela 4.5 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos CP 9 a 16

Teste LSD; variável Rigidez (MPa) (dados ANOVA)  
 Probabilidades para testes Post Hoc  
 Erro: Entre MSE = 1112E2, df = 132,00  
 Casos excluídos: 174

	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{9} 2963,6	{10} 1521,0	{11} 3084,1	{12} 1765,4
9	-1	7	6	-1	-1		0,000000	0,532493	0,000000
10	-1	7	6	-1	1	0,000000		0,000000	0,248562
11	-1	7	6	1	-1	0,532493	0,000000		0,000000
12	-1	7	6	1	1	0,000000	0,248562	0,000000	
13	-1	7	28	-1	-1	0,000000	0,295981	0,000000	0,912798
14	-1	7	28	-1	1	0,000000	0,000869	0,000000	0,000015
15	-1	7	28	1	-1	0,000000	0,232783	0,000000	0,990620
16	-1	7	28	1	1	0,000000	0,038860	0,000000	0,001486
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{13} 1742,2	{14} 758,77	{15} 1763,0	{16} 1081,0
9	-1	7	6	-1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
10	-1	7	6	-1	1	0,295981	0,000869	0,232783	0,038860
11	-1	7	6	1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
12	-1	7	6	1	1	0,912798	0,000015	0,990620	0,001486
13	-1	7	28	-1	-1		0,000022	0,918262	0,002114
14	-1	7	28	-1	1	0,000022		0,000007	0,152114
15	-1	7	28	1	-1	0,918262	0,000007		0,000960
16	-1	7	28	1	1	0,002114	0,152114	0,000960	

Para o intervalo em estudo, as seguintes comparações não foram consideradas significativas:

- Em todos os comparativos que envolvem apenas a alteração do alinhamento, ou seja, o comparativo entre os CP 9 x 11 ( $p = 0,53$ ), 10 x 12 ( $p = 0,25$ ), 13 x 15 ( $p = 0,92$ ) e 14 x 16 ( $p = 0,15$ ) não foram significativos.

#### 4.1.3 Análise de interação de variáveis - Rigidez - CPs 17 a 24

Neste ponto, serão analisados os CP 17 a 24 (Figura 4.10), que se tratam dos CP com 3 defeitos losangulares, em todas as variações de área de defeito, alinhamento e material.

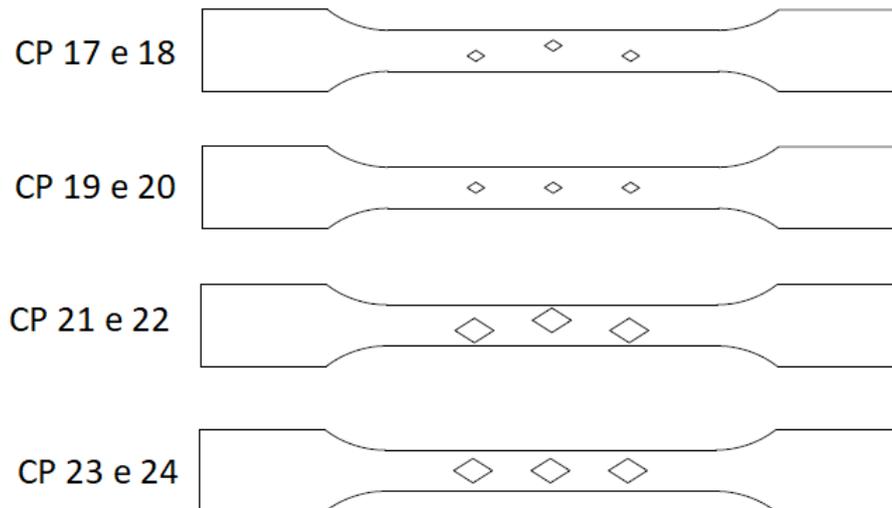


Figura 4.10 – CP 17 a 24

Para os gráficos da Figura 4.11 é realizada a análise da rigidez (eixo  $y$ ) e material dos CP (eixo  $x$  superior), onde no primeiro gráfico, à esquerda, são analisados os CP com área de defeito desalinhado ( $-1$ ) e no outro gráfico, à direita, para os CP com defeitos alinhados ( $1$ ) (eixo  $x$  inferior), tanto para os defeitos menores ( $5,7\text{mm}^2$  - linha azul) e defeito maiores ( $28,3\text{mm}^2$  - linha vermelha), assim como os CP controle (linha verde).

Como a análise completa conta com 5 fatores de entrada, para esta análise foram fixados os seguintes fatores:

- Formato dos defeitos: losango (1)
- Quantidade de defeitos: 3

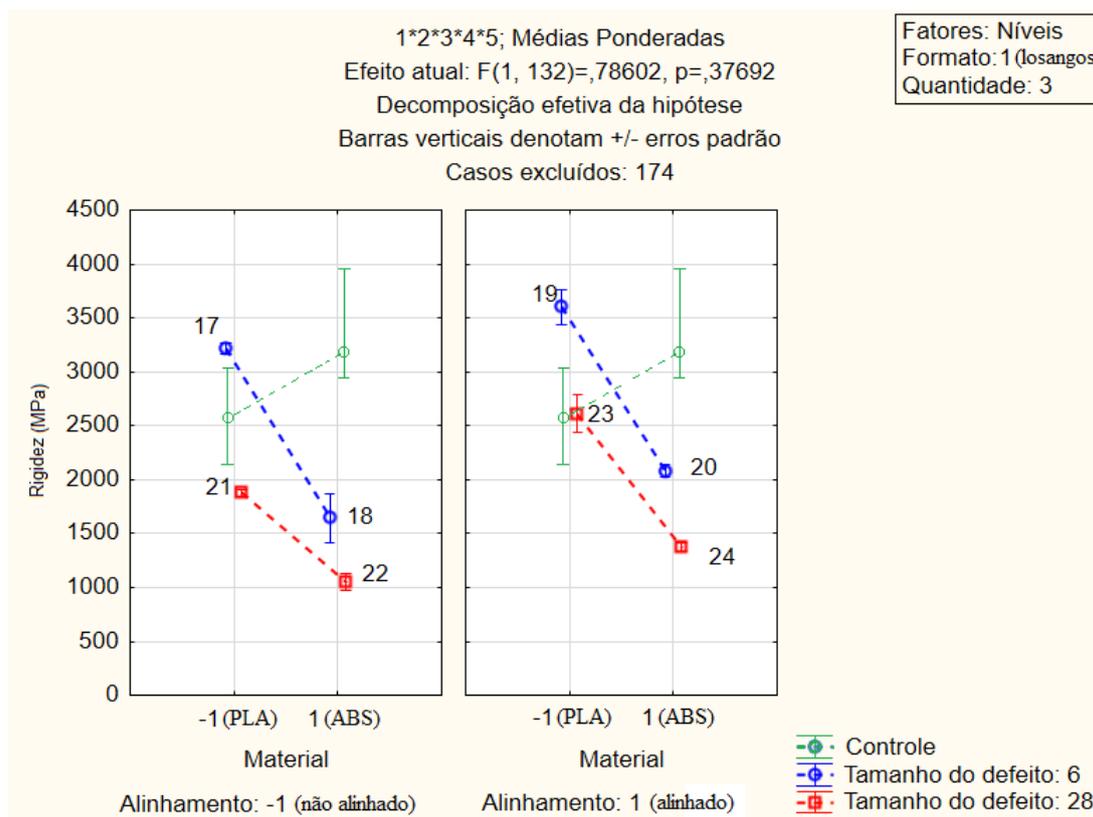


Figura 4.11 – Impacto do alinhamento e tamanho do defeito e material na rigidez. CP com sete defeitos losangulares.

É possível observar em ambos os gráficos que os CP feitos em PLA apresentam uma rigidez consideravelmente maior que para os CP feitos em ABS. Deve ser observado que no caso dos CP controle, o comportamento foi contrário aos CP com defeitos. No caso dos CP feitos em ABS, a rigidez do controle é muito maior que os CP com defeitos, porém, no caso dos feitos em PLA, a rigidez tem valor intermediário aos CP com defeitos de diferentes áreas.

Realizando uma verificação mais profunda, através da Tabela 4.6 (teste Fisher LSD), é possível analisar estatisticamente em relação à  $H_0$  adotada se há diferença nos pares de resultados para os intervalos comparados.

Tabela 4.6 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos CP 17 a 24

Teste LSD; variável Rigidez (MPa) (dados ANOVA)  
 Probabilidades para testes Post Hoc  
 Erro: Entre MSE = 1112E2, df = 132,00  
 Casos excluídos: 174

	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{17}	{18}	{19}	{20}
						3216,4	1643,8	3603,0	2078,1
17	1	3	6	-1	-1		0,000000	0,068995	0,000000
18	1	3	6	-1	1	0,000000		0,000000	0,041418
19	1	3	6	1	-1	0,068995	0,000000		0,000000
20	1	3	6	1	1	0,000000	0,041418	0,000000	
21	1	3	28	-1	-1	0,000000	0,273455	0,000000	0,338954
22	1	3	28	-1	1	0,000000	0,005557	0,000000	0,000003
23	1	3	28	1	-1	0,004808	0,000010	0,000006	0,012610
24	1	3	28	1	1	0,000000	0,231618	0,000000	0,002063
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{21}	{22}	{23}	{24}
						1875,7	1049,3	2611,5	1375,0
17	1	3	6	-1	-1	0,000000	0,000000	0,004808	0,000000
18	1	3	6	-1	1	0,273455	0,005557	0,000010	0,231618
19	1	3	6	1	-1	0,000000	0,000000	0,000006	0,000000
20	1	3	6	1	1	0,338954	0,000003	0,012610	0,002063
21	1	3	28	-1	-1		0,000142	0,000660	0,026859
22	1	3	28	-1	1	0,000142		0,000000	0,147705
23	1	3	28	1	-1	0,000660	0,000000		0,000000
24	1	3	28	1	1	0,026859	0,147705	0,000000	

Será realizada nesta análise um recorte dos pares não significativos, ou seja, onde  $p > 0,05$  (a  $H_0$  não é rejeitada).

Portanto, para os CP com 3 defeitos losangulares, as seguintes comparações não foram consideradas significativas:

- CP 17 e 19 ( $p = 0,069$ ) - para os CP feitos em PLA, com defeito de  $5,7mm^2$ , o alinhamento dos defeitos não influenciou na rigidez. Numa análise mais profunda, em função da proximidade do valor de  $p$  ao mínimo, por prudência de análise será considerada a rejeição da  $H_0$ . Observa-se que, para CP feitos em PLA com defeitos maiores,  $28,3mm^2$ , o alinhamento se mostrou significativo (comparativos dos CP 21x23,  $p = 0,0007$ );
- CP 22 e 24 ( $p = 0,15$ ) - para os CP feitos em ABS com defeitos maiores, o alinhamento do CP não influenciou na rigidez;

Analisando o gráfico da Figura 4.11 pode-se perceber que, para o PLA, a mudança de tamanho do defeito de  $5,7mm^2$  para  $28,3mm^2$  parece ter muito

mais efeito que para o ABS por isso o efeito do comparativo dos CP 19 x 21 foi significativo, conforme verificado na Tabela 4.6, onde  $p = 0,00$ .

#### 4.1.4 Análise de interação de variáveis - Rigidez - CP 25 a 32

Neste ponto serão analisados os CP 25 a 32 (Figura 4.12), que se tratam dos CP com 7 defeitos losangulares, em todas as variações de área de defeito, alinhamento e material.

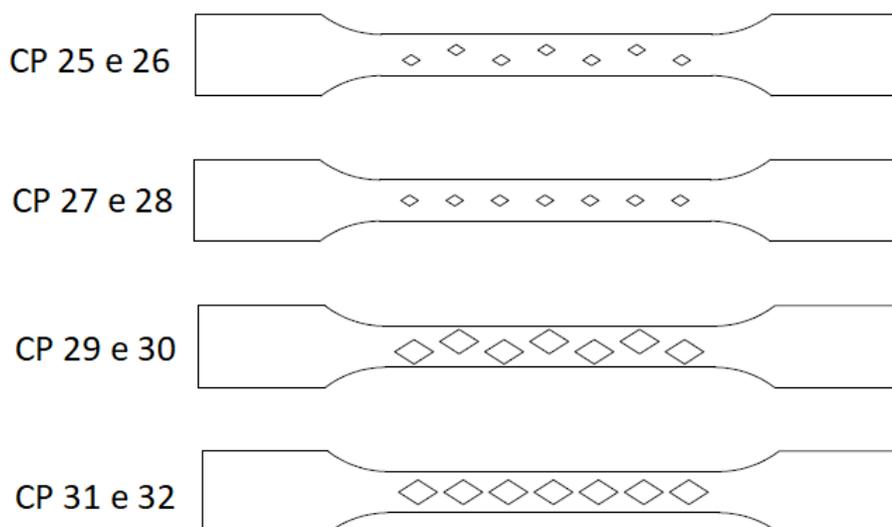


Figura 4.12 – CP 25 a 32

Para os gráficos da Figura 4.13 é realizada a análise da rigidez (eixo  $y$ ) e alinhamento dos defeitos (eixo  $x$  superior) – não alinhados (-1) e alinhados (1) –, onde no primeiro gráfico, à esquerda, são analisados os CP com área de defeito menor ( $5,7mm^2$ ) e no outro gráfico, à direita, para os CP com defeitos maiores ( $28,3mm^2$ ) (eixo  $x$  inferior).

Como a análise completa conta com 5 fatores de entrada, para esta análise foram fixados os seguintes fatores:

- Formato dos defeitos: losango (1)
- Quantidade de defeitos: 7

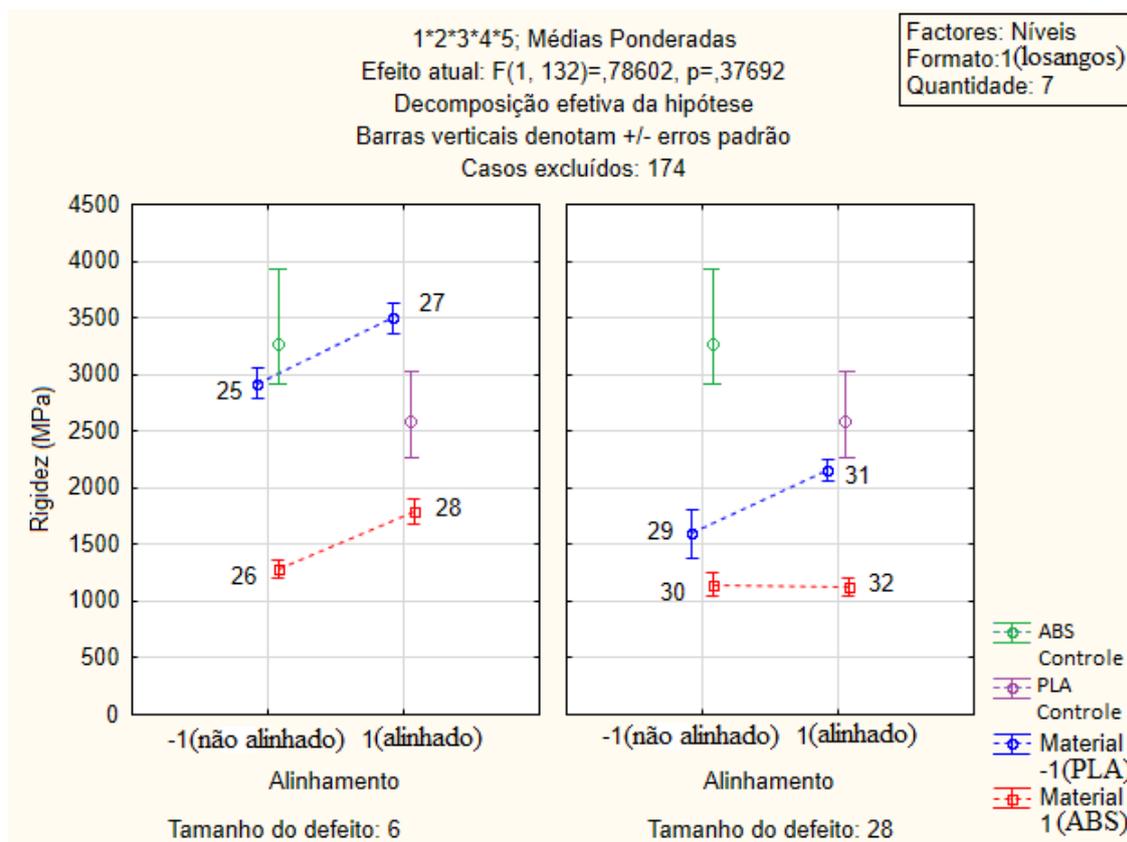


Figura 4.13 – Impacto do alinhamento e tamanho do defeito e material na rigidez. CP com sete defeitos losangulares.

No gráfico da esquerda, que representam os defeitos com menor área pode-se observar que:

Alterando a disposição dos defeitos (de desalinhados (-1) para alinhados (+1)), a tendência é de aumento da rigidez para ambos os materiais, porém em faixas de valores bem distintos.

Já no gráfico à direita, para os CP com defeitos maiores, é possível observar que a faixa de valores para a rigidez do PLA é bem mais baixa que nos CP com defeitos menores, com uma diferença em torno dos 1500MPa (considerando o mesmo alinhamento de defeitos). Já para os CP feitos em ABS, observa-se no gráfico que a rigidez se manteve por volta dos 1100MPa, mesmo alterando o alinhamento (esta análise será aprofundada abaixo).

Através do teste LSD Fisher (Tabela 4.7), serão analisadas as interações dos pares de CP, partindo da  $H_0$  de que não há diferença no par estudado.

Tabela 4.7 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos pontos 25 a 32

Teste LSD; Variável Rigidez (MPa) (dados ANOVA)  
 Probabilidade para testes Post Hoc  
 Erro: Entre MSE = 1112E2, df = 132,00  
 Casos excluídos: 174

	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{25} 2923,4	{26} 1285,0	{27} 3495,7	{28} 1790,6
25	1	7	6	-1	-1		0,000000	0,005312	0,000000
26	1	7	6	-1	1	0,000000		0,000000	0,017920
27	1	7	6	1	-1	0,005312	0,000000		0,000000
28	1	7	6	1	1	0,000000	0,017920	0,000000	
29	1	7	28	-1	-1	0,000000	0,127390	0,000000	0,333978
30	1	7	28	-1	1	0,000000	0,519279	0,000000	0,002823
31	1	7	28	1	-1	0,000214	0,000032	0,000000	0,073739
32	1	7	28	1	1	0,000000	0,485008	0,000000	0,003644
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{29} 1594,8	{30} 1148,8	{31} 2154,5	{32} 1128,4
25	1	7	6	-1	-1	0,000000	0,000000	0,000214	0,000000
26	1	7	6	-1	1	0,127390	0,519279	0,000032	0,485008
27	1	7	6	1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
28	1	7	6	1	1	0,333978	0,002823	0,073739	0,003644
29	1	7	28	-1	-1		0,028895	0,004274	0,032041
30	1	7	28	-1	1	0,028895		0,000002	0,927623
31	1	7	28	1	-1	0,004274	0,000002		0,000005
32	1	7	28	1	1	0,032041	0,927623	0,000005	

Para o intervalo em estudo, as seguintes comparações não foram consideradas significativas:

- Analisando também a interação entre os CP 26 e 30 ( $p = 0,52$ ), apreende-se que para os CP feitos em ABS com defeito desalinhado, o tamanho dos defeitos não é significativo.
- Para os CP 30 e 32 ( $p = 0,93$ ) - observando o gráfico da Figura 4.13, é possível observar que os pontos encontram-se praticamente alinhados, o que é reforçado pelo alto valor de  $p$  encontrado. Apreende-se desta análise que, para os CP feitos em ABS com maior defeito ( $28,3\text{mm}^2$ ), o alinhamento dos defeitos não é significativo;
- No caso dos CP 28 e 31 ( $p = 0,074$ ), onde são alterados o material e tamanho do defeito, a  $H_0$  não foi rejeitada, porém com um valor muito próximo de 0,05. Por prudência de análise, será considerado

significativo, uma vez que uma amostragem maior poderia fazer com que o valor de  $p$  fique abaixo de 0,05.

#### 4.1.5 Estimativa de Efeitos, Coeficientes de Regressão e Gráficos 3D

A Tabela 4.8 traz algumas informações muito importantes acerca da série de dados. Primeiramente, no título da tabela pode ser encontrado um dado muito interessante, o  $R - sq$  ( $R^2$ ) ou coeficiente de determinação, que é o quanto da variabilidade de dados que estão sendo explicadas pelos testes realizados. O valor  $R^2 = 0,8679$  significa que os dados explicam 86,79% da variância presente no modelo.

Já a coluna *Effect* é uma forma de quantificar a influência da variável na rigidez. Desta forma, temos para cada variável a seguinte interpretação:

- Formato (1): ao variar o formato circular (-1) para o losango (+1), temos um aumento médio de 104,93MPa na rigidez.
- Quantidade (2): ao variar de 3 (-1) para 7 (+1) defeitos, temos uma diminuição média de 247,48MPa na rigidez.
- Tamanho do defeito (3): ao variar de 5,7mm<sup>2</sup> (-1) para 28,3mm<sup>2</sup> (+1), temos uma diminuição média de 894,01MPa na rigidez.
- Alinhamento (4): ao variar de defeitos não alinhados (-1) para alinhados (+1), temos um aumento médio de 372,88MPa na rigidez.
- Material (5): ao variar do PLA (-1) para ABS (+1), temos uma diminuição média de 1219,23MPa na rigidez.

Tabela 4.8 – Estimativa de Efeitos

Estimativas de Efeito; Var.:Rigidez (MPa); R-sqr=,86789;  
Adj:,8545 (dadosANOVA) 5 fatores, 1 Bloqueado, 164 Rodadas;  
Erro Quadrático Médio=111182,9  
DV: Rigidez (MPa)  
Casos excluídos: 174

Fator	Efeito	Erro Padrão	p
Intercept	2014,17	26,21241	0,00000
Formato (1)	104,93	52,43807	0,04743
Quantidade (2)	-247,48	52,35312	0,00001
Área/Tamanho do defeito (3)	-894,01	52,41433	0,00000
Alinhamento (4)	372,88	52,41386	0,00000
Material (5)	-1219,23	52,41030	0,00000
(1)x(2)	8,02	52,18378	0,87805
(1)x(3)	11,72	52,23869	0,82289
(2)x(3)	80,56	52,20170	0,12518
(1)x(4)	-21,98	52,38595	0,67550
(2)x(4)	-35,57	52,18912	0,49676
(3)x(4)	-78,51	52,14990	0,13458
(1)x(5)	71,93	52,37043	0,17192
(2)x(5)	15,14	52,24378	0,77237
(3)x(5)	379,30	52,39735	0,00000
(4)x(5)	-8,21	52,36064	0,87572

O que fica evidente, mais ainda que na Tabela 4.3, é que pode-se fazer um *ranking* da influência quantitativa na rigidez. Partindo da  $H_0$  de que o fator não tem significância para o efeito, verifica-se, portanto, que o material (5) é o fator mais predominante para a variação da rigidez (para a variação de  $(-1)$  para  $(+1)$ , ou seja, do PLA para o ABS, onde se observa uma queda média no valor da rigidez de  $1219,23MPa$ ), o que já era esperado. É possível constatar também que a interação entre as variáveis (exceto para tamanho do defeito (3) x material (5)) não demonstra muita significância.

Analisando agora a Tabela 4.9 observamos os Coeficientes de Regressão, que determinam a equação da curva que descreve a relação entre as variáveis e a resposta do sistema, no caso em análise, a rigidez.

Desta forma, serão considerados na equação todos os fatores de entrada - formato, quantidade, tamanho e alinhamento dos defeitos, além do material utilizado na fabricação dos CP - e o efeito de interação do tamanho do defeito x material em que a  $H_0$  foi rejeitada, utilizando os coeficientes de

regressão dos fatores considerados significativos pela tabela de estimativa de efeitos (Tabela 4.8) .

Tabela 4.9 – Coeficientes de Regressão

Coeficientes de Regressão; Var.:Rigidez (MPa); R-sqr=,86789; Adj:,8545 (dadosANOVA) 5 Fatores, 1 Bloqueado, 164 Rodadas; Erro Quadrático Médio=111182,9 DV: Rigidez (MPa) Casos Excluídos: 174		
Fator	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão
Mean/Interc.	2945,641	127,6787
Formato (1)	33,385	80,6636
Quantidade (2)	-48,130	23,6018
Área/Tamanho do defeito (3)	-36,595	6,4444
Alinhamento (4)	272,878	80,5735
Material (5)	-992,625	80,8322
1 by 2	2,006	13,0459
1 by 3	0,533	2,3745
1 by 4	40,279	26,1008
1 by 5	-10,989	26,1930
2 by 3	-0,808	1,1861
2 by 4	-19,628	13,0375
2 by 5	17,983	13,0926
3 by 4	0,688	2,3747
3 by 5	17,241	2,3817
4 by 5	-4,103	26,1803

Cada fator será uma variável na equação de regressão. Os nomes e valores que as variáveis poderão assumir na equação (de acordo com o CP em estudo estão definidos na Tabela 4.10, abaixo:

Tabela 4.10 – Variáveis utilizadas na equação de regressão

Fator	Variável na Equação	Valores a serem substituídos conforme CP
Formato	F	-1 ou 1
Quantidade	Q	3 ou 7
Área/Tamanho de defeito	T	6 ou 28
Alinhamento	A	-1 ou 1
Material	M	-1 ou 1

De acordo com a Tabela 4.9, temos então a equação de regressão para a rigidez ( $E$ ):

$$E(\text{MPa}) = 2945,64 + 33,385 \cdot F - 48,13 \cdot Q - 36,6 \cdot T + 272,9 \cdot A - 992,63 \cdot M + 17,24 \cdot T \cdot M \quad (4.1)$$

Continuando, pela Figura 4.14 é possível analisar a superfície das variáveis Alinhamento e Quantidade de defeitos em função da rigidez (eixo z). Através do gráfico, visualmente, pode-se extrair as seguintes informações:

- No aumento da quantidade de defeitos temos uma leve queda na rigidez para os CP com defeitos alinhados (+1) (em torno de 2500MPa para aproximadamente 2000MPa) e uma variação quase nula para os CP não alinhados (-1);
- A rigidez dos CP alinhados é maior que dos não alinhados;

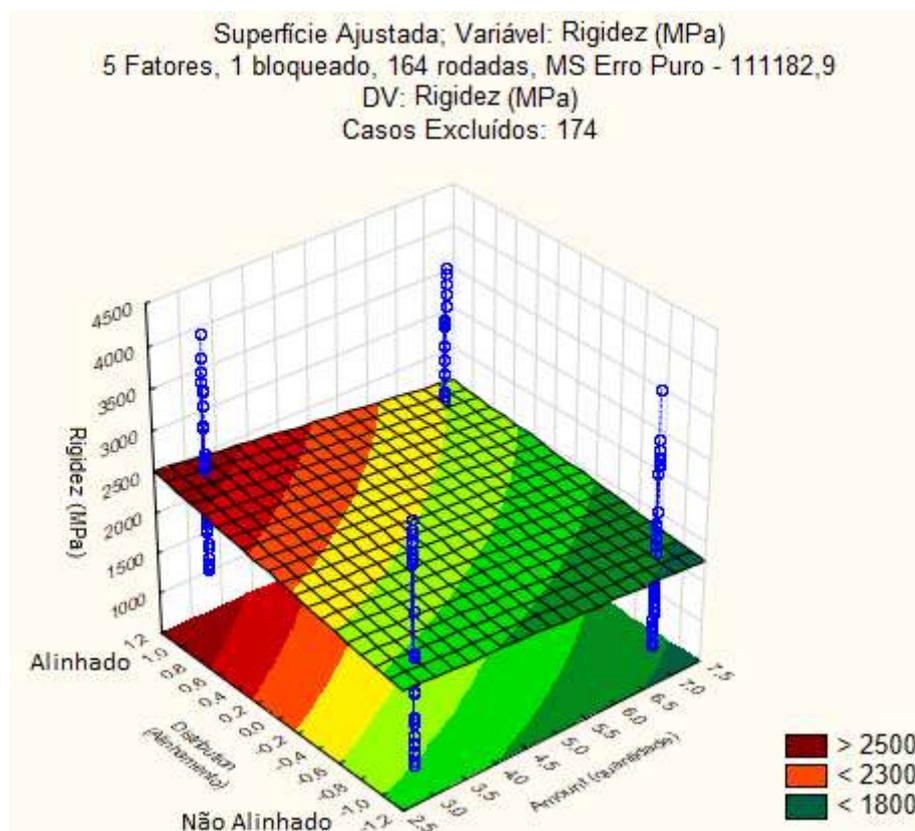


Figura 4.14 – Gráfico 3D Alinhamento x Quantidade x Rigidez

Na Figura 4.15 é possível analisar a superfície em função das variáveis Material e Quantidade de defeitos em função da rigidez (eixo z). Através do gráfico, visualmente, pode-se extrair as seguintes informações:

- No aumento da quantidade de defeitos temos uma leve queda na rigidez (diferença de aproximadamente  $500\text{MPa}$ ) para os CP feitos em PLA e se mantém constante (praticamente) para os CP feitos em ABS;
- A rigidez dos CP em PLA (-1) (em torno de  $2500\text{MPa}$ ) é consideravelmente maior que dos feitos em ABS (+1) (em torno de  $1200\text{MPa}$ ).

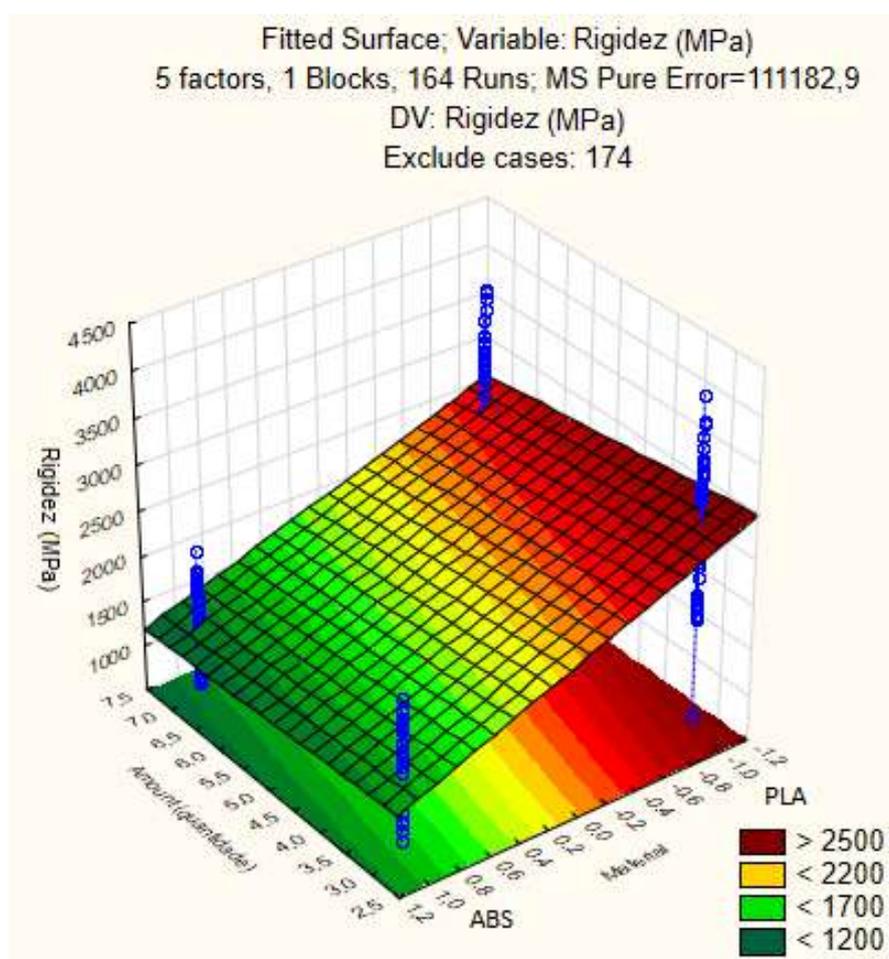


Figura 4.15 – Gráfico 3D Quantidade x Material x Rigidez

Na Figura 4.16, é possível analisar a superfície em função das variáveis Formato e Quantidade de defeitos em função da rigidez (eixo z). Através do gráfico, visualmente, pode-se extrair as seguintes informações:

- No aumento da quantidade de defeitos temos uma leve queda na rigidez para os CP feitos e se mantém constante (praticamente) para os CP feitos em ABS;
- A rigidez dos CP em PLA (-1) é consideravelmente maior que dos produzidos em ABS (+1);

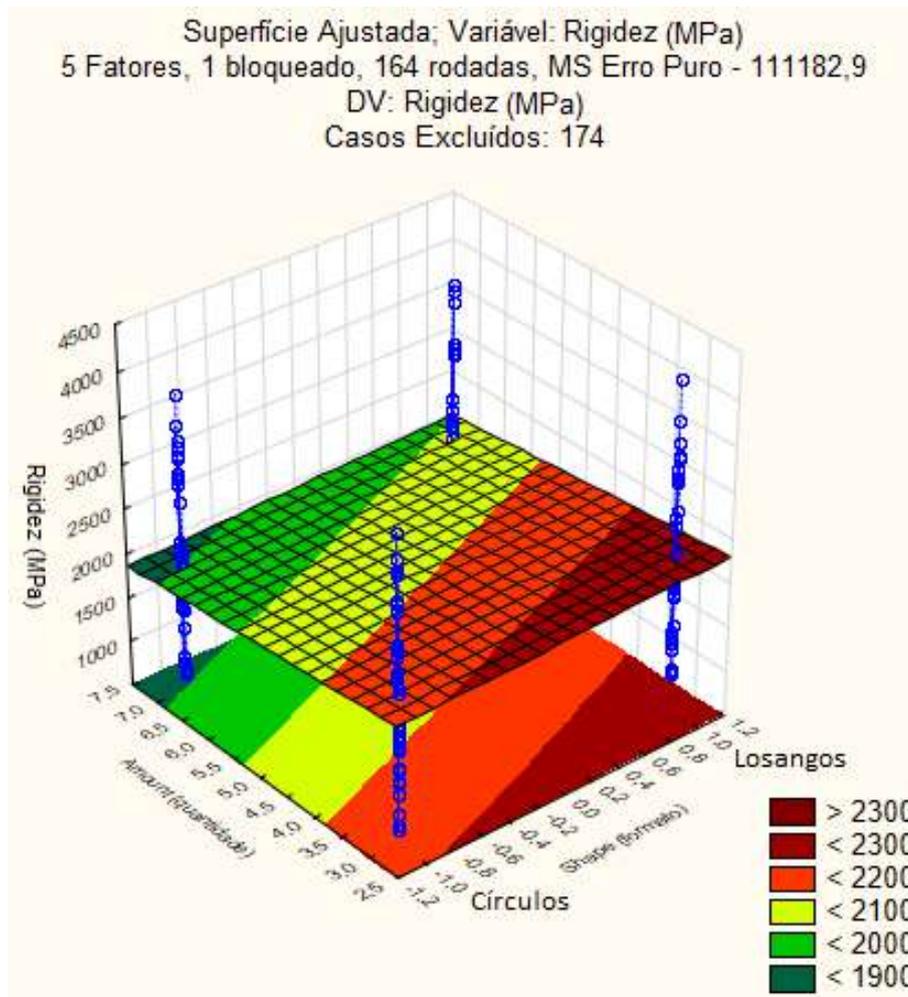


Figura 4.16 – Gráfico 3D - Quantidade x Formato x Rigidez

Na Figura 4.17, é possível analisar a superfície em função das variáveis Material e Quantidade de defeitos em função da rigidez (eixo z). Através do gráfico, visualmente, pode-se extrair as seguintes informações:

- No aumento da quantidade de defeitos temos uma leve queda na rigidez para os CP feitos e se mantém constante (praticamente) para os CP

feitos em ABS;

- A rigidez dos CP em PLA (-1) é consideravelmente maior que dos feitos em ABS (+1);

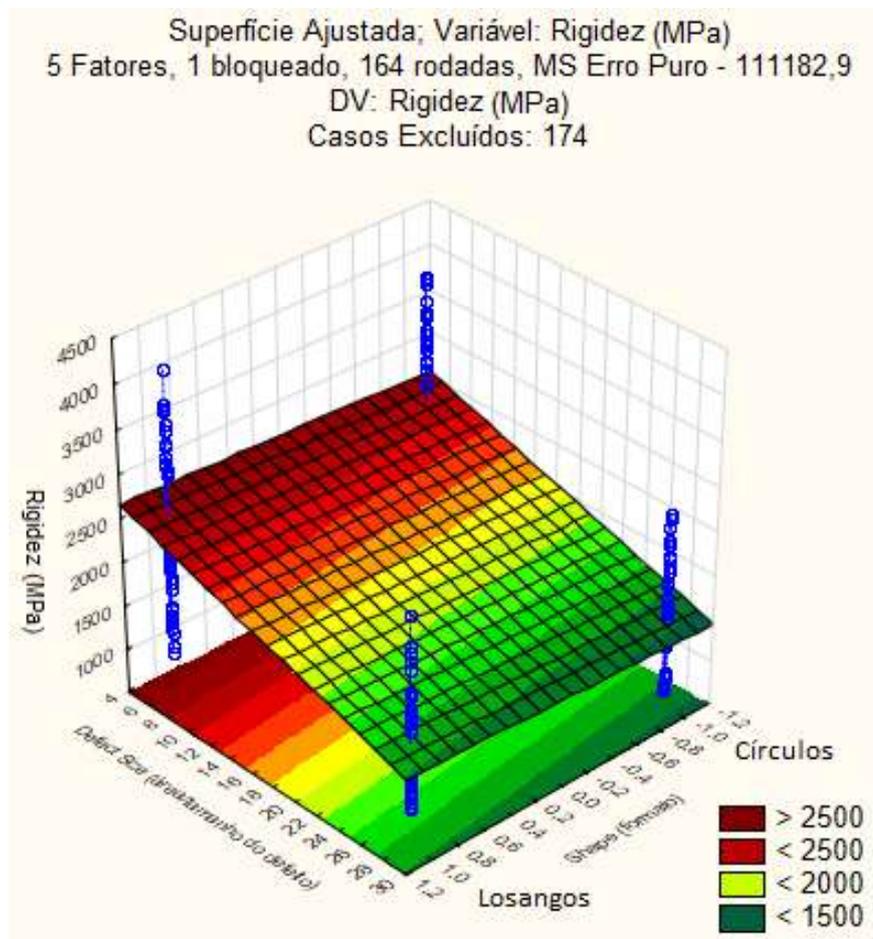


Figura 4.17 – Gráfico 3D - Tamanho do Defeito x Formato x Rigidez

## 4.2 Tensão Máxima (MPa) - $\delta_{m\acute{a}x}$

Nesta seção, será realizada a análise da Tensão Máxima, que seguirá a mesma metodologia utilizada para a rigidez.

Analisando o gráfico da Figura 4.18, é possível verificar os valores previstos da variável de resposta no eixo  $x$  e os resíduos brutos no eixo  $y$ , onde são considerados todos os ensaios realizados, sem desconsiderar os possíveis *outliers*.

Na figura, é possível observar que o ponto 10 é o que mais se separa da nuvem de pontos e visivelmente se destaca, sendo este o ponto que mais se distanciou do comportamento médio do grupo ao qual está inserido. Visando não prejudicar o tratamento estatístico da amostra, este foi considerado um *outlier* e posteriormente retirado da análise.

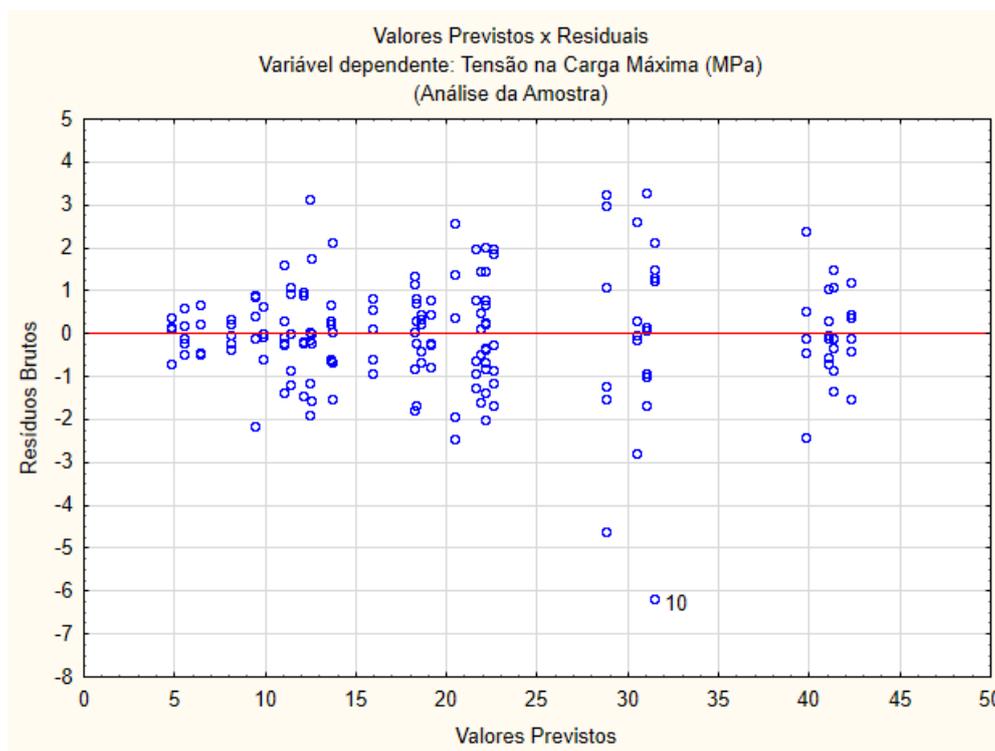


Figura 4.18 – Gráfico dos valores previstos x resíduos - tensão máxima.

Foi, então, realizada a verificação de dados em função das premissas da estatística paramétrica (homogeneidade das variâncias e normalidade dos resíduos).

Após a exclusão do ponto 10 da análise, obtivemos a Figura 4.19, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma aparentemente homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição similar dos pontos acima e abaixo do eixo das abcissas. Isto indica, possivelmente, o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

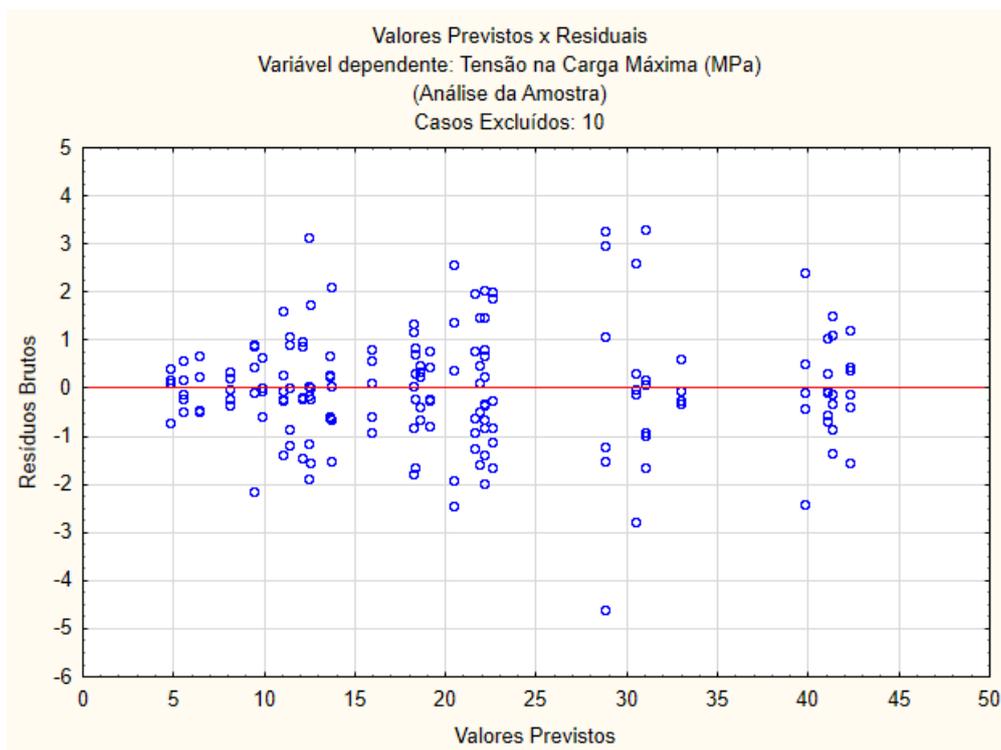


Figura 4.19 – Gráfico dos valores previstos x resíduos - caso excluído: 10.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene's (tabelas 4.11 e 4.12), a  $H_0$  considera que não existem diferenças entre as variâncias, ou seja, que as variâncias são homogêneas.

Verifica-se em ambos os testes que  $p < 0,05$ , indicando a rejeição da premissa para a base de dados em questão. Os resultados, porém, não necessariamente inviabilizam os testes realizados a seguir uma vez que a Figura 4.19 já mostrou ausência de tendências notáveis, além das análises de Monte Carlo historicamente mostrarem que os erros acumulados em uma análise paramétrica sem atendimento completo dos parâmetros são toleráveis.

Tabela 4.11 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa)

Teste de Homogeneidade de Variâncias (dadosANOVA)					
Efeito: 1*2*3*4*5					
Casos Excluídos: 10					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr	df	p
Tensão na Carga Máxima (MPa)	105,6316	0,175869	63,10795	31	0,000572

Tabela 4.12 – Teste de Levene´s para homogeneidade de variâncias - Tensão na Carga Máxima (MPa).

Teste de Levene´s para Homogeneidade de Variâncias (dadosANOVA)				
Efeito: 1*2*3*4*5				
Graus de Liberdade para todos os F's: 31, 132				
Casos Excluídos: 10				
	MS Effect	MS Error	F	p
Tensão na Carga Máxima (MPa)	1,135168	0,534865	2,122345	0,001796

Pelo gráfico de normalidade da Figura 4.20 é possível observar que os resíduos acompanham a linha de tendência (vermelha) de valor normal esperado, indicando, possivelmente, uma distribuição normal dos resíduos, que será verificada nos testes de Lilliefors e Shapiro-Wilks.

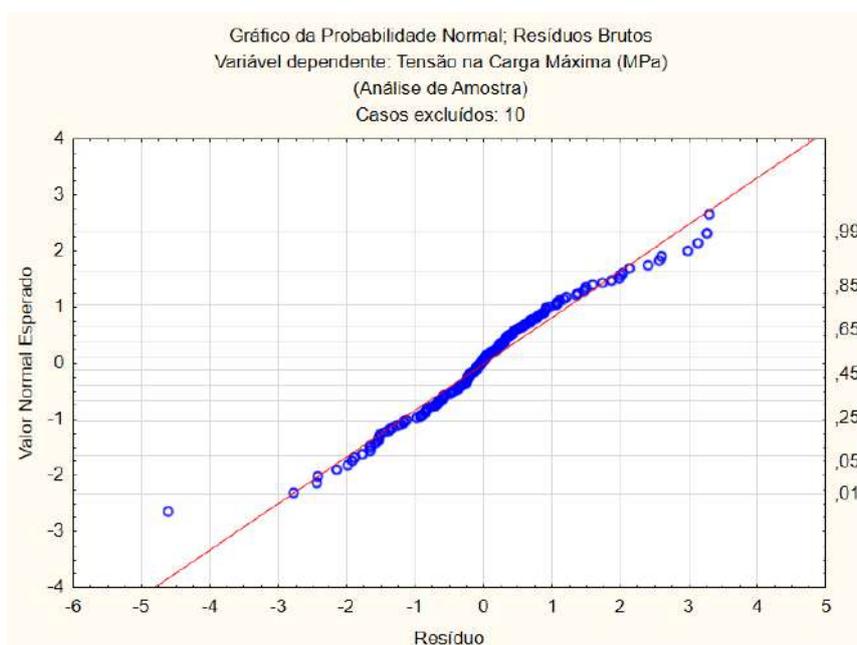


Figura 4.20 – Gráfico dos valores previstos x resíduos - caso excluído: 10.

A hipótese nula ( $H_0$ ) foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.21:

- Lilliefors -  $p = 0,05$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,0034$ : apesar deste teste rejeitar a  $H_0$  ( $p < 0,05$ ), a amostra não foi rejeitada em outro teste, logo será considerada atestada a normalidade.

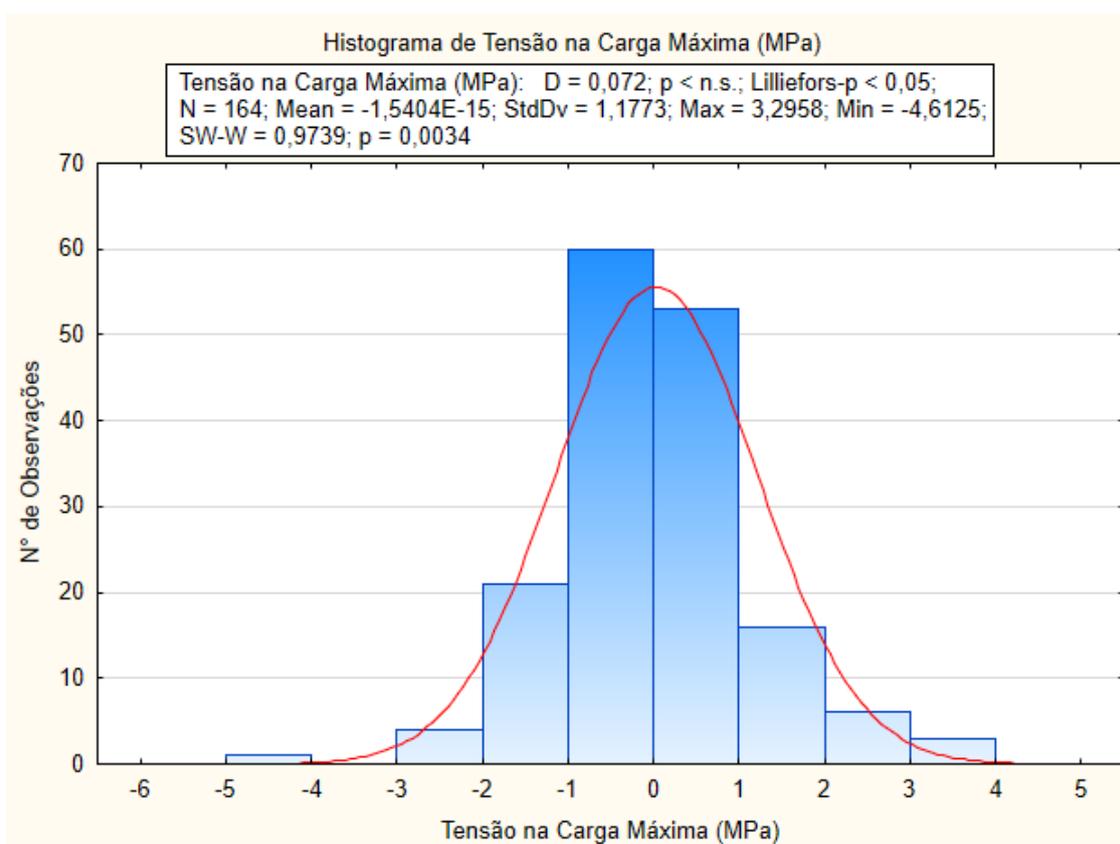


Figura 4.21 – Histograma dos resíduos.

A Tabela 4.13 que se refere aos efeitos principais de interação das variáveis escolhidas, considerando a  $H_0$  de que os fatores de entrada analisados não influenciam na tensão máxima, foi analisada primeiramente a coluna  $p$ .

Tabela 4.13 – Efeito de Interação das variáveis - Tensão máxima

Resultados univariados para cada visualização de dados (dadosANOVA)  
 Parametrização restrita a sigma  
 Decomposição efetiva da hipótese  
 Casos excluídos: 10

Effect	Tensão na Carga Máxima (MPa) SS	Tensão na Carga Máxima (MPa) MS	Tensão na Carga Máxima (MPa) p
Intercept	64268,23	64268,23	0,000000
Formato (1)	5,68	5,68	0,070851
Quantidade (2)	3,53	3,53	0,153612
Área/Tamanho do defeito (3)	8212,06	8212,06	0,000000
Alinhamento (4)	1966,81	1966,81	0,000000
Material (5)	6201,93	6201,93	0,000000
(1)x(2)	0,88	0,88	0,473863
(1)x(3)	0,53	0,53	0,577786
(2)x(3)	116,38	116,38	0,000000
(1)x(4)	29,39	29,39	0,000061
(2)x(4)	75,16	75,16	0,000000
(3)x(4)	95,08	95,08	0,000000
(1)x(5)	6,03	6,03	0,062796
(2)x(5)	14,33	14,33	0,004460
(3)x(5)	1128,08	1128,08	0,000000
(4)x(5)	518,60	518,60	0,000000
(1)x(2)x(3)	5,91	5,91	0,065428
(1)x(2)x(4)	15,10	15,10	0,003533
(1)x(3)x(4)	7,87	7,87	0,033851
(2)x(3)x(4)	103,04	103,04	0,000000
(1)x(2)x(5)	0,21	0,21	0,723704
(1)x(3)x(5)	2,21	2,21	0,257444
(2)x(3)x(5)	30,01	30,01	0,000051
(1)x(4)x(5)	2,78	2,78	0,204770
(2)x(4)x(5)	8,33	8,33	0,029088
(3)x(4)x(5)	64,38	64,38	0,000000
(1)x(2)x(3)x(4)	0,90	0,90	0,468444
(1)x(2)x(3)x(5)	14,68	14,68	0,004010
(1)x(2)x(4)x(5)	0,01	0,01	0,946192
(1)x(3)x(4)x(5)	25,21	25,21	0,000192
(2)x(3)x(4)x(5)	16,51	16,51	0,002320
(1)x(2)x(3)x(4)x(5)	3,95	3,95	0,131202
Error	225,92	1,71	
Total	19640,02		

Pela tabela, para os fatores principais onde a  $H_0$  não é rejeitada ( $p > 0,05$ ), tem-se que o formato e a quantidade de defeitos não influenciam estatisticamente na tensão máxima. No caso do formato, assim como na

análise relacionada à rigidez, o valor calculado ( $p = 0,071$ ) confirma a  $H_0$ , porém o valor é muito próximo de 0,05, portanto, por prudência na análise, será considerado que o formato exerce influência na tensão, porém de forma menos significativa que outros fatores, como será mostrado a seguir.

Para o caso dos outros fatores de entrada (área, alinhamento e material) verifica-se que a  $H_0$  é rejeitada, ou seja, as variáveis influenciam na tensão máxima ( $p \ll 0,05$ ).

Analisando agora a coluna MS, verifica-se que o tamanho do defeito é a variável que apresenta maior influência, seguida de material e alinhamento dos defeitos. O formato e quantidade, nesta análise, praticamente não tem nenhuma influência.

Em relação aos efeitos de interação das variáveis, é possível verificar que diversas interações tem influência sobre a tensão máxima.

#### 4.2.1 Análise de interação de variáveis - Tensão Máxima - CPs 01 a 08

A partir do gráfico da Figura 4.22 é realizada a análise da tensão máxima (eixo y) e material (eixo x superior), onde no primeiro gráfico, à esquerda, temos uma distribuição dos CP com defeitos não alinhados e o gráfico à direita para os CP com defeitos alinhados (eixo x inferior), tanto para o CP com defeito de tamanho menor (azul) quanto para o com defeito maior (vermelho) e controle, variando o material.

Para esta análise serão fixados os seguintes fatores:

- Formato dos defeitos: círculos (-1)
- Quantidade de defeitos: 3

Para desenho esquemático dos CP, ver Figura 4.6 da página 78.

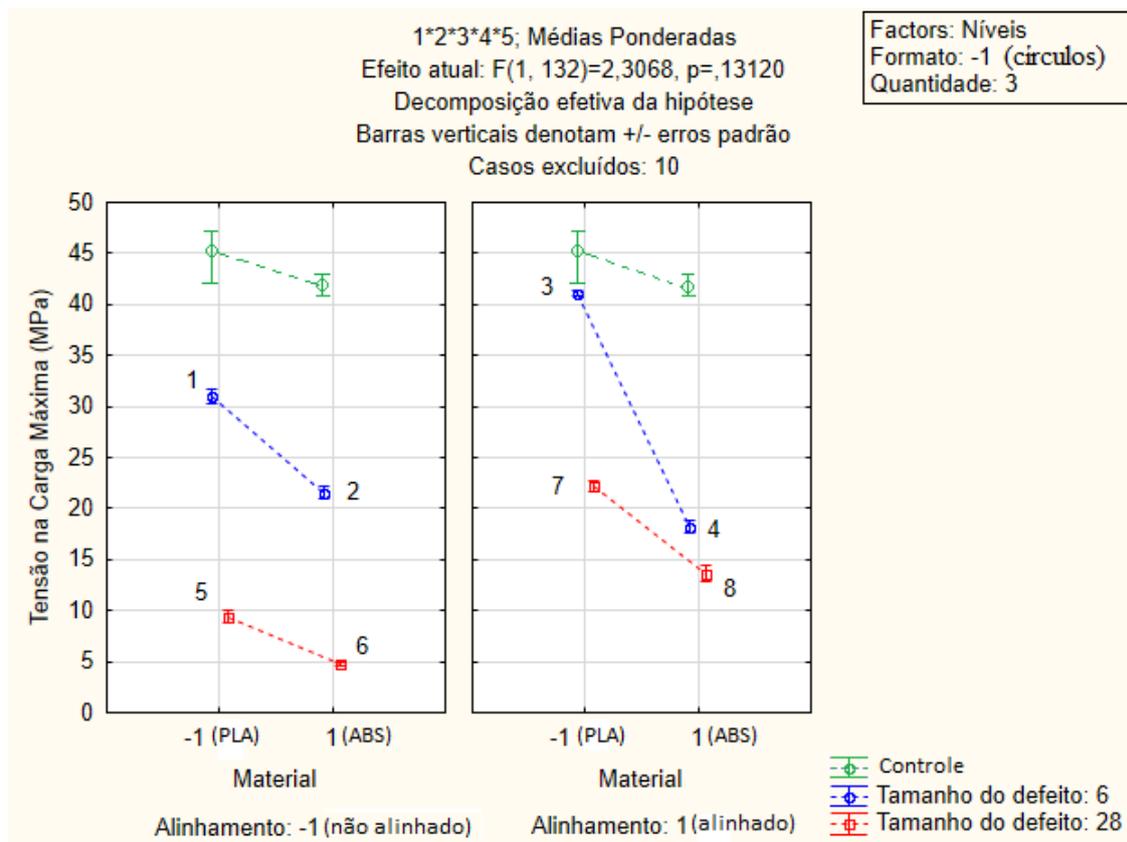


Figura 4.22 – Impacto do material, alinhamento e tamanho do defeito na tensão máxima. CPs com três defeitos circulares.

É possível observar que, em ambos os gráficos, os CP feitos em PLA apresentam uma tensão máxima consideravelmente maior que para os CP feitos em ABS, sendo este valor ainda maior para os CP controle. Pelo gráfico verifica-se que tanto o material quanto o alinhamento dos defeitos tem forte influência para a tensão máxima. Esta observação pode ser verificada pela tabela de Fisher (em recorte com os dados relevantes para esta análise, na Tabela 4.14). Na referida tabela, realizando as comparações ponto-a-ponto, parte-se da  $H_0$  de que há diferença entre os pares de resultados para os intervalos comparados.

Tabela 4.14 – Tabela de testes LSD - Fisher - Tensão Máxima - comparativos dos CPs 01 a 08

Teste LSD; variável Tensão na Carga Máxima (MPa) (dados ANOVA)									
Probabilidades para testes Post Hoc									
Erro: Entre MSE = 1,7115, df = 132,00									
Casos excluídos: 10									
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{1} 31,004	{2} 21,560	{3} 41,063	{4} 18,220
1	-1	3	6	-1	-1		0,000000	0,000000	0,000000
2	-1	3	6	-1	1	0,000000		0,000000	0,000091
3	-1	3	6	1	-1	0,000000	0,000000		0,000000
4	-1	3	6	1	1	0,000000	0,000091	0,000000	
5	-1	3	28	-1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
6	-1	3	28	-1	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
7	-1	3	28	1	-1	0,000000	0,467299	0,000000	0,000002
8	-1	3	28	1	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000001
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{5} 9,3900	{6} 4,7750	{7} 22,137	{8} 13,650
1	-1	3	6	-1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
2	-1	3	6	-1	1	0,000000	0,000000	0,467299	0,000000
3	-1	3	6	1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
4	-1	3	6	1	1	0,000000	0,000000	0,000002	0,000001
5	-1	3	28	-1	-1		0,000001	0,000000	0,000003
6	-1	3	28	-1	1	0,000001		0,000000	0,000000
7	-1	3	28	1	-1	0,000000	0,000000		0,000000
8	-1	3	28	1	1	0,000003	0,000000	0,000000	

Tendo como base a Figura 4.22 e a Tabela 4.14, foram realizadas as seguintes análises:

- Exceto pelos CP 2 e 7 ( $p = 0,47$ ), onde mais de um fator varia ao mesmo tempo, o que não traz nenhum ganho de compreensão dos experimentos (CP feitos em ABS, com defeitos desalinhados e menores e os feitos em PLA, com defeitos alinhados e maiores, respectivamente), de acordo com a Tabela 4.14, todas as outras combinações rejeitam a  $H_0$  (todos os CP são distintos entre si).

#### 4.2.2 Análise de interação de variáveis - Tensão Máxima - CPs 09 a 16

A partir do gráfico da Figura 4.23 é realizada a análise da tensão máxima (eixo y) e material (eixo x superior), onde no primeiro gráfico, à esquerda, temos uma distribuição dos CP não alinhados e para os com defeitos alinhados (eixo x inferior), tanto para o CP com defeitos de menor área ( $5,7\text{mm}^2$ )

(linha azul) e o gráfico à direita para os CP com defeitos de maior área ( $28,3\text{mm}^2$ ) (linha vermelha) e CP controle (linha verde), variando o material.

Para esta análise serão fixados os seguintes fatores:

- Formato dos defeitos: círculos (-1)
- Quantidade de defeitos: 7

Para desenho esquemático dos CP, ver Figura 4.8 da página 82.

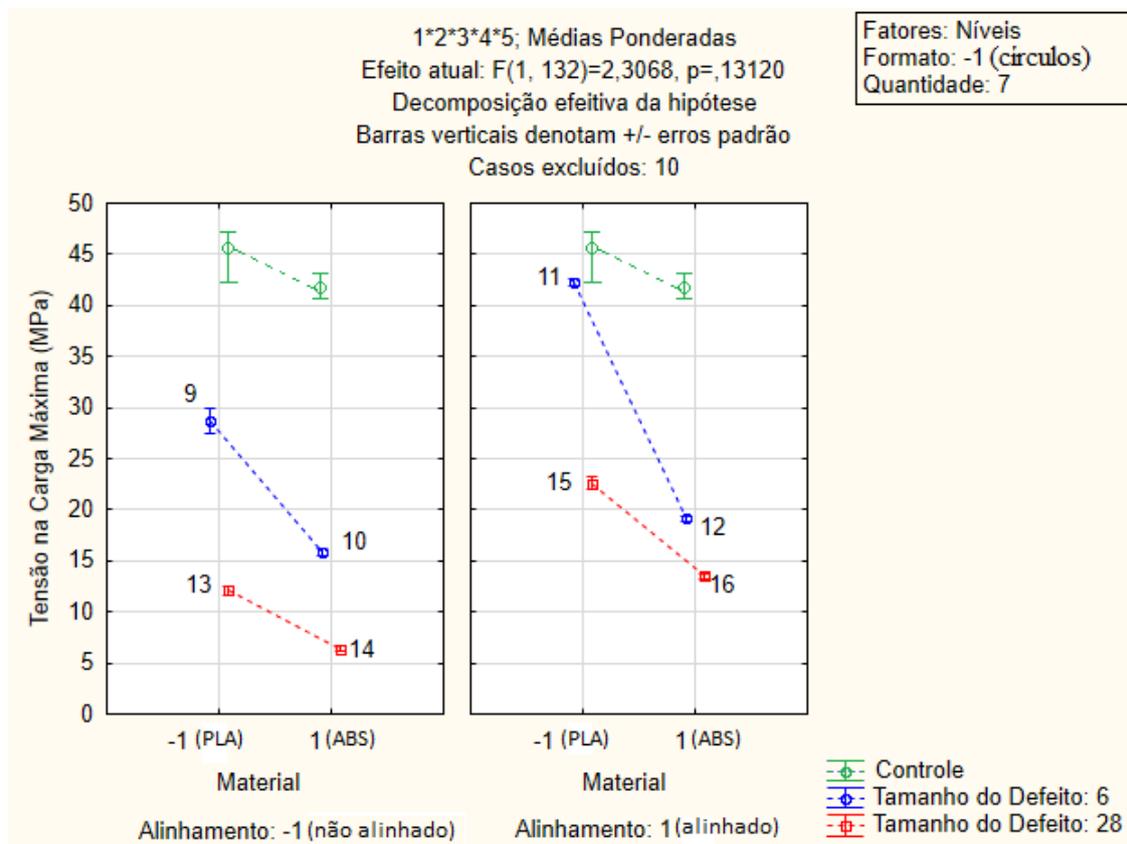


Figura 4.23 – Impacto do material, alinhamento e tamanho do defeito na tensão máxima. CPs com sete defeitos losangulares.

É possível observar que, em ambos os gráficos, os CP feitos em PLA apresentam uma tensão máxima consideravelmente maior que para os CP feitos em ABS, sendo este valor ainda maior para os CP controle. Pelo gráfico verifica-se que tanto o material quanto o alinhamento dos defeitos tem forte influência para a tensão máxima, exceto para os CP 10 e 12, ambos

feitos em ABS e com defeito menor. Apesar da proximidade dos valores de tensão observada no gráfico, verifica-se pela tabela de LSD Fisher (Tabela 4.15) que a alteração do alinhamento foi relevante para os CP citados.

Na referida tabela, realizando as comparações ponto-a-ponto, parte-se da  $H_0$  de que há diferença entre os pares de resultados para os intervalos comparados.

Tabela 4.15 – Tabela de testes LSD - Fisher - Tensão Máxima - comparativos dos CPs 09 a 16

Teste LSD; variável Tensão na Carga Máxima (MPa) (dados ANOVA)									
Probabilidades para testes Post Hoc									
Erro: Entre MSE = 1,7115, df = 132,00									
Casos excluídos: 10									
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{9}	{10}	{11}	{12}
						28,762	15,870	42,233	19,125
9	-1	7	6	-1	-1		0,000000	0,000000	0,000000
10	-1	7	6	-1	1	0,000000		0,000000	0,000134
11	-1	7	6	1	-1	0,000000	0,000000		0,000000
12	-1	7	6	1	1	0,000000	0,000134	0,000000	
13	-1	7	28	-1	-1	0,000000	0,000012	0,000000	0,000000
14	-1	7	28	-1	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
15	-1	7	28	1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000026
16	-1	7	28	1	1	0,000000	0,005915	0,000000	0,000000
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{13}	{14}	{15}	{16}
						12,105	6,3875	22,579	13,555
9	-1	7	6	-1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
10	-1	7	6	-1	1	0,000012	0,000000	0,000000	0,005915
11	-1	7	6	1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
12	-1	7	6	1	1	0,000000	0,000000	0,000026	0,000000
13	-1	7	28	-1	-1		0,000000	0,000000	0,082020
14	-1	7	28	-1	1	0,000000		0,000000	0,000000
15	-1	7	28	1	-1	0,000000	0,000000		0,000000
16	-1	7	28	1	1	0,082020	0,000000	0,000000	

Tendo como base a Figura 4.23 e a Tabela 4.15, foram realizadas as seguintes análises:

- Exceto o comparativo entre os CP 13 x 16, que, apesar de não serem significativos entre si ( $p > 0,05$ ), apresentam mais de um fator variando ao mesmo tempo, o que não acrescenta ganho de compreensão na análise, todos os outros CP são distintos entre si ( $p < 0,05$ );

## 4.2.3 Análise de interação de variáveis - Tensão Máxima - CPs 17 a 24

A partir do gráfico da Figura 4.24 é realizada a análise da tensão máxima (eixo y) e material (eixo x superior), onde no primeiro gráfico, à esquerda, uma distribuição dos CP com defeitos com menor área ( $5,7\text{mm}^2$ ) e o gráfico à direita para os CP com defeitos com maior área ( $28,3\text{mm}^2$ ) (eixo x inferior), tanto para o CP não alinhados (linha azul) quanto para os com defeitos alinhados (linha vermelha) e CP controle, variando o material.

Para esta análise serão fixados os seguintes fatores:

- Formato dos defeitos: losangos (1)
- Quantidade de defeitos: 3

Para desenho esquemático dos CP, ver Figura 4.10 da página 85.

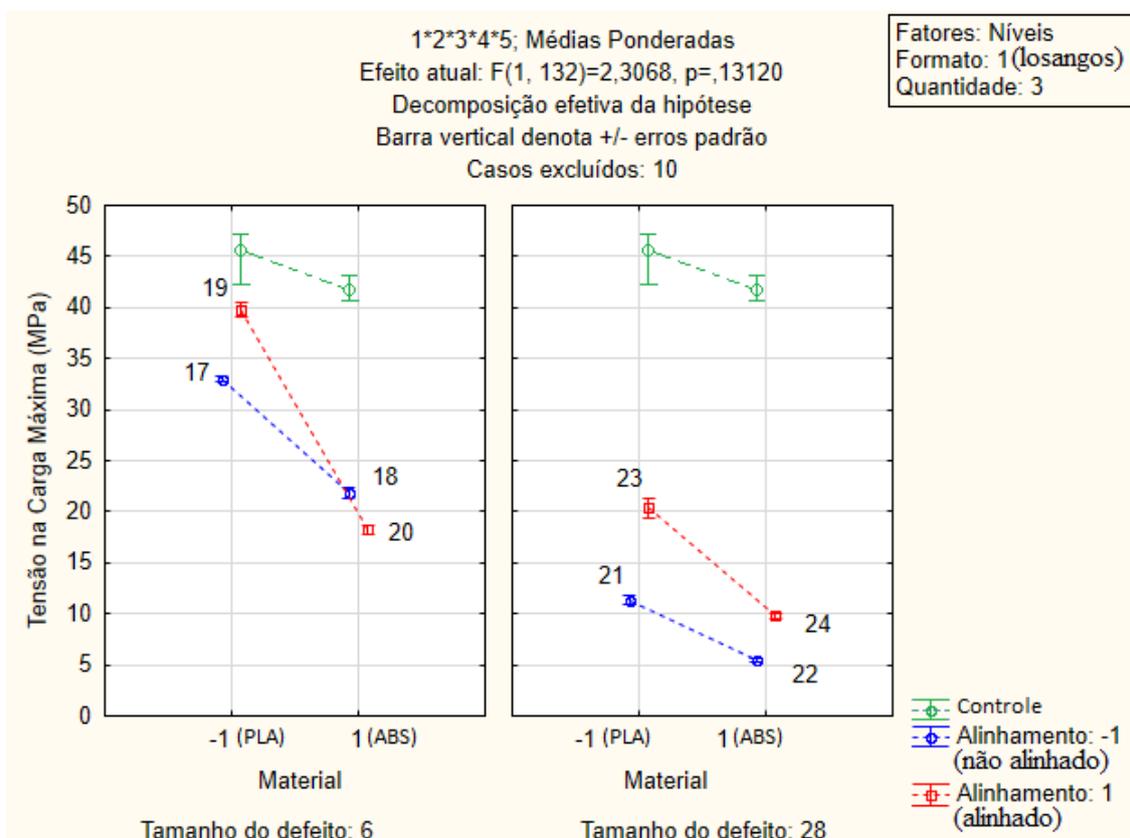


Figura 4.24 – Impacto do material, alinhamento e tamanho do defeito na tensão máxima. CPs com sete defeitos losangulares.

É possível observar que, em ambos os gráficos, os CP feitos em PLA apresentam uma tensão máxima consideravelmente maior que para os CP feitos em ABS, sendo este valor ainda maior para os CP controle. Pelo gráfico verifica-se que tanto o material quanto o alinhamento dos defeitos tem forte influência para a tensão máxima. Esta observação pode ser verificada pela tabela de Fisher (em recorte com os dados relevantes para esta análise, na Tabela 4.16). Na referida tabela, realizando as comparações ponto-a-ponto, parte-se da  $H_0$  de que há diferença entre os pares de resultados para os intervalos comparados.

Será agora analisada a tabela de Fisher (em recorte com os dados relevantes para esta análise, na Tabela 4.16).

Tabela 4.16 – Tabela de testes LSD - Fisher - Tensão Máxima - comparativos dos CPs 17 a 24

Teste LSD; variável Tensão na Carga Máxima (MPa) (dados ANOVA)									
Probabilidades para testes Post Hoc									
Erro: Entre MSE = 1,7115, df = 132,00									
Casos excluídos: 10									
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{17}	{18}	{19}	{20}
						32,994	21,860	39,795	18,280
17	1	3	6	-1	-1		0,000000	0,000000	0,000000
18	1	3	6	-1	1	0,000000		0,000000	0,000030
19	1	3	6	1	-1	0,000000	0,000000		0,000000
20	1	3	6	1	1	0,000000	0,000030	0,000000	
21	1	3	28	-1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
22	1	3	28	-1	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
23	1	3	28	1	-1	0,000000	0,076941	0,000000	0,012109
24	1	3	28	1	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{21}	{22}	{23}	{24}
						11,350	5,4800	20,385	9,8375
17	1	3	6	-1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
18	1	3	6	-1	1	0,000000	0,000000	0,076941	0,000000
19	1	3	6	1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
20	1	3	6	1	1	0,000000	0,000000	0,012109	0,000000
21	1	3	28	-1	-1		0,000000	0,000000	0,087152
22	1	3	28	-1	1	0,000000		0,000000	0,000002
23	1	3	28	1	-1	0,000000	0,000000		0,000000
24	1	3	28	1	1	0,087152	0,000002	0,000000	

Tendo como base a Figura 4.24 e a Tabela 4.16, foram realizadas as seguintes análises:

- Uma vez que as análises acima foram consideradas não significativas,

observando a Tabela 4.16, observa-se que todos os CP desta análise são significantes, ou seja, nenhum deles é estatisticamente igual a outro.

#### 4.2.4 Análise de interação de variáveis - Tensão Máxima - CPs 25 a 32

A partir do gráfico da Figura 4.25 é realizada a análise da tensão máxima (eixo  $y$ ) e material (eixo  $x$  superior), onde no primeiro gráfico, à esquerda, temos uma distribuição dos CP com defeitos não alinhados ( $-1$ ) e o gráfico à direita para os CP com defeitos alinhados ( $1$ ) (eixo  $x$  inferior), tanto para o CP com defeito de tamanho menor (azul) quanto para o com defeito maior (vermelho), além do CP controle (verde), variando o material.

Para esta análise serão fixados os seguintes fatores:

- Formato dos defeitos: losangos ( $1$ )
- Quantidade de defeitos:  $7$

Para desenho esquemático dos CP, ver Figura 4.12 da página 88.

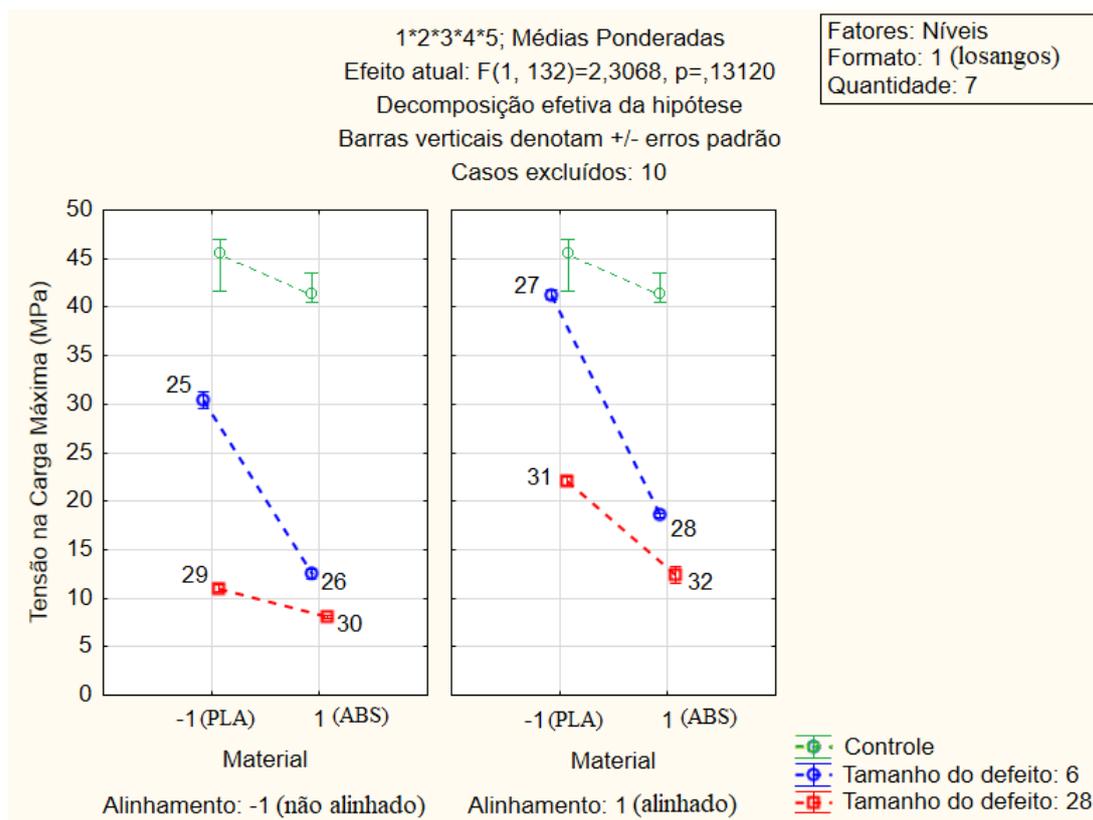


Figura 4.25 – Impacto do material, alinhamento e tamanho do defeito na tensão máxima. CPs com sete defeitos losangulares.

É possível observar que, em ambos os gráficos, os CP feitos em PLA apresentam uma tensão máxima consideravelmente maior que para os CP feitos em ABS, sendo este valor ainda maior para os CP controle. Pelo gráfico verifica-se que tanto o material quanto o alinhamento dos defeitos tem forte influência para a tensão máxima. Esta observação pode ser verificada pela tabela de Fisher (em recorte com os dados relevantes para esta análise, na Tabela 4.17). Na referida tabela, realizando as comparações ponto-a-ponto, parte-se da  $H_0$  de que há diferença entre os pares de resultados para os intervalos comparados.

Tabela 4.17 – Tabela de testes LSD - Fisher - Tensão Máxima - comparativos dos CPs 25 a 32

Teste LSD; variável Tensão na Carga Máxima (MPa) (dados ANOVA)  
 Probabilidades para testes Post Hoc  
 Erro: Entre MSE = 1,7115, df = 132,00  
 Casos excluídos: 10

	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{25} 30,425	{26} 12,525	{27} 41,292	{28} 18,585
25	1	7	6	-1	-1		0,000000	0,000000	0,000000
26	1	7	6	-1	1	0,000000		0,000000	0,000000
27	1	7	6	1	-1	0,000000	0,000000		0,000000
28	1	7	6	1	1	0,000000	0,000000	0,000000	
29	1	7	28	-1	-1	0,000000	0,057043	0,000000	0,000000
30	1	7	28	-1	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
31	1	7	28	1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000017
32	1	7	28	1	1	0,000000	0,913548	0,000000	0,000000
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{29} 11,004	{30} 8,0450	{31} 22,121	{32} 12,435
25	1	7	6	-1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
26	1	7	6	-1	1	0,057043	0,000000	0,000000	0,913548
27	1	7	6	1	-1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
28	1	7	6	1	1	0,000000	0,000000	0,000017	0,000000
29	1	7	28	-1	-1		0,000278	0,000000	0,073170
30	1	7	28	-1	1	0,000278		0,000000	0,000000
31	1	7	28	1	-1	0,000000	0,000000		0,000000
32	1	7	28	1	1	0,073170	0,000000	0,000000	

Tendo como base a Figura 4.25 e a Tabela 4.17, foram realizadas as seguintes análises:

- Exceto os comparativos entre os CP 26 x 29, 29 x 32 e 26 x 32, que, apesar de não serem significativos entre si ( $p > 0,05$ ), apresentam mais de um fator variando ao mesmo tempo, o que não acrescenta ganho de compreensão na análise, todos os outros CP são distintos entre si ( $p < 0,05$ );

#### 4.2.5 Estimativa de Efeitos, Coeficientes de Regressão e Gráficos 3D

De acordo com a Tabela 4.18, verifica-se o coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9732$ , ou seja, os dados explicam 97,32% da variância no modelo.

Tabela 4.18 – Estimativa de Efeitos - Tensão Máxima

Estimativa de Efeitos; Var.:Tensão na Carga Máxima (MPa);  
R-sqr=,97322; Adj:,9705 (dadosANOVA in tensão)  
5 fatores, 1 Bloqueado, 164 Rodadas;  
Erro Quadrático Médio=3,554253  
DV: Tensão na Carga Máxima (MPa)  
Casos Excluídos: 10

Fator	Efeito	Erro Padrão	p
Mean/Interc.	19,9595	0,148187	0,000000
Formato (1)	-0,3642	0,296460	0,221193
Quantidade (2)	-0,3171	0,295921	0,285598
Área/tamanho do defeito (3)	-14,3049	0,296258	0,000000
Alinhamento (4)	6,9421	0,296036	0,000000
Material (5)	-12,3841	0,296226	0,000000
1 by 2	-0,1346	0,295326	0,649202
1 by 3	-0,1497	0,295428	0,613111
1 by 4	-0,8313	0,295435	0,005564
1 by 5	-0,4140	0,296075	0,164118
2 by 3	1,6237	0,295269	0,000000
2 by 4	1,3923	0,295046	0,000005
2 by 5	-0,5681	0,296136	0,057007
3 by 4	1,3890	0,295369	0,000006
3 by 5	5,3334	0,296050	0,000000
4 by 5	-3,6749	0,295842	0,000000

Partindo da  $H_0$  de que o fator não tem significância para o efeito, é possível confirmar que o formato e quantidade de defeitos não tem significância, assim como alguns dos efeitos de interação. Além disso, o efeito mais significativo para a tensão máxima é o tamanho do defeito conforme descrito abaixo, em função da coluna *Efeito*:

- Tamanho do defeito (3): ao variar de  $5,7mm^2$  (-1) para  $28,3mm^2$  (+1), temos uma diminuição média de  $14,30MPa$  na tensão máxima.
- Alinhamento (4): ao variar de defeitos não alinhados (-1) para alinhados (+1), temos um aumento médio de  $6,94MPa$  na tensão máxima.
- Material (5): ao variar do PLA (-1) para ABS (+1), temos uma diminuição média de  $12,38MPa$  na tensão máxima.

Analisando agora a Tabela 4.19 observamos os Coeficientes de Regressão, agora em função da tensão máxima ( $\delta_{máx}$ ).

Tabela 4.19 – Coeficientes de Regressão - Tensão Máxima

Coeficientes de Regressão; Var.:Tensão na Carga Máxima (MPa); R-sqr=,97322; Adj:,9705 (dadosANOVA) 5 fatores, 1 Bloqueado, 164 Rodadas; Erro Quadrático Médio=1,711548 DV: Tensão na Carga Máxima (MPa) Casos Excluídos: 10		
Factor	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão Erro Puro
Mean/Interc.	34,54627	0,506385
Formato(1)	0,10183	0,318741
Quantidade(2)	-0,70661	0,093182
Área/tamanho do defeito(3)	-0,83473	0,025411
Alinhamento(4)	0,65729	0,318110
Material(5)	-9,60328	0,318969
1 by 2	-0,03365	0,051235
1 by 3	-0,00680	0,009319
1 by 4	-0,41563	0,102507
1 by 5	-0,20700	0,102729
2 by 3	0,03690	0,004657
2 by 4	0,34809	0,051186
2 by 5	-0,14201	0,051375
3 by 4	0,06313	0,009317
3 by 5	0,24243	0,009338
4 by 5	-1,83747	0,102648

Utilizando os coeficientes de regressão dos fatores considerados significativos pela tabela de estimativa de efeitos (Tabela 4.18), levando em consideração as variáveis definidas na Tabela 4.10, a equação de regressão para a tensão máxima:

$$\begin{aligned} \delta_{m\acute{a}x}(MPa) = & 34,55 - 0,83 \cdot T + 0,66 \cdot A - 9,6 \cdot M - \\ & 0,42 \cdot F \cdot A + 0,04 \cdot Q \cdot T + 0,35 \cdot Q \cdot A + \\ & 0,06 \cdot T \cdot A + 0,24 \cdot T \cdot M - 1,84 \cdot A \cdot M \end{aligned} \quad (4.2)$$

Pela Figura 4.26 é possível analisar a superfície em função das variáveis Alinhamento e Quantidade de defeitos em função da Tensão Máxima (eixo z). Através do gráfico, visualmente, podemos extrair as seguintes informações:

- Utilizando como referência o eixo y é possível perceber a forte inclinação em função do material, onde a tensão na carga máxima é menor para os CP feitos em ABS com defeitos de  $28,3\text{mm}^2$  (em torno de  $8\text{MPa}$ ) e maior para os CP feitos em PLA com defeitos de  $5,7\text{mm}^2$  (em torno de  $40\text{MPa}$ );
- Conforme demonstrado visualmente na figura e na coluna coeficientes de regressão da Tabela 4.19, o material é um item muito significativo para a tensão na carga máxima, o que corrobora com o item anterior;
- O tamanho do defeito é muito mais significativo para a tensão nos CP em PLA;

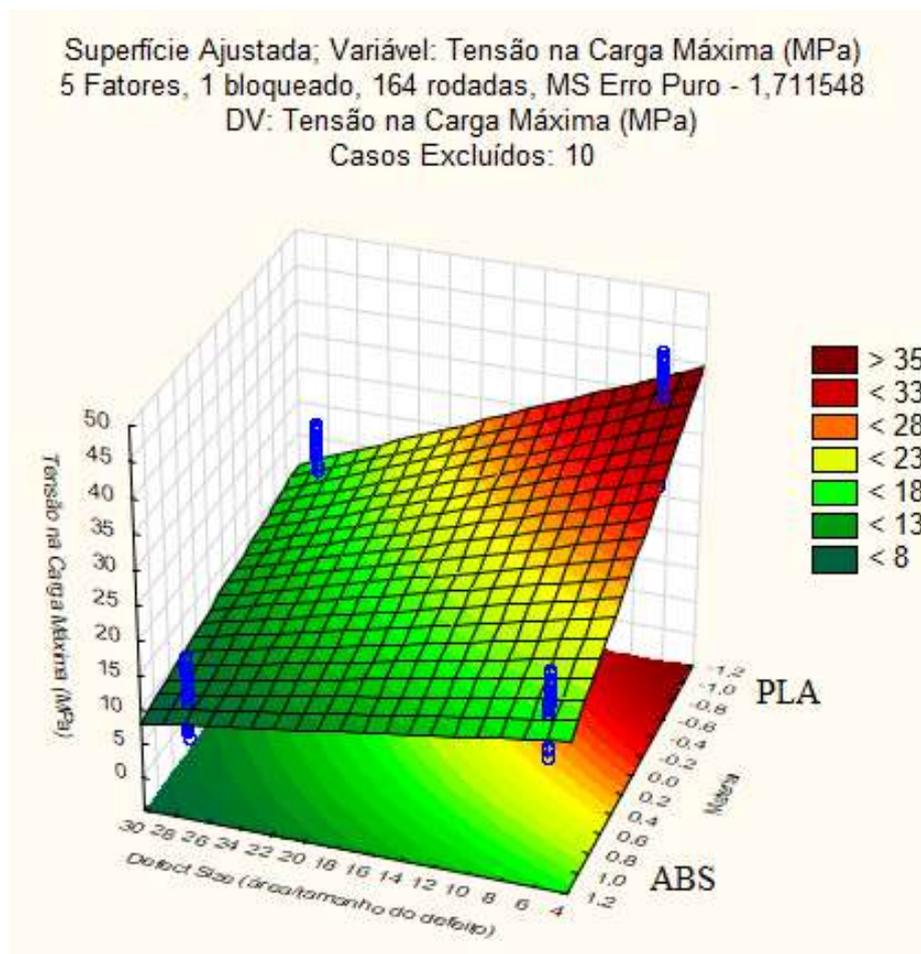


Figura 4.26 – Gráfico 3D Tamanho do defeito x Material x Tensão na carga máxima

Pela Figura 4.27 é possível analisar a superfície em função das variáveis Alinhamento e Tamanho de defeitos em função da tensão na carga máxima (eixo z). Através do gráfico, visualmente, pode-se extrair as seguintes informações:

- É possível verificar através da imagem uma diferença significativa entre os pontos com defeitos alinhados (1) x tamanho de defeito de  $5,7mm^2$  (em torno de  $33MPa$ ) e defeitos desalinhados (-1) e tamanho de defeito de  $28,3mm^2$  (em torno de  $6MPa$ );

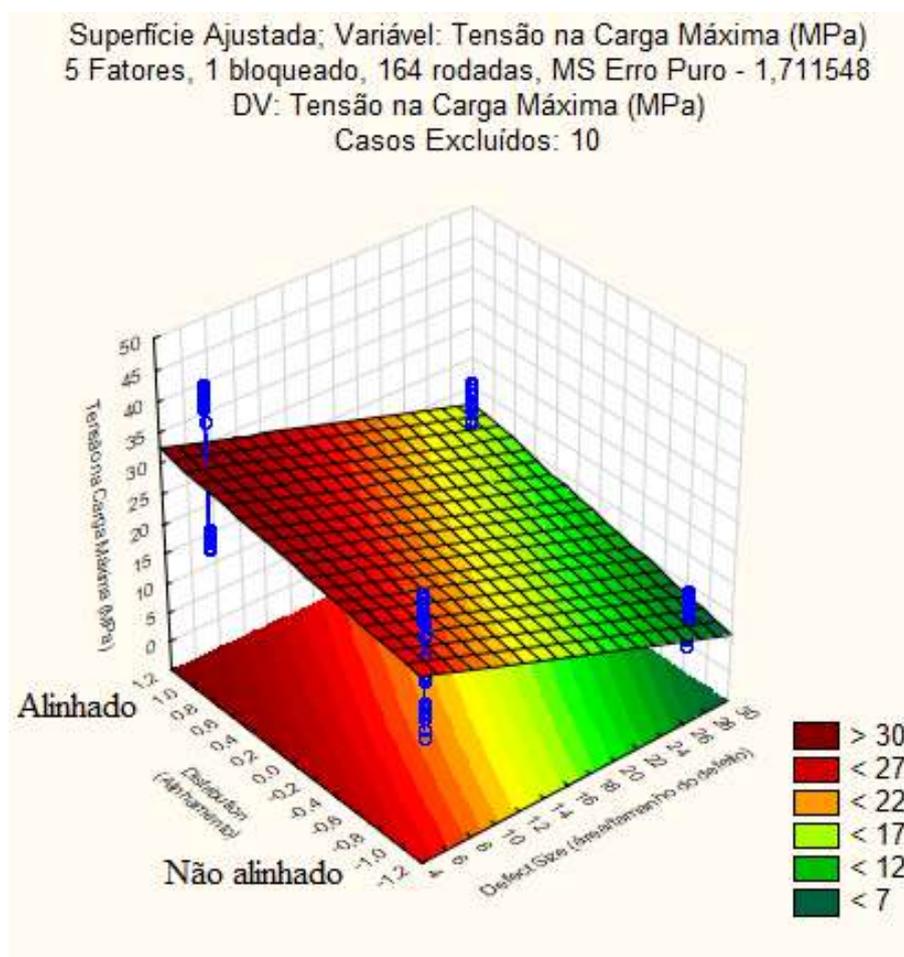


Figura 4.27 – Gráfico 3D Alinhamento x Tamanho do defeito x Tensão na carga máxima

Pela Figura 4.28 é possível analisar a superfície em função das variáveis alinhamento e material em função da tensão na carga máxima (eixo z). Através do gráfico, visualmente, pode-se extrair as seguintes informações:

- É possível verificar através da imagem uma diferença significativa entre os pontos com defeitos alinhados (1) x material do CP em PLA (em torno de 33MPa) e defeitos desalinhados (-1) e material do CP em ABS (em torno de 6MPa);

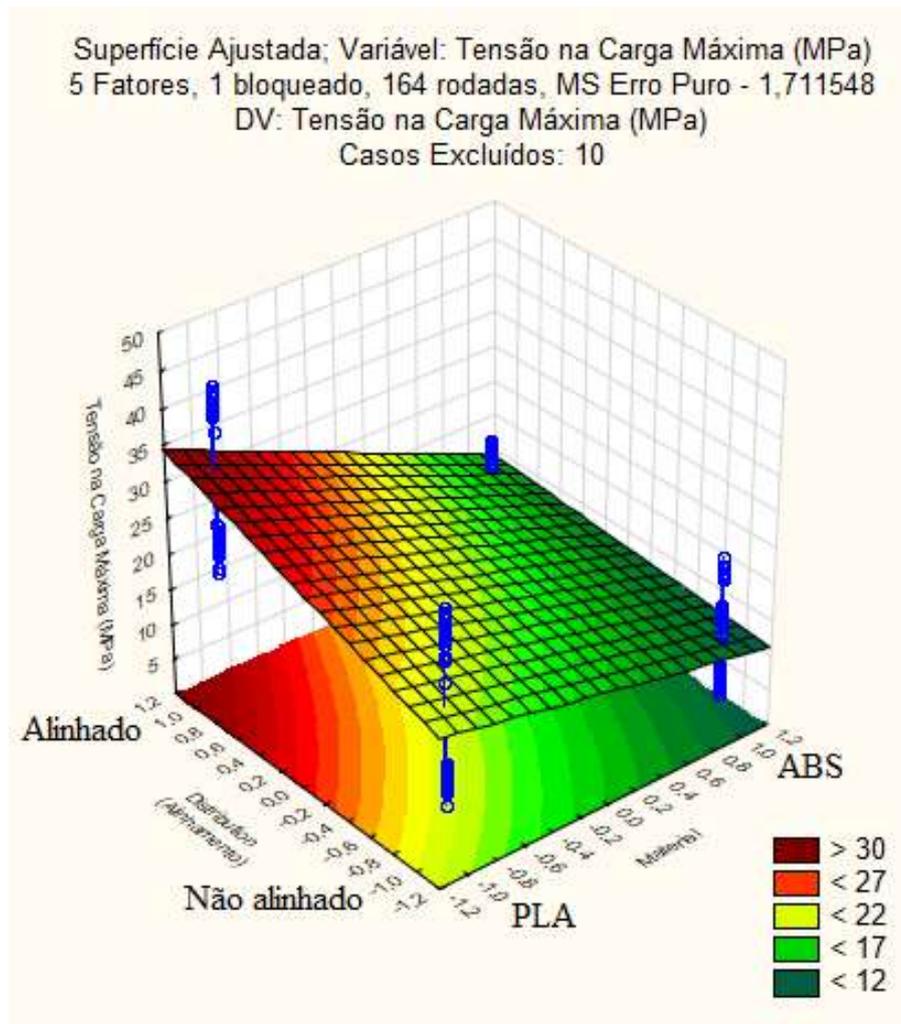


Figura 4.28 – Gráfico 3D Alinhamento x Material x Tensão na carga máxima

### 4.3 Deformação Máxima (%) - $\epsilon_{máx}$

Através das análises já apresentadas nas seções anteriores e utilizando o gráfico da Figura 4.29, pode-se visualizar os valores previstos da variável de resposta no eixo x (Valores Previstos) e os resíduos no eixo y (Resíduos Brutos) para Deformação Máxima, onde são considerados todos os ensaios realizados, novamente sem desconsiderar os possíveis outliers.

Na figura, é possível observar que o ponto 172 é o que mais se separa da nuvem de pontos e visivelmente se destaca, sendo este o ponto que mais se distanciou do comportamento médio do grupo ao qual está inserido. Visando não prejudicar o tratamento estatístico da amostra, este foi considerado um *outlier* e posteriormente retirado da análise.

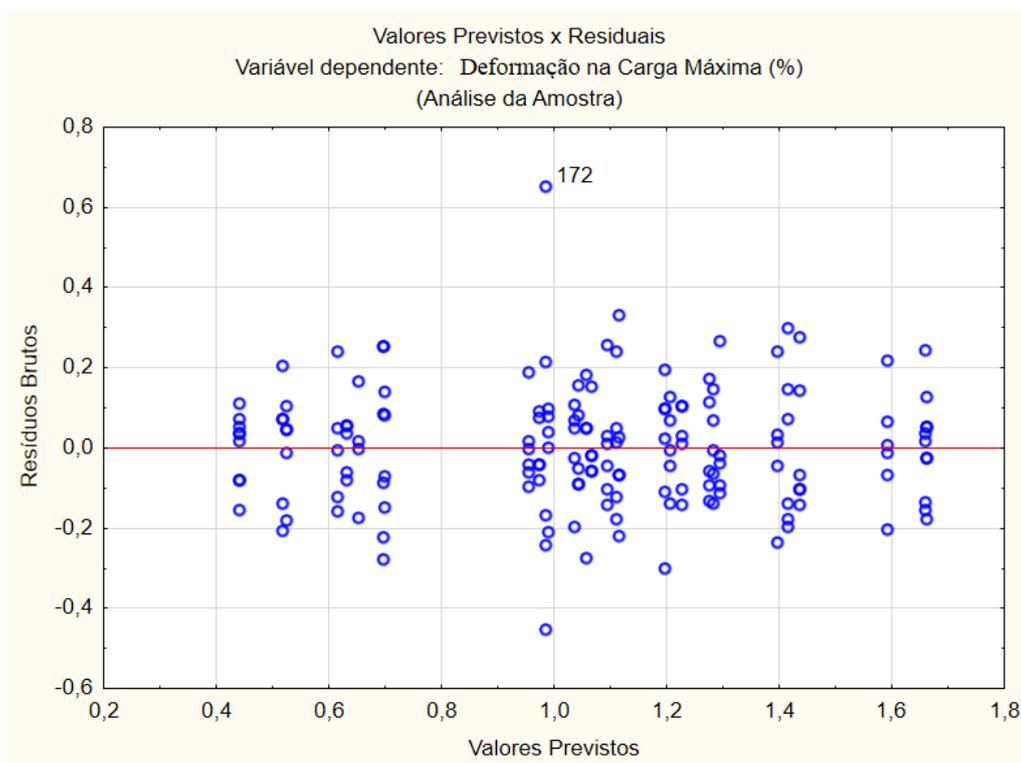


Figura 4.29 – Gráfico dos valores previstos x resíduos - deformação máxima.

Foi, então, realizada a verificação de dados em função das premissas da estatística paramétrica (homogeneidade das variâncias e normalidade dos resíduos).

Após a exclusão do ponto 172 da análise, obtivemos a Figura 4.30, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma aparentemente homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição similar dos pontos acima e abaixo do eixo das abcissas. Isto indica, possivelmente, o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

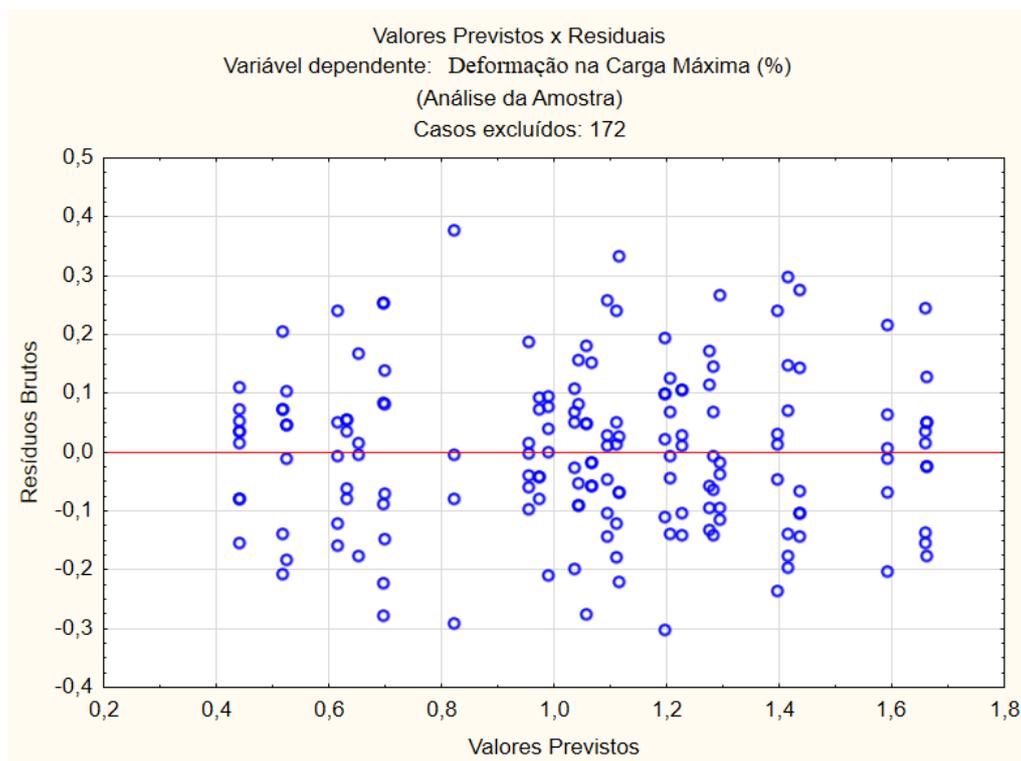


Figura 4.30 – Gráfico dos valores previstos x resíduos - caso excluído: 172. Fonte: o autor

Será analisada agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene’s (tabelas 4.20 e 4.21), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Tabela 4.20 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%)

Teste de Homogeneidade de Variâncias (dados ANOVA)					
Efeito: 1*2*3*4*5					
Casos Excluídos: 172					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr	df	p
Deformação Máxima (%)	18,05826	0,108844	24,55088	31	0,787437

Tabela 4.21 – Teste de Levene para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%).

Teste de Levene's para Homogeneidade de Variâncias (dados ANOVA)				
Efeito: 1*2*3*4*5				
Graus de Liberdade para todos os F's: 31, 132				
Casos Excluídos: 172				
	MS Effect	MS Error	F	p
Deformação Máxima (%)	0,006796	0,006433	1,056481	0,399964

Como pode ser verificado nas tabelas, em ambos os testes  $p > 0,05$ , demonstrando que a  $H_0$  apresentada acima não foi rejeitada.

Analisando o gráfico de normalidade da Figura 4.31 observa-se que os resíduos acompanham a linha de tendência (vermelha) de valor normal esperado, indicando, possivelmente, uma distribuição normal dos resíduos.

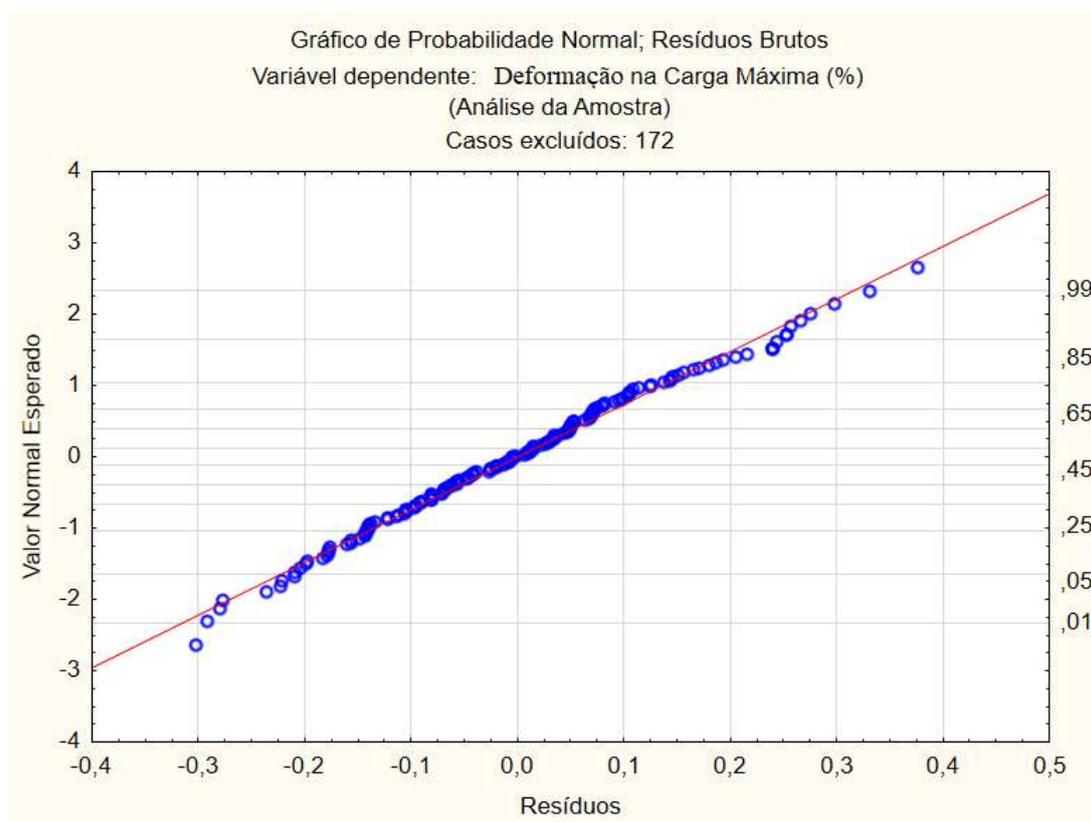


Figura 4.31 – Gráfico dos valores previstos x resíduos - caso excluído: 172.

A ( $H_0$ ) foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.32:

- Lilliefors -  $p = 1$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,47$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;

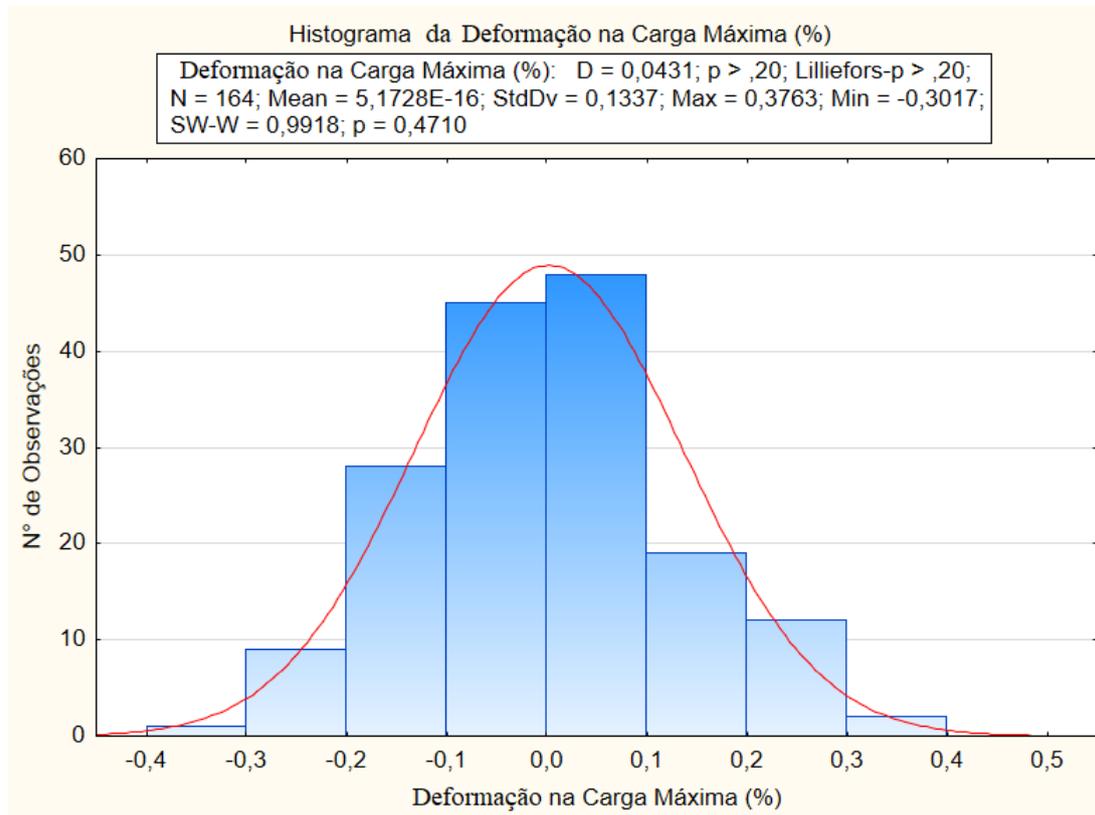


Figura 4.32 – Histograma dos resíduos.

Para a Tabela 4.22, partindo da  $H_0$  de que os fatores de entrada analisados não influenciam na deformação máxima, verifica-se que a  $H_0$  foi rejeitada para todos os fatores de entrada indicando a influência, sendo o alinhamento o fator mais influente.

Tabela 4.22 – Efeito de Interação das variáveis - Deformação Máxima

Resultados univariados para cada visualização de dados (dados ANOVA)  
 Parametrização restrita a Sigma  
 Decomposição efetiva da hipótese  
 Casos excluídos: 172

Effect	Deformação Máxima (%) SS	Deformação Máxima (%) MS	Deformação Máxima (%) p
Intercept	173,1643	173,1643	0,000000
Formato (1)	0,6589	0,6589	0,000000
Quantidade (2)	1,0736	1,0736	0,000000
Área/Tamanho do defeito (3)	5,9658	5,9658	0,000000
Alinhamento (4)	7,0553	7,0553	0,000000
Material (5)	0,2171	0,2171	0,002119
(1)x(2)	0,1488	0,1488	0,010512
(1)x(3)	0,0188	0,0188	0,357466
(2)x(3)	0,0906	0,0906	0,044891
(1)x(4)	1,5926	1,5926	0,000000
(2)x(4)	0,3986	0,3986	0,000040
(3)x(4)	0,6327	0,6327	0,000000
(1)x(5)	0,1157	0,1157	0,023666
(2)x(5)	0,0046	0,0046	0,647258
(3)x(5)	0,1280	0,1280	0,017465
(4)x(5)	0,7604	0,7604	0,000000
(1)x(2)x(3)	0,0004	0,0004	0,888548
(1)x(2)x(4)	0,0120	0,0120	0,461593
(1)x(3)x(4)	0,0754	0,0754	0,066869
(2)x(3)x(4)	0,0152	0,0152	0,408704
(1)x(2)x(5)	0,0151	0,0151	0,410061
(1)x(3)x(5)	0,0581	0,0581	0,107269
(2)x(3)x(5)	0,0149	0,0149	0,413237
(1)x(4)x(5)	0,0640	0,0640	0,091176
(2)x(4)x(5)	0,0071	0,0071	0,572134
(3)x(4)x(5)	0,0001	0,0001	0,949953
(1)x(2)x(3)x(4)	0,0005	0,0005	0,877890
(1)x(2)x(3)x(5)	0,0004	0,0004	0,890443
(1)x(2)x(4)x(5)	0,0005	0,0005	0,883006
(1)x(3)x(4)x(5)	0,0445	0,0445	0,158192
(2)x(3)x(4)x(5)	0,1276	0,1276	0,017625
(1)x(2)x(3)x(4)x(5)	0,0064	0,0064	0,590611
Error	2,9153	0,0221	
Total	22,5329		

Em relação aos efeitos de interação das variáveis, é possível verificar que praticamente todas as interações combinadas dois a dois tem influência sobre a deformação máxima (exceto formato (1) x tamanho (3) e quantidade

(2) e material (5)). Além destas interações, a única que possui influência é a combinada entre 4 fatores – quantidade (2)x tamanho (3)x alinhamento (4)x material (5).

#### 4.3.1 Análise de interação de variáveis - Deformação na carga máxima - CPs ímpares de 01 a 15

De acordo com os CP da Figura 4.33 e a partir do gráfico da Figura 4.34 é realizada a análise da deformação máxima (eixo y) e tamanho do defeito (eixo x superior), onde no primeiro gráfico, à esquerda, temos uma distribuição dos CP com 3 defeitos e o gráfico à direita para os CP com 7 defeitos (eixo x inferior), tanto para o CP com defeitos não alinhados (azul) quanto para os com defeitos alinhados (vermelho) e controle (verde).

Para esta análise serão fixados os seguintes fatores:

- Formato dos defeitos: círculos (-1)
- Material: PLA (-1)

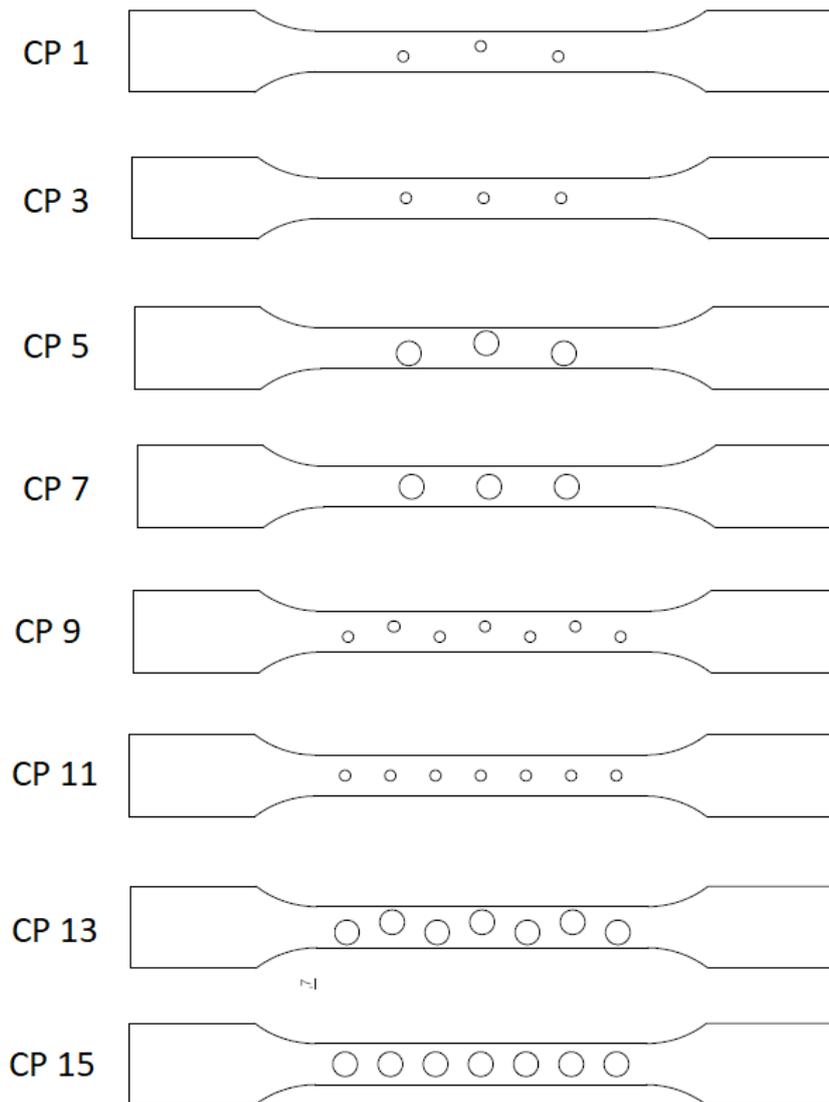


Figura 4.33 – CP ímpares de 01 a 15 - CP feitos em PLA com defeitos circulares

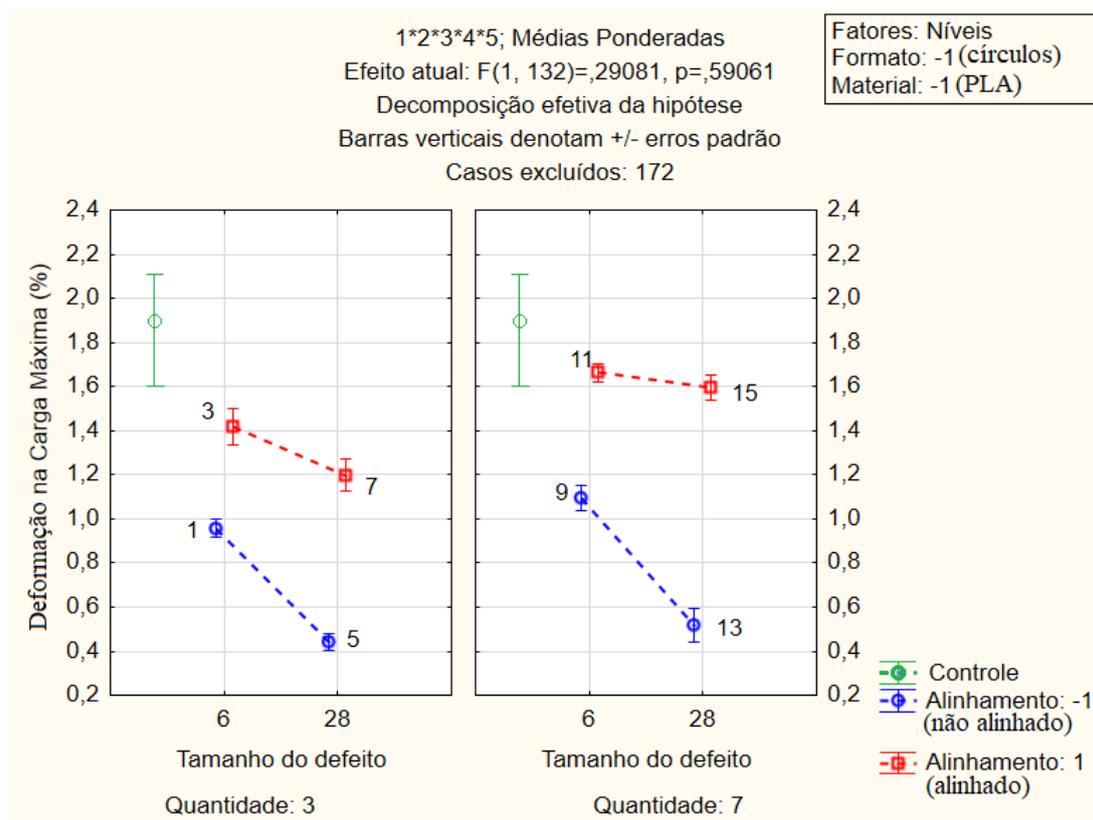


Figura 4.34 – Impacto do tamanho do defeito, quantidade e alinhamento na deformação na carga máxima. CPs feitos em PLA com defeitos circulares.

Nesta análise da Tabela 4.23, realizando as comparações ponto-a-ponto e partindo da  $H_0$  de que não há diferença entre os pontos analisados e tendo como base a Figura 4.34 e a Tabela 4.23, foram realizadas as seguintes análises:

Tabela 4.23 – Tabela de testes LSD - Fisher - Deformação na Carga Máxima - comparativos dos CPs ímpares de 01 a 15

LSD test; variable Deformação na Carga Máxima (%) (dadosANOVA)  
 Probabilities for Post Hoc Tests  
 Error: Between MSE = ,02209, df = 132,00  
 Excludes cases: 172

	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{1}	{3}	{5}	{7}
						,95533	1,4158	,44180	1,1967
1	-1	3	6	-1	-1		0,000000	0,000000	0,005663
3	-1	3	6	1	-1	0,000000		0,000000	0,011774
5	-1	3	28	-1	-1	0,000000	0,000000		0,000000
7	-1	3	28	1	-1	0,005663	0,011774	0,000000	
9	-1	7	6	-1	-1	0,105541	0,000276	0,000000	0,238948
11	-1	7	6	1	-1	0,000000	0,004579	0,000000	0,000000
13	-1	7	28	-1	-1	0,000003	0,000000	0,414130	0,000000
15	-1	7	28	1	-1	0,000000	0,040153	0,000000	0,000009
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{9}	{11}	{13}	{15}
						1,0952	1,6633	,51880	1,5937
1	-1	3	6	-1	-1	0,105541	0,000000	0,000003	0,000000
3	-1	3	6	1	-1	0,000276	0,004579	0,000000	0,040153
5	-1	3	28	-1	-1	0,000000	0,000000	0,414130	0,000000
7	-1	3	28	1	-1	0,238948	0,000000	0,000000	0,000009
9	-1	7	6	-1	-1		0,000000	0,000000	0,000000
11	-1	7	6	1	-1	0,000000		0,000000	0,418279
13	-1	7	28	-1	-1	0,000000	0,000000		0,000000
15	-1	7	28	1	-1	0,000000	0,418279	0,000000	

- Os CP 01 e 09 ( $p = 0,106$ ), com defeitos de  $5,7mm^2$  desalinhados feitos em PLA, a quantidade de defeitos não é estatisticamente significativa. A deformação destes, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 4.34, para os CP feitos em PLA o tamanho dos defeitos é bem significativo, porém, para um mesmo tamanho de defeito, a mesma observação quanto a quantidade de defeitos se mantém, como pode ser observado nos CP 05 e 13 ( $p = 0,414$ );
- Para os CP 11 e 15 ( $p = 0,42$ ), com 7 defeitos alinhados feitos em PLA, a área dos defeitos não é estatisticamente significativa. Já para os CP 03 e 07 ( $p = 0,012$ ), com 3 defeitos, a área é significativa, demonstrando que a quantidade de defeitos para estes CP é significativa para a deformação máxima;

#### 4.3.2 Análise de interação de variáveis - Deformação na carga máxima - CPs pares de 02 a 16

De acordo com a figura 4.35 e a partir do gráfico da Figura 4.36 é realizada a análise da deformação máxima (eixo  $y$ ) e tamanho do defeito (eixo  $x$  superior), onde no primeiro gráfico, à esquerda, temos uma distribuição dos CP com 3 defeitos e o gráfico à direita para os CP com 7 defeitos (eixo  $x$  inferior), tanto para o CP com defeitos não alinhados (azul) quanto para os com defeitos alinhados (vermelho).

Para esta análise serão fixados os seguintes fatores:

- Formato dos defeitos: círculos (-1)
- Material: ABS (1)

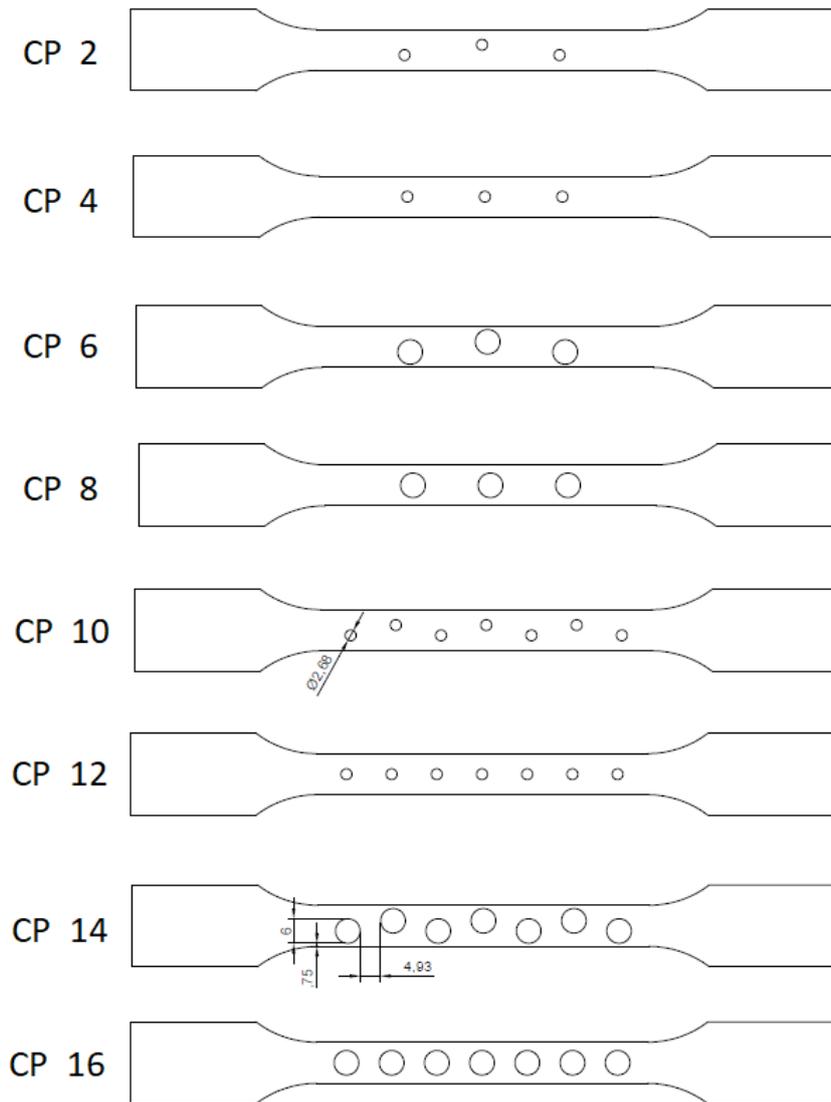


Figura 4.35 – CP pares de 02 a 16 - CP feitos em ABS com defeitos circulares

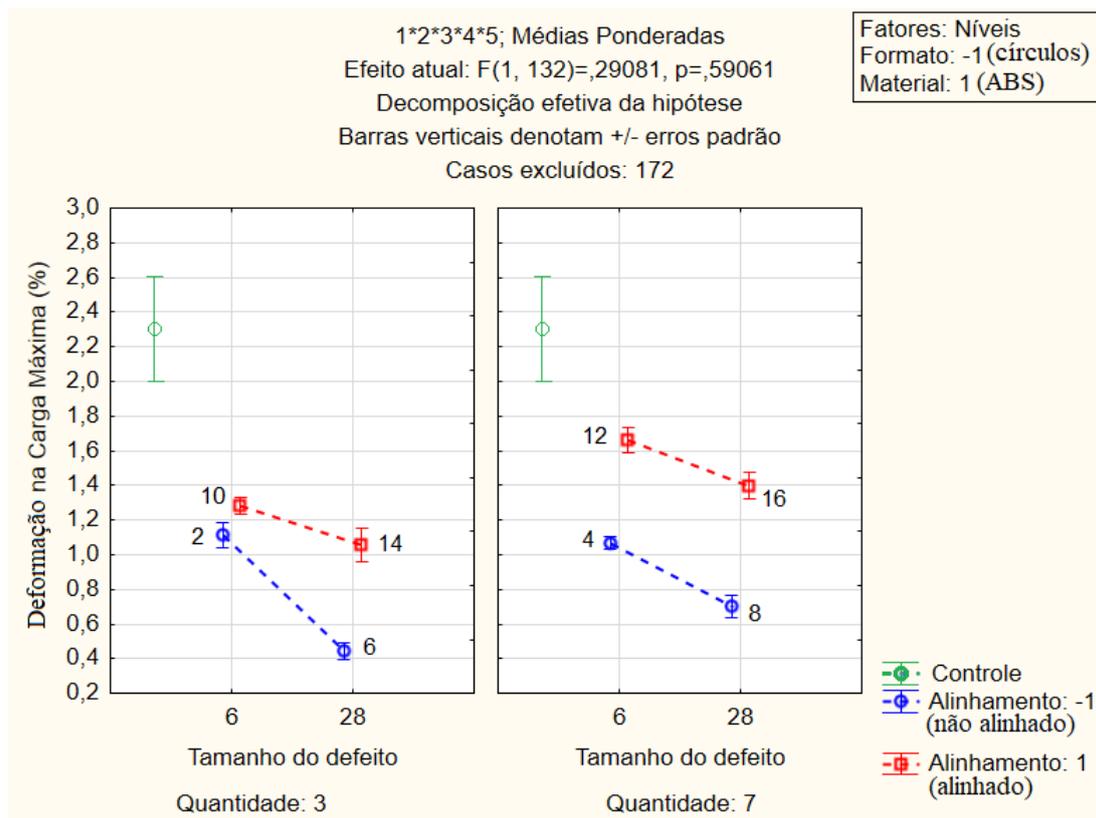


Figura 4.36 – Impacto do tamanho do defeito, quantidade e alinhamento na deformação na carga máxima. CPs feitos em ABS com defeitos circulares.

De acordo com a tabela de Fisher (Tabela 4.24, abaixo), realizando as comparações ponto-a-ponto, partindo da  $H_0$  de que não há diferença entre os pontos analisados, foram realizadas as seguintes análises:

Tabela 4.24 – Tabela de testes LSD - Fisher - Deformação na Carga Máxima - comparativos dos CPs pares de 02 a 16

LSD test; variable Deformação na Carga Máxima (%) (dados ANOVA)  
 Probabilities for Post Hoc Tests  
 Error: Between MSE = ,02209, df = 132,00  
 Exclude cases: 172

	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{2}	{4}	{6}	{8}
						1,1122	1,2838	,44275	1,0573
2	-1	3	6	-1	1		0,070153	0,000000	0,582429
4	-1	3	6	1	1	0,070153		0,000000	0,024673
6	-1	3	28	-1	1	0,000000	0,000000		0,000000
8	-1	3	28	1	1	0,582429	0,024673	0,000000	
10	-1	7	6	-1	1	0,631383	0,022634	0,000000	0,922238
12	-1	7	6	1	1	0,000000	0,000100	0,000000	0,000000
14	-1	7	28	-1	1	0,000063	0,000000	0,015677	0,000893
16	-1	7	28	1	1	0,002828	0,225720	0,000000	0,000834
	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{10}	{12}	{14}	{16}
						1,0670	1,6610	,70000	1,3982
2	-1	3	6	-1	1	0,631383	0,000000	0,000063	0,002828
4	-1	3	6	1	1	0,022634	0,000100	0,000000	0,225720
6	-1	3	28	-1	1	0,000000	0,000000	0,015677	0,000000
8	-1	3	28	1	1	0,922238	0,000000	0,000893	0,000834
10	-1	7	6	-1	1		0,000000	0,000337	0,000585
12	-1	7	6	1	1	0,000000		0,000000	0,005946
14	-1	7	28	-1	1	0,000337	0,000000		0,000000
16	-1	7	28	1	1	0,000585	0,005946	0,000000	

- Os CP 02 e 04 ( $p = 0,07$ ), com 3 defeitos de  $5,7mm^2$  feitos em ABS, o alinhamento dos defeitos não é estatisticamente significativo. ;
- Os CP 02 e 10 ( $p = 0,63$ ), com defeitos de  $5,7mm^2$  desalinhados feitos em ABS, a quantidade de defeitos não é estatisticamente significativa;

#### 4.3.3 Análise de interação de variáveis - Deformação na carga máxima - CPs ímpares de 17 a 31

De acordo com a Figura 4.37 e a partir do gráfico da Figura 4.38 é realizada a análise da deformação na carga máxima (eixo y) e tamanho do defeito (eixo x superior), onde no primeiro gráfico, à esquerda, temos uma distribuição dos CP com 3 defeitos e o gráfico à direita para os CP com 7 defeitos (eixo x inferior), tanto para o CP não alinhados (azul) quanto para os alinhados (vermelho) e controle (verde).

Para esta análise serão fixados os seguintes fatores:

- Formato dos defeitos: losangos (1)
- Material: PLA (-1)

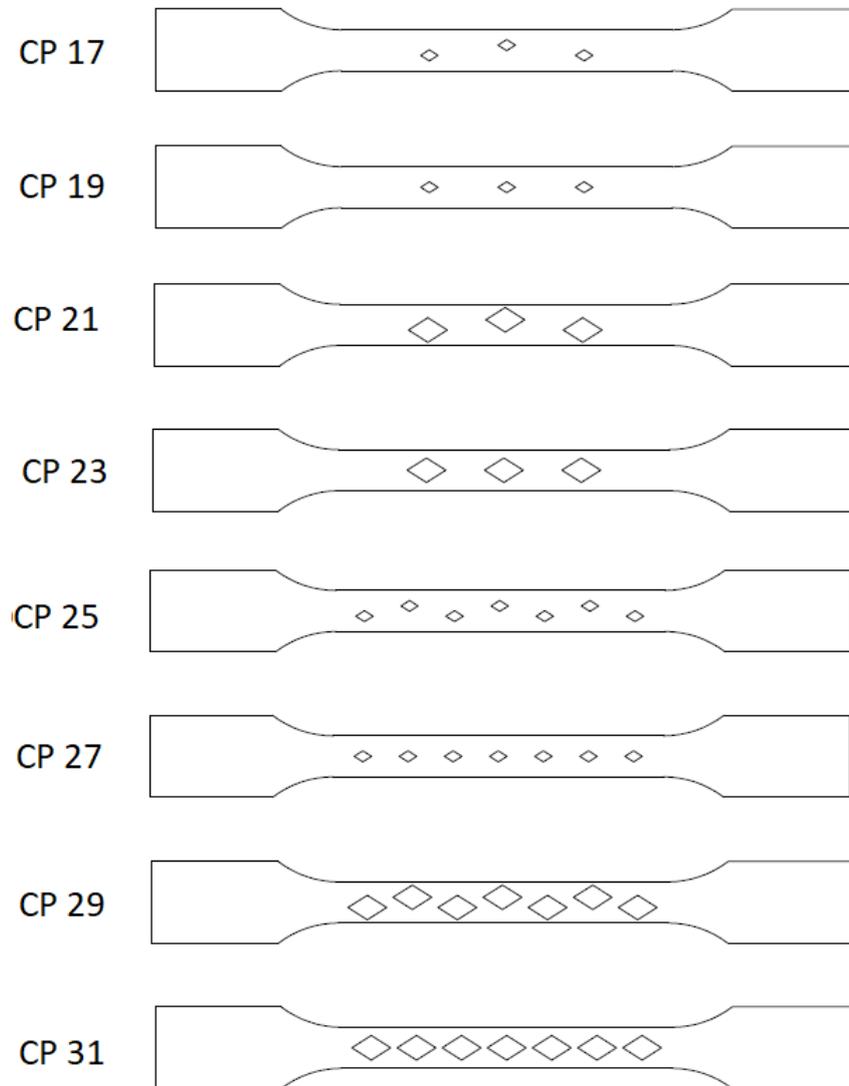


Figura 4.37 – CP ímpares de 17 a 31 - CP feitos em PLA com defeitos losangulares

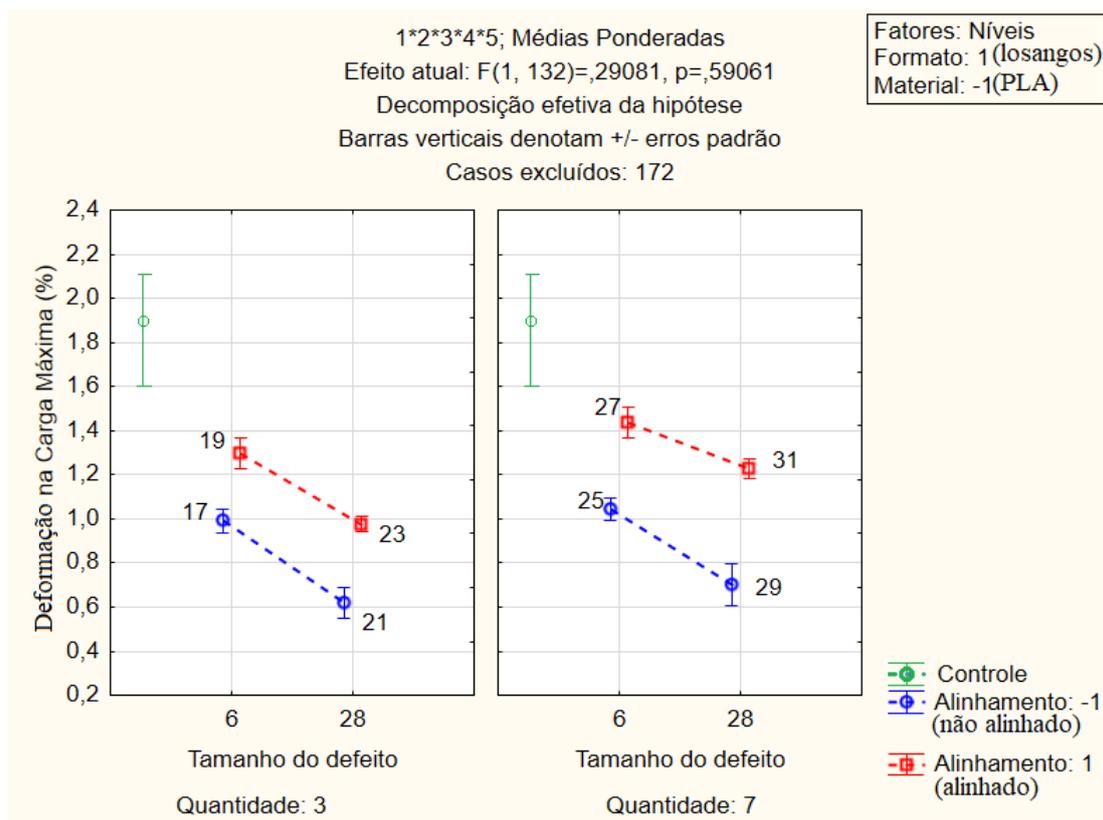


Figura 4.38 – Impacto do tamanho do defeito, quantidade e alinhamento na deformação na carga máxima. CPs feitos em PLA com defeitos losangulares.

De acordo com a tabela de Fisher (Tabela 4.25, abaixo), foram então realizadas as comparações ponto-a-ponto, partindo da  $H_0$  de que não há diferença entre os pontos analisados.

Tabela 4.25 – Tabela de testes LSD - Fisher - Deformação na Carga Máxima - comparativos dos CPs ímpares de 17 a 31

Teste LSD; Variável Deformação na Carga Máxima (%) (dados ANOVA)									
Probabilities for Post Hoc Tests									
Error: Between MSE = ,02209, df = 132,00									
Excluye cases: 172									
	Formato	Quantidade	Área	Alinh.	Material	{17}	{19}	{21}	{23}
						,99060	1,2952	,61720	,97520
17	1	3	6	-1	-1		0,001509	0,000116	0,870102
19	1	3	6	1	-1	0,001509		0,000000	0,000878
21	1	3	28	-1	-1	0,000116	0,000000		0,000213
23	1	3	28	1	-1	0,870102	0,000878	0,000213	
25	1	7	6	-1	-1	0,573787	0,008374	0,000013	0,468065
27	1	7	6	1	-1	0,000002	0,115357	0,000000	0,000001
29	1	7	28	-1	-1	0,001475	0,000000	0,368915	0,002546
31	1	7	28	1	-1	0,009195	0,459887	0,000000	0,005629
	Formato	Quantidade	Área	Alinh.	Material	{25}	{27}	{29}	{31}
						1,0436	1,4378	,69833	1,2285
17	1	3	6	-1	-1	0,573787	0,000002	0,001475	0,009195
19	1	3	6	1	-1	0,008374	0,115357	0,000000	0,459887
21	1	3	28	-1	-1	0,000013	0,000000	0,368915	0,000000
23	1	3	28	1	-1	0,468065	0,000001	0,002546	0,005629
25	1	7	6	-1	-1		0,000024	0,000192	0,041881
27	1	7	6	1	-1	0,000024		0,000000	0,016025
29	1	7	28	-1	-1	0,000192	0,000000		0,000000
31	1	7	28	1	-1	0,041881	0,016025	0,000000	

Foram realizadas as seguintes análises:

- Para os CP 17 e 25 ( $p = 0,57$ ), que possuem defeitos de  $5,7mm^2$  e desalinhados, a quantidade de defeitos não foi significativa.
- Os CP 19 e 27 ( $p = 0,12$ ), com defeitos alinhados de  $5,7mm^2$  feitos em PLA, a quantidade de defeitos não é estatisticamente significativa;
- Os CP 21 e 29 ( $p = 0,37$ ), com defeitos alinhados de  $28,3mm^2$ , a quantidade de defeitos não é estatisticamente significativo;

#### 4.3.4 Análise de interação de variáveis - Deformação na carga máxima - CPs pares de 18 a 32

De acordo com a Figura 4.39 e a partir do gráfico da Figura 4.40 é realizada a análise da deformação na carga máxima (eixo y) e tamanho do defeito (eixo x superior), onde no primeiro gráfico, à esquerda, temos uma distribuição dos CP com 3 defeitos e o gráfico à direita para os CP com 7

defeitos (eixo  $x$  inferior), tanto para o CP não alinhados (azul) quanto para os alinhados (vermelho) e controle (verde).

Para esta análise serão fixados os seguintes fatores:

- Formato dos defeitos: losangos (1)
- Material: ABS (1)

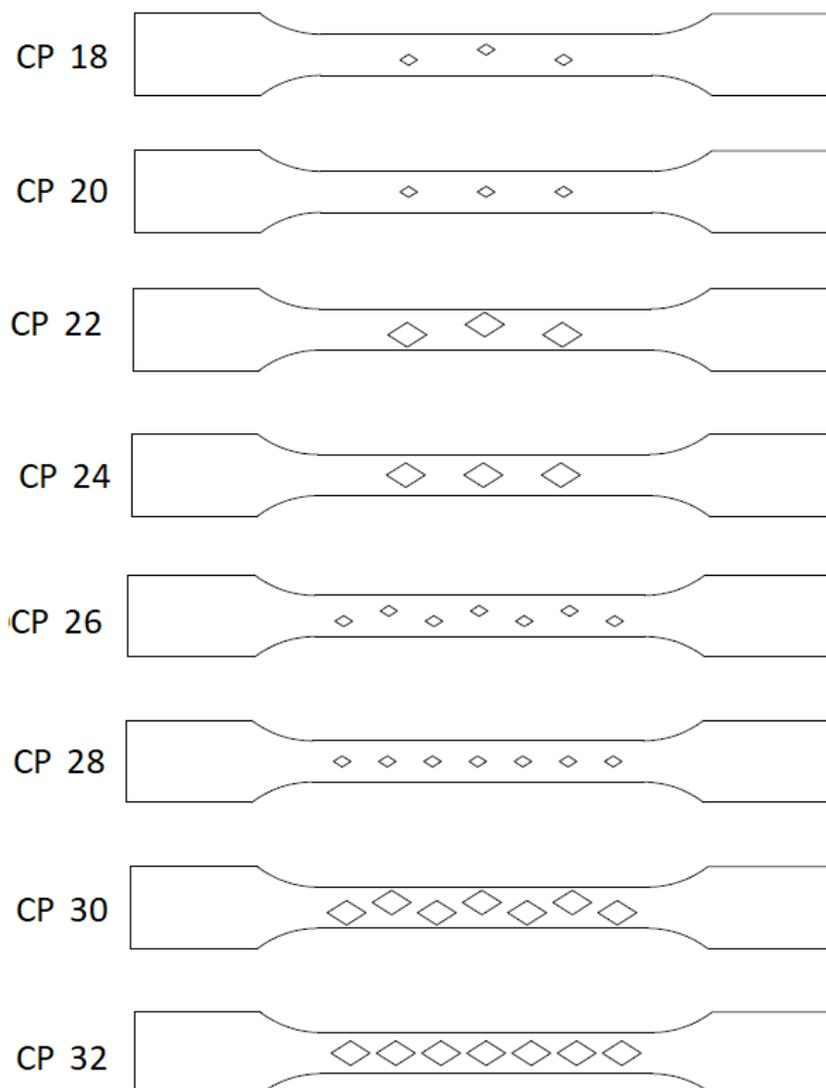


Figura 4.39 – CP pares de 18 a 32 - CP feitos em ABS com defeitos losangulares

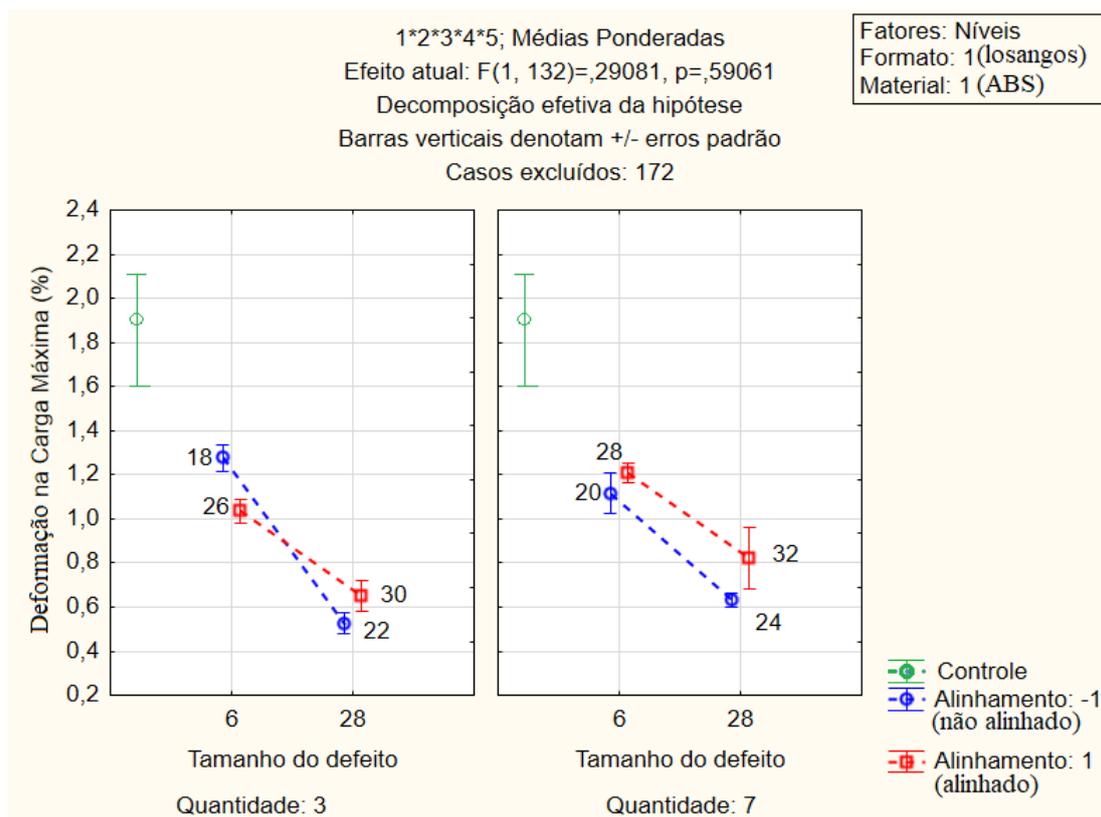


Figura 4.40 – Impacto do tamanho do defeito, quantidade e alinhamento na deformação na carga máxima. CPs feitos em ABS com defeitos losangulares.

Nesta análise observa-se que, alterando o material do CP com defeito em forma de losango, a tendência da tensão máxima é diminuir. As linhas azuis representam os CP não alinhados e as linhas vermelhas representam os CP alinhados, onde é possível observar:

- As retas azuis estão abaixo das retas vermelhas (para cada gráfico), indicando que a deformação é menor nos CP com defeitos não alinhados;
- Comparando agora o tamanhos dos defeitos, é possível verificar visualmente que a deformação é maior nos CP com menores defeitos;

De acordo com a tabela de Fisher (Tabela 4.26, abaixo), realizando as comparações ponto-a-ponto, partindo da  $H_0$  de que não há diferença entre os pontos analisados, foram realizadas as seguintes análises:

Tabela 4.26 – Tabela de testes LSD - Fisher - Deformação na Carga Máxima - comparativos dos CPs ímpares de 18 a 32

Teste LSD; Variável Deformação na Carga Máxima (%) (dados ANOVA)									
Probabilities for Post Hoc Tests									
Error: Between MSE = ,02209, df = 132,00									
Exclude cases: 172									
Cell No.	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{18}	{20}	{22}	{24}
						1,2762	1,0364	,52560	,65250
18	1	3	6	-1	1		0,011872	0,000000	0,000000
20	1	3	6	1	1	0,011872		0,000000	0,000183
22	1	3	28	-1	1	0,000000	0,000000		0,205283
24	1	3	28	1	1	0,000000	0,000183	0,205283	
26	1	7	6	-1	1	0,091453	0,396227	0,000000	0,000008
28	1	7	6	1	1	0,466768	0,070801	0,000000	0,000000
30	1	7	28	-1	1	0,000000	0,000033	0,257895	0,840523
32	1	7	28	1	1	0,000013	0,034769	0,003322	0,105561
Cell No.	Formato	Quant.	Área	Alinh.	Material	{26}	{28}	{30}	{32}
						1,1164	1,2076	,63240	,82375
18	1	3	6	-1	1	0,091453	0,466768	0,000000	0,000013
20	1	3	6	1	1	0,396227	0,070801	0,000033	0,034769
22	1	3	28	-1	1	0,000000	0,000000	0,257895	0,003322
24	1	3	28	1	1	0,000008	0,000000	0,840523	0,105561
26	1	7	6	-1	1		0,333665	0,000001	0,003929
28	1	7	6	1	1	0,333665		0,000000	0,000183
30	1	7	28	-1	1	0,000001	0,000000		0,057090
32	1	7	28	1	1	0,003929	0,000183	0,057090	

- Para os CP 18 e 26 ( $p = 0,091$ ), que possuem defeitos desalinhados, de  $5,7mm^2$ , a quantidade de defeitos não foi fator significativo para a deformação máxima. Considerando os CP 22 e 30 ( $p = 0,26$ ), com as mesmas características, porém com defeito maior ( $28,3mm^2$ ), observa-se também que não tem influência da deformação. Apreende-se dos comparativos que, para os CP com defeitos desalinhados, a manutenção do tamanho de defeito não influencia na deformação. Para os CP com defeitos alinhados (comparativos dos CP 20 e 28 -  $p = 0,07$  - e 24 e 32 -  $p = 0,11$ ), é possível verificar que não influencia na deformação máxima.
- Para os CP 22 e 24 ( $p = 0,20$ ), com 3 defeitos de  $28,3mm^2$ , o alinhamento não é estatisticamente significativo. Percebe-se também, pela tabela, que para os CP 30 e 32 ( $p = 0,06$ ), com 7 defeitos de  $28,3mm^2$ , o alinhamento também não influencia na deformação máxima;
- Os CP 26 e 28 ( $p = 0,33$ ), ambos com 3 defeitos de  $5,7mm^2$ , verifica-

se que o alinhamento não foi significativo para a deformação máxima.

#### 4.3.5 Estimativa de Efeitos, Coeficientes de Regressão e Gráficos 3D

Analisando agora a Tabela 4.27 de estimativa de efeitos, verifica-se o coeficiente de determinação  $R^2 = 0,851$ , ou seja, os dados explicam 85,1% da variância no modelo.

Tabela 4.27 – Estimativa de Efeitos - Deformação Máxima

Estimativa de Efeitos; Var.:Deformação na Carga Máxima (%); R-sqr=,851; Adj:,8359 (dadosANOVA) 5 fatores, 1 Bloqueado, 164 Rodadas; Erro Quadrático Médio=,0220855 DV: Deformação na Carga Máxima (%) Casos Excluídos: 172			
Fator	Efeito	Erro Padrão	p
Mean/Interc.	1,037419	0,011683	0,000000
Formato (1)	-0,126043	0,023371	0,000000
Quantidade (2)	0,164683	0,023333	0,000000
Área/tamanho do defeito (3)	-0,384561	0,023361	0,000000
Alinhamento (4)	0,415932	0,023360	0,000000
Material (5)	-0,074283	0,023359	0,001835
1 by 2	-0,058886	0,023258	0,012517
1 by 3	-0,018951	0,023282	0,417138
1 by 4	-0,194448	0,023266	0,000000
1 by 5	-0,051659	0,023348	0,028647
2 by 3	0,047887	0,023260	0,041484
2 by 4	0,100932	0,023243	0,000028
2 by 5	-0,011457	0,023341	0,624354
3 by 4	0,127335	0,023285	0,000000
3 by 5	-0,055034	0,023353	0,019913
4 by 5	-0,134076	0,023337	0,000000

Partindo da  $H_0$  de que o fator não tem significância para o efeito, é possível observar que nenhum dos efeitos de entrada tem significância para a deformação máxima, assim como a maior parte dos efeitos de interação. Além disso, o efeito mais significativo para a tensão máxima é o tamanho do defeito conforme descrito abaixo, em função da coluna *Efeito*:

- Formato (1): ao variar o formato circular (-1) para o losango (+1), temos uma diminuição média de apenas 0,13% na deformação máxima.

- Quantidade (2): ao variar de 3 (−1) para 7 (+1) defeitos, temos um aumento médio de 0,16% na deformação máxima.
- Tamanho do defeito (3): ao variar de 5,7mm<sup>2</sup> (−1) para 28,3mm<sup>2</sup> (+1), temos uma diminuição média de 0,38% na deformação máxima.
- Alinhamento (4): ao variar de defeitos não alinhados (−1) para alinhados (+1), temos um aumento médio de 0,42% na deformação máxima.
- Material (5): ao variar do PLA (−1) para ABS (+1), temos uma diminuição média de 0,07% na deformação máxima.

Analisando agora a Tabela 4.28 observamos os Coeficientes de Regressão, agora em função da deformação máxima ( $\epsilon_{máx}$ ).

Tabela 4.28 – Coeficientes de Regressão - Deformação Máxima

Coeficientes de Regressão; Var.:Deformação Máxima (%); R-sqr=,851; Adj:,8359 (dadosANOVA) 5 fatores, 1 Bloqueado, 164 Rodadas; Erro Quadrático Médio=0,220855 DV: Deformação Máxima (MPa) Casos Excluídos: 172		
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err. Pure Err
Mean/Interc.	1,221235	0,056905
Formato (1)	0,025230	0,035951
Quantidade (2)	0,022669	0,010519
Área/tamanho do defeito (3)	-0,022922	0,002872
Alinhamento (4)	-0,016594	0,035911
Material (5)	0,019706	0,036026
1 by 2	-0,014722	0,005814
1 by 3	-0,000861	0,001058
1 by 4	-0,097224	0,011633
1 by 5	-0,025829	0,011674
2 by 3	0,001088	0,000529
2 by 4	0,025233	0,005811
2 by 5	-0,002864	0,005835
3 by 4	0,005788	0,001058
3 by 5	-0,002502	0,001062
4 by 5	-0,067038	0,011668

Levando em consideração as variáveis definidas na Tabela 4.10 e os itens considerados significativos pela Tabela 4.27, a equação de regressão para a deformação na carga máxima, abaixo:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{m\acute{a}x}(\%) = & 1,22 + 0,025 \cdot F + 0,023 \cdot Q - 0,023 \cdot T - \\ & 0,017 \cdot A + 0,02 \cdot M - 0,015 \cdot F \cdot Q - \\ & 0,097 \cdot F \cdot A - 0,026 \cdot F \cdot M + 0,001 \cdot Q \cdot T + \\ & 0,025 \cdot Q \cdot A + 0,006 \cdot T \cdot A - 0,003 \cdot T \cdot M - \\ & 0,067 \cdot A \cdot M \end{aligned} \quad (4.3)$$

Desta forma, foram considerados na equação todos os fatores de entrada, exceto os seguintes fatores/interações:

- Formato (1) x Tamanho do defeito (3);
- Quantidade (2) x Material (5);

Continuando, pela Figura 4.41 é possível analisar a superfície das variáveis Tamanho e Alinhamento dos defeitos em função da Deformação Máxima (eixo z). Através do gráfico, visualmente, pode-se extrair as seguintes informações:

- O aumento do tamanho dos defeitos apresenta uma leve queda na deformação para os CP com defeitos alinhados (+1) (em torno de 1,5% para aproximadamente 1,2%) e uma forte variação para os CP não alinhados (-1) (em torno de 1,1% para aproximadamente 0,5%);
- Além disso, é possível verificar que a maior diferença se dá entre os CP com defeitos de  $5,7mm^2$  e alinhados (em torno de 1,5%) e os CP com defeitos de  $28,3mm^2$  e não alinhados (em torno de 0,5%)

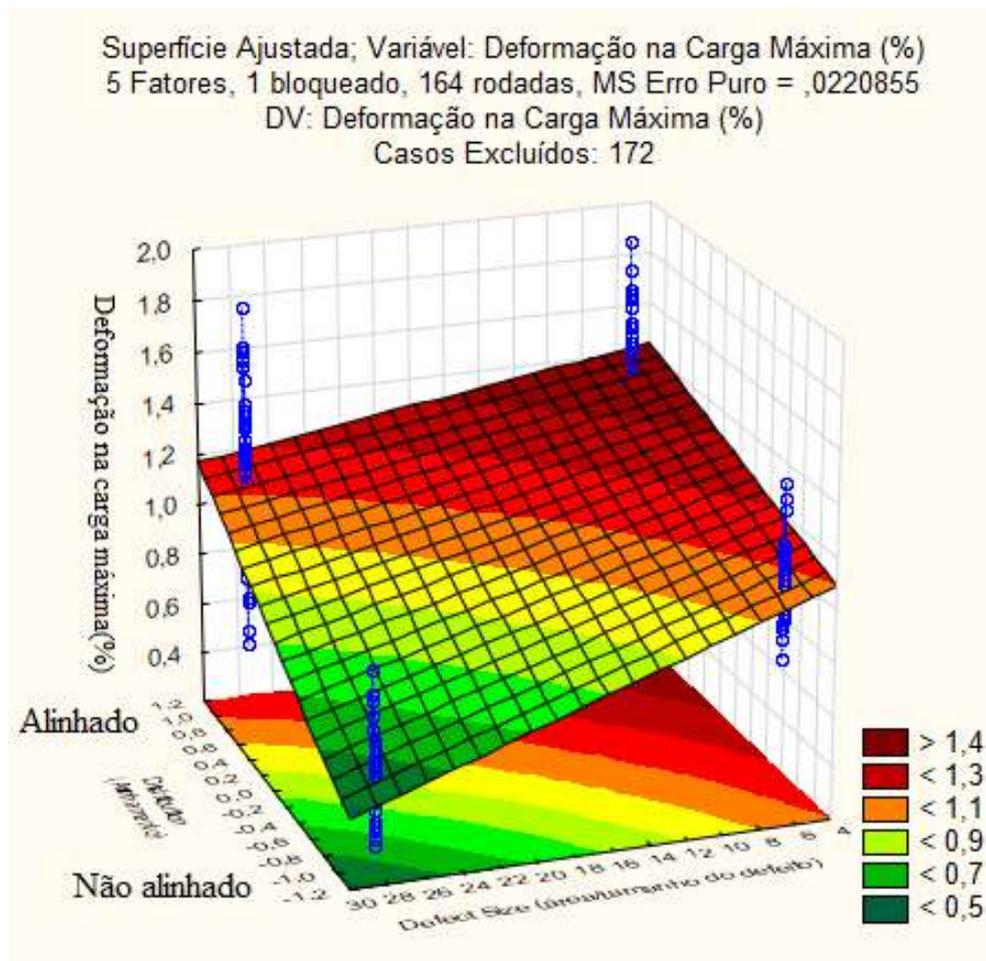


Figura 4.41 – Gráfico 3D Tamanho do defeito x Alinhamento x Deformação Máxima

Pela Figura 4.42 é possível analisar a superfície das variáveis Quantidade e Alinhamento dos defeitos em função da Deformação Máxima (eixo z). Através do gráfico, visualmente, pode-se extrair as seguintes informações:

- O aumento da quantidade de defeitos apresenta uma forte queda na deformação para os CP com defeitos alinhados (+1) (em torno de 1,5% para aproximadamente 1,1%) e uma variação praticamente nula para os CP não alinhados (-1) (em torno de 0,8%)
- Além disso, é possível verificar que a maior diferença se dá entre os CP com mais defeitos e alinhados (em torno de 1,5%) e os CP com menos defeitos e não alinhados (em torno de 0,8%)

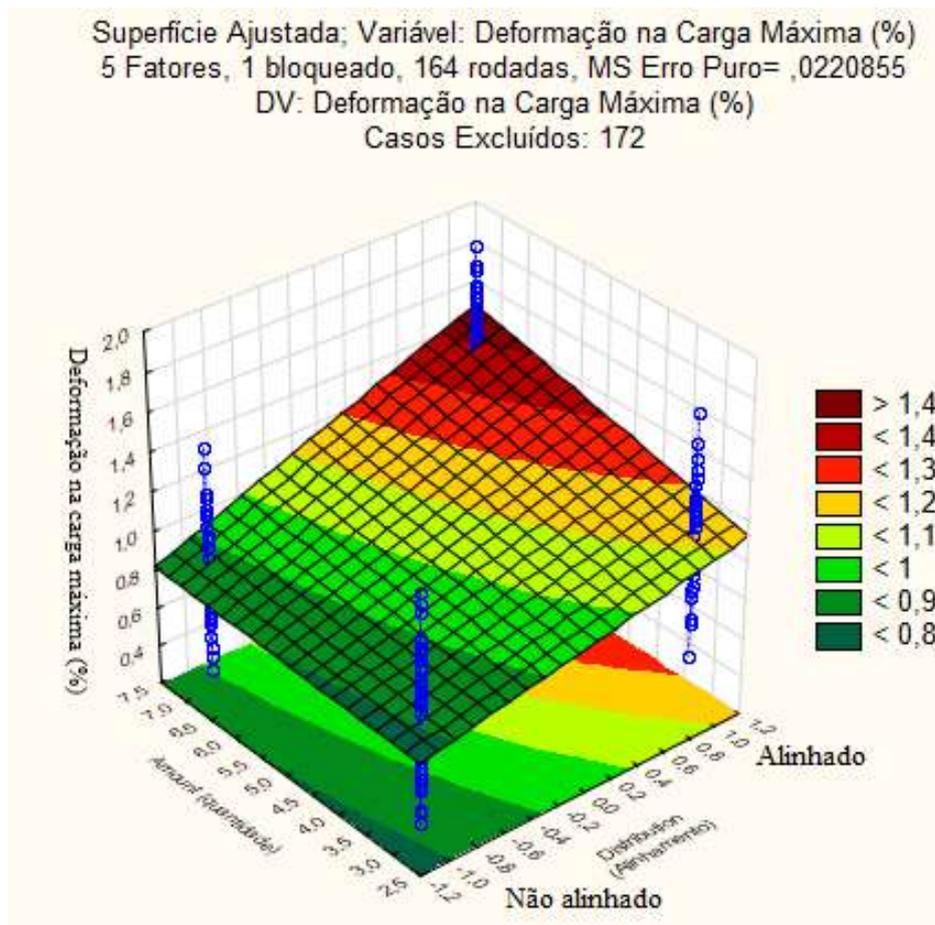


Figura 4.42 – Gráfico 3D Quantidade de defeitos x Alinhamento x Deformação Máxima

#### 4.4 CPs Complementares

Com o objetivo de extrapolar alguns dos níveis propostos para os fatores de entrada do planejamento original, foram fabricados oito diferentes modelos de CP, com variações em relação *design* original dos CP da Figura 4.43.

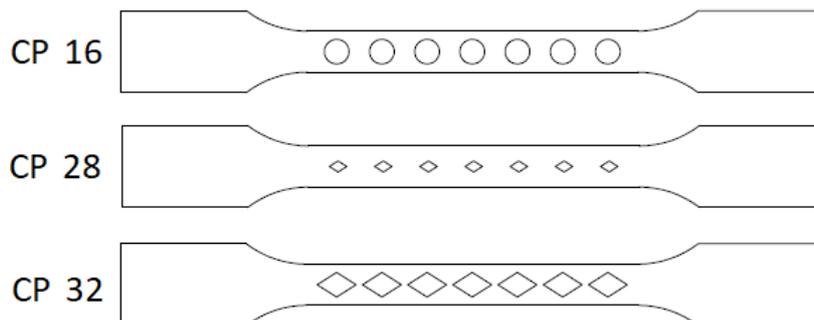


Figura 4.43 – Desenhos dos CP originais que foram modificados para gerar os CP complementares

Todos os CP foram feitos utilizando como matéria prima o ABS. As variações foram relativas aos defeitos internos dos CP conforme descrito abaixo:

- CP complementar 01 (C01) (Figura 4.44) - Utilizando como modelo o CP 32 da Figura 4.43, os defeitos que originalmente são vazados, neste CP complementar foram aprofundados na área útil até a metade da espessura apenas (ver seção A-A do CP Complementar 01 da figura abaixo).

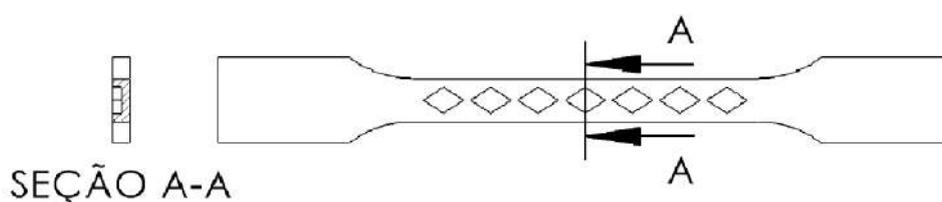


Figura 4.44 – CP complementar 01

- CP complementar 02 (C02) (Figura 4.45) - Utilizando como modelo o CP 28 da Figura 4.43, os defeitos foram rotacionados em 90°. Foram mantidas a área e posição dos defeitos.

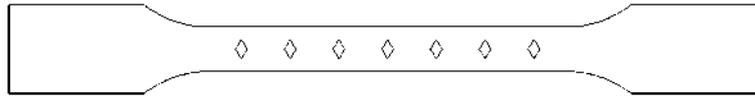


Figura 4.45 – CP complementar 02

- CP complementar 03 (C03) (Figura 4.46) - Utilizando como modelo o CP 28 da Figura 4.43, os defeitos foram alongados na direção do eixo do CP, mantendo a área e posição do defeito.



Figura 4.46 – CP complementar 03

- CP complementar 04 (C04) (Figura 4.47) - Utilizando como modelo o CP 28 da Figura 4.43, os defeitos foram divididos nas bordas do CP, mantendo a área e posição do defeito.

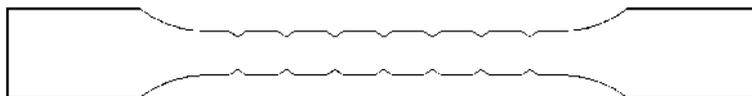


Figura 4.47 – CP complementar 04

- CP complementar 05 (C05) (Figura 4.48) - Utilizando como modelo o CP 32 da Figura 4.43, os defeitos foram modificados para o formato de quadrados, mantendo sua área e posição.

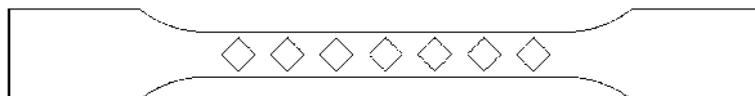


Figura 4.48 – CP complementar 05

- CP complementar 06 (C06) (Figura 4.49) - Utilizando como modelo o CP 32 da Figura 4.43, os defeitos foram modificados para o formato de triângulos, mantendo sua área e posição.

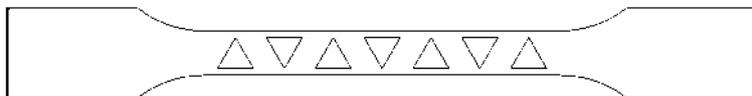


Figura 4.49 – CP complementar 06

- CP complementar 07 (C07) (Figura 4.50) - Utilizando como modelo o CP 32 da Figura 4.43, assim como o CP complementar 06, os defeitos foram modificados para o formato de triângulos, mantendo sua área e posição, porém os triângulos foram desenhados na mesma posição.

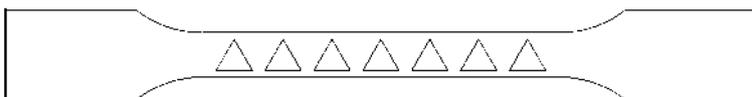


Figura 4.50 – CP complementar 07

- CP complementar 08 (C08) (Figura 4.51) - Utilizando como modelo o CP 16 da Figura 4.43, assim como o CP complementar 04, o defeito foi dividido nas bordas, mantendo a área e posição do defeito.

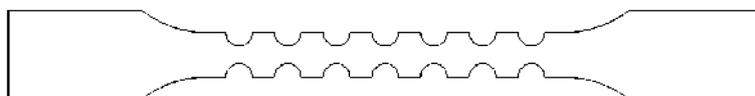


Figura 4.51 – CP complementar 08

Relativo aos resultados dos ensaios, as análises foram realizadas comparando os CP complementares com os CP originais dos quais foram derivados, além dos CP controle, conforme a seguir:

- CP Controle x C01 x CP 32;

- CP Controle x C02 x C03 x C04 x CP 28;
- CP Controle x C05 x C06 x C07 x CP 32;
- CP Controle x C08 x CP 16;

Seguindo com as análises para cada conjunto de comparação para os fatores Rigidez, Tensão Máxima e Deformação Máximo, temos;

#### 4.4.1 CP Controle x C01 x CP 32

O comparativo foi feito utilizando os CP da Figura 4.52, abaixo:

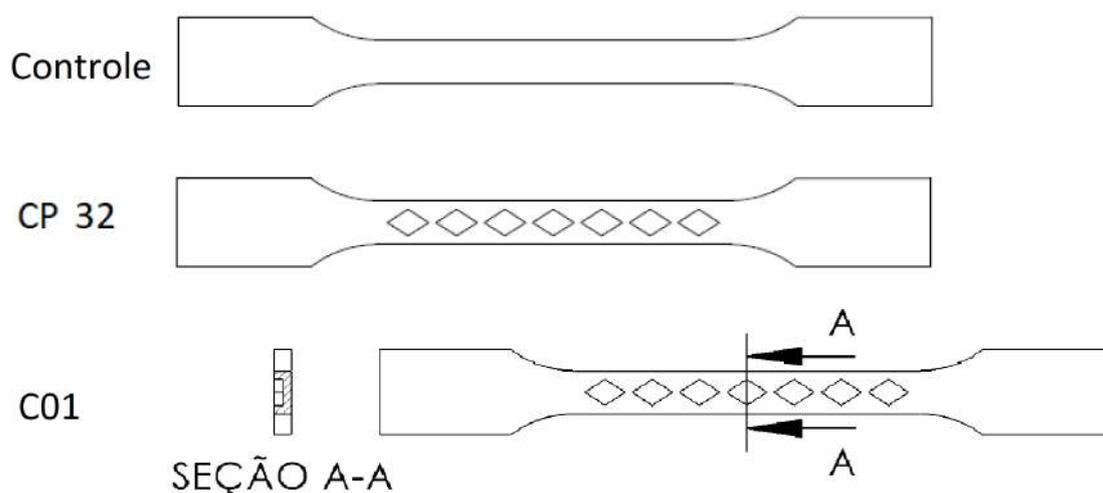


Figura 4.52 – CP Controle, CP32 e C01

##### 4.4.1.1 Rigidez

Iniciando a análise pela Figura 4.53, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma, até então aparentemente, de forma homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição aproximadamente igual dos pontos acima e abaixo do eixo. Isto indica possivelmente o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

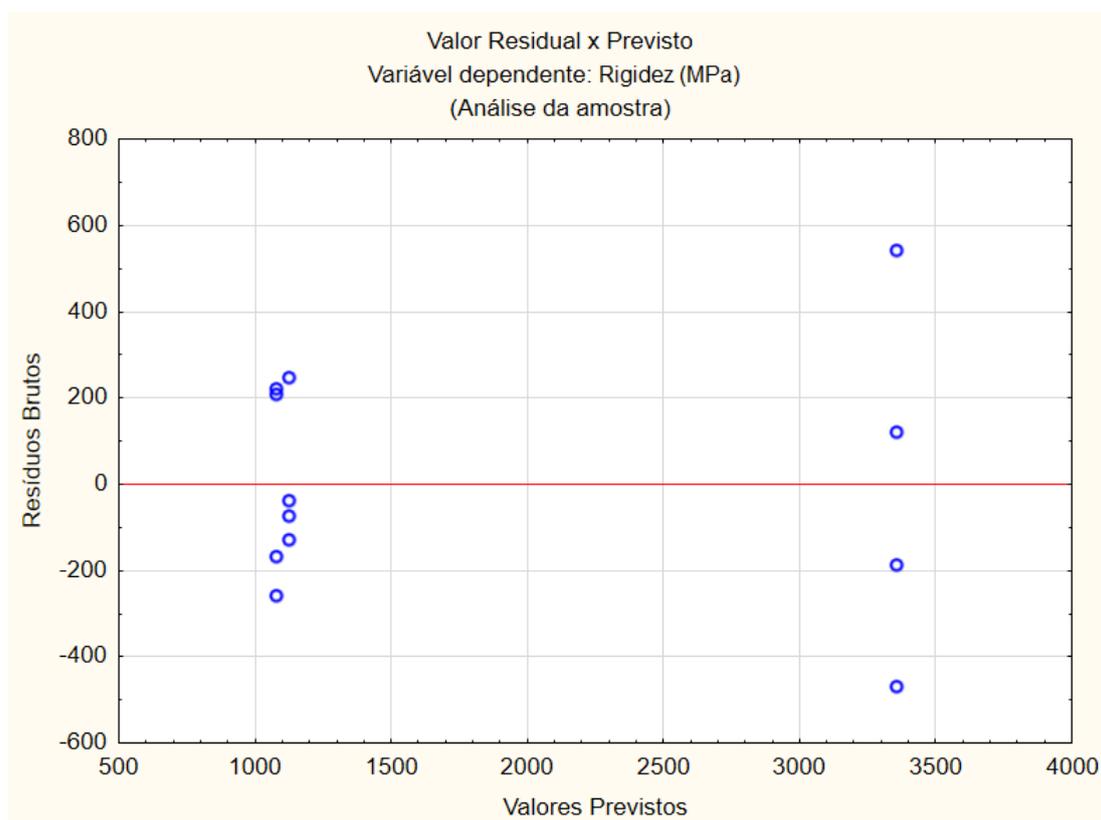


Figura 4.53 – Gráfico dos valores previstos x resíduos.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene's (tabelas 4.29 e 4.30), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Como pode ser verificado nas tabelas, em ambos os testes  $p > 0,05$ , confirmando a  $H_0$  apresentada acima.

Tabela 4.29 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa)

Teste de Homogeneidade de Variâncias (C01 X CP32)					
Efeito: GRUPO					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Rigidez (MPa)	6,696640	0,674020	2,312293	2	0,314697

Tabela 4.30 – Teste Levene’s para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa)

Teste de Levene’s para Homogeneidade de Variâncias (C01 X CP32)				
Efeito: GRUPO				
Graus de Liberdade para todos os F’s: 2, 9				
	MS Effect	MS Error	F	p
Rigidez (MPa)	43073,00	17365,64	2,480358	0,138678

A ( $H_0$ ) foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.54, não tendo sido rejeitada a  $H_0$ , sendo portanto confirmada a distribuição normal dos resíduos:

- Lilliefors -  $p = 0,2$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,93$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal.

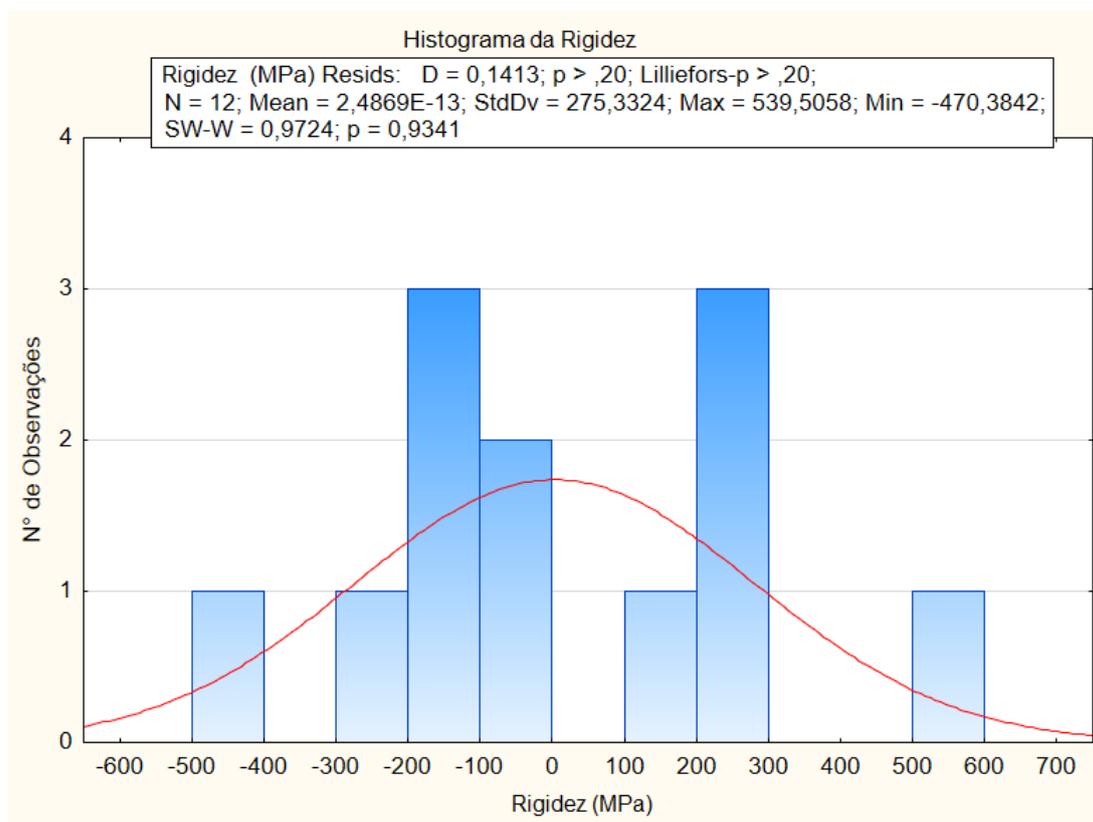


Figura 4.54 – Histograma dos resíduos.

A partir do gráfico da Figura 4.55 é realizada a análise da rigidez (eixo y) em cada grupo de CP. Visualmente é possível verificar que os CP controle possuem rigidez da ordem de  $3400\text{MPa}$ , significativamente maior que os CP com defeitos inseridos (da ordem de  $1100\text{MPa}$ ).

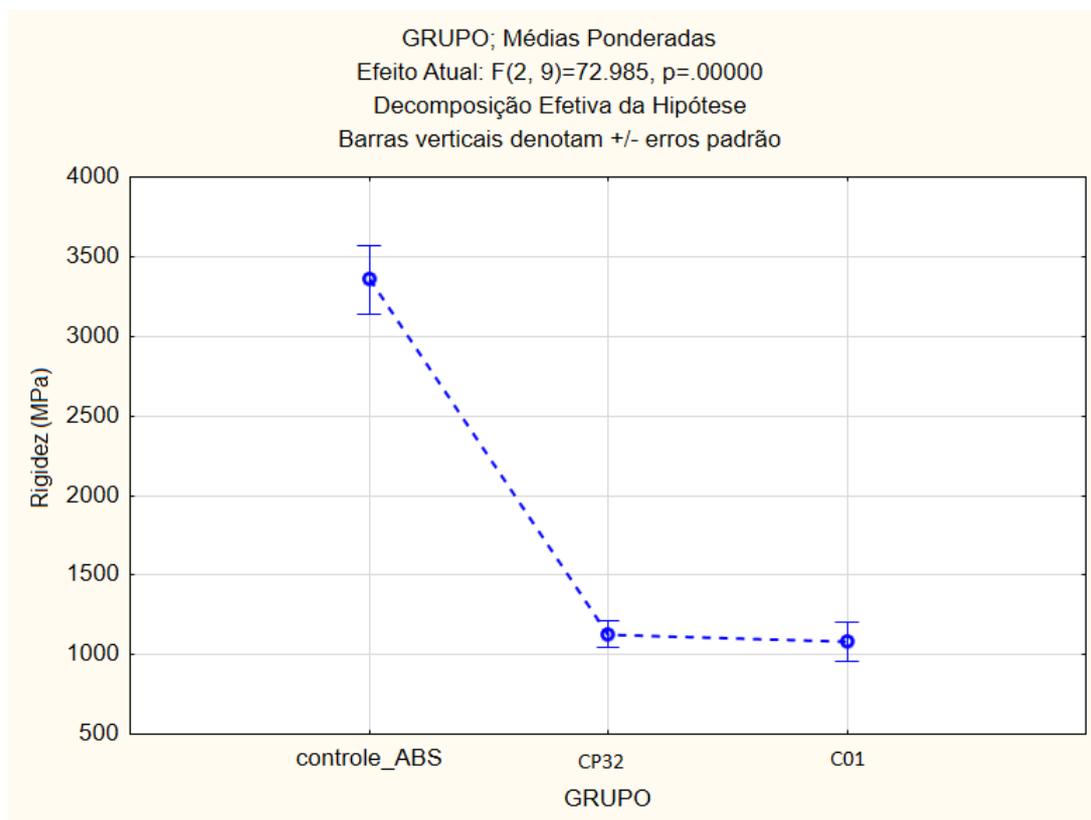


Figura 4.55 – Análise da interação entre os grupos.

Utilizando a Tabela 4.31, é possível verificar que os CP controle têm rigidez de fato diferente dos outros grupos, porém, o grupo de CP C01 é estatisticamente igual ao grupo do CP32, o que significa que o defeito sendo ou não passante, não é significativo para a rigidez.

Tabela 4.31 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C01 x CP32

Teste LSD; variável Rigidez (MPa) (C01 X CP32)				
Probabilidades para Testes Post Hoc				
Erro: Entre MS = 92654., df = 9.0000				
Cell No.	GRUPO	{1}	{2}	{3}
		3356.4	1128.4	1081.0
1	controle_ABS		0,000003	0,000002
2	CP32	0,000003		0,830484
3	C01	0,000002	0,830484	

## 4.4.1.2 Tensão Máxima

Analisando agora a tensão máxima, de acordo com a Figura 4.56 é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma, aparentemente, homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição aproximadamente igual dos pontos acima e abaixo do eixo. Isto indica possivelmente o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

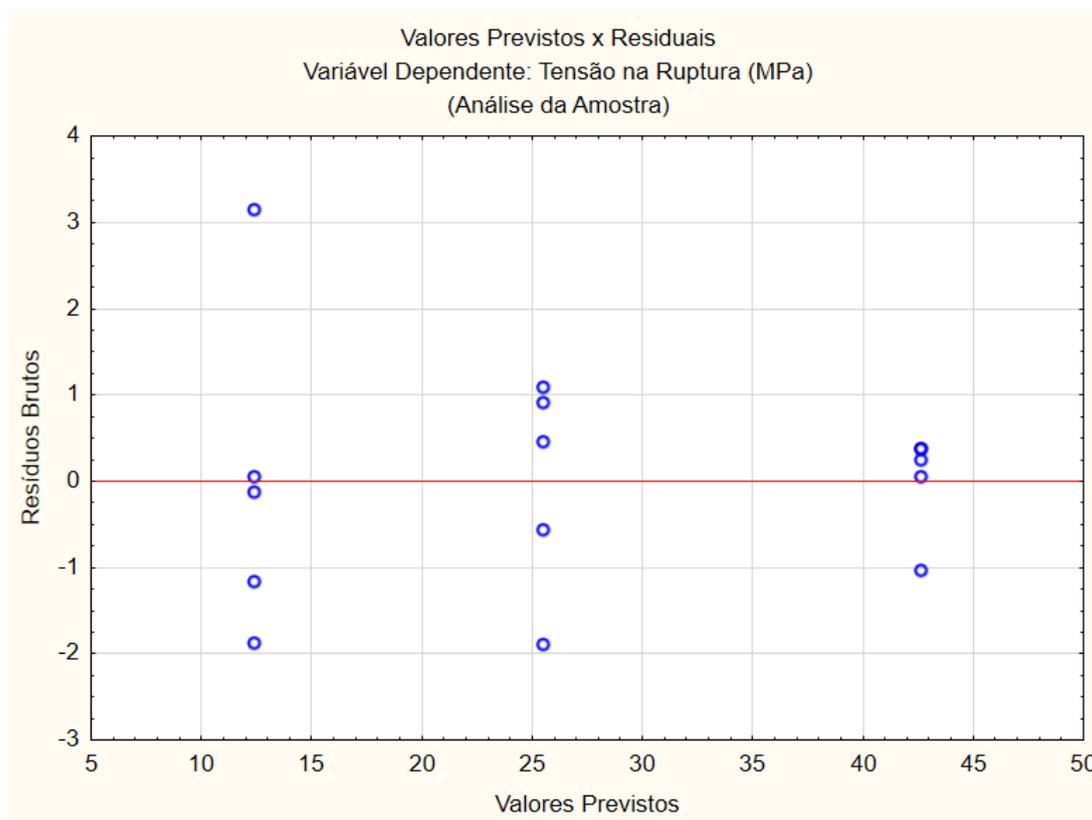


Figura 4.56 – Gráfico dos valores previstos x resíduos.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene’s (tabelas 4.32 e 4.33), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Como pode ser verificado nas tabelas, em ambos os testes  $p > 0,05$ , confirmando a  $H_0$  apresentada acima.

Tabela 4.32 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa)

Testes of Homogeneidade de Variâncias (C01 X CP32)					
Efeito: GRUPO					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Tensão na Ruptura (MPa)	10,58045	0,663200	4,243407	2	0,119827

Tabela 4.33 – Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa)

Teste de Levene's para Homogeneidade de Variâncias (C01 X CP32)				
Efeito: GRUPO				
Graus de Liberdade para todos os F's: 2, 12				
	MS Effect	MS Error	F	p
Tensão na Ruptura (MPa)	0,957167	0,710249	1,347649	0,296495

A  $H_0$  foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.57, sendo confirmada a distribuição normal dos resíduos:

- Lilliefors -  $p = 0,2$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,26$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;

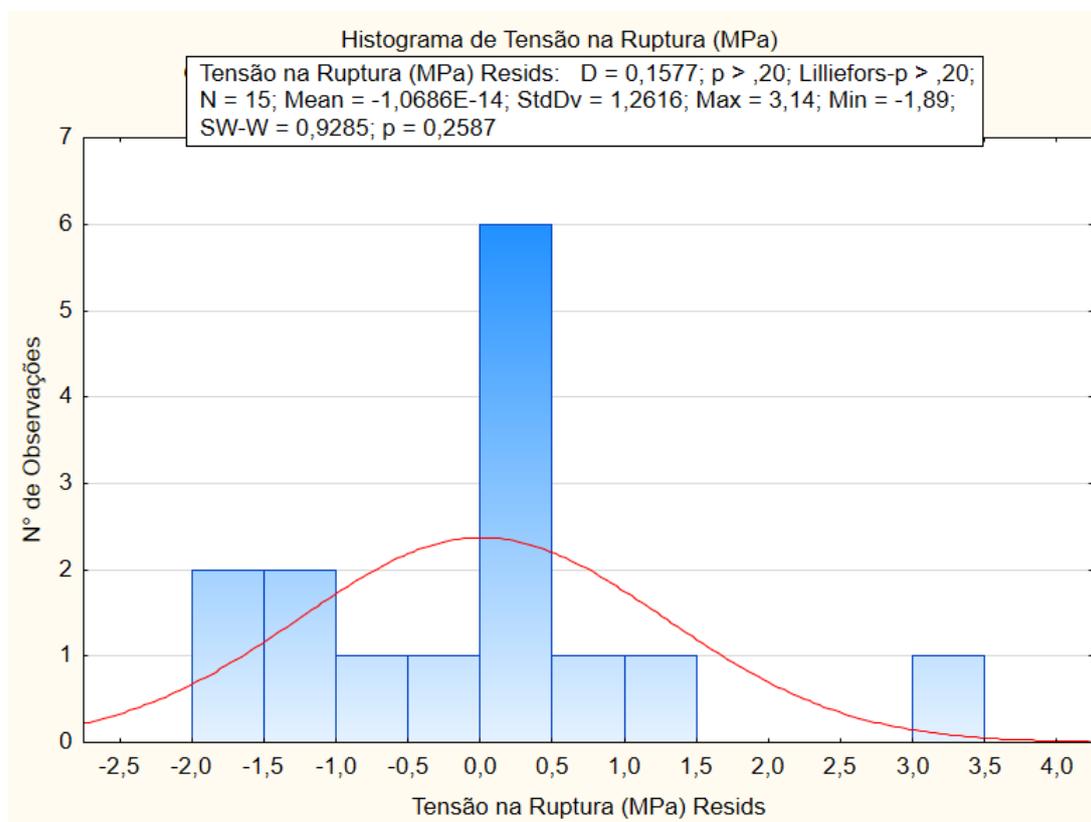


Figura 4.57 – Histograma dos resíduos.

A partir do gráfico da Figura 4.58 é realizada a análise da tensão máxima (eixo y) em cada grupo de CP. Visualmente é possível verificar que os CP controle possuem tensão máxima da ordem de  $43MPa$ , enquanto os CP do experimento 32 foi verificada tensão máxima significativamente menor, de aproximadamente  $13MPa$  e o CP complementar tem um valor intermediário, de aproximadamente  $25MPa$ .

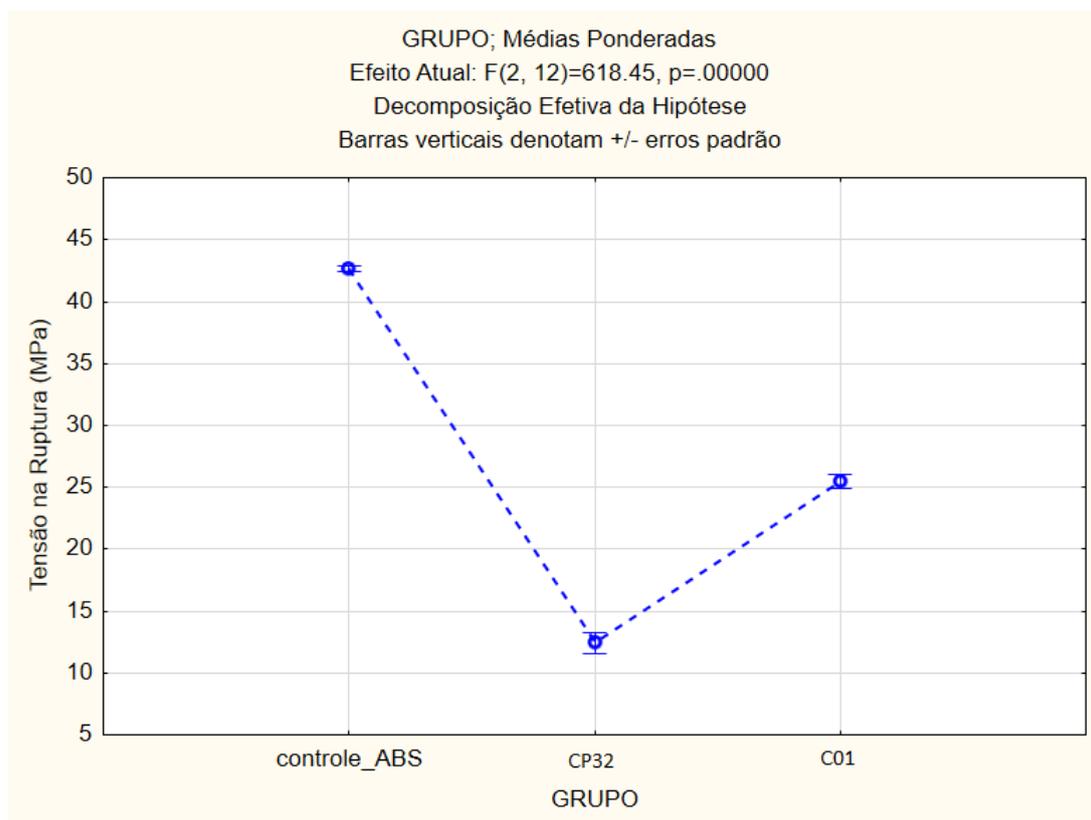


Figura 4.58 – Análise da interação entre os grupos.

Utilizando a Tabela 4.34, pode-se verificar que a tensão máxima os CP são estatisticamente diferentes entre si, uma vez que a  $H_0$  é rejeitada em todas as combinações. Conclui-se a partir do teste complementar que a alteração feita no CP é significativa para o experimento (a tensão máxima aumentou em em torno de  $12MPa$ ).

Tabela 4.34 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C01 x CP32

Teste LSD; variável Tensão na Ruptura (MPa) (C01 X CP32)  
 Probabilidades para Testes Post Hoc  
 Erro: Entre MS = 1.8569, df = 12.000

Cell No.	GRUPO	{1}	{2}	{3}
		42.655	12.435	25.515
1	controle_ABS		0,000000	0,000000
2	CP32	0,000000		0,000000
3	C01	0,000000	0,000000	

4.4.1.3 Deformação Máxima

Iniciando a análise pela Figura 4.59, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma, até então aparentemente, de forma homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição aproximadamente igual dos pontos acima e abaixo do eixo. Isto indica possivelmente o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

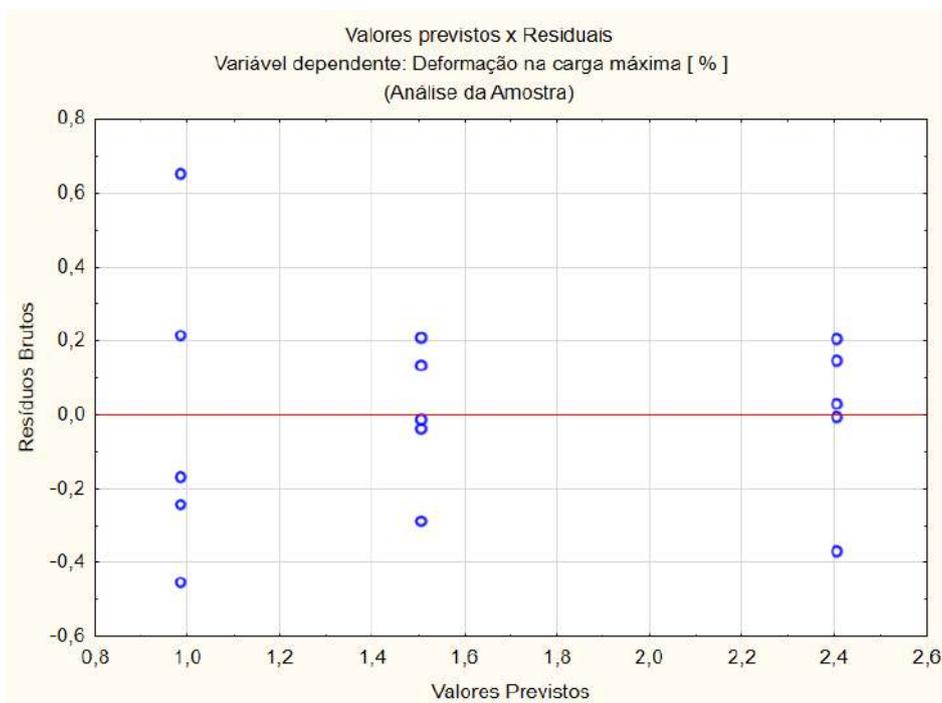


Figura 4.59 – Gráfico dos valores previstos x resíduos.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene's (tabelas 4.35 e 4.36), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Como pode ser verificado nas tabelas, em ambos os testes  $p > 0,05$ , confirmando a  $H_0$  apresentada acima.

Tabela 4.35 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%)

Testes de Homogeneidade de Variâncias (C01 X CP32)					
Efeito: GRUPO					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Deformação na carga máxima [ % ]	5,271586	0,689170	2,971032	2	0,226385

Tabela 4.36 – Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%)

Teste de Levene's para Homogeneidade de Variâncias (C01 X CP32)				
Efeito: GRUPO				
Graus de Liberdade para todos os F's: 2, 12				
	MS Effect	MS Error	F	p
Deformação na carga máxima [ % ]	0,068667	0,025234	2,721232	0,106033

A  $H_0$  foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.60, sendo confirmada a distribuição normal dos resíduos:

- Lilliefors -  $p = 0,2$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,60$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;

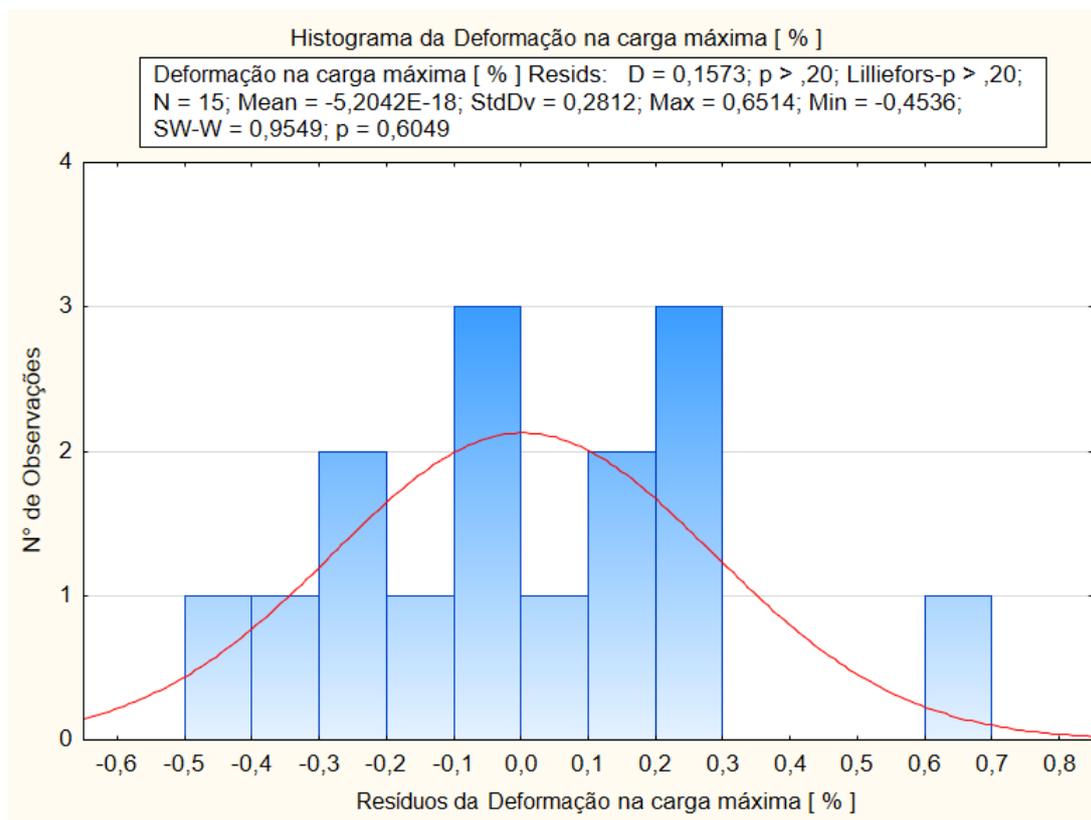


Figura 4.60 – Histograma dos resíduos.

A partir do gráfico da Figura 4.61 é realizada a análise da deformação máxima (eixo y) em cada grupo de CP. Visualmente é possível verificar que os CP controle possuem deformação máxima da ordem de 2,4%, enquanto os CP do CP32 foi verificada deformação máxima significativamente menor, de aproximadamente 1,0% e o CP complementar tem um valor intermediário, de aproximadamente 1,5%.

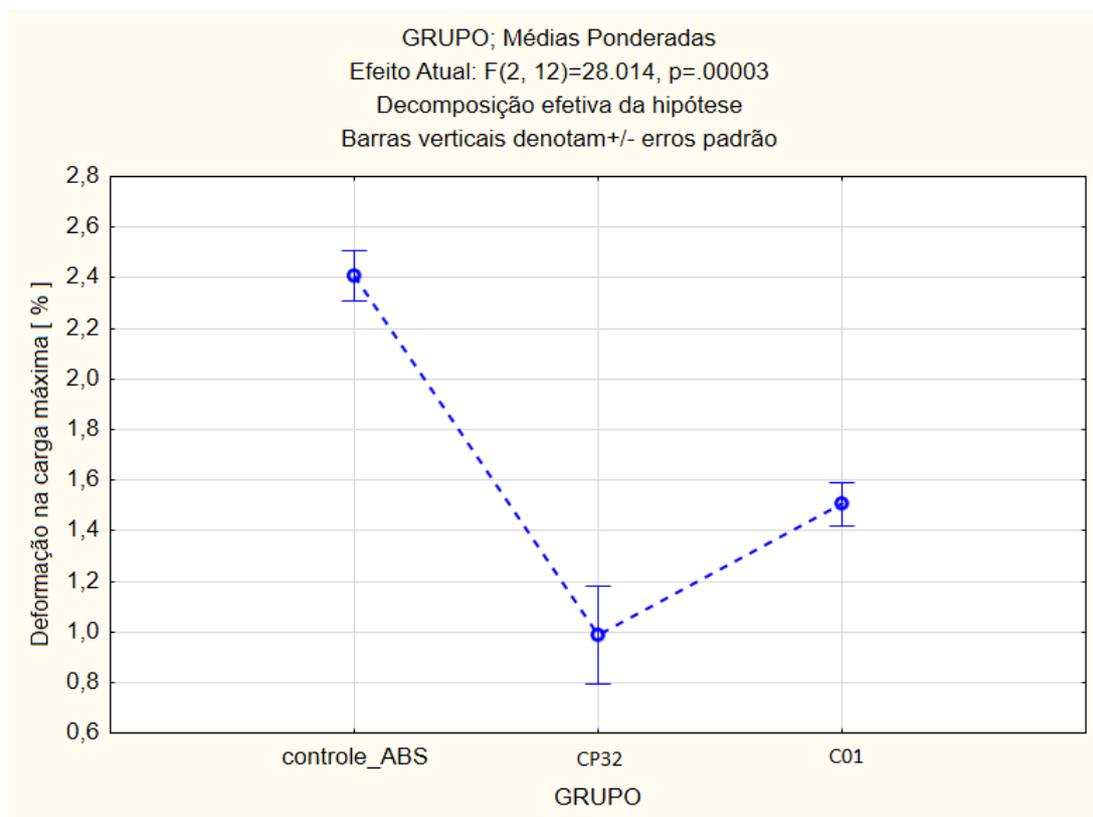


Figura 4.61 – Análise da interação entre os grupos.

Utilizando a Tabela 4.37, pode-se verificar que a deformação máxima os CP são estatisticamente diferentes entre si, uma vez que a  $H_0$  é rejeitada em todas as combinações. Conclui-se a partir do teste complementar que a alteração feita no CP é significativa para o experimento (a deformação máxima aumentou em em torno de 0,5%).

Tabela 4.37 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C01 x CP32

Teste LSD; variável Deformação na carga máxima [ % ] (C01 X CP32) Probabilidades para Testes Post Hoc Erro: Entre MS = .09227, df = 12.000				
Cell No.	GRUPO	{1}	{2}	{3}
		2.4076	.98660	1.5062
1	controle_ABS		0,000008	0,000521
2	CP32	0,000008		0,019143
3	C01	0,000521	0,019143	

#### 4.4.2 CP Controle x C02 x C03 x C04 x CP 28

O comparativo foi feito utilizando os CP da Figura 4.62, abaixo:

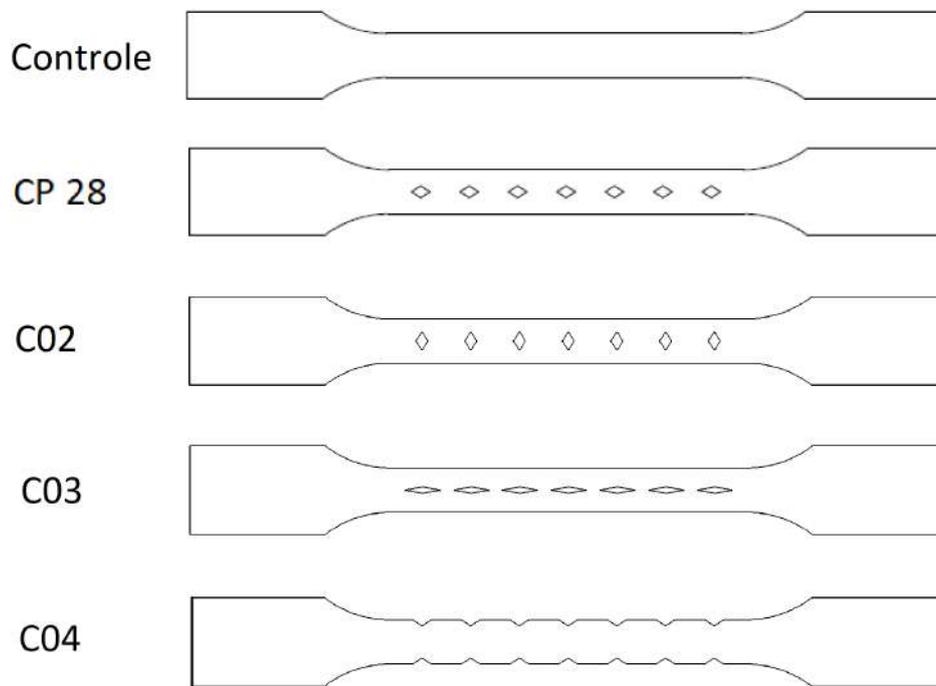


Figura 4.62 – CP Controle, CP28, C02, C03 e C04

##### 4.4.2.1 Rigidez

Iniciando a análise pela Figura 4.63, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma, até então aparentemente, de forma homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição aproximadamente igual dos pontos acima e abaixo do eixo. Isto indica possivelmente o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

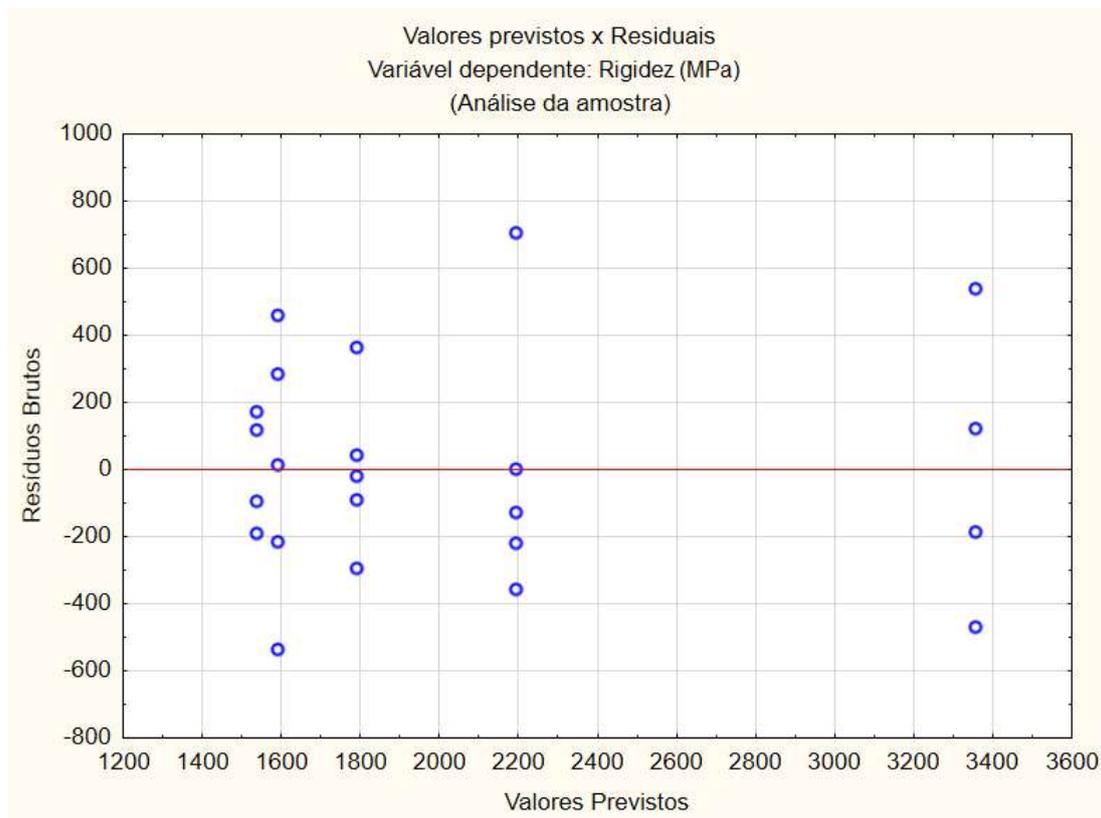


Figura 4.63 – Gráfico dos valores previstos x resíduos.

A ( $H_0$ ) foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.64, sendo confirmada a distribuição normal dos resíduos:

- Lilliefors -  $p = 0,2$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,77$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;

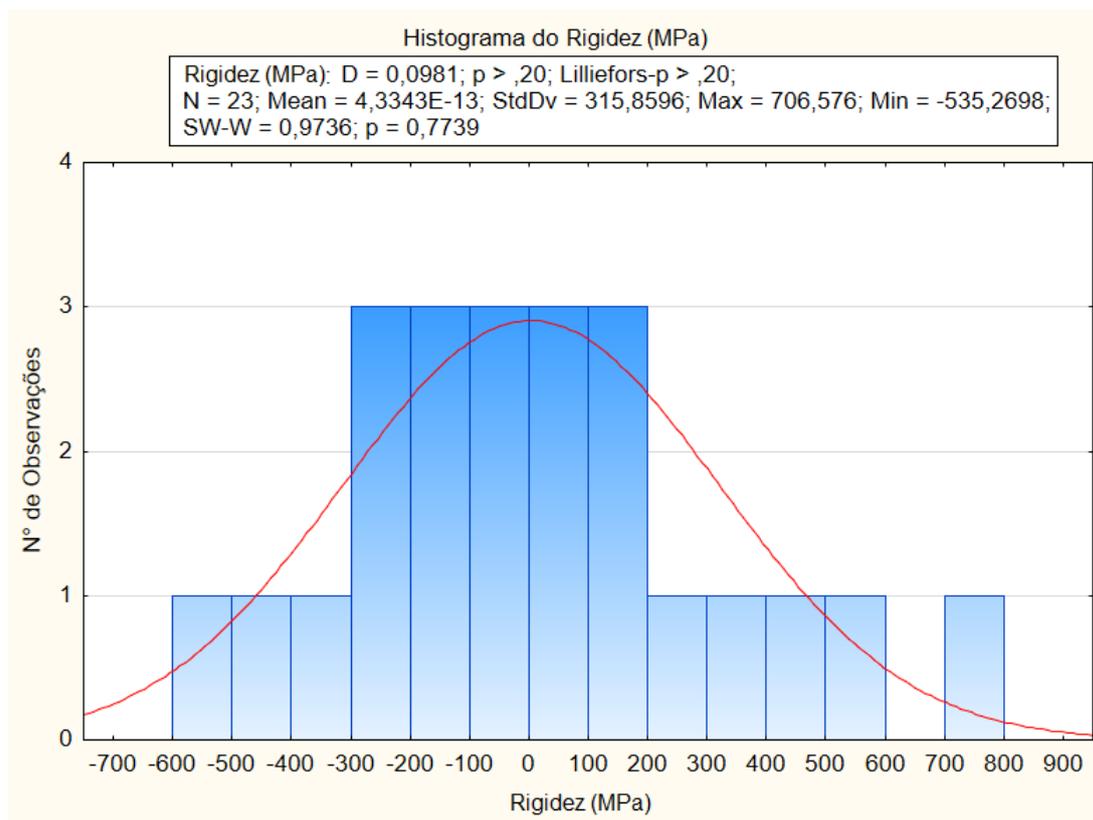


Figura 4.64 – Histograma dos resíduos.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene’s (tabelas 4.38 e 4.39), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Como pode ser verificado nas tabelas, em ambos os testes  $p > 0,05$ , confirmando a  $H_0$  apresentada acima.

Tabela 4.38 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa)

Testes de Homogeneidade de Variâncias (C02 X C03 X C04 X CP28)					
Efeito: GRUPO					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Rigidez (MPa)	6,255936	0,310677	3,228357	4	0,520363

Tabela 4.39 – Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa)

Teste de Levene's para Homogeneidade de Variâncias (C02 X C03 X C04 X CP28) Effect: GRUPO Graus de Liberdade para todos os F's: 4, 18				
	MS Effect	MS Error	F	p
Rigidez (MPa)	31617,07	38475,13	0,821753	0,528163

A partir do gráfico da Figura 4.65 é realizada a análise da rigidez (eixo y) em cada grupo de CP. Visualmente é possível verificar que os CP controle possuem rigidez da ordem de  $3400\text{MPa}$ , significativamente maior que os CP com defeitos inseridos (em torno de  $1500\text{MPa}$  a aproximadamente  $2300\text{MPa}$ ).

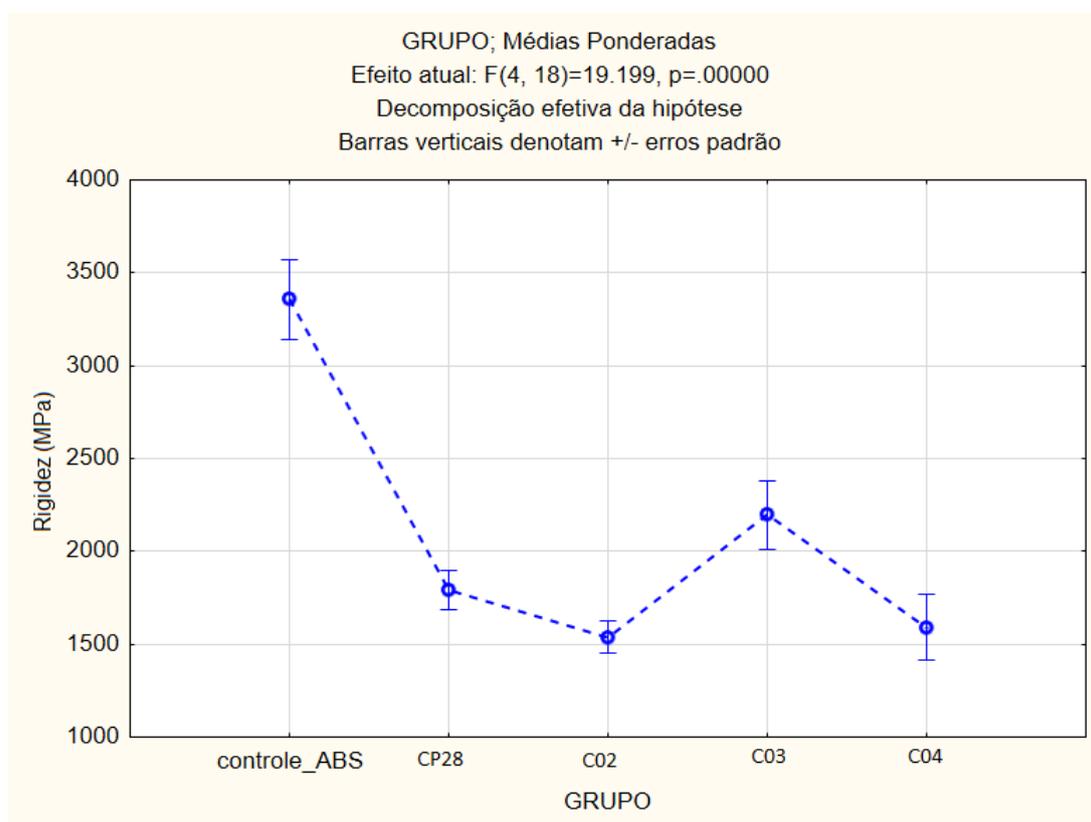


Figura 4.65 – Análise da interação entre os grupos.

Utilizando a Tabela 4.40, pode-se verificar que os CP controle tem rigidez de fato diferente dos outros grupos. É possível analisar também que o CP28 é estatisticamente igual a todos os CP complementares, em menor grau ao CP C03 ( $p = 0,08$ ). Isto significa que mudar a posição do

defeito, “esticar” o defeito ou o defeito não estar no centro do CP, em teoria não influencia na rigidez, embora no caso do defeito esticado, para efeito de análise mais aprofundada, por prudência, pode-se considerar que há influência.

Para as demais análises, têm-se o seguinte:

- O CP C02 tem grande similaridade ao CP C04 ( $p = 0,83$ ), ou seja, não faz diferença o defeito estar concentrado nas bordas do CP ou rotacionado em relação ao original.
- Diferentemente da comparação entre os CP C03 e CP28 (neste caso desconsiderando a análise mais prudente), o CP C03 não possui qualquer similaridade com os demais, o que significa que “esticar” o defeito tem influência direta na rigidez, nesse caso, rigidez maior.

Tabela 4.40 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C02 x C03 x C04 x CP28

Teste LSD; variável Rigidez (MPa) (C02 X C03 X C04 X CP28)						
Probabilidades para Testes Post Hoc						
Erro: Entre MS = 1219E2, df = 18.000						
Cell No.	GRUPO	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		3356.4	1790.6	1538.5	2195.4	1591.0
1	controle_ABS		0,000003	0,000001	0,000102	0,000001
2	CP28	0,000003		0,296133	0,083416	0,378040
3	C02	0,000001	0,296133		0,011734	0,825354
4	C03	0,000102	0,083416	0,011734		0,013552
5	C04	0,000001	0,378040	0,825354	0,013552	

#### 4.4.2.2 Tensão Máxima

Iniciando a análise pela Figura 4.66, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma, até então aparentemente, de forma homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição aproximadamente igual dos pontos acima e abaixo do eixo. Isto indica possivelmente o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

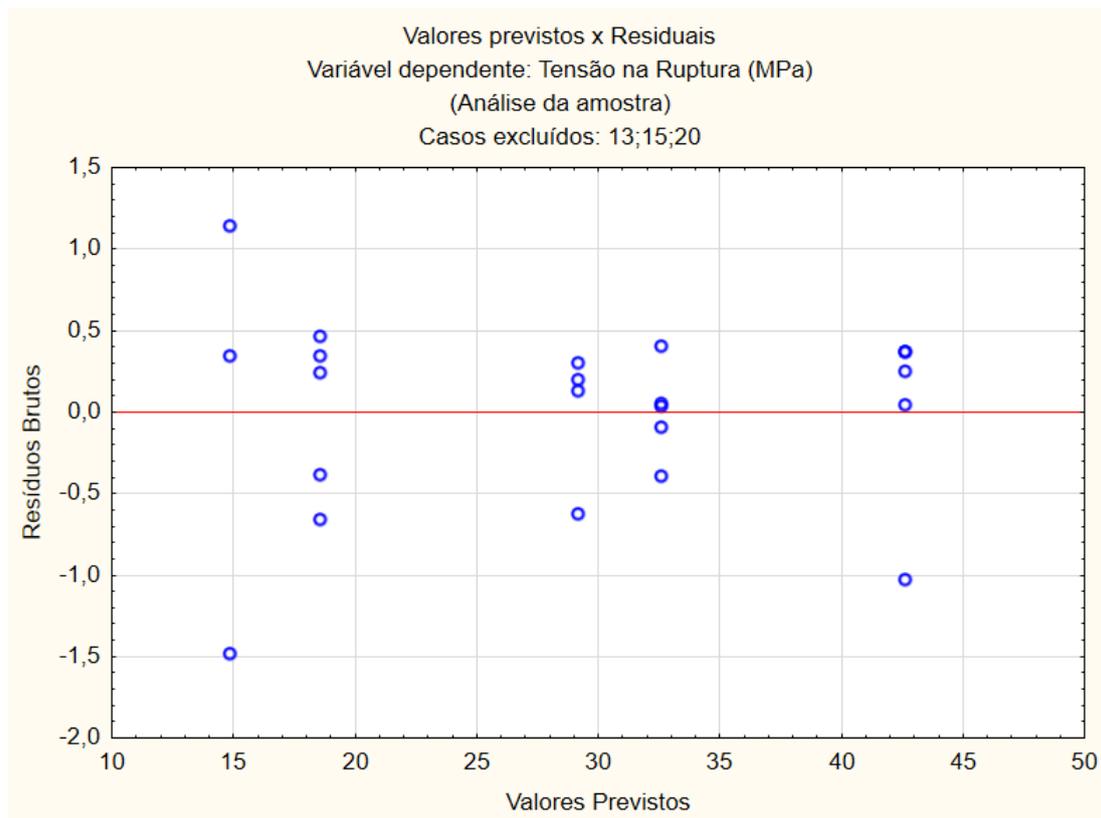


Figura 4.66 – Gráfico dos valores previstos x resíduos.

A  $H_0$  foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.67, sendo confirmada a distribuição normal dos resíduos:

- Lilliefors -  $p = 0,05$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,045$ : a  $H_0$  tecnicamente foi rejeitada, porém, com um valor de  $p$  muito próximo do limite, sendo, por prudência de análise, aceita como não rejeitada. Apesar desta consideração, a  $H_0$  não tinha sido rejeitada em outro teste, o que já seria suficiente;

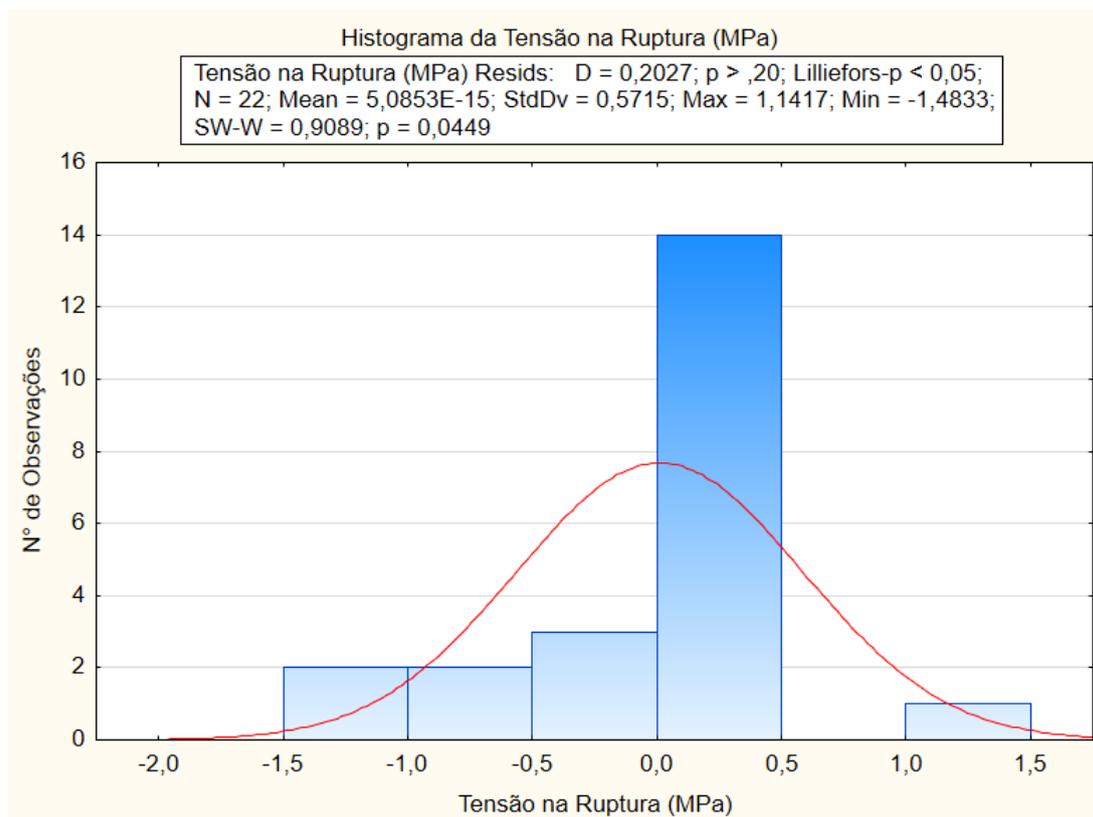


Figura 4.67 – Histograma dos resíduos.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene’s (tabelas 4.41 e 4.42), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Como pode ser verificado nas tabelas, em ambos os testes  $p > 0,05$ , confirmando a  $H_0$  apresentada acima.

Tabela 4.41 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa)

Testes de Homogeneidade de Variâncias (C02 X C03 X C04 X CP28)					
Efeito: GRUPO					
Casos excluídos: 13;15;20					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Tensão na Ruptura (MPa)	21,74424	0,679327	7,413952	4	0,115564

Tabela 4.42 – Teste Levene’s para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa)

Teste de Levene’s para Homogeneidade de Variâncias (C02 X C03 X C04 X CP28) Efeito: GRUPO Graus de Liberdade para todos os F’s:: 4, 17 Casos excluídos: 13;15;20				
	MS Effect	MS Error	F	p
Tensão na Ruptura (MPa)	0,316958	0,095348	3,324218	0,034821

A partir do gráfico da Figura 4.68 é realizada a análise da tensão máxima (eixo y) em cada grupo de CP. Visualmente é possível verificar que os CP controle possuem tensão máxima da ordem de 43MPa, significativamente maior que os CP com defeitos inseridos (em torno de 15 MPa a aproximadamente 33 Mpa).

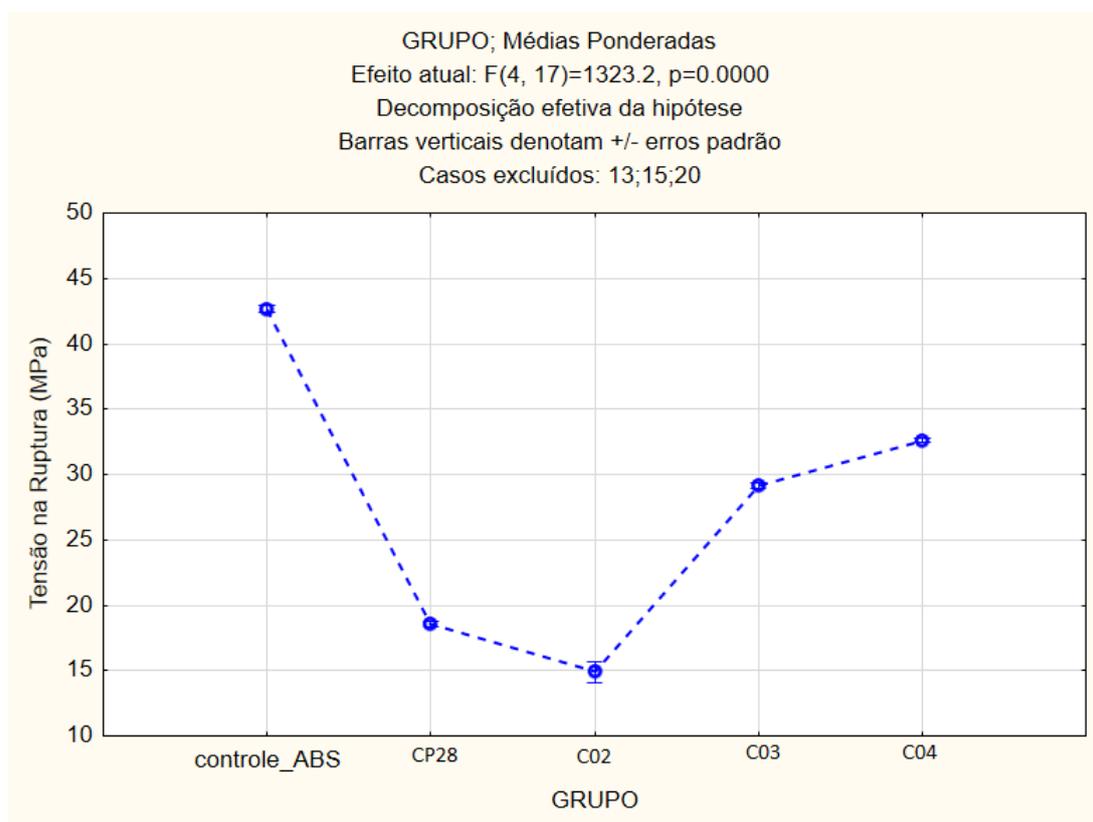


Figura 4.68 – Análise da interação entre os grupos.

Utilizando a Tabela 4.43, pode-se verificar que os CP controle tem tensão máxima de fato diferente dos outros grupos. É possível analisar também que

todos os experimentos são diferentes entre si ( $H_0 < 0,05$ ), o que significa que a alteração dos defeitos influenciam diretamente na tensão máxima.

Tabela 4.43 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C02 x C03 x C04 x CP 28

Teste LSD; variável Tensão na Ruptura (MPa) (C02 X C03 X C04 X CP28)						
Probabilidades para Testes Post Hoc						
Erro: Entre MS = .40351, df = 17.000						
Casos excluídos: 13;15;20						
Cell No.	GRUPO	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		42.655	18.585	14.883	29.175	32.620
1	controle_ABS		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
2	CP28	0,000000		0,000000	0,000000	0,000000
3	C02	0,000000	0,000000		0,000000	0,000000
4	C03	0,000000	0,000000	0,000000		0,000000
5	C04	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	

#### 4.4.2.3 Deformação Máxima

Iniciando a análise pela Figura 4.69, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma, até então aparentemente, de forma homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição aproximadamente igual dos pontos acima e abaixo do eixo. Isto indica possivelmente o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

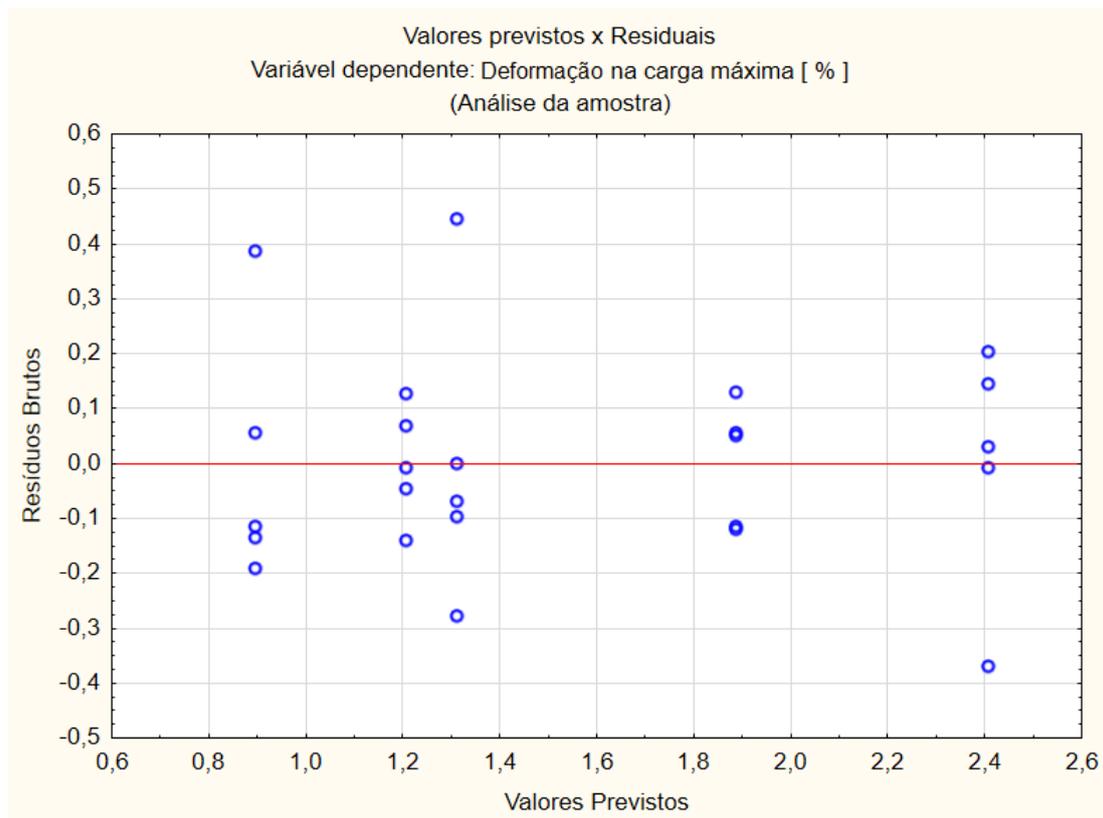


Figura 4.69 – Gráfico dos valores previstos x resíduos.

A  $H_0$  foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.70, sendo confirmada a distribuição normal dos resíduos:

- Lilliefors -  $p = 0,2$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,47$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;

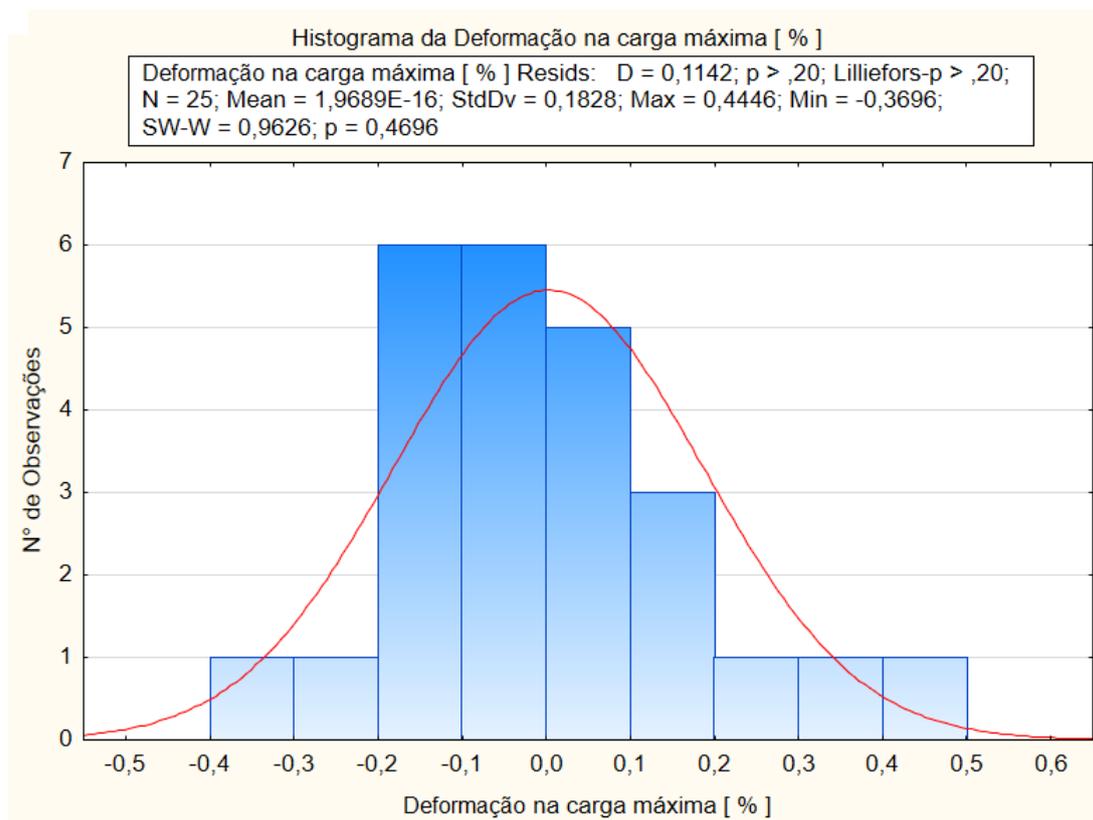


Figura 4.70 – Histograma dos resíduos.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene’s (tabelas 4.44 e 4.45), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Tabela 4.44 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%)

Testes de Homogeneidade de Variâncias (C02 X C03 X C04 X CP28)					
Efeito: GRUPO					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Deformação na carga máxima [%]	6,838730	0,360654	4,992229	4	0,288096

Tabela 4.45 – Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%)

Teste de Levene's para Homogeneidade de Variâncias (C02 X C03 X C04 X CP28)				
Efeito: GRUPO				
Graus de Liberdade para todos os F's: 4, 20				
	MS Effect	MS Error	F	p
Deformação na carga máxima [ % ]	0,011032	0,014972	0,736848	0,577752

A partir do gráfico da Figura 4.71 é realizada a análise da deformação máxima (eixo y) em cada grupo de CP. Visualmente é possível verificar que os CP controle possuem deformação máxima da ordem de 2,4%, significativamente maior que os CP com defeitos inseridos (em torno de 0,9% a aproximadamente 1,9%).

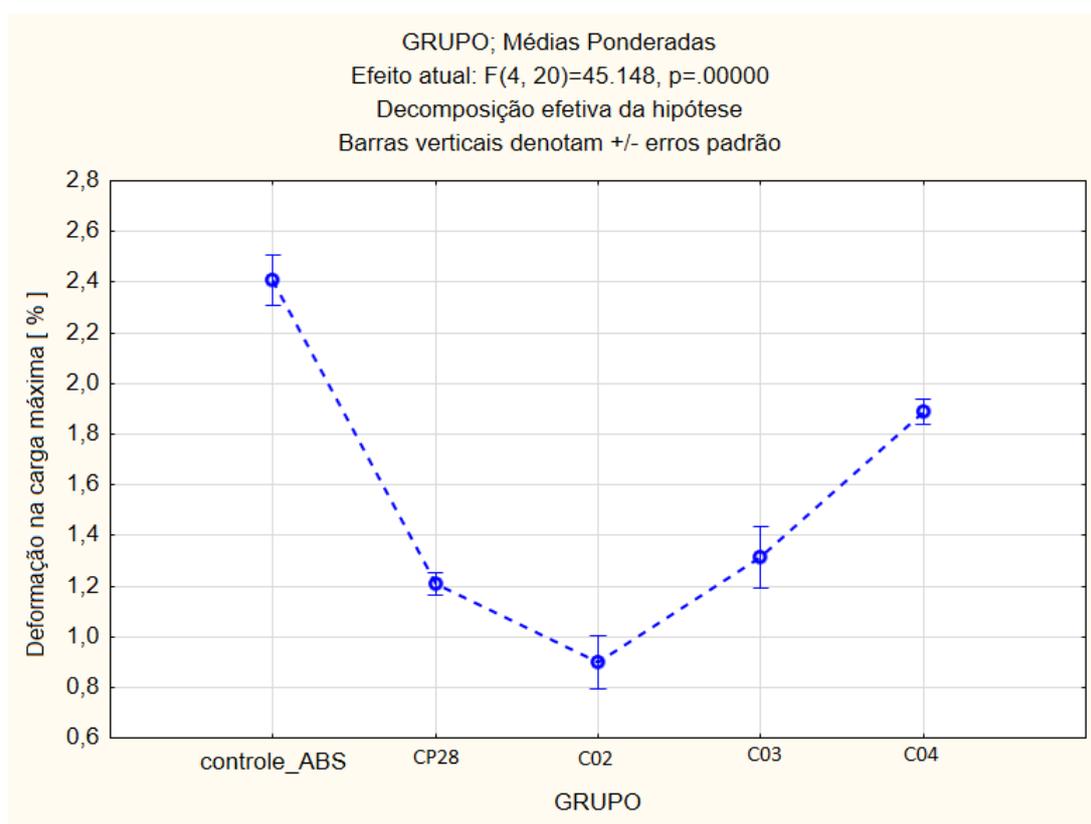


Figura 4.71 – Análise da interação entre os grupos.

Utilizando a Tabela 4.46, utilizando a  $H_0$  de que não há diferença entre os pontos analisados, pode-se verificar que a deformação máxima os CP são estatisticamente diferentes entre si em praticamente todos os pontos,

exceto entre o CP 28 e C03, uma vez que a  $H_0$  é rejeitada em todas as outras combinações. Conclui-se a partir do teste complementar que:

- Em relação aos CP 28 e C03 o fato de “esticar” o defeito não influencia na deformação máxima;
- Nos outros casos, em que a  $H_0$  é rejeitada, a alteração feita no CP influencia diretamente na deformação máxima.

Tabela 4.46 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C02 X C03 X C04 X CP28

Teste LSD; variável Deformação na carga máxima [ % ] (C02 X C03 X C04 X CP28)						
Probabilidades para Testes Post Hoc						
Erro: Entre MS = = .04011, df = 20.000						
Cell No.	GRUPO	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		2.4076	1.2076	.89680	1.3124	1.8866
1	controle_ABS		0,000000	0,000000	0,000000	0,000540
2	CP28	0,000000		0,023437	0,417804	0,000030
3	C02	0,000000	0,023437		0,003736	0,000000
4	C03	0,000000	0,417804	0,003736		0,000203
5	C04	0,000540	0,000030	0,000000	0,000203	

#### 4.4.3 CP Controle x C05 x C06 x C07 x CP32

O comparativo foi feito utilizando os CP da Figura 4.72, abaixo:

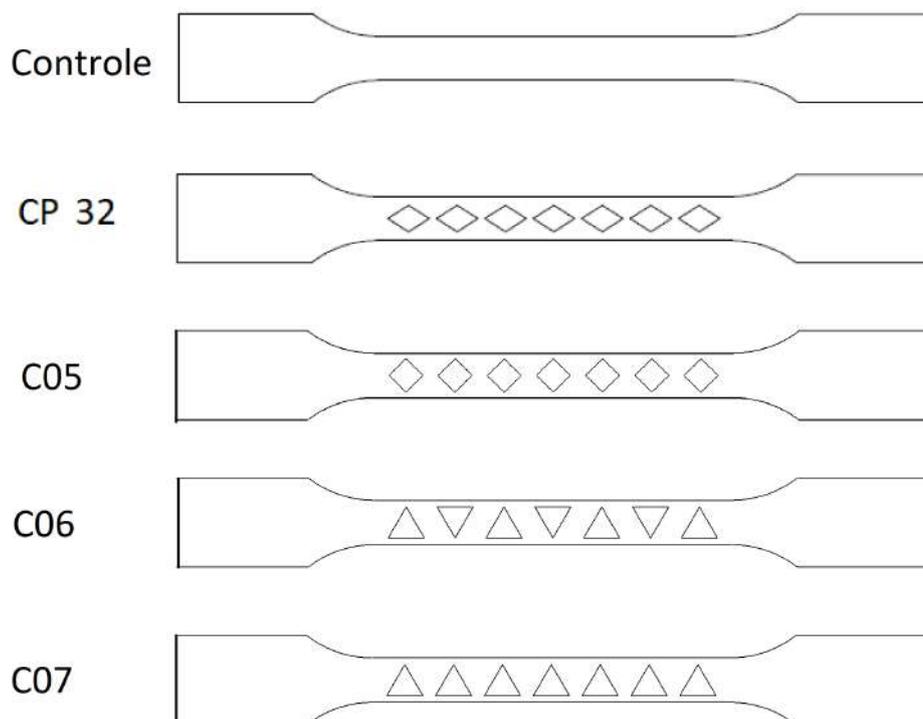


Figura 4.72 – CP Controle, CP32, C05, C06 e C07

#### 4.4.3.1 Rigidez

Iniciando a análise pela Figura 4.73, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma, até então aparentemente, de forma homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição aproximadamente igual dos pontos acima e abaixo do eixo. Isto indica possivelmente o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

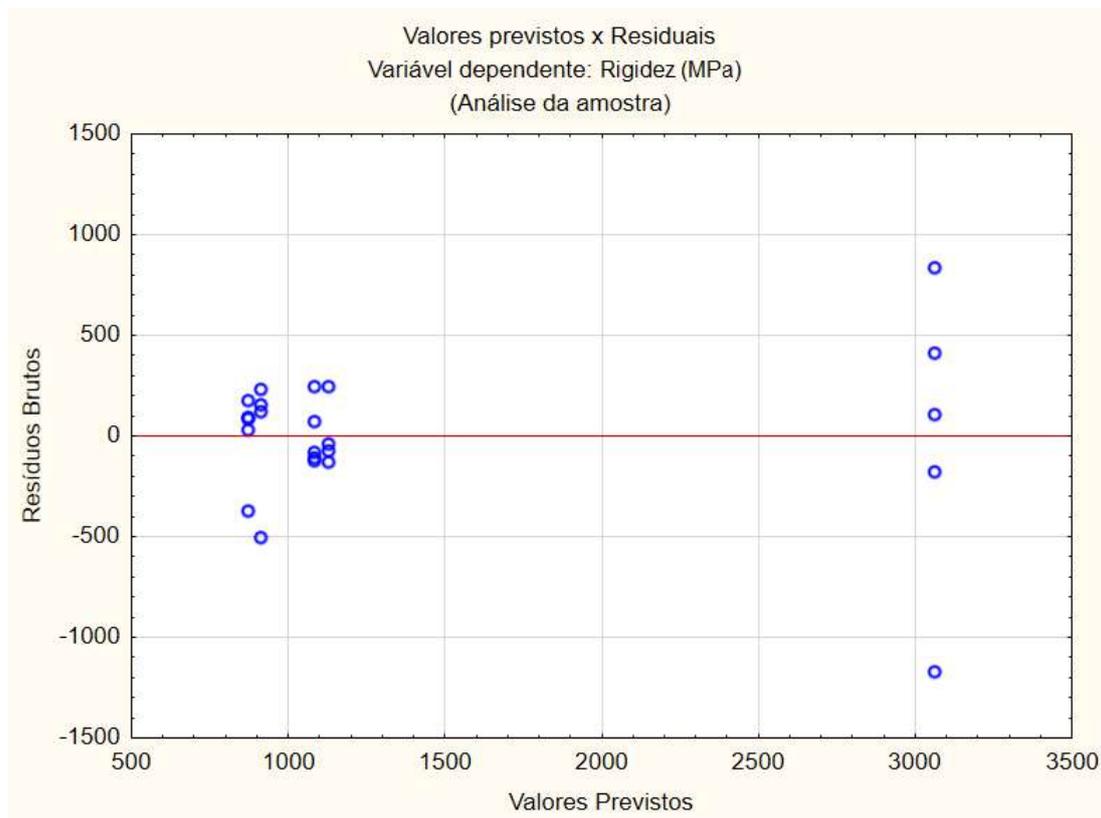


Figura 4.73 – Gráfico dos valores previstos x resíduos.

A ( $H_0$ ) foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.74, sendo confirmada a distribuição normal dos resíduos:

- Lilliefors -  $p = 0,05$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,011$ : a  $H_0$  foi rejeitada, porém, como no teste acima não foi, a condição de normalidade é satisfeita;

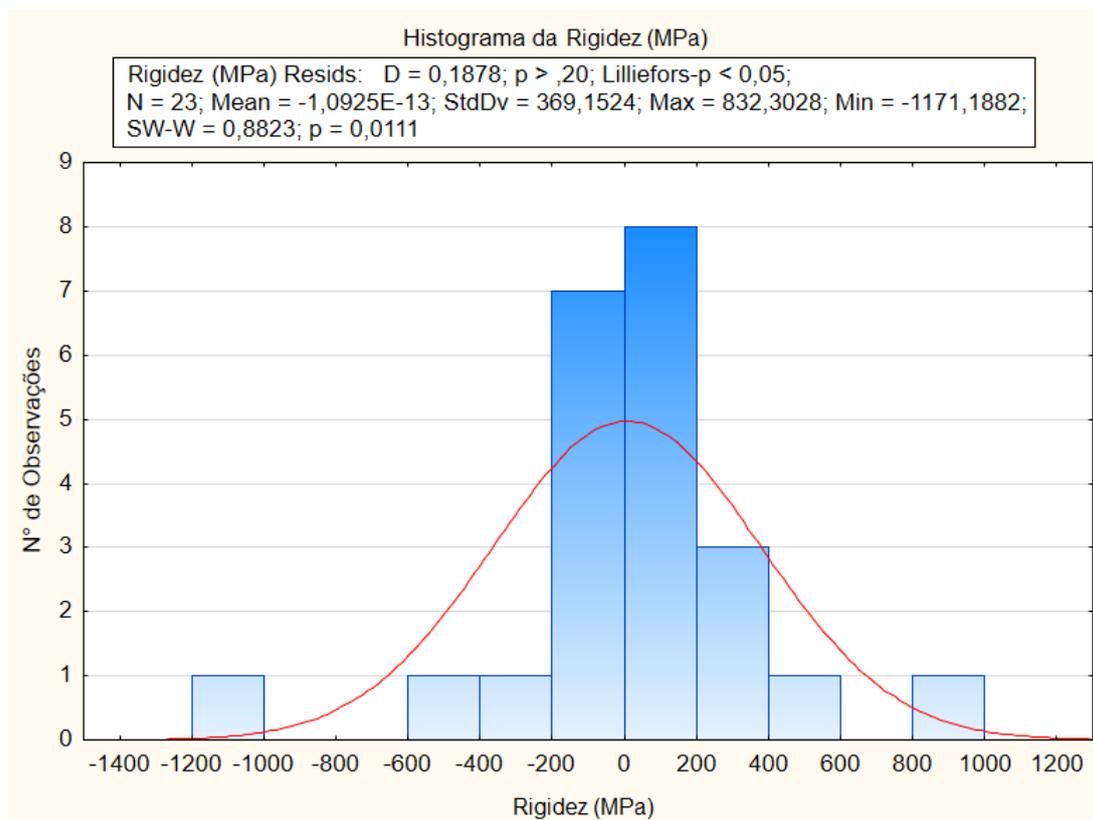


Figura 4.74 – Histograma dos resíduos.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene’s (tabelas 4.47 e 4.48), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Como pode ser verificado nas tabelas, o teste Cochran-Bartlett rejeita a  $H_0$ , porém o teste de Levene’s não rejeita ( $p > 0,05$ ), sendo suficiente para aceitação da premissa de homecedasticidade.

Tabela 4.47 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa)

Testes de Homogeneidade de Variâncias (C05 X C06 X C07 X CP32)					
Efeito: GRUPO					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Rigidez (MPa)	23,22051	0,724348	12,76720	4	0,012471

Tabela 4.48 – Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa)

Teste de Levene's para Homogeneidade de Variâncias (C05 X C06 X C07 X CP32)				
Efeito: GRUPO				
Graus de Liberdade para todos os F's: 4, 18				
	MS Effect	MS Error	F	p
Rigidez (MPa)	152536,5	57354,72	2,659528	0,066491

A partir do gráfico da Figura 4.75 é realizada a análise da rigidez (eixo y) em cada grupo de CP (eixo x). Visualmente é possível verificar que os CP controle possuem rigidez da ordem de  $3400\text{MPa}$ , significativamente maior que os CP com defeitos inseridos (em torno de  $900\text{MPa}$  a aproximadamente  $1100\text{MPa}$ ).

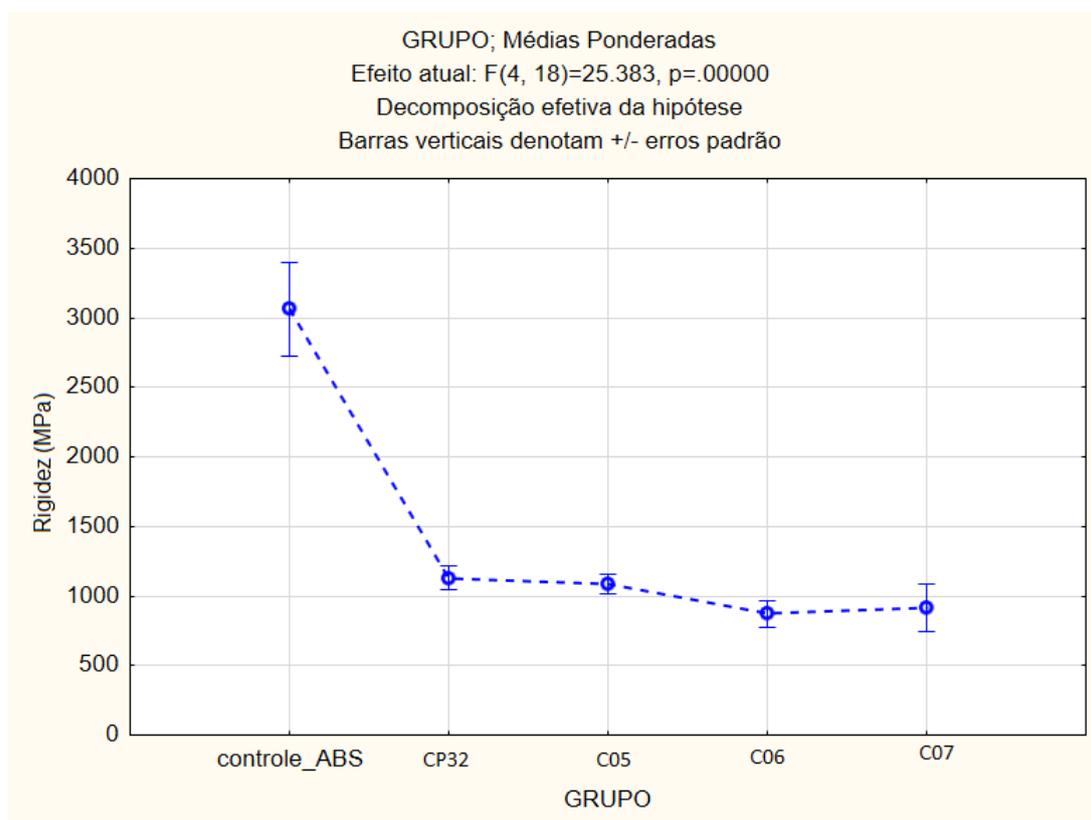


Figura 4.75 – Análise da interação entre os grupos.

Utilizando a Tabela 4.49, pode-se verificar que os CP controle tem rigidez de fato diferente dos outros grupos. É possível analisar também que, exceto o CP controle, todos as outras interações não rejeitam a  $H_0$ ,

o que significa que todos os outros CP são estatisticamente iguais entre si. Apreende-se disto que a alteração da geometria do defeito que simula uma trinca não é significativa. Pelos valores de  $p$  verifica-se uma maior proximidade entre os CP com mesma quantidade de vértices, no caso, o CP32 x C05 ( $p = 0,88$ ) e C06 x C07 ( $p = 0,89$ ).

Tabela 4.49 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C05 x C06 x C07 x CP 32

Teste LSD; variável Rigidez (MPa) (C05 X C06 X C07 X CP32)						
Probabilidades para Testes Post Hoc						
Erro: Entre MS = 1666E2, df = 18.000						
Cell No.	GRUPO	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		3063.6	1128.4	1086.7	873.55	912.05
1	controle_ABS		0,000001	0,000000	0,000000	0,000000
2	CP32	0,000001		0,880630	0,364203	0,463099
3	C05	0,000000	0,880630		0,419699	0,531522
4	C06	0,000000	0,364203	0,419699		0,889712
5	C07	0,000000	0,463099	0,531522	0,889712	

#### 4.4.3.2 Tensão Máxima

Iniciando a análise pela Figura 4.76, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma, até então aparentemente, de forma homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição aproximadamente igual dos pontos acima e abaixo do eixo. Isto indica possivelmente o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

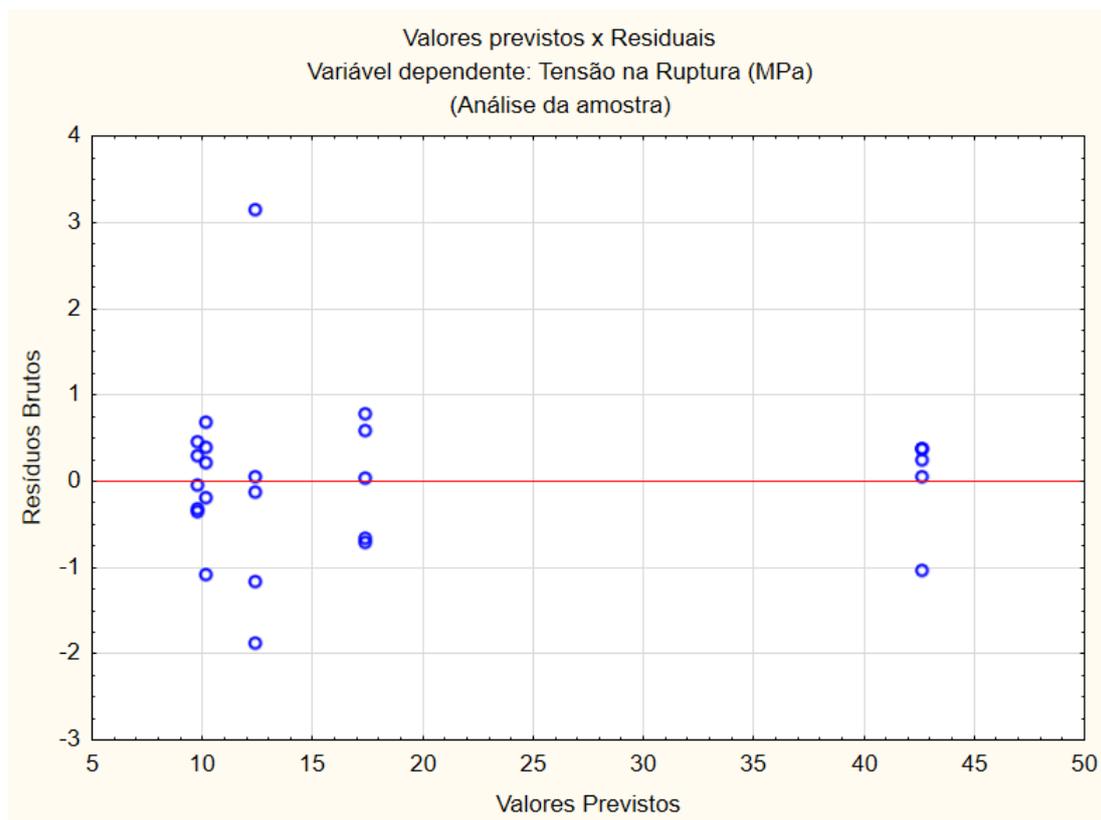


Figura 4.76 – Gráfico dos valores previstos x resíduos.

A  $H_0$  foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.77, sendo confirmada a distribuição normal dos resíduos:

- Lilliefors -  $p = 0,15$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,0057$ : a  $H_0$  tecnicamente foi rejeitada. Apesar desta consideração, a  $H_0$  não foi rejeitada em outro teste, suficiente para aceitação do critério;

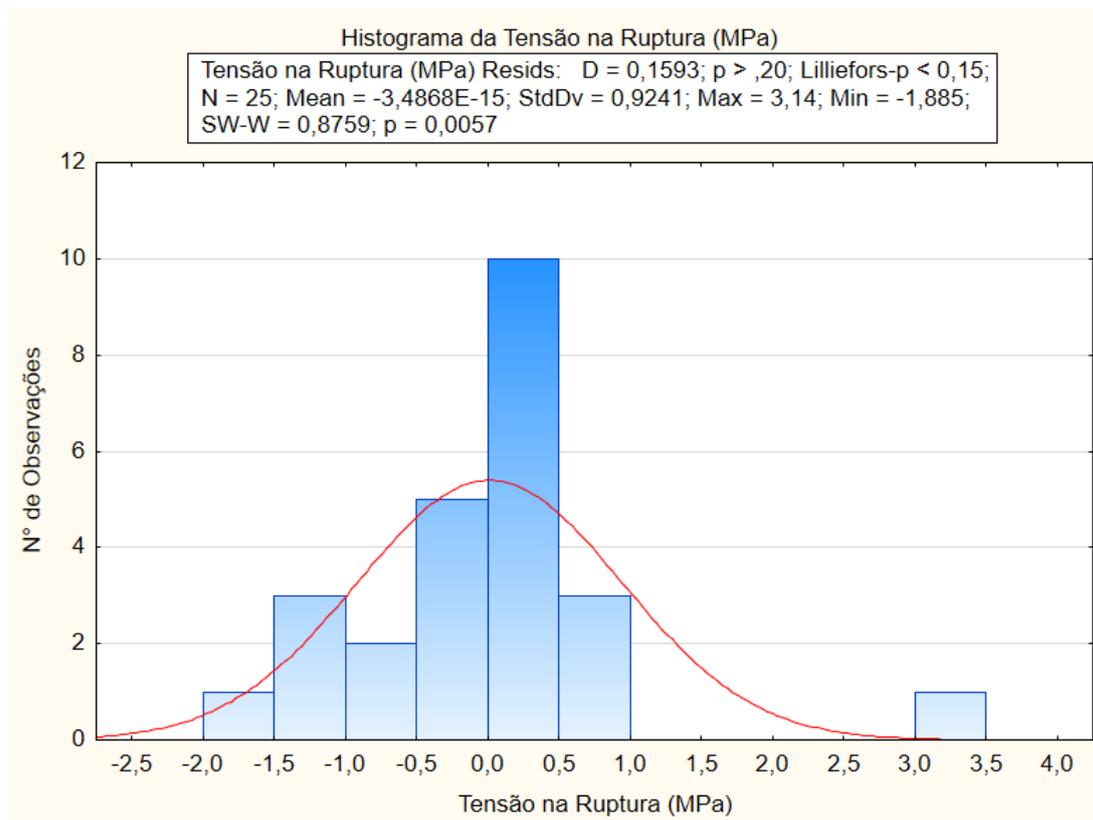


Figura 4.77 – Histograma dos resíduos.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene’s (tabelas 4.50 e 4.51), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Como pode ser verificado nas tabelas, no teste de Cochran-Bartlett a  $H_0$  foi rejeitada, porém não foi rejeitada no teste de Levene’s. Novamente, uma vez não rejeitado em um dos testes, o critério é considerado aceito.

Tabela 4.50 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa)

Testes de Homogeneidade de Variâncias (C05 X C06 X C07 X CP32)					
Effect: GRUPO					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Tensão na Ruptura (MPa)	28,25669	0,721005	12,33459	4	0,015029

Tabela 4.51 – Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa)

Teste de Levene's para Homogeneidade de Variâncias (C05 X C06 X C07 X CP32)				
Efeito: GRUPO				
Graus de Liberdade para todos os F's: 4, 20				
	MS Effect	MS Error	F	p
Tensão na Ruptura (MPa)	0,735704	0,413182	1,780583	0,172368

A partir do gráfico da Figura 4.78 é realizada a análise da tensão máxima (eixo y) em cada grupo de CP. Visualmente é possível verificar que os CP controle possuem tensão máxima da ordem de  $43MPa$ , significativamente maior que os CP com defeitos inseridos (em torno de  $10MPa$  a aproximadamente  $18MPa$ ).

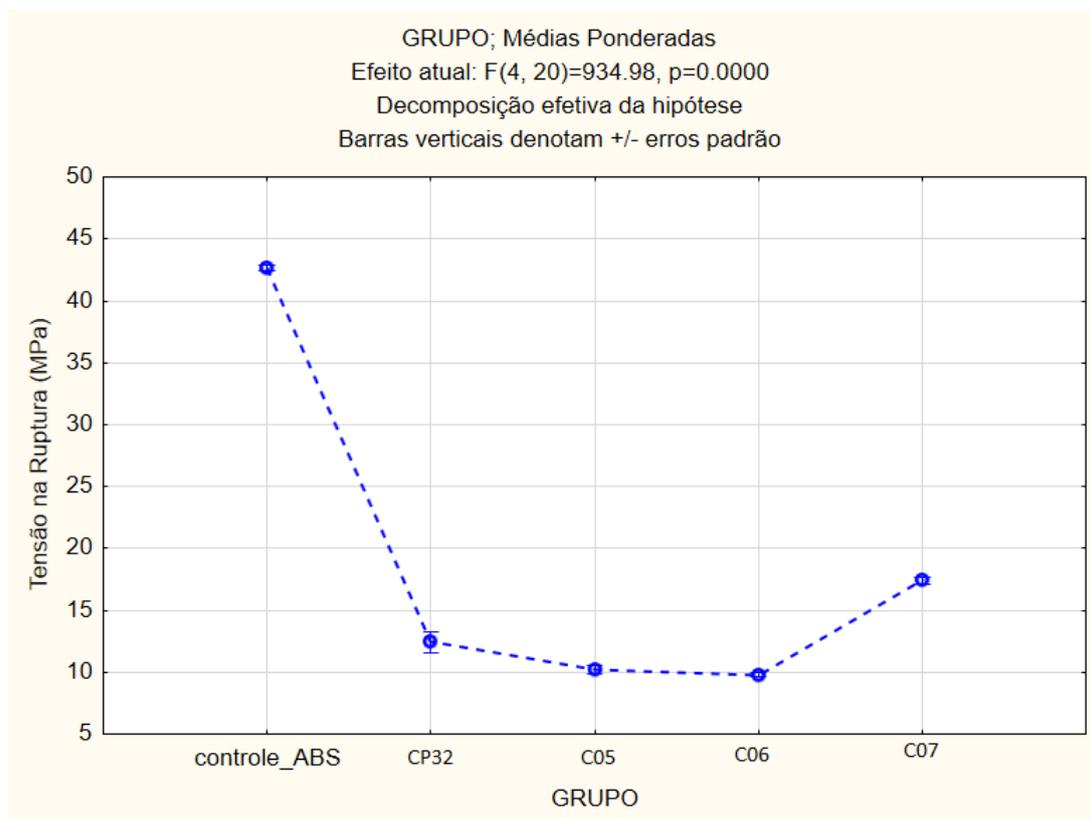


Figura 4.78 – Análise da interação entre os grupos.

Utilizando a Tabela 4.52, pode-se verificar que os CP controle tem tensão máxima de fato diferente dos outros grupos. É possível analisar também que todos os experimentos são diferentes entre si ( $p < 0,05$ ), exceto no caso dos CP C05 x C06 ( $p = 0,53$ ).

Tabela 4.52 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C05 x C06 x C07 x CP 32

Teste LSD; variável Tensão na Ruptura (MPa) (C05 X C06 X C07 X CP32)						
Probabilidades para Testes Post Hoc						
Erro: Entre MS = 1.0248, df = 20.000						
Cell No.	GRUPO	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		42.655	12.435	10.190	9.7800	17.395
1	controle_ABS		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
2	CP32	0,000000		0,002222	0,000499	0,000000
3	C05	0,000000	0,002222		0,529206	0,000000
4	C06	0,000000	0,000499	0,529206		0,000000
5	C07	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	

#### 4.4.3.3 Deformação Máxima

Iniciando a análise pela Figura 4.79, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma, até então aparentemente, de forma homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição aproximadamente igual dos pontos acima e abaixo do eixo. Isto indica possivelmente o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

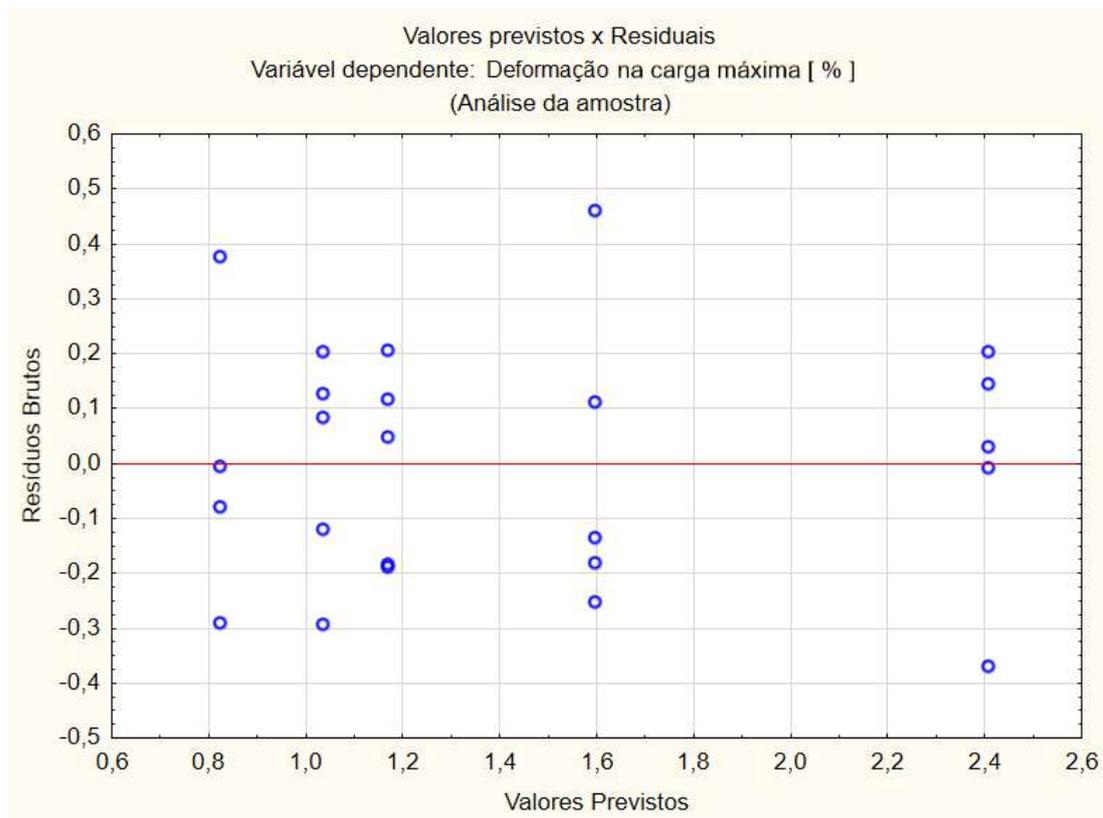


Figura 4.79 – Gráfico dos valores previstos x resíduos.

A  $H_0$  foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.80, sendo confirmada a distribuição normal dos resíduos:

- Lilliefors -  $p = 0,2$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,76$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;

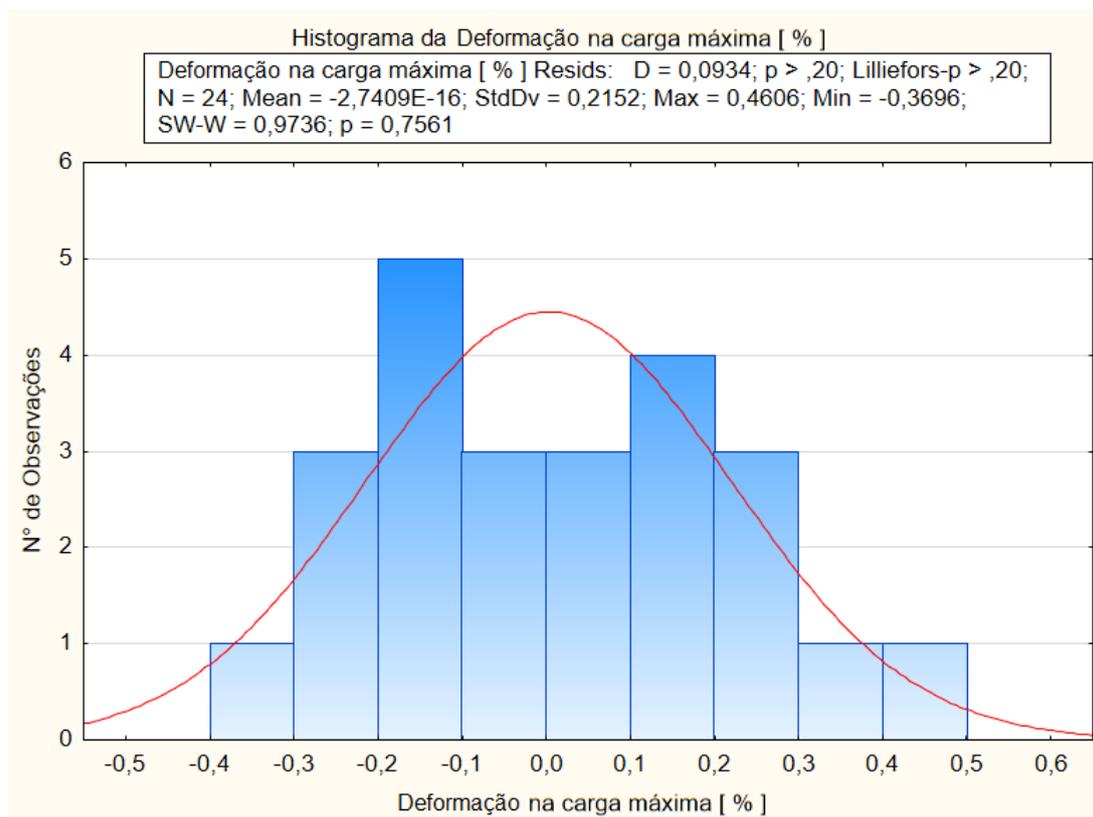


Figura 4.80 – Histograma dos resíduos.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene’s (tabelas 4.53 e 4.54), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Tabela 4.53 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%)

Testes de Homogeneidade de Variâncias (C05 X C06 X C07 X CP32)					
Efeito: GRUPO					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Deformação na carga máxima [ % ]	2,649873	0,297813	1,175508	4	0,882114

Tabela 4.54 – Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%)

Teste de Levene's para Homogeneidade de Variâncias (C05 X C06 X C07 X CP32)				
Efeito: GRUPO				
Graus de Liberdade para todos os F's: 4, 20				
	MS Effect	MS Error	F	p
Deformação na carga máxima [ % ]	0,005434	0,015849	0,342846	0,845637

A partir do gráfico da Figura 4.81 é realizada a análise da deformação máxima (eixo y) em cada grupo de CP. Visualmente é possível verificar que os CP controle possuem deformação máxima da ordem de 2,4%, significativamente maior que os CP com defeitos inseridos (em torno de 0,8% a aproximadamente 1,6%).

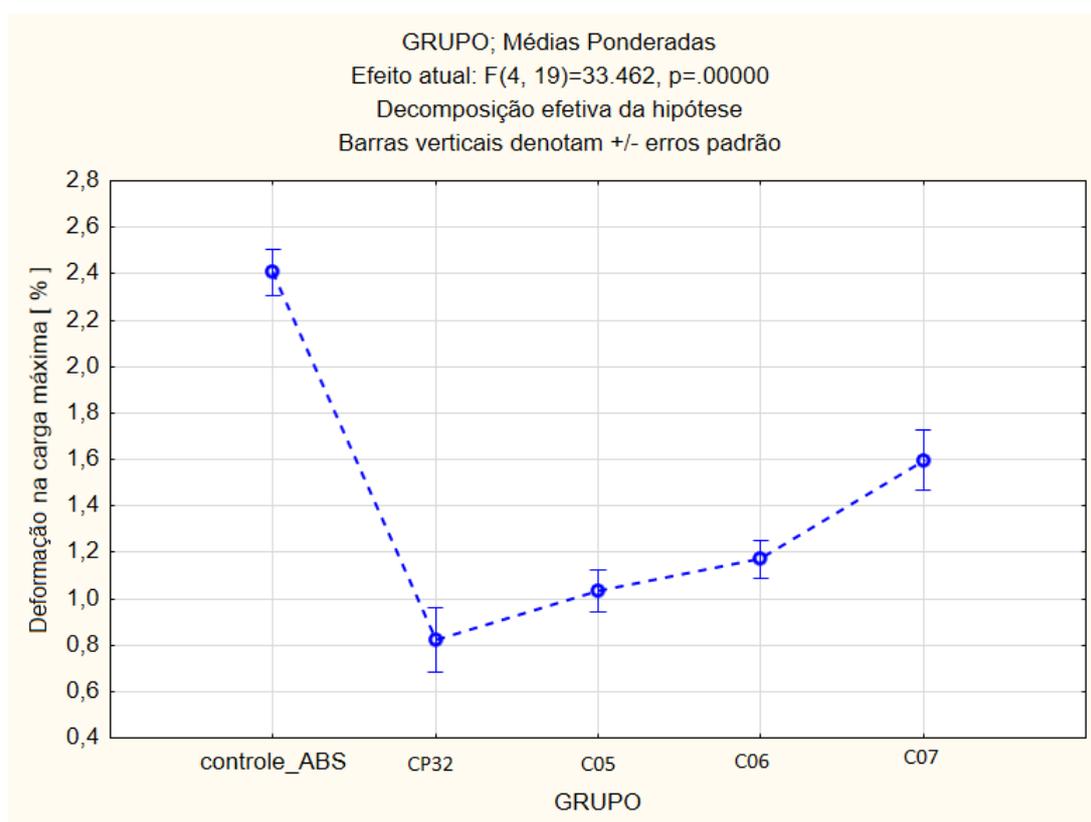


Figura 4.81 – Análise da interação entre os grupos.

Utilizando a Tabela 4.55, utilizando a  $H_0$  de que não há diferença entre os pontos analisados, pode-se verificar que a deformação máxima os CP são estatisticamente diferentes entre si em praticamente todos os pontos,

exceto entre os CP32 x C05 e C05 x C06, uma vez que a  $H_0$  é rejeitada em todas as outras combinações. Conclui-se a partir do teste complementar que:

- Em relação aos CP32 e C05 ( $p = 0,20$ ) o fato do defeito alterar o formato de losango para quadrado não foi significativo para a deformação máxima;
- Em relação aos CP C05 e C06 ( $p = 0,38$ ) não foi significativa a alteração de um defeito quadrado para triangular, considerando os triângulos invertidos entre si. Já em relação aos triângulos todos na mesma posição (CP C07) foi significativo.
- Nos outros casos, em que a  $H_0$  é rejeitada, a alteração feita no CP influencia diretamente na deformação máxima.

Tabela 4.55 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C05 X C06 X C07 X CP32

Teste LSD; variável Deformação na carga máxima [%] (C05 X C06 X C07 X CP32)						
Probabilidades para Testes Post Hoc						
Erro: Entre MS = .05604, df = 19.000						
Cell No.	GRUPO	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}
		2.4076	.82375	1.0362	1.1704	1.5974
1	controle_ABS		0,000000	0,000000	0,000000	0,000032
2	CP32	0,000000		0,196749	0,041796	0,000106
3	C05	0,000000	0,196749		0,381291	0,001361
4	C06	0,000000	0,041796	0,381291		0,010198
5	C07	0,000032	0,000106	0,001361	0,010198	

#### 4.4.4 CP Controle x C08 x CP16

O comparativo foi feito utilizando os CP da Figura 4.82, abaixo:

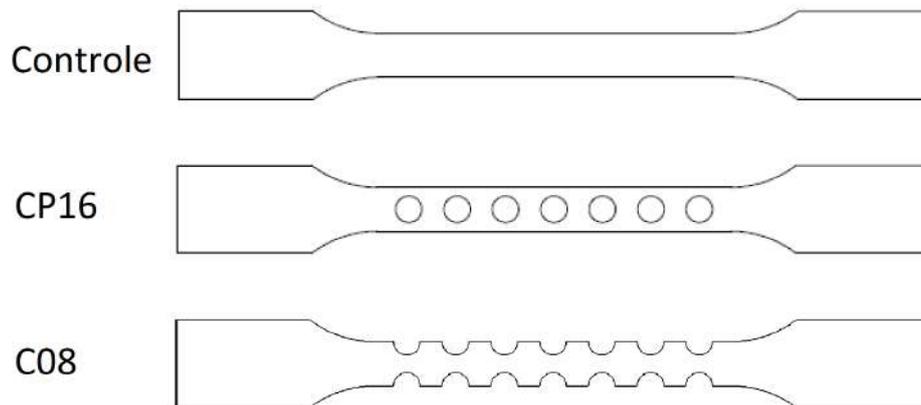


Figura 4.82 – CP Controle, CP16 e C08

#### 4.4.4.1 Rigidez

Iniciando a análise pela Figura 4.83, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma, até então aparentemente, de forma homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição aproximadamente igual dos pontos acima e abaixo do eixo. Isto indica possivelmente o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

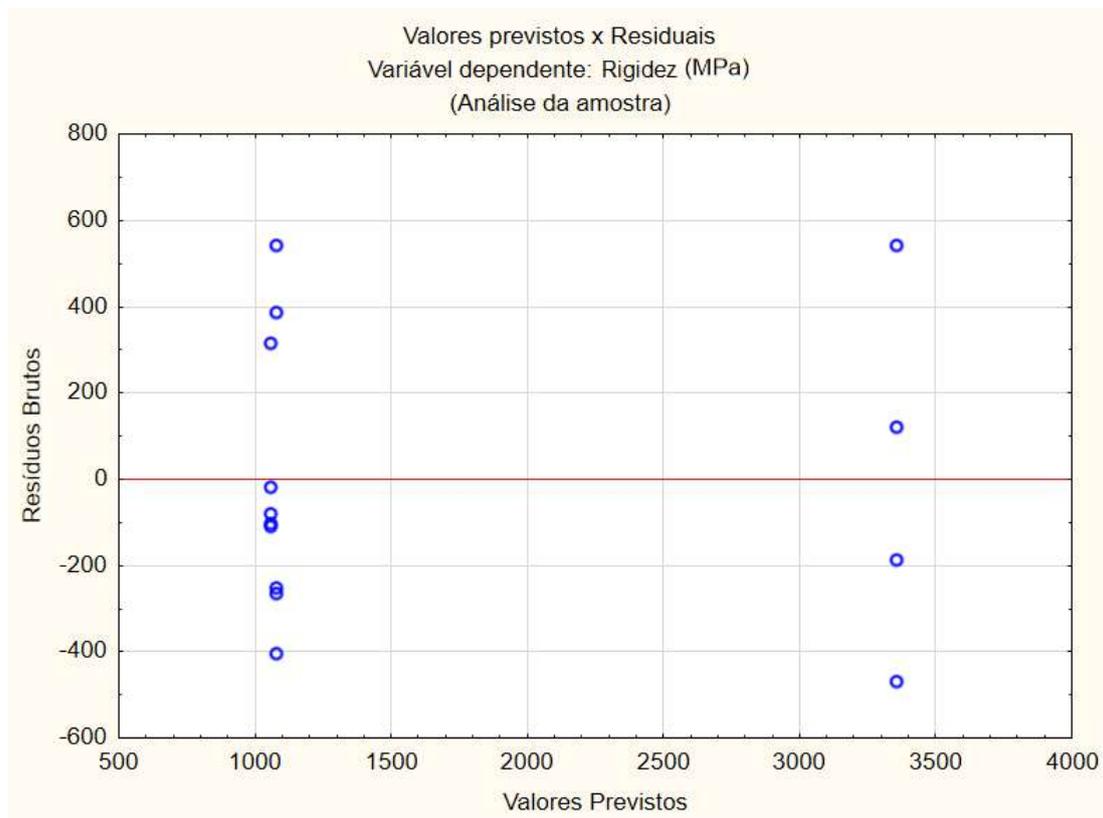


Figura 4.83 – Gráfico dos valores previstos x resíduos.

A ( $H_0$ ) foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.84, sendo confirmada a distribuição normal dos resíduos:

- Lilliefors -  $p = 0,2$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,28$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;

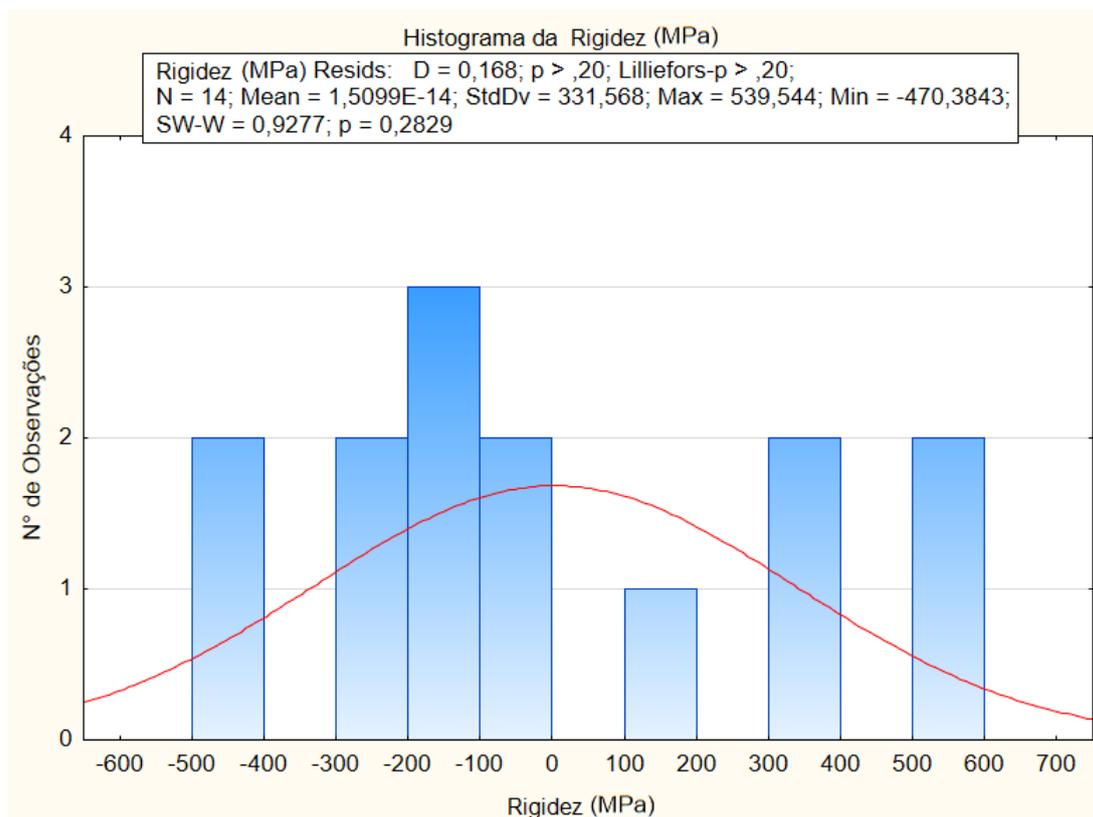


Figura 4.84 – Histograma dos resíduos.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene’s (tabelas 4.56 e 4.57), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Como pode ser verificado nas tabelas, o teste Cochran-Bartlett não rejeita a  $H_0$ . Já o teste de Levene’s tecnicamente rejeita a  $H_0$  ( $p < 0,05$ ), porém, analisando mais a fundo, o valor é muito próximo do valor mínimo de não rejeição, ou seja, por prudência de análise, será considerado como não rejeitado. De qualquer forma, o fato do primeiro teste não ter sido rejeitado já seria suficiente para aceitação da premissa de homecedasticidade.

Tabela 4.56 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa)

Testes de Homogeneidade de Variâncias (C08 X CP16)					
Effect: GRUPO					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Rigidez (MPa)	5,849674	0,463589	2,754303	2	0,252296

Tabela 4.57 – Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Rigidez (MPa)

Teste de Levene's para Homogeneidade de Variâncias (C08 X CP16)				
Efeito: GRUPO				
Graus de Liberdade para todos os F's: 2, 11				
	MS Effect	MS Error	F	p
Rigidez (MPa)	84240,88	21060,14	4,000016	0,049489

A partir do gráfico da Figura 4.85 é realizada a análise da rigidez (eixo y) em cada grupo de CP (eixo x). Visualmente é possível verificar que os CP controle possuem rigidez da ordem de 3400MPa, significativamente maior que os CP com defeitos inseridos (em torno de 1100MPa para ambos os grupos).

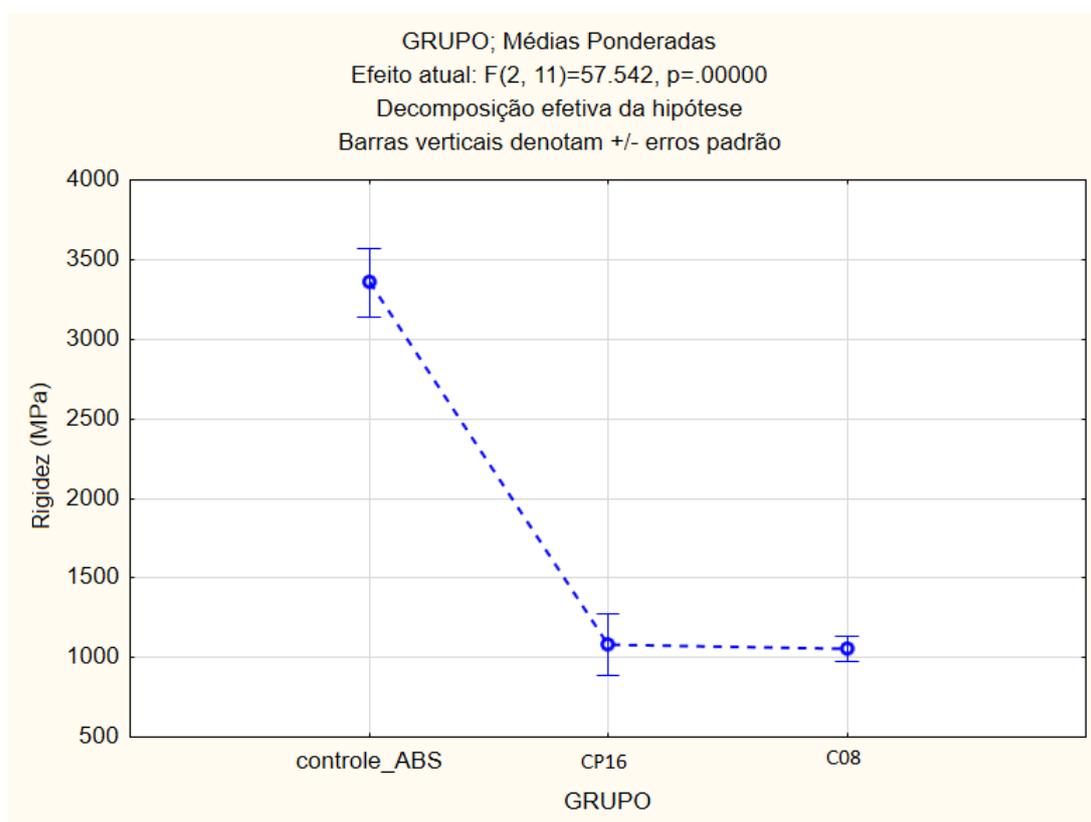


Figura 4.85 – Análise da interação entre os grupos.

Utilizando a Tabela 4.58, pode-se verificar que os CP controle tem rigidez de fato diferente dos outros grupos. É possível analisar também que, exceto o CP controle, nenhuma das outras interações rejeitam a  $H_0$ , o que significa que os outros CP (C08 X CP16) são estatisticamente iguais

entre si. No caso em questão, a divisão do defeito circular em duas partes, concentrando-se os defeitos na borda da área útil do CP, foi irrelevante para a rigidez.

Tabela 4.58 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C08 x CP16

Teste LSD; variável Rigidez [MPa] (C08 X CP16)				
Probabilidades para Testes Post Hoc				
Erro: Entre MS = 1299E2, df = 11.000				
Cell No.	GRUPO	{1}	{2}	{3}
		3356.4	1081.0	1056.7
1	controle_ABS		0,000001	0,000001
2	CP16	0,000001		0,917228
3	C08	0,000001	0,917228	

#### 4.4.4.2 Tensão Máxima

Iniciando a análise pela Figura 4.86, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma, até então aparentemente, de forma homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição aproximadamente igual dos pontos acima e abaixo do eixo. Isto indica possivelmente o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

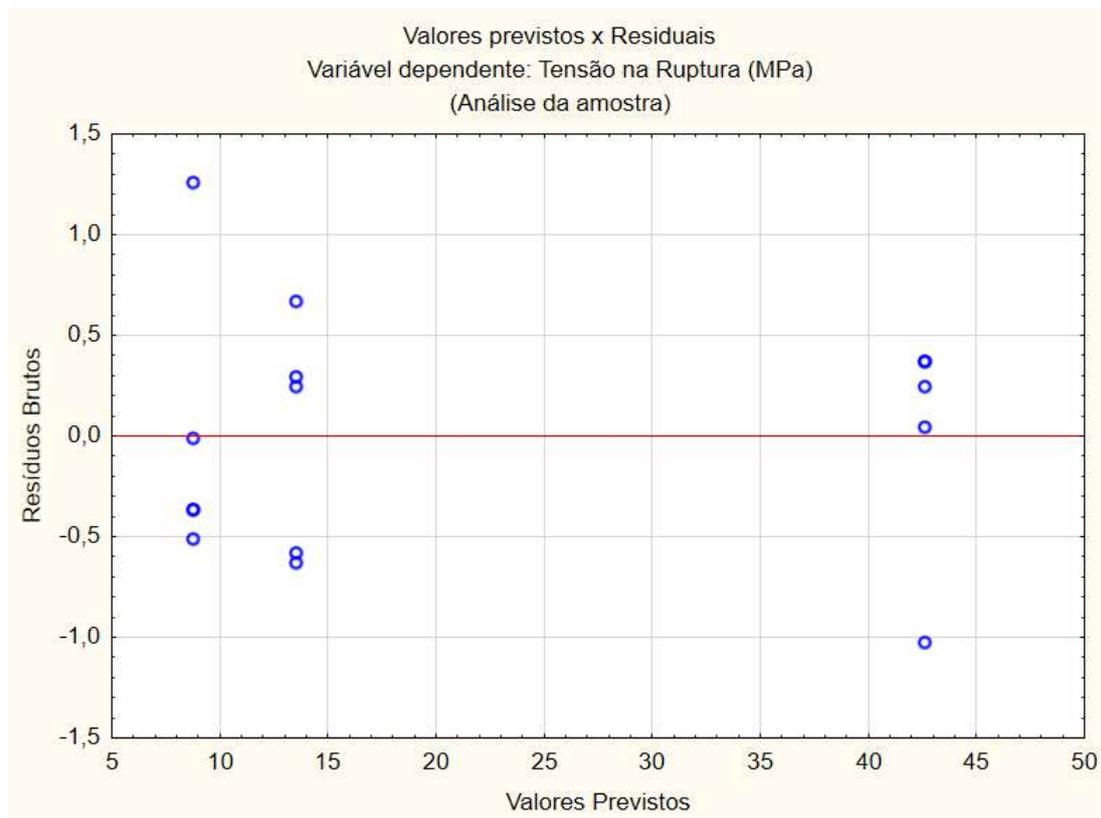


Figura 4.86 – Gráfico dos valores previstos x resíduos.

A  $H_0$  foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.87, sendo confirmada a distribuição normal dos resíduos:

- Lilliefors -  $p = 0,2$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,84$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;

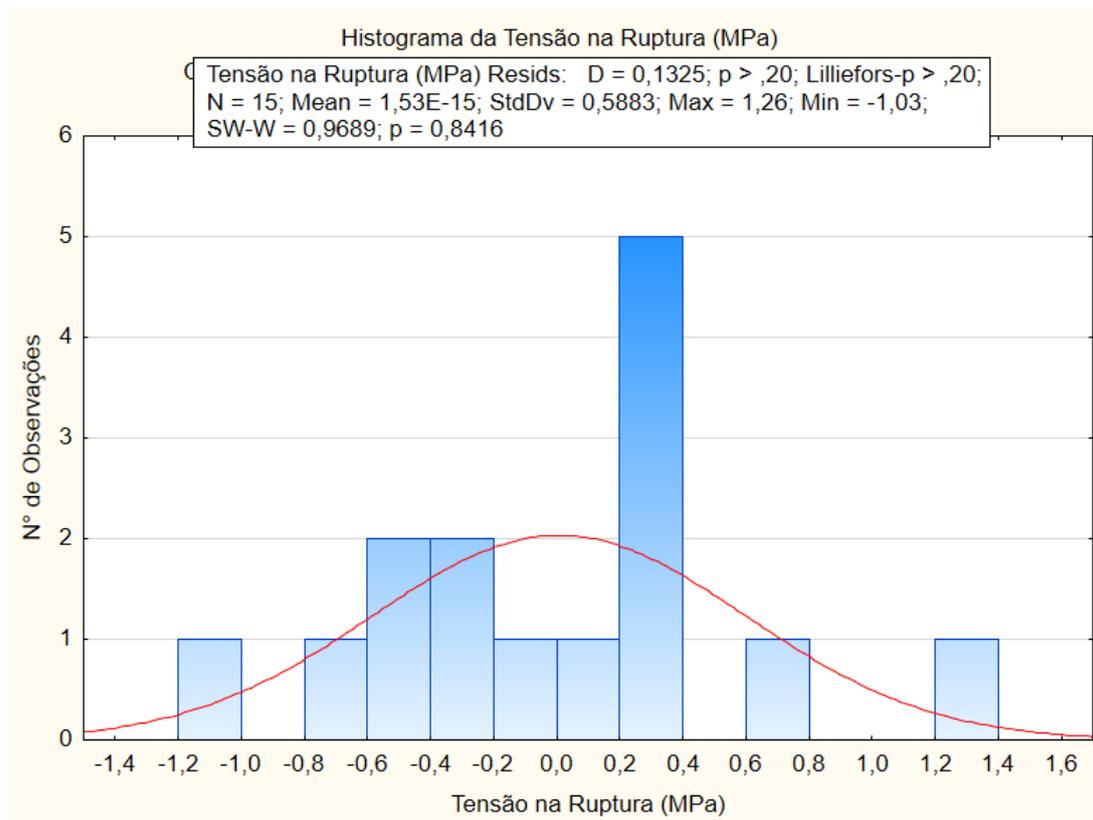


Figura 4.87 – Histograma dos resíduos.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene’s (tabelas 4.59 e 4.60), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Como pode ser verificado nas tabelas, no teste de Cochran-Bartlett a  $H_0$  não foi rejeitada, da mesma forma no teste de Levene’s, indicando que não há diferença entre as variâncias.

Tabela 4.59 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa)

Testes de Homogeneidade de Variâncias (C08 X CP16)					
Effect: GRUPO					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Tensão na Ruptura (MPa)	1,594508	0,437416	0,246137	2	0,884203

Tabela 4.60 – Teste Levene's para homogeneidade de variâncias - Tensão Máxima (MPa)

Teste de Levene's para Homogeneidade de Variâncias (C08 X CP16)				
Efeito: GRUPO				
Graus de Liberdade para todos os F's: 2, 12				
	MS Effect	MS Error	F	p
Tensão na Ruptura (MPa)	0,011707	0,129618	0,090316	0,914257

A partir do gráfico da Figura 4.88 é realizada a análise da tensão máxima (eixo y) em cada grupo de CP. Visualmente é possível verificar que os CP controle possuem tensão máxima da ordem de  $43\text{MPa}$ , significativamente maior que os CP com defeitos inseridos (em torno de  $8\text{MPa}$  a aproximadamente  $14\text{MPa}$ ).

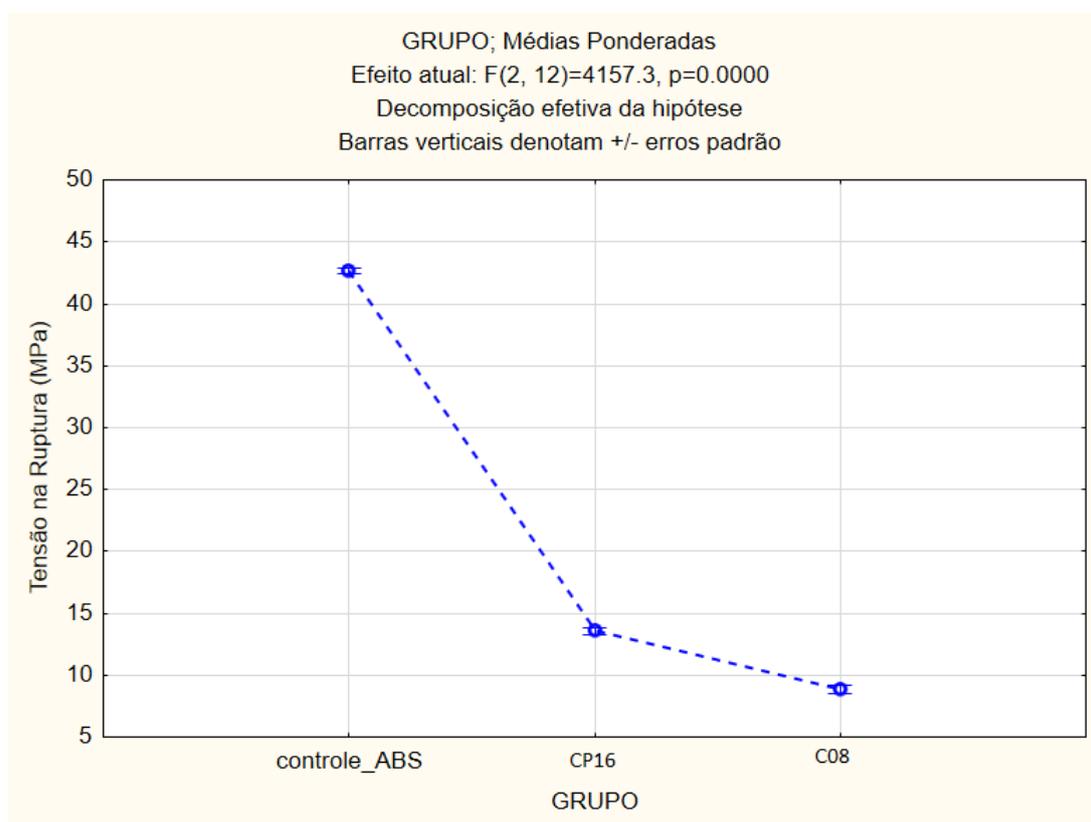


Figura 4.88 – Análise da interação entre os grupos.

Utilizando a Tabela 4.61, pode-se verificar que os CP controle tem tensão máxima de fato diferente dos outros grupos. É possível analisar também que todos os experimentos são diferentes entre si ( $p < 0,05$ ).

Nesse caso, concentrar os defeitos nas bordas (C08) reduziu a tensão máxima em relação aos defeitos centralizados (CP16).

Tabela 4.61 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C08 x CP16

Teste LSD; variável Tensão na Ruptura (MPa) (C08 X CP16)				
Probabilidades para Testes Post Hoc				
Erro: Entre MS =.40379, df = 12.000				
Cell No.	GRUPO	{1}	{2}	{3}
		42.655	13.555	8.8150
1	controle_ABS		0,000000	0,000000
2	CP16	0,000000		0,000000
3	C08	0,000000	0,000000	

#### 4.4.4.3 Deformação Máxima

Iniciando a análise pela Figura 4.89, onde é possível observar uma maior concentração de pontos ao redor do eixo  $y = 0$ .

A nuvem de resíduos se comporta de forma, até então aparentemente, de forma homogênea em relação ao eixo  $y$ , mostrando uma distribuição aproximadamente igual dos pontos acima e abaixo do eixo. Isto indica possivelmente o atendimento ao critério da homocedasticidade, a ser verificado através de testes mais específicos.

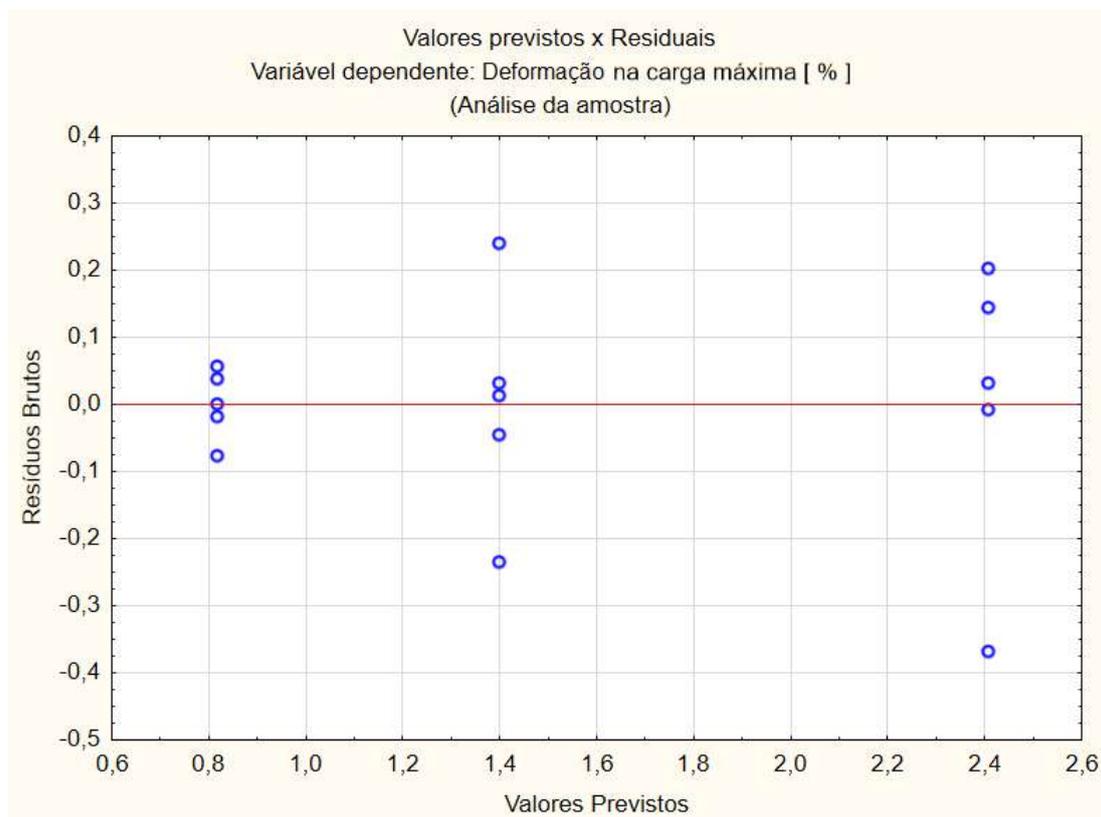


Figura 4.89 – Gráfico dos valores previstos x resíduos.

A  $H_0$  foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors, como mostrado a seguir, no histograma da Figura 4.90, sendo confirmada a distribuição normal dos resíduos:

- Lilliefors -  $p = 0,2$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;
- Shapiro-Wilks -  $p = 0,14$ : a  $H_0$  não foi rejeitada, logo a distribuição dos resíduos observada não se diferencia de uma distribuição normal;

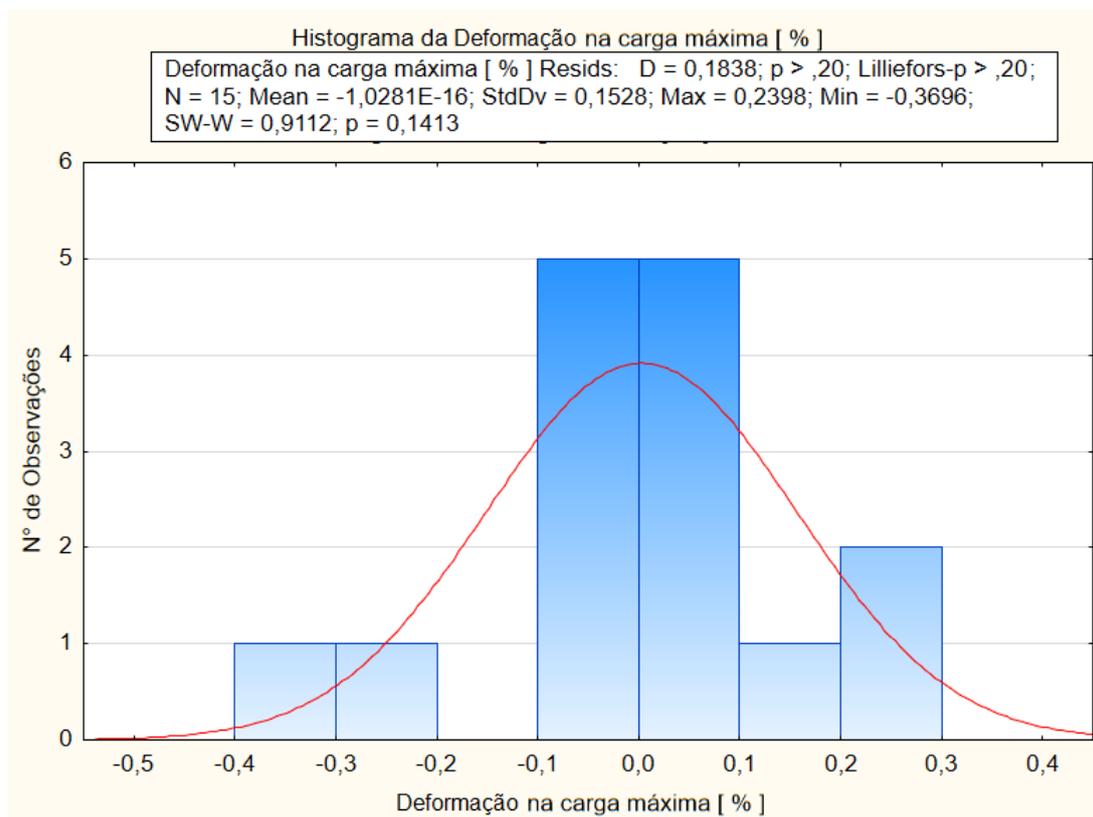


Figura 4.90 – Histograma dos resíduos.

Analisando agora a homocedasticidade dos resíduos através dos testes Cochran-Bartlett e Levene’s (tabelas 4.62 e 4.63), considerando como  $H_0$  que não existem diferenças entre as variâncias.

Tabela 4.62 – Teste Cochran-Bartlett para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%)

Testes de Homogeneidade de Variâncias (C08 X CP16)					
Effect: GRUPO					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
Deformação na carga máxima [%]	18,41211	0,610262	5,889833	2	0,052606

Tabela 4.63 – Teste Levene’s para homogeneidade de variâncias - Deformação Máxima (%)

Teste de Levene’s para Homogeneidade de Variâncias (C08 X CP16)				
Efeito: GRUPO				
Graus de Liberdade para todos os F’s: 2, 12				
	MS Effect	MS Error	F	p
Deformação na carga máxima [%]	0,016499	0,011826	1,395204	0,285238

A partir do gráfico da Figura 4.91 é realizada a análise da deformação máxima (eixo y) em cada grupo de CP. Visualmente é possível verificar que os CP controle possuem deformação máxima da ordem de 2,4%, significativamente maior que os CP com defeitos inseridos (em torno de 0,8% a aproximadamente 1,4%).

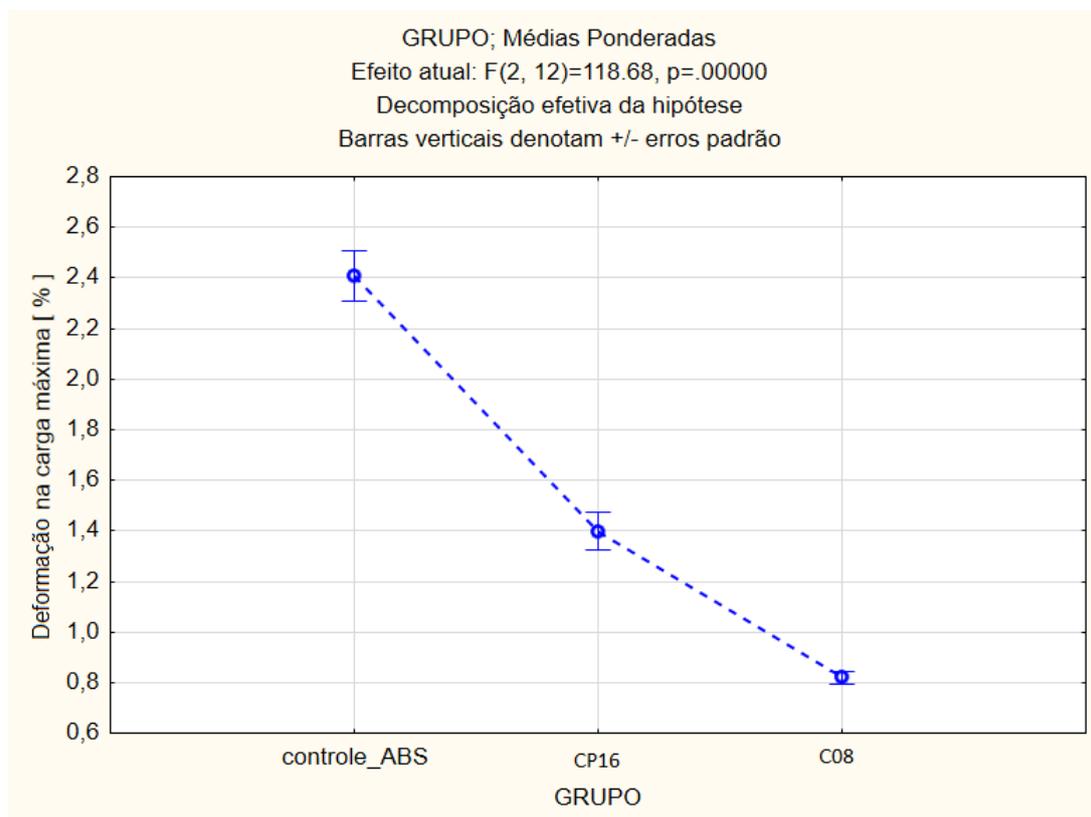


Figura 4.91 – Análise da interação entre os grupos.

Utilizando a Tabela 4.64, utilizando a  $H_0$  de que não há diferença entre os pontos analisados, pode-se verificar que a deformação máxima os CP são estatisticamente diferentes entre si em todos os pontos.

Nesse caso, concentrar os defeitos nas bordas (C08) reduziu a deformação máxima em relação aos defeitos centralizados (CP16).

Tabela 4.64 – Tabela de testes LSD - Fisher - comparativos dos grupos de CP Controle x C08 X CP16

LSD test; variable Deformação na carga máxima [ % ] (C08 X CP16)				
Probabilities for Post Hoc Tests				
Error: Between MS = .02723, df = 12.000				
Cell No.	GRUPO	{1}	{2}	{3}
		2.4076	1.3982	.81900
1	controle_ABS		0,000001	0,000000
2	CP16	0,000001		0,000126
3	C08	0,000000	0,000126	

## 4.5 Análise de Materiais PLA x ABS

Nesta seção, será realizada uma análise dos efeitos dos fatores diretamente nos materiais. Nas tabelas abaixo, foram considerados os efeitos para realizar um comparativos entre o PLA e ABS, com objetivo de analisar a sensibilidade dos materiais aos defeitos. As tabelas de efeitos em função de cada material foram separadas em rigidez, tensão máxima e deformação máxima.

### 4.5.1 Rigidez

A Tabela 4.65 abaixo relaciona, para a rigidez e cada material, os efeitos de cada fator e considerando a  $H_0$  de que o efeito não é significativo para o fator.

Tabela 4.65 – Tabela de efeitos em função de cada material - Rigidez

Rigidez	PLA		ABS	
	Efeito	p	Efeito	p
Formato	123,45	0,130252	116,385	0,133508
Quantidade	-315,64	0,000201	-137,437	0,077505
Tamanho	-1268,7	0,000000	-478,97	0,000000
Alinhamento	383,55	0,000010	406,562	0,000010

Pela tabela, relativo aos dois materiais, o formato dos defeitos não são significativos. Além disso, a quantidade de defeitos também não é significativa para os CP feitos em ABS.

Os outros fatores (tamanho e alinhamento dos defeitos) são significativos para ambos os materiais, além da quantidade de defeitos, no caso do PLA.

Para a rigidez apreende-se as seguintes análises:

- O aumento da quantidade de defeitos no CP feito em PLA provoca um efeito de queda de 315,6 MPa na rigidez;
- O aumento do tamanho dos defeitos provoca uma queda de 1269 MPa em relação ao PLA e 479 MPa em relação ao ABS;
- Relativo a alteração do alinhamento dos defeitos (desalinhado para alinhado), o PLA apresentou um aumento de 384 MPa enquanto o ABS, 407 MPa.

Conclui-se que, relativo à rigidez, o PLA é mais sensível aos defeitos que o ABS (no caso do alinhamento, a diferença é muito pequena entre eles).

#### 4.5.2 Tensão Máxima

A Tabela 4.66 abaixo relaciona, para a tensão máxima e cada material, os efeitos de cada fator. Novamente considerando a  $H_0$  de que o efeito não é significativo para o fator.

Tabela 4.66 – Tabela de efeitos em função de cada material - Tensão Máxima

Tensão Máxima	PLA		ABS	
	Efeito	p	Efeito	p
Formato	-0,1891	0,604459	-0,76667	0,001592
Quantidade	0,4708	0,199045	-0,88708	0,000311
Tamanho	-19,3615	0,000000	-8,9825	0,000000
Alinhamento	10,7718	0,000000	3,39812	0,000000

Pela tabela, o formato e quantidade dos defeitos não são significativos para os CP feitos em PLA.

Os outros fatores (tamanho e alinhamento dos defeitos) são significativos para ambos os materiais, além do formato e a quantidade de defeitos, no caso do ABS.

Para a tensão máxima, temos:

- A alteração do formato do CP feitos em ABS apresentam uma queda de 0,8 MPa na tensão máxima;
- O aumento da quantidade de defeitos do CP feitos em ABS apresentam uma queda de 0,9 MPa na tensão máxima;
- O aumento do tamanho de defeitos no CP feito em PLA provoca um efeito de queda de 19,4 MPa na tensão máxima, e 9 MPa para os CP feitos em ABS;
- Relativo a alteração do alinhamento dos defeitos (desalinhado para alinhado), o PLA apresentou um aumento de 10,8 MPa enquanto o ABS, 3,4 MPa.

Conclui-se que, relativo à tensão máxima, o ABS é sensível à alteração do formato do defeito e aumento da quantidade de defeitos, enquanto o PLA não é. Porém, relativo aos demais fatores, tanto aumento do tamanho do defeito como alinhamento dos defeitos, o PLA é mais sensível que o ABS.

Os resultados aqui encontrados estão alinhados com a expectativa de desempenho para os materiais ABS e PLA conforme sinalizados anteriormente na Tabela 2.1.

#### 4.5.3 Deformação Máxima

Partindo do mesmo raciocínio, a Tabela 4.67 abaixo relaciona, para a deformação máxima e cada material, os efeitos de cada fator. Novamente considerando a  $H_0$  de que o efeito não é significativo para o fator.

Tabela 4.67 – Tabela de efeitos em função de cada material - Deformação Máxima

Deformação Máxima	PLA		ABS	
	Efeito	p	Efeito	p
Formato	-0,07408	0,021984	-0,160199	0,000189
Quantidade	0,174484	0,000000	0,171949	0,000070
Tamanho	-0,328528	0,000000	-0,420662	0,000000
Alinhamento	0,555489	0,000000	0,30135	0,000000

Pela tabela, todos os fatores são significativos para ambos CP.

Assim:

- A alteração do formato do CP feitos em ABS apresentam uma queda de 0,07 % na deformação máxima para os CP feitos em PLA e 0,16% para os feitos em ABS;
- O aumento da quantidade de defeitos apresentam uma aumento de 0,17 % na deformação máxima para ambos os CP;
- O aumento do tamanho de defeitos no CP feito em PLA provoca um efeito de queda de 0,33% na deformação máxima, e 0,42% para os CP feitos em ABS;
- Relativo a alteração do alinhamento dos defeitos (desalinhado para alinhado), o PLA apresentou um aumento de 0,6% enquanto o ABS, 0,3%.

Conclui-se que, relativo à deformação máxima, o ABS é mais sensível à alteração do formato e tamanho do defeito, enquanto o PLA é mais sensível à alteração do alinhamento. Ambos os materiais são igualmente sensíveis ao aumento da quantidade de defeitos.

## 5 Conclusões e sugestão de trabalhos futuros

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo avaliar estatisticamente a influência de fatores de forma, quantidade, tamanho e alinhamento de defeitos controlados em sua área útil no desempenho mecânico do PLA e ABS produzidos pelo processo de MA por FDM.

As seguintes conclusões específicas podem ser sumarizadas a partir do estudo realizado:

#### 5.1.1 Rigidez (MPa)

- Constata-se a partir deste estudo que os dados apresentados explicam 87% da variância do modelo;
- A alteração do formato de circular para losangular apresenta um aumento médio de 105 MPa na rigidez;
- O aumento da quantidade de defeitos de 3 para 7 apresenta uma diminuição média de 250 MPa na rigidez;
- O aumento do tamanho dos defeitos de 5,7 para 28,3 mm<sup>2</sup> apresenta uma diminuição média de 900 MPa na rigidez;
- A alteração do alinhamento dos defeitos, de não-alinhados para alinhados apresenta um aumento médio de 373 MPa na rigidez;
- A alteração do material de PLA para ABS apresenta uma diminuição média de 1220 MPa na rigidez.

#### 5.1.2 Tensão Máxima (MPa)

- Constata-se a partir deste estudo que os dados apresentados explicam 97% da variância do modelo;

- A alteração do formato e aumento da quantidade de defeitos não foram significativos para a tensão máxima;
- O aumento do tamanho dos defeitos de 5,7 para 28,3 mm<sup>2</sup> apresenta uma diminuição média de 14,30 MPa na tensão máxima;
- A alteração do alinhamento dos defeitos, de não-alinhados para alinhados apresenta um aumento médio de 6,94 MPa na tensão máxima;
- A alteração do material de PLA para ABS apresenta uma diminuição média de 12,38 MPa na tensão máxima.

### 5.1.3 Deformação Máxima (%)

- Constata-se a partir deste estudo que os dados apresentados explicam 84% da variância do modelo;
- A alteração do formato de circular para losangular apresenta uma diminuição média de 0,13% na deformação máxima;
- O aumento da quantidade de defeitos de 3 para 7 apresenta um aumento médio de 0,16% na deformação máxima;
- O aumento do tamanho dos defeitos de 5,7 para 28,3 mm<sup>2</sup> apresenta uma diminuição média de 0,38% na deformação máxima;
- A alteração do alinhamento dos defeitos, de não-alinhados para alinhados apresenta um aumento médio de 0,42% na deformação máxima;
- A alteração do material de PLA para ABS apresenta uma diminuição média de 0,07% na deformação máxima.

### 5.1.4 Testes Complementares

- De acordo com teste realizado em CP com defeitos não passantes (C01) em comparação com os CP do grupo CP32 (CP feitos em ABS com 7 defeitos losangulares grandes passantes), constatou-se que o comparativo com os CP com furos passantes não foi significativo

para a rigidez, porém foi significativo para a tensão máxima (com um aumento de  $\approx 12MPa$ ) e para a deformação na carga máxima (com um aumento de  $\approx 0,5\%$ );

- Relativo ao comparativo entre os CP do grupo CP28 (CP feitos em ABS com 7 defeitos losangulares pequenos) e os CP C02, C03 e C04, onde foram mantidas a área, quantidade de defeitos e material, com variações das geometrias em relação ao original (conforme Figuras 4.45, 4.46 e 4.47). Nas análises foi observado que o CP 28 é similar a todos os CP desta análise, ou seja, a alteração da geometria não é significativa para a rigidez. Entre os CP complementares, os CP C02 e C04 apresentam grande similaridade, não fazendo diferença a posição do defeito ou a concentração nas bordas do CP. Já para o C03, o fato do defeito ter sido “esticado”, apesar de não ser significativo em relação ao CP 28, não apresenta qualquer similaridade aos demais, apresentando maior rigidez. Quanto à tensão máxima, a alteração dos defeitos foi significativa em todos os comparativos. Já em relação à tensão na carga máxima, constatou-se que o fato de esticar o defeito não foi significativo, e o contrário para os casos de rotação do defeito e concentração nas bordas;
- Quanto ao comparativo dos CP 32 (CP feitos em ABS com 7 defeitos losangulares grandes) e C05 (defeitos quadrados), C06 (triangulares alternados) e C07 (triangulares na mesma posição), sendo mantidas as mesmas áreas de defeitos, quantidades e material, constata-se que nenhuma destas alterações foi significativa para a rigidez. Já para a tensão máxima, em relação ao CP 32, nenhuma alteração foi significativa, porém dentre os CP complementares, a alteração de quadrado para triangular (C05 x C06) teve significância. No caso da deformação na carga máxima, a alteração para o formato quadrado foi significativa, porém, para o formato triangular em quaisquer das posições não foi. Entre os complementares a alteração de quadrado para triângulos invertidos não foi significativo, o contrário para os triângulos na mesma

posição.

- Finalmente, relativos ao comparativo dos CP 16 (CP feitos em ABS com 7 defeitos circulares grandes) e C08 (mesmos defeitos, porém divididos nas bordas do CP), constatou-se que a alteração não foi significativa para a rigidez, porém foi significativa para a tensão máxima e deformação na carga máxima.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A partir do estudo realizado, pode-se apresentar sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar ensaios de longa duração, especialmente os dinâmicos (fadiga) nos CP;
- Alterar a direção de impressão dos CP (anisotropia);
- Realizar os ensaios em CP com diferentes tipos e percentuais de *infill*;
- Produzir o próprio filamento, por exemplo, a partir de polímeros reciclados, fazer a caracterização do material, imprimir e testar os CP;
- Incluir filamentos que possam produzir peças com elemento de reforço (compósitos);
- Avaliar o comportamento (visco)elástico/(visco)plástico dos CP;
- Avaliar o comportamento ortotrópico, considerando defeitos intrínsecos da fabricação (não apenas os controlados);

## Referências

- 3DLAB. *Fabricante de Filamentos 3DLab*. 2022. Disponível em: <<https://3dlab.com.br>>. Acesso em: 08 set 2022.
- AHN, S. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling abs. *Rapid Prototyping Journal*, v. 8, n. 4, p. 248–257, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/13552540210441166>>.
- ALOYAYDI, B.; S., S.; ALAREQI, A. Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3d printed poly-lactic-acid. *Polymer Testing*, v. 87, 04 2020.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API 20T*: Specification for production, quality control, and documentation of additively manufactured polymer components for petroleum and natural gas applications. Washington, DC, 2022. 39 p.
- ANJOS, A. D. Planejamento de experimentos i. *Universidade Federal do Paraná. Curitiba*, p. 98, 2005.
- AVIZ, A.; GUERRA, T.; GUERRA, C. Construção de protótipos por adição e remoção de material comparativo entre deposição em ABS x usinagem CNC. *Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial - ISSN - 1983-1838*, p. 14–36, 09 2012.
- BARNETT, V.; LEWIS, T. *Outlier in statistics*. New York - NY - EUA: Wiley, 1993.
- BARROS Ângela Maria Puga Caridade de. *Síntese e caracterização de um polímero biodegradável*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade do Minho, 2011. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1822/18454>>. Acesso em: 31 ago 2022.
- BAXTER, M. R. *Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos*. 2. ed. São Paulo - SP: Editora Edgard Blücher Ltda, 1998. ISBN 978-85-212-0265-5. Acesso em: 16 ago 2022.
- BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3d. *Gestão Tecnologia e Inovação*, v. 1, n. 3, p. 9–18, 2017.
- BOURELL, D. et al. Solid freeform fabrication proceedings. *SFF Symposium*, 01 2001.

CALADO, V.; MONTGOMERY, C. Planejamento de experimentos usando statistica 1. *E-papers Serviços Editoriais*, 01 2003.

CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução*, 9ª edição. [S.l.: s.n.], 2016.

CAVALCANTE, A. A. *Correlação entre parâmetros 3D e a resistência mecânica anisotrópica de peças impressas em PLA*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Bahia, 2022.

CHACÓN, J. et al. Additive manufacturing of pla structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials Design*, v. 124, p. 143–157, 2017. ISSN 0264-1275. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517303143>>.

CHAMPION, B. T.; JAMSHIDI, M.; JOORDENS, M. A. 3D printed underwater housing. In: *2016 World Automation Congress (WAC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

COOK, R. D.; WEISBERG, S. Residuals and influence in regression. In: \_\_\_\_\_. [s.n.], 1982. ISBN 0-412-24280-0. Disponível em: <<https://conservancy.umn.edu/handle/11299/37076>>.

COSTA, M. L.; ALMEIDA, S. F. M. de; REZENDE, M. C. Critical void content for polymer composite laminates. *AIAA JOURNAL*, v. 43, n. 6, p. 1336–1341, 2005.

DANIEL, F. et al. The influence of temperature on the mechanical properties of 3d printed and injection molded abs. *Materials Today: Proceedings*, 10 2022.

ELKOLALI, M. et al. Void content determination of carbon fiber reinforced polymers: A comparison between destructive and non-destructive methods. *Polymers*, v. 14, n. 6, 2022. ISSN 2073-4360. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/14/6/1212>>.

FILHO, R. L. et al. Análise da influência de defeitos nas propriedades mecânicas de materiais poliméricos utilizados em peças fabricadas por impressão 3d. *Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia - COBICET*, 2023. Disponível em: <<https://bbuj.short.gy/mJYBVA>>. Acesso em: 12 SET 2023.

- FLAMM, M. et al. Effects of very high loads on fatigue life of nr elastomer materials. *International Journal of Fatigue*, v. 33, n. 9, p. 1189–1198, 2011. ISSN 0142-1123. Disponível em: [〈https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014211231100082X〉](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014211231100082X).
- GORNI, A. A. Introdução a prototipagem rápida e seus processos. *Revista Plástico Industrial*, p. 230–239, 2001.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STARDARDIZATION. *ISO 527-1: Plastics — determination of tensile properties — part 1: General principles*. Rio de Janeiro, 2012. 28 p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STARDARDIZATION. *ISO 527-2: Plastics — determination of tensile properties — part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*. Rio de Janeiro, 2012. 11 p.
- JAHNO, V. D. *Síntese e caracterização do Poli (L-Ácido Láctico) para uso como biomaterial*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Brasília, 2005.
- KHALEED, H. M. T. et al. Novel approach to manufacture an auv propeller by additive manufacturing and error analysis. *Applied Sciences*, v. 9, n. 20, 2019. ISSN 2076-3417. Disponível em: [〈https://www.mdpi.com/2076-3417/9/20/4413〉](https://www.mdpi.com/2076-3417/9/20/4413).
- LASPRILLA, A. R.; MARTINEZ, G. R.; HOSS, B. Synthesis and characterization of poly (lactic acid) for use in biomedical field. *Chem. Eng*, v. 24, p. 985–990, 2011.
- LIGON, S. C. et al. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chemical Reviews*, n. 117, p. 10212–10290, 2017. Disponível em: [〈https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.7b00074〉](https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.7b00074). Acesso em: 19 jul 2022.
- LIMA, R. et al. Estudo comparativo das propriedades mecânicas de polímeros usados na manufatura aditiva e plásticos de engenharia comuns usados na indústria. *Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica*, v. 3, p. 35–46, 02 2021.
- LOVO, J. F. P.; FORTULAN, C. A. Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo fdm. *I Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da EESC-USP (SiPGEM/EESC-USP)(1)*, 2016.

- MANÇANARES, C. G. *Modelo de processo de avaliação para adoção de manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo,, 2016.
- MENDONÇA, E. C.; TELES, A. S.; MENDES, V. B. Desenvolvimento de um veículo submarino autônomo de baixo custo utilizando manufatura aditiva. *Revista Pesquisa Naval*, v. 32, p. 10–16, 2020. Disponível em: <http://portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/pesquisanaval/article/view/2826/2739>.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros, 2<sup>a</sup>. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, p. 416, 2003.
- MOORE, J. Acrylonitrile-butadiene-styrene (abs) - a review. *Composites*, v. 4, n. 3, p. 118–130, 1973. ISSN 0010-4361. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010436173905855>.
- OSIMITZ, T. G. et al. Lack of androgenicity and estrogenicity of the three monomers used in eastman's tritan™ copolyesters. *Food and Chemical Toxicology*, v. 50, n. 6, p. 2196–2205, 2012. ISSN 0278-6915. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278691512000865>.
- PEREIRA, R. B.; MORALES, A. R. Estudo do comportamento térmico e mecânico do PLA modificado com aditivo nucleante e modificador de impacto. *Polímeros*, SciELO Brasil, v. 24, p. 198–202, 2014.
- RODRÍGUEZ-PANES, A.; CLAVER, J.; CAMACHO, A. M. The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of pla and abs pieces manufactured by fdm: A comparative analysis. *Materials*, v. 11, n. 8, 2018. ISSN 1996-1944. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/8/1333>.
- SIEGEL, S.; JR, N. J. C. *Estatística não-paramétrica para ciências do comportamento*. [S.l.]: Artmed Editora, 1975.
- SOUZA, J. P. F. M. d. et al. Inspeção de defeitos em revestimentos de materiais compósitos aplicados em tanques metálicos utilizando shearografia. Florianópolis, 2012.
- STONE, D.; CLARKE, B. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon-fibre reinforced plastics. *Non-Destructive*

*Testing*, v. 8, n. 3, p. 137–145, 1975. ISSN 0029-1021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029102175900237>.

VOLPATO, N. *Prototipagem Rápida - Tecnologias e Aplicações*. [S.l.: s.n.], 2007. ISBN 8521203888.

VOLPATO, N. et al. *Manufatura Aditiva - Tecnologias e aplicações da impressão 3D*. [S.l.: s.n.], 2017. ISBN 9788521211501.

WOLFF, E. G. Moisture effects on polymer matrix composites. *SAMPE Journal*, v. 29, n. 3, p. 11–19, 1993.



# APÊNDICE A – Resultados Experimentais

Tabela A.1 – Tabela de resultados dos ensaios mecânicos de tração

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	Nº do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
Controle	Sem defeito	-	-	-	PLA	1	3020,223	53,288	2,4
Controle	Sem defeito	-	-	-	PLA	2	2374,28	45,5	2,171
Controle	Sem defeito	-	-	-	PLA	3	2345,652	45,65	1,638
Controle	Sem defeito	-	-	-	PLA	4	2289,351	42,325	1,905
Controle	Sem defeito	-	-	-	PLA	5	2847,994	47,3	1,886
1	círculo	3	5,6547	não alinhado	PLA	1	3167,463	30,025	0,952
1	círculo	3	5,6547	não alinhado	PLA	2	3442,747	29,35	0,952
1	círculo	3	5,6547	não alinhado	PLA	3	3176,562	30,1	0,895
1	círculo	3	5,6547	não alinhado	PLA	4	3152,828	31,175	0,971
1	círculo	3	5,6547	não alinhado	PLA	5	3612,985	34,3	1,143
1	círculo	3	5,6547	não alinhado	PLA	6	3491,557	31,075	0,914

**Tabela A.1 continuando da página anterior**

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	Nº do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
2	losango	3	5,6547	não alinhado	PLA	1	3097,656	32,75	1,067
2	losango	3	5,6547	não alinhado	PLA	2	3324,275	32,95	0,99
2	losango	3	5,6547	não alinhado	PLA	3	3094,138	33,6	1,086
2	losango	3	5,6547	não alinhado	PLA	4	3213,397	25,275	0,781
2	losango	3	5,6547	não alinhado	PLA	5	3352,313	32,675	1,029
2	losango	3	5,6547	não alinhado	PLA	6	3340,694	18,025	0,571
3	círculo	7	5,6547	não alinhado	PLA	1	2943,856	29,85	1,048
3	círculo	7	5,6547	não alinhado	PLA	2	2917,615	27,55	0,952
3	círculo	7	5,6547	não alinhado	PLA	3	3237,244	32,025	1,124
3	círculo	7	5,6547	não alinhado	PLA	4	3807,297	31,75	1,352
3	círculo	7	5,6547	não alinhado	PLA	5	2049,89	24,15	1,105
3	círculo	7	5,6547	não alinhado	PLA	6	2825,543	27,25	0,99
4	losango	7	5,6547	não alinhado	PLA	1	2364,81	27,65	0,952
4	losango	7	5,6547	não alinhado	PLA	2	3116,685	33,025	1,124

Tabela A.1 continuando da página anterior

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	Nº do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
4	losango	7	5,6547	não alinhado	PLA	3	3026,008	30,3	0,952
4	losango	7	5,6547	não alinhado	PLA	4	3112,337	30,75	1,2
4	losango	7	5,6547	não alinhado	PLA	5	2996,935	30,4	0,686
4	losango	7	5,6547	não alinhado	PLA	6	2940,969	21,6	0,8
5	círculo	3	28,2735	não alinhado	PLA	1	1760,557	10,275	0,476
5	círculo	3	28,2735	não alinhado	PLA	2	675,034	7,25	4,267
5	círculo	3	28,2735	não alinhado	PLA	3	2553,341	10,3	0,286
5	círculo	3	28,2735	não alinhado	PLA	4	2047,079	9,3	1,181
5	círculo	3	28,2735	não alinhado	PLA	5	1915,03	9,825	0,476
5	círculo	3	28,2735	não alinhado	PLA	6	2006,071	3,275	0,095
6	losango	3	28,2735	não alinhado	PLA	1	1804,687	12,85	1,124
6	losango	3	28,2735	não alinhado	PLA	2	1798,189	12,275	0,495
6	losango	3	28,2735	não alinhado	PLA	3	1942,457	11,375	0,457
6	losango	3	28,2735	não alinhado	PLA	4	1920,673	12,425	0,667

Tabela A.1 continuando da página anterior

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	N° do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
6	losango	3	28,2735	não alinhado	PLA	5	1891,282	10,5	0,495
6	losango	3	28,2735	não alinhado	PLA	6	1826,073	10,175	0,857
7	círculo	7	28,2735	não alinhado	PLA	1	1534,552	10,65	0,514
7	círculo	7	28,2735	não alinhado	PLA	2	1575,992	11,875	0,724
7	círculo	7	28,2735	não alinhado	PLA	3	1639,741	13	0,724
7	círculo	7	28,2735	não alinhado	PLA	4	981,314	12,9	1,029
7	círculo	7	28,2735	não alinhado	PLA	5	1751,925	13,075	0,724
7	círculo	7	28,2735	não alinhado	PLA	6	2209,013	11,925	0,59
8	losango	7	28,2735	não alinhado	PLA	1	1093,75	12,6	0,952
8	losango	7	28,2735	não alinhado	PLA	2	2199,113	10,95	0,476
8	losango	7	28,2735	não alinhado	PLA	3	2040,936	11,3	0,61
8	losango	7	28,2735	não alinhado	PLA	4	942,515	10,8	0,952
8	losango	7	28,2735	não alinhado	PLA	5	1332,308	10,75	0,781
8	losango	7	28,2735	não alinhado	PLA	6	1960,141	9,625	0,705

Tabela A.1 continuando da página anterior

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	Nº do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
9	círculo	3	5,6547	alinhado	PLA	1	3885,742	41,375	1,238
9	círculo	3	5,6547	alinhado	PLA	2	3874,364	42,125	1,276
9	círculo	3	5,6547	alinhado	PLA	3	3607,379	40,5	1,219
9	círculo	3	5,6547	alinhado	PLA	4	2652,424	40,375	1,714
9	círculo	3	5,6547	alinhado	PLA	5	3059,733	40,975	1,562
9	círculo	3	5,6547	alinhado	PLA	6	3495,876	41,025	1,486
10	losango	3	5,6547	alinhado	PLA	1	2923,221	34,95	1,486
10	losango	3	5,6547	alinhado	PLA	2	3311,02	40,325	1,638
10	losango	3	5,6547	alinhado	PLA	3	3320,97	39,375	1,181
10	losango	3	5,6547	alinhado	PLA	4	3482,809	37,375	1,2
10	losango	3	5,6547	alinhado	PLA	5	4170,98	39,7	1,257
10	losango	3	5,6547	alinhado	PLA	6	3729,205	42,2	1,562
11	círculo	7	5,6547	alinhado	PLA	1	3303,437	42,6	1,486
11	círculo	7	5,6547	alinhado	PLA	2	2828,918	43,45	1,714

**Tabela A.1 continuando da página anterior**

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	Nº do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
11	círculo	7	5,6547	alinhado	PLA	3	3471,583	42,675	1,638
11	círculo	7	5,6547	alinhado	PLA	4	2650,151	41,85	1,714
11	círculo	7	5,6547	alinhado	PLA	5	3111,653	40,7	1,638
11	círculo	7	5,6547	alinhado	PLA	6	3138,607	42,125	1,79
12	losango	7	5,6547	alinhado	PLA	1	3775,635	40,975	1,295
12	losango	7	5,6547	alinhado	PLA	2	3708,495	41,175	1,333
12	losango	7	5,6547	alinhado	PLA	3	3065,489	40,45	1,333
12	losango	7	5,6547	alinhado	PLA	4	3064,518	42,4	1,714
12	losango	7	5,6547	alinhado	PLA	5	3576,404	39,95	1,371
12	losango	7	5,6547	alinhado	PLA	6	3783,44	42,8	1,581
13	círculo	3	28,2735	alinhado	PLA	1	2398,507	22,375	1,086
13	círculo	3	28,2735	alinhado	PLA	2	2660,531	24,175	1,295
13	círculo	3	28,2735	alinhado	PLA	3	2689,329	21,475	0,895
13	círculo	3	28,2735	alinhado	PLA	4	2221,86	21,825	1,219

**Tabela A.1 continuando da página anterior**

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	Nº do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
13	círculo	3	28,2735	alinhado	PLA	5	2356,746	22,825	1,295
13	círculo	3	28,2735	alinhado	PLA	6	1903,051	20,15	1,39
14	losango	3	28,2735	alinhado	PLA	1	2667,16	22,95	1,067
14	losango	3	28,2735	alinhado	PLA	2	2886,366	20,875	0,571
14	losango	3	28,2735	alinhado	PLA	3	2572,847	20,775	0,895
14	losango	3	28,2735	alinhado	PLA	4	2745,21	18,475	0,933
14	losango	3	28,2735	alinhado	PLA	5	3071,484	21,775	1,048
14	losango	3	28,2735	alinhado	PLA	6	2000,751	17,95	0,933
15	círculo	7	28,2735	alinhado	PLA	1	1664,816	24,575	1,657
15	círculo	7	28,2735	alinhado	PLA	2	1504,965	22,325	1,524
15	círculo	7	28,2735	alinhado	PLA	3	2205,3	24,45	1,6
15	círculo	7	28,2735	alinhado	PLA	4	1531,584	21,75	1,81
15	círculo	7	28,2735	alinhado	PLA	5	1562,818	21,45	1,581
15	círculo	7	28,2735	alinhado	PLA	6	2108,546	20,925	1,295

Tabela A.1 continuando da página anterior

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	N° do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
16	losango	7	28,2735	alinhado	PLA	1	2236,916	23,6	1,257
16	losango	7	28,2735	alinhado	PLA	2	2194,989	22,375	1,086
16	losango	7	28,2735	alinhado	PLA	3	2483,243	22,925	1,124
16	losango	7	28,2735	alinhado	PLA	4	1821,476	20,75	1,333
16	losango	7	28,2735	alinhado	PLA	5	1991,131	21,3	1,333
16	losango	7	28,2735	alinhado	PLA	6	2199,448	21,775	0,857
17	círculo	3	5,6547	não alinhado	ABS	1	1718,541	20,65	3,733
17	círculo	3	5,6547	não alinhado	ABS	2	722,428	20,95	0,99
17	círculo	3	5,6547	não alinhado	ABS	3	1049,614	20,3	1,124
17	círculo	3	5,6547	não alinhado	ABS	4	1559,838	22,35	1,162
17	círculo	3	5,6547	não alinhado	ABS	5	1588,828	23,55	1,352
18	losango	3	5,6547	não alinhado	ABS	1	1985,46	20,275	1,39
18	losango	3	5,6547	não alinhado	ABS	2	1258,532	21,375	1,219
18	losango	3	5,6547	não alinhado	ABS	3	2032,322	21,975	1,143

**Tabela A.1 continuando da página anterior**

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	N° do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
18	losango	3	5,6547	não alinhado	ABS	4	1986,788	22,35	1,486
18	losango	3	5,6547	não alinhado	ABS	5	955,989	23,325	1,448
19	círculo	7	5,6547	não alinhado	ABS	1	1221,178	14,95	1,048
19	círculo	7	5,6547	não alinhado	ABS	2	1861,428	16,45	2,152
19	círculo	7	5,6547	não alinhado	ABS	3	1460,685	16,7	2,743
19	círculo	7	5,6547	não alinhado	ABS	4	1640,38	15,975	2,324
19	círculo	7	5,6547	não alinhado	ABS	5	1421,19	15,275	1,981
20	losango	7	5,6547	não alinhado	ABS	1	1033,155	14,275	1,448
20	losango	7	5,6547	não alinhado	ABS	2	1323,032	12,3	2,514
20	losango	7	5,6547	não alinhado	ABS	3	1190,421	12,525	2,381
20	losango	7	5,6547	não alinhado	ABS	4	1389,796	10,975	1,048
20	losango	7	5,6547	não alinhado	ABS	5	1488,79	12,55	2,99
21	círculo	3	28,2735	não alinhado	ABS	1	1202,328	5,175	1,238
21	círculo	3	28,2735	não alinhado	ABS	2	847,493	4,95	2,133

**Tabela A.1 continuando da página anterior**

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	Nº do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
21	círculo	3	28,2735	não alinhado	ABS	3	838,416	4,075	1,105
21	círculo	3	28,2735	não alinhado	ABS	4	1186,253	4,9	1,886
21	círculo	3	28,2735	não alinhado	ABS	5			
22	losango	3	28,2735	não alinhado	ABS	1	920,011	6,075	2,457
22	losango	3	28,2735	não alinhado	ABS	2	1274,867	5,675	2,724
22	losango	3	28,2735	não alinhado	ABS	3	921,422	5,375	2,133
22	losango	3	28,2735	não alinhado	ABS	4	930,902	5	2,495
22	losango	3	28,2735	não alinhado	ABS	5	1199,242	5,275	2,019
23	círculo	7	28,2735	não alinhado	ABS	1	879,97	7,075	0,781
23	círculo	7	28,2735	não alinhado	ABS	2	716,947	5,9	0,362
23	círculo	7	28,2735	não alinhado	ABS	3	693,908	6,625	0,629
23	círculo	7	28,2735	não alinhado	ABS	4	1938,522	4,625	-0,267
23	círculo	7	28,2735	não alinhado	ABS	5	744,249	5,95	-0,114
24	losango	7	28,2735	não alinhado	ABS	1	1130,24	8,275	0,152

**Tabela A.1 continuando da página anterior**

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	Nº do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
24	losango	7	28,2735	não alinhado	ABS	2	1399,741	7,7	-0,438
24	losango	7	28,2735	não alinhado	ABS	3	1345,147	8,025	0,686
24	losango	7	28,2735	não alinhado	ABS	4	931,916	7,825	0,724
24	losango	7	28,2735	não alinhado	ABS	5	936,787	8,4	-0,171
25	círculo	3	5,6547	alinhado	ABS	1	1791,952	18,275	1,429
25	círculo	3	5,6547	alinhado	ABS	2	1642,735	19,4	1,429
25	círculo	3	5,6547	alinhado	ABS	3	2004,175	17,4	1,219
25	círculo	3	5,6547	alinhado	ABS	4	2168,649	19,575	1,276
25	círculo	3	5,6547	alinhado	ABS	5	1809,905	16,45	1,352
26	losango	3	5,6547	alinhado	ABS	1	2058,383	16,625	0,838
26	losango	3	5,6547	alinhado	ABS	2	1947,572	19	1,143
26	losango	3	5,6547	alinhado	ABS	3	2278,866	18,6	1,01
26	losango	3	5,6547	alinhado	ABS	4	2134,139	19,125	1,086
26	losango	3	5,6547	alinhado	ABS	5	1971,667	18,05	1,143

Tabela A.1 continuando da página anterior

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	Nº do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
27	círculo	7	5,6547	alinhado	ABS	1	1610,029	18,35	1,524
27	círculo	7	5,6547	alinhado	ABS	2	1940,858	18,925	1,505
27	círculo	7	5,6547	alinhado	ABS	3	1911,123	18,875	1,695
27	círculo	7	5,6547	alinhado	ABS	4	1781,576	19,9	1,676
27	círculo	7	5,6547	alinhado	ABS	5	1583,329	19,575	1,905
28	losango	7	5,6547	alinhado	ABS	1	1772,113	17,925	1,067
28	losango	7	5,6547	alinhado	ABS	2	1833,488	19,05	1,2
28	losango	7	5,6547	alinhado	ABS	3	1496,917	18,925	1,276
28	losango	7	5,6547	alinhado	ABS	4	2151,831	18,825	1,333
28	losango	7	5,6547	alinhado	ABS	5	1698,557	18,2	1,162
29	círculo	3	28,2735	alinhado	ABS	1	1368,75	15,775	1,333
29	círculo	3	28,2735	alinhado	ABS	2	1935,937	12,125	0,781
29	círculo	3	28,2735	alinhado	ABS	3	1513,926	12,6	0,61
29	círculo	3	28,2735	alinhado	ABS	4	1325,642	13,7	1,238

Tabela A.1 continuando da página anterior

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	Nº do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
29	círculo	3	28,2735	alinhado	ABS	5	1591,093	13	1,105
30	losango	3	28,2735	alinhado	ABS	1	1338,39	9,775	0,819
30	losango	3	28,2735	alinhado	ABS	2	1380,256	9,25	0,971
30	losango	3	28,2735	alinhado	ABS	3	1470,17	9,85	0,933
30	losango	3	28,2735	alinhado	ABS	4	1311,246	10,475	0,476
30	losango	3	28,2735	alinhado	ABS	5	1656,919	14,95	1,314
31	círculo	7	28,2735	alinhado	ABS	1	1466,554	13,8	1,429
31	círculo	7	28,2735	alinhado	ABS	2	1620,506	13,85	1,162
31	círculo	7	28,2735	alinhado	ABS	3	826,978	14,225	1,638
31	círculo	7	28,2735	alinhado	ABS	4	676,472	12,925	1,352
31	círculo	7	28,2735	alinhado	ABS	5	814,3	12,975	1,41
32	losango	7	28,2735	alinhado	ABS	1	1054,659	15,575	1,543
32	losango	7	28,2735	alinhado	ABS	2	1372,974	12,3	0,533
32	losango	7	28,2735	alinhado	ABS	3	2869,938	11,275	0,743

**Tabela A.1 continuando da página anterior**

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Alinhamento	Material	Nº do cp	Módulo (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima (%)
32	losango	7	28,2735	alinhado	ABS	4	997,773	12,475	1,2
32	losango	7	28,2735	alinhado	ABS	5	1088,231	10,55	0,819
Controle	Sem defeito	-	-	-	ABS	1	3475,661	41,625	2,038
Controle	Sem defeito	-	-	-	ABS	2	3895,877	43,025	2,229
Controle	Sem defeito	-	-	-	ABS	3	2885,987	42,9	2,4
Controle	Sem defeito	-	-	-	ABS	4	1892,386	43,025	3,676
Controle	Sem defeito	-	-	-	ABS	5	3167,96	42,7	2,629

# APÊNDICE B – CP Complementares

Tabela B.1 – Tabela de resultados experimentais -  
CP Complementares

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Derivado do CP:	n° do CP	Módulo (MPa)	Tensão na Ruptura (MPa)	Deformação Máxima (%)
controle_ABS	-	-	-	-	1	3475,661	41,625	2,038
controle_ABS	-	-	-	-	2	3895,877	43,025	2,61
controle_ABS	-	-	-	-	3	2885,987	42,9	2,4
controle_ABS	-	-	-	-	4	1892,386	43,025	2,552
controle_ABS	-	-	-	-	5	3167,96	42,7	2,438
CP16	círculo	7	28,2735	-	1	1466,554	13,8	1,429
CP16	círculo	7	28,2735	-	2	1620,506	13,85	1,162
CP16	círculo	7	28,2735	-	3	826,978	14,225	1,638
CP16	círculo	7	28,2735	-	4	676,472	12,925	1,352
CP16	círculo	7	28,2735	-	5	814,3	12,975	1,41
CP28	losango	7	5,6547	-	1	1772,113	17,925	1,067

Tabela B.1 continuando da página anterior

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Derivado n° do CP:	Módulo CP	Tensão na Ruptura (MPa)	Deformação Máxima (%)
CP28	losango	7	5,6547	-	2	1833,488	1,2
CP28	losango	7	5,6547	-	3	1496,917	1,276
CP28	losango	7	5,6547	-	4	2151,831	1,333
CP28	losango	7	5,6547	-	5	1698,557	1,162
CP32	losango	7	28,2735	-	1	1054,659	1,638
CP32	losango	7	28,2735	-	2	1372,974	0,533
CP32	losango	7	28,2735	-	3	2869,938	0,743
CP32	losango	7	28,2735	-	4	997,773	1,2
CP32	losango	7	28,2735	-	5	1088,231	0,819
C01	losango	7	28,2735	CP32	1	911,515	1,714
C01	losango	7	28,2735	CP32	2	2775,3	1,219
C01	losango	7	28,2735	CP32	3	1288,356	1,467
C01	losango	7	28,2735	CP32	4	1302,277	1,493
C01	losango	7	28,2735	CP32	5	821,743	1,638

Tabela B.1 continuando da página anterior

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Derivado do CP:	n° do CP	Módulo (MPa)	Tensão na Ruptura (MPa)	Deformação Máxima (%)
C02	losango	7	5,6547	CP28	1	1441,314	16,025	0,952
C02	losango	7	5,6547	CP28	2	1711,482	15,225	0,781
C02	losango	7	5,6547	CP28	3	2855,047	18,625	0,762
C02	losango	7	5,6547	CP28	4	1654,949	13,4	0,705
C02	losango	7	5,6547	CP28	5	1346,366	20,15	1,284
C03	losango	7	5,6547	CP28	1	2065,331	29,375	1,312
C03	losango	7	5,6547	CP28	2	2901,948	28,55	1,034
C03	losango	7	5,6547	CP28	3	1837,775	29,3	1,244
C03	losango	7	5,6547	CP28	4	1975,847	29,475	1,215
C03	losango	7	5,6547	CP28	5	2195,959	35,875	1,757
C04	losango	7	5,6547	CP28	1	1874,305	32,65	1,943
C04	losango	7	5,6547	CP28	2	1055,707	32,225	1,771
C04	losango	7	5,6547	CP28	3	1603,766	32,675	1,767
C04	losango	7	5,6547	CP28	4	2048,053	33,025	2,015

Tabela B.1 continuando da página anterior

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Derivado do CP:	n° do CP	Módulo (MPa)	Tensão na Ruptura (MPa)	Deformação Máxima (%)
C04	losango	7	5,6547	CP28	5	1373,053	32,525	1,937
C05	quadrado	7	28,2735	CP32	1	973,878	10,575	1,162
C05	quadrado	7	28,2735	CP32	2	1157,868	9,1	0,743
C05	quadrado	7	28,2735	CP32	3	965,103	10,4	1,12
C05	quadrado	7	28,2735	CP32	4	1006,897	10,875	1,239
C05	quadrado	7	28,2735	CP32	5	1329,799	10	0,917
C06	triângulo	7	28,2735	CP32	1	898,888	10,075	1,219
C06	triângulo	7	28,2735	CP32	2	1050,336	9,45	0,981
C06	triângulo	7	28,2735	CP32	3	966,3	10,225	1,288
C06	triângulo	7	28,2735	CP32	4	954,411	9,425	0,987
C06	triângulo	7	28,2735	CP32	5	497,79	9,725	1,377
C07	triângulo	7	28,2735	CP32	1	1033,762	16,675	1,415
C07	triângulo	7	28,2735	CP32	2	403,612	16,725	2,058
C07	triângulo	7	28,2735	CP32	3	1144,458	18,175	1,708

Tabela B.1 continuando da página anterior

Experimentos	Formato	Quantidade	Área	Derivado do CP:	n° do CP	Módulo (MPa)	Tensão na Ruptura (MPa)	Deformação Máxima (%)
C07	triângulo	7	28,2735	CP32	4	1925,813	17,425	1,462
C07	triângulo	7	28,2735	CP32	5	1066,366	17,975	1,344
C08	círculo	7	28,2735	CP16	1	1370,589	10,075	0,876
C08	círculo	7	28,2735	CP16	2	1036,551	8,45	0,857
C08	círculo	7	28,2735	CP16	3	947,919	8,3	0,8
C08	círculo	7	28,2735	CP16	4	975,65	8,8	0,743
C08	círculo	7	28,2735	CP16	5	952,89	8,45	0,819



# APÊNDICE C – Gráficos de Resultados Experimentais

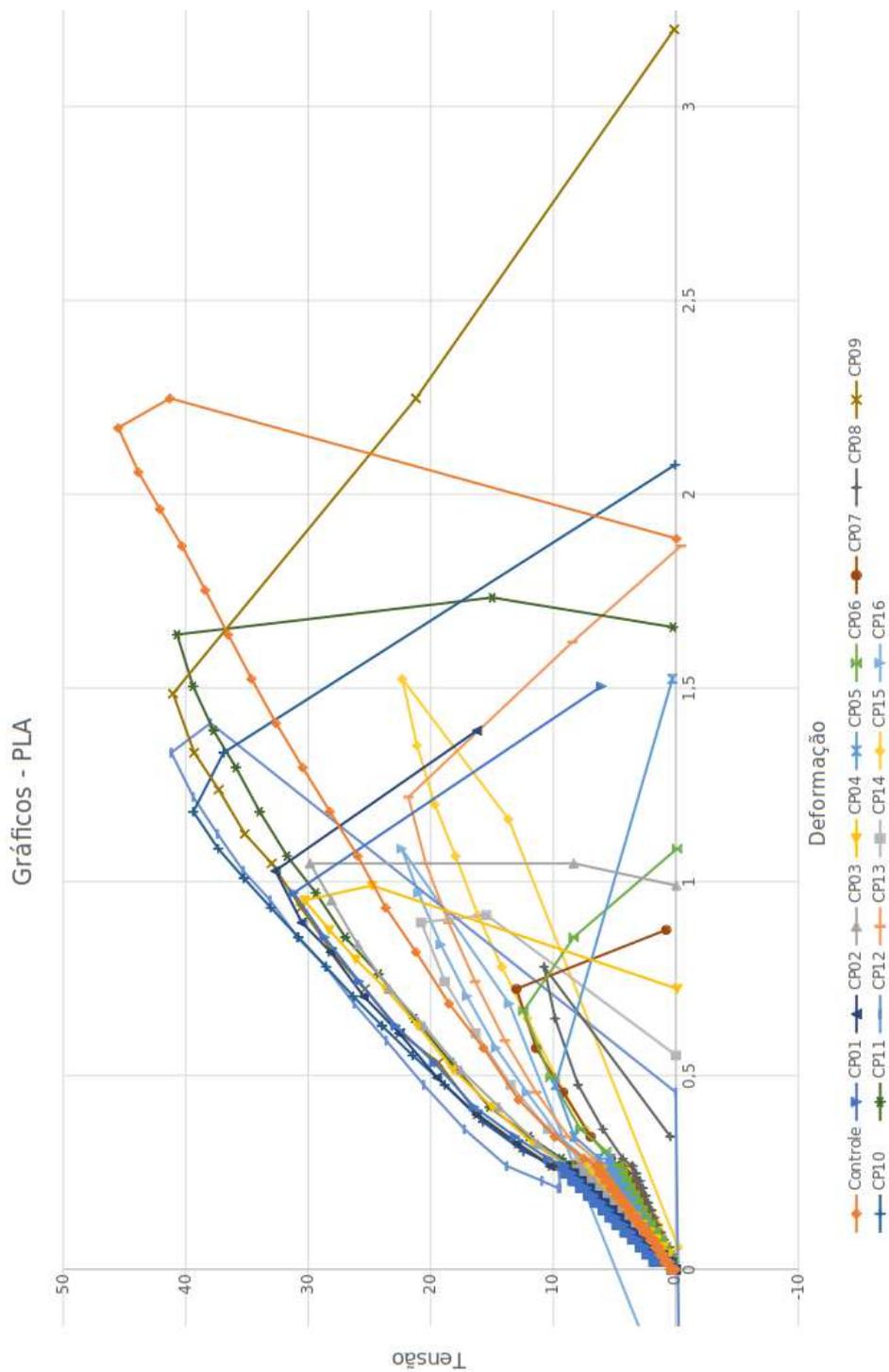


Figura C.1 – Gráficos Experimentais PLA.

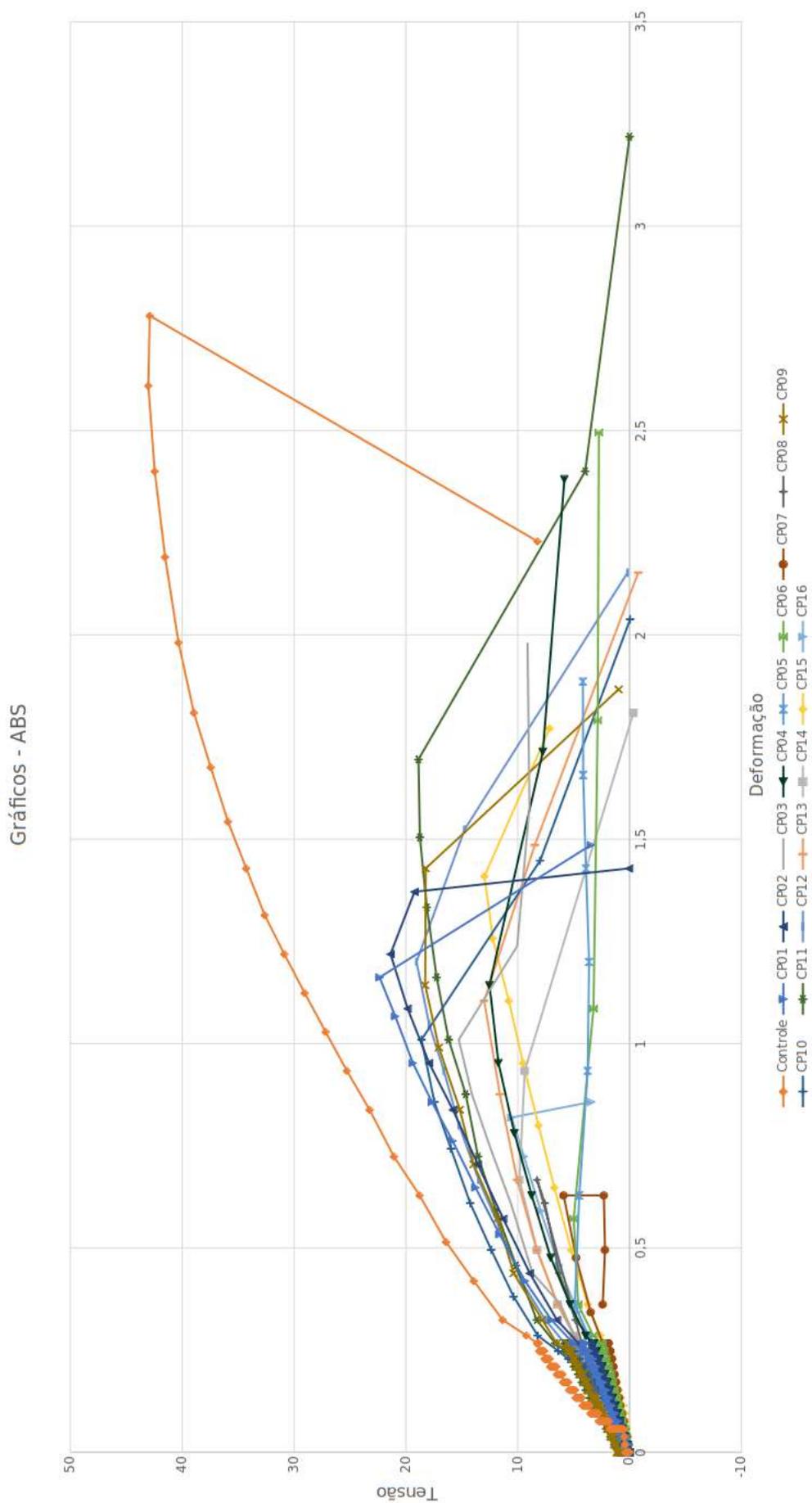


Figura C.2 – Gráficos Experimentais ABS.

# ANEXO A – Artigo publicado

Anais do IV CoBICET – Trabalho completo

Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia

27 de agosto a 01 de setembro de 2023



"Educação inovadora: ensino, pesquisa e extensão interdisciplinar"

## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DEFEITOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS EM PEÇAS FABRICADAS POR IMPRESSÃO 3D

Reinaldo Lube Filho<sup>1,3</sup>, Antonio Henrique M. F. Thomé da Silva<sup>2</sup>, Vilson Berilli Mendes<sup>3</sup>, Paulo Arthur Lima de Deus<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PGMEC-UFF, Niterói - RJ, Brasil ([reinaldolube@id.uff.br](mailto:reinaldolube@id.uff.br))

<sup>2</sup>PGMEC-UFF, Niterói - RJ, Brasil/Petrobras-CENPES

<sup>3</sup>LabProM – Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), Rio de Janeiro – RJ, Brasil

**Resumo:** O trabalho apresenta uma avaliação do desempenho do Poliacido Láctico (PLA) e Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS) em corpos de provas produzidos por processo de manufatura aditiva (impressão 3D) com defeitos controlados, visando verificar como diferentes geometrias desses defeitos afetam as propriedades mecânicas. A partir do planejamento de experimentos e análise estatística realizada, confirmou-se a influência da geometria desses defeitos e do material nas propriedades mecânicas avaliadas.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva; Impressão 3D; Comportamento Mecânico; Materiais Poliméricos;

### INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia desenvolvida desde o final da década de 1980 e continua em pleno desenvolvimento com novas impressoras surgindo a cada dia, utilização de materiais com características distintas e que podem ser utilizados em diversos tipos de aplicação, desde o uso mais cotidiano, como para decoração e prototipagem rápida até aplicações que exigem maior responsabilidade técnica, como na fabricação de peças para equipamentos ou que tenham que suportar carregamentos específicos.

O fluxo do processo de impressão 3D ocorre a partir da criação de um modelo tridimensional através de um *software* CAD (*Computer-Aided-Design*) (GORN, 2001) e o processo de qualificação de peças impressas se dá a partir de normas específicas, como a API20T. Este modelo é convertido para um arquivo em formato de estereolitografia (STL), que simplifica o modelo original para um conjunto de elementos triangulares. O formato STL tem a vantagem de ser compatível com a maioria dos sistemas CAD. Por meio de um *software* específico, este arquivo é então dividido horizontalmente (ou fatiado) em diversas camadas (Figura 1b) representando os contornos bidimensionais, que quando depositadas umas sobre as outras através do processo denominado *Fused Deposition Modeling* (FDM) formam o modelo

tridimensional original (AHN et al., 2002), sendo, dentre os vários disponíveis, o método utilizado neste trabalho.

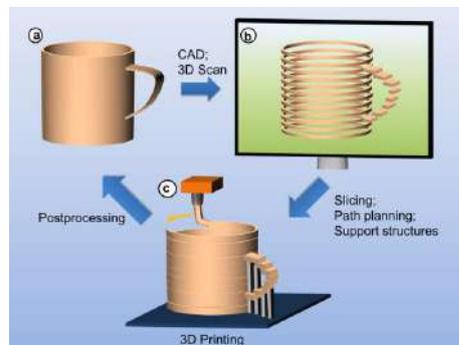


Figura 1. Conceito básico do processo de MA (LIGON et al. 2017).

Dentre os materiais que podem ser utilizados para impressão, os mais comuns são o PLA e o ABS, uma vez que são facilmente encontrados no mercado, de custo acessível, podendo ser utilizados em diversas aplicações.

A depender da aplicação da peça impressa, é de extrema importância conhecer o comportamento mecânico e térmico do material. É possível prever o comportamento térmico das peças por meio das características especificadas pelo fabricante do

material. Conforme tabela 1, referente às características térmicas do PLA e ABS do fabricante 3DLAB (2023), é possível observar que o PLA é um material que exige menores temperaturas de impressão ( $T_{\text{impressão}}$ ) e de mesa ( $T_{\text{mesa}}$ ) em relação ao ABS.

Tabela 1. Temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ), de impressão e mesa do PLA e ABS (3DLAB, 2023).

Material	$T_g$ [°C]	$T_{\text{impressão}}$ [°C]	$T_{\text{mesa}}$ [°C]
ABS	99	210 – 250	90 – 120
PLA	55 – 60	195 – 220	55 – 70

Como pode ser observado na tabela 1, a  $T_{\text{mesa}}$  é uma temperatura próxima da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), o que auxilia na aderência da peça durante a impressão. Por outro lado, podemos inferir que uma peça impressa em PLA provavelmente se deformará com certa facilidade quando utilizados em aplicações sujeitas a ambientes com temperaturas elevadas ( $T > 60^\circ\text{C}$ ), o que torna o ABS mais recomendável para estes tipos de aplicação.

Os parâmetros de controle do processo que provavelmente podem afetar as propriedades mecânicas das peças FDM são: *Bead width*, *Air gap*, *Model build temperature*, *Raster orientation* e *color* (AHN et al., 2002). O foco deste trabalho é avaliar o desempenho mecânico devido a possibilidade de ocorrência de *Air gap* (lacuna) em peças fabricadas por FDM.

*Air gap* (lacuna) é o espaço entre os grânulos de material FDM, sendo o padrão zero, o que significa que os grânulos apenas se tocam. Portanto, uma lacuna positiva significa que os grânulos de material não se tocam, o que resulta em uma estrutura frágil que cresce rapidamente (AHN et al., 2002).

A presença de vazios é um dos principais defeitos encontrados em polímeros e compósitos de matriz polimérica, sendo extremamente difícil evitá-los por completo. Esses defeitos podem comprometer o comportamento estrutural das peças, uma vez que são pontos potenciais de concentração de tensão, além de favorecer a absorção de água e aumentar os vazios pré-existentes (WOLFF, 1993).

Relativo à resistência mecânica, de acordo com a ficha técnica dos filamentos (3DLAB, 2023), os corpos de prova (CP) impressos têm as seguintes características:

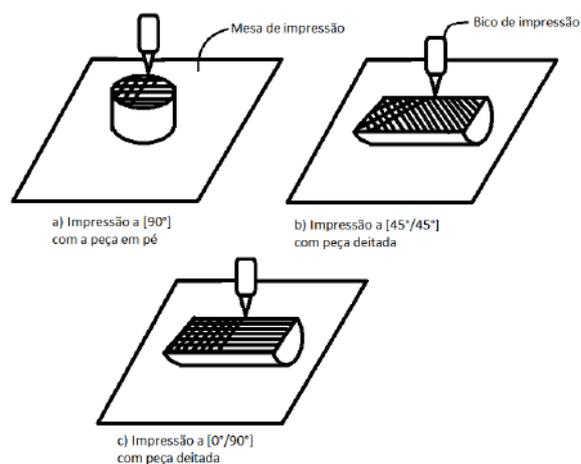
Tabela 2. Características mecânicas dos CP impressos em PLA e ABS (3DLAB, 2023).

	ABS	PLA	Norma
Tensão de escoamento [MPa]	14,7	28,4	ASTMD638
Módulo de elasticidade [MPa]	1335,9	1896	ASTMD638
Tensão de ruptura [MPa]	29	46	ASTMD638
Dureza [Shore D]	74	85	ASTMD2240
Alongamento [%]	7,08	3,69	ASTMD638

De acordo com WOLFF (1993), um dos principais defeitos encontrados em polímeros e compósitos de matriz polimérica são os vazios, que podem comprometer o comportamento estrutural das peças fabricadas. Estes vazios podem ser induzidos no processo de fabricação por bolhas de ar formadas nas peças por motivos variados, como subprodutos voláteis que se encontram na matriz do material, erros de fabricação, entre outros. Para ELKOLALI et al. (2022) a presença dos vazios, além de afetar as propriedades mecânicas, pode também aumentar a penetração de água.

Outra informação de extrema importância na resistência mecânica das peças fabricadas em 3D é a anisotropia de fabricação da peça. Segundo LOVO e FORTULAN (2017) e CHACÓN et al. (2017) a direção das camadas influencia diretamente na resistência da peça. No trabalho realizado por LOVO e FORTULAN (2017) foi realizado teste de tração em peças impressas e foi observado que num CP fabricado com deposição de material nas direções opostas ao carregamento  $[90^\circ]$  (figura 2a) resistiram a 40% do valor obtido para a matéria prima utilizada no estudo, na direção cruzada ao carregamento  $[45^\circ/-45^\circ]$ , 78% (figura 2b) e nas direções  $[0^\circ/90^\circ]$  (figura 2c) 85%.

Figura 2. Direções de deposição de filamento em peças que sofrerão carga axial. a)  $[90^\circ]$ . b)  $[45^\circ/-45^\circ]$ . c)  $[0^\circ/90^\circ]$ . Adaptado de LOVO e FORTULAN (2017).



A direção de impressão pode ser controlada no software gerador do arquivo .gcode, porém o posicionamento da peça no software é fundamental para que a impressão seja feita da melhor forma, conforme pode ser verificado nas figuras 2a e 2c, onde a impressão da peça onde a deposição de material foi realizado na direção da carga aplicada foi determinante para uma maior resistência mecânica.

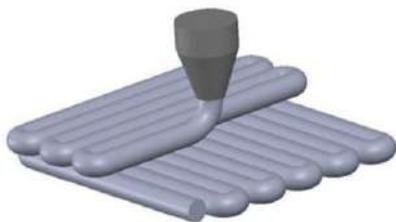


Figura 3. Esquema de impressão de duas camadas consecutivas. (LOVO e FORTULAN, 2017).

#### MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, foram fabricados até 06 corpos de provas padronizados e testados conforme norma ISO 527-2, CP tipo 1A (2012) pelo processo de MA utilizando os materiais PLA e ABS. Foram realizados ensaios destrutivos de tração, onde foram registrados os valores da tensão aplicada no CP em função de sua deformação, sendo avaliados os resultados de Módulo de Young e Tensão e Deformação Máximas, com posterior tratamento estatístico dos dados. Os ensaios foram realizados conforme norma ISO 527, em uma máquina de ensaio Filizola, modelo BME-20kN, pertencente ao Laboratório de Materiais do IPqM, utilizando-se uma velocidade de deslocamento de 50 mm/min até a ruptura e célula de carga de 20kN.

Os CP foram projetados em software CAD conforme figura 4, abaixo e as dimensões básicas conforme tabela 3, que é um extrato da tabela 1 da norma ISO 527-2 (2012) – página 5.

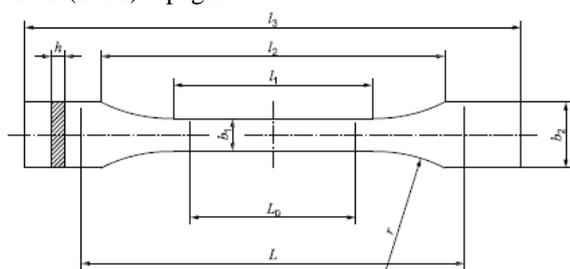


Figura 4. Desenho dos CP (ISO 527-2 2012).

Tabela 3. Dimensões do CP da figura 2 (ISO 527-2 2012 – tabela 1, coluna 1A, página 5).

Dimensão (mm)	1A
$l_3$	170
$l_1$	$80 \pm 2$
r	$24 \pm 1$
$l_2$	$109,3 \pm 3,2$
$b_2$	$20 \pm 0,2$
$b_1$	$10 \pm 0,2$
h	$4 \pm 0,2$
$L_0$	$75 \pm 0,5$
L	$115 \pm 1$

Os defeitos foram distribuídos nos CP conforme figura 5 abaixo sendo o espaçamento entre defeitos detalhado na figura 6 (o posicionamento para círculos e losangos é a mesma nos CP).

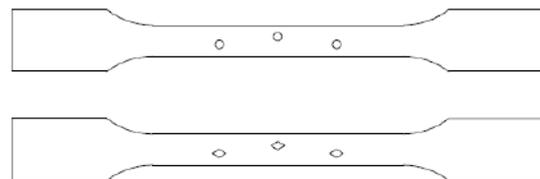


Figura 5. Desenhos dos CP com defeitos.

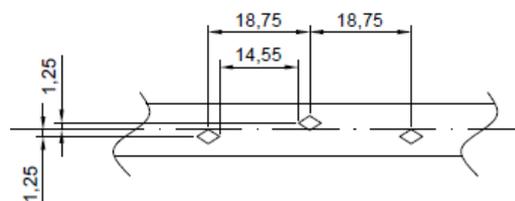


Figura 6. Posicionamento dos defeitos no CP.

Todos os defeitos foram feitos com a mesma área conforme tabela 4.

Tabela 4. Dimensões dos defeitos.

	Círculo	Losango
Dimensões (mm)	$\varnothing 2,68$	$D = 4,2 \quad d = 2,69$
Área (mm <sup>2</sup> )	5,7	5,7
Dimensão alinhada axialmente ao CP	2,68	4,2

Os CP foram impressos no Laboratório de Prototipagem Mecânica (LabProM) do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), em impressora 3D modelo Creality Ender 3 Pro que utiliza filamentos de diversos materiais com  $\varnothing 1,75$  mm e bico de impressão de 0,4 mm e os arquivos .gcode foram gerados no software Ultimaker Cura, versão Arachne Engine Beta 99.9.1. Para a impressão foram utilizados

os filamentos da empresa 3DLAB, tanto PLA quanto ABS.

Para as peças foi utilizada direção de impressão [90°/90°] posicionadas deitadas na mesa de impressão, ou seja, todas as linhas de impressão na direção de aplicação da carga de tração conforme figura 7.

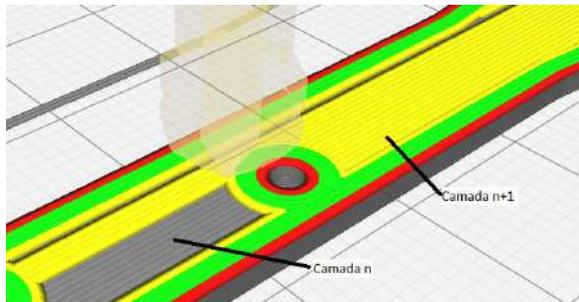


Figura 7. Direção de impressão dos CP a [90°/90°].

Na tabela 5 estão especificados os principais parâmetros de impressão.

Tabela 5. Principais parâmetros de impressão utilizando na fabricação dos CP.

Parâmetro	ABS	PLA
Temperatura bico (°C)	225	200
Temperatura mesa (°C)	110	60
Altura de camada (mm)		0,2
Infill (preenchimento)		100%
Velocidade de impressão (mm/s)		60

Os dados gerados foram compilados e analisados no software Statistica®, utilizando a metodologia de análise de variância (ANOVA) a partir de um planejamento de experimentos do tipo 2<sup>2</sup>, ou seja, dois fatores (material e geometria do defeito), cada um a dois níveis, ou seja, material PLA x material ABS e geometria circular x geometria com cantos vivos. A tabela 6 mostra o planejamento de experimentos 2<sup>2</sup> onde, para os níveis inferiores (-1) temos o formato circular e material PLA e nos superiores (1), o formato losangular e material ABS.

Tabela 6. Planejamento de experimentos.

CP	Formato	Material
1	-1	-1
2	-1	1
3	1	-1
4	1	1

Visando verificar a possibilidade de se utilizar a estatística paramétrica, inicialmente serão analisados os critérios para atender a este tipo de análise, quais sejam a homogeneidade das variâncias (homocedasticidade) e normalidade dos resíduos. A

normalidade dos resíduos foi avaliada a partir dos testes de Shapiro-Wilks e Lilliefors e a homoscedasticidade foi avaliada a partir dos testes de Cochran-Bartlet e Levene’s. Os diferentes grupos de ensaios foram comparados a partir do teste de Fisher LSD. A avaliação de significância dos fatores de entrada assim como todas as avaliações anteriores utilizaram um nível de significância de  $\alpha=0.05$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 7 apresenta os resultados obtidos nos grupos de ensaios de 1 a 4, cada um com até 6 réplicas.

Tabela 7. Resultados dos ensaios mecânicos.

Modelo CP	N° CP	Módulo (MPa)	Tensão na Ruptura (MPa)	Deformação na Ruptura (%)
1	1	3167,46	30,025	0,952
	2	3442,75	29,35	0,952
	3	3176,56	30,1	0,895
	4	3152,83	31,175	0,971
	5	3612,99	34,3	1,143
	6	3491,56	31,075	0,914
2	1	3097,66	32,75	1,067
	2	3324,28	32,95	0,99
	3	3094,14	33,6	1,086
	4	3213,4	25,275	0,781
	5	3352,31	32,675	1,029
	6	3340,69	18,025	0,571
3	1	1718,54	20,65	3,733
	2	722,428	20,95	0,99
	3	1049,61	20,3	1,124
	4	1559,84	22,35	1,162
	5	1588,83	23,55	1,352
4	1	1985,46	20,275	1,39
	2	1258,53	21,375	1,219
	3	2032,32	21,975	1,143
	4	1986,79	22,35	1,486
	5	955,989	23,325	1,448

## • MÓDULO DE YOUNG

A figura 8 mostra a distribuição dos resíduos em função dos valores previstos pelo modelo matemático proposto pela ANOVA. Foram filtrados os resultados que apresentaram maiores resíduos, de forma a garantir tanto quanto possível a homoscedasticidade.

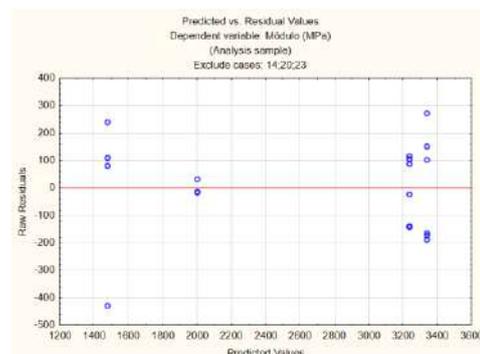


Figura 8. Gráfico de valores previstos x resíduos - módulo.

Nas tabelas 8 e 9 são realizados os testes de Cochran-Bartlett e Levene's que verificam a homocedasticidade.

Tabela 8. Teste de Cochran-Bartlett para homocedasticidade.

Tests of Homogeneity of Variances (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)					
Effect: Formato*Material					
Exclude cases: 14;20;23					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr	df	p
Módulo (MPa)	121,9103	0,611938	8,041892	3	0,045154

Tabela 9. Teste de Levene's para homocedasticidade.

Levene's Test for Homogeneity of Variances (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)				
Effect: Formato*Material				
Degrees of freedom for all F's: 3, 15				
Exclude cases: 14;20;23				
	MS Effect	MS Error	F	p
Módulo (MPa)	26974,37	6748,184	3,997278	0,028197

Apesar da  $H_0$  ser rejeitadas em ambos os testes ( $p < 0,05$ ), no teste de Cochran-Bartlett o valor encontrado é muito próximo do valor de não-rejeição ( $p = 0,045$ ).

No histograma apresentado na figura 9 é possível verificar a distribuição dos valores de resíduos. No mesmo gráfico é mostrado o resultado da estatística p para os testes de Shapiro-Wilks ( $p=0,30$ ) e Lilliefors ( $p=0,20$ ). Dado que  $p>0,05$  não se rejeita a  $H_0$ , confirmando a normalidade dos resíduos.

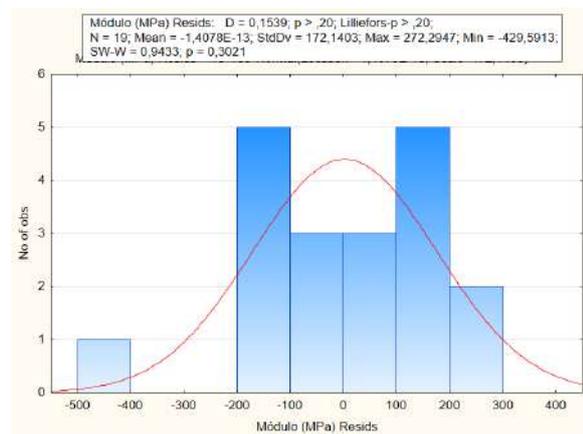


Figura 9. Histograma dos resíduos - módulo

Na tabela 10 são mostrados os efeitos principais e de interação das variáveis, onde é considerado como  $H_0$  que os fatores de entrada analisados não influenciam no efeito estudado, neste caso, no módulo.

Tabela 10. Efeito das variáveis.

Univariate Results for Each DV (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)			
Sigma-restricted parameterization			
Effective hypothesis decomposition			
Exclude cases: 14;20;23			
Effect	Módulo (MPa) SS	Módulo (MPa) MS	Módulo (MPa) p
Intercept	110370957	110370957	0,000000
Formato	191253	191253	0,034906
Material	10463629	10463629	0,000000
Formato*Material	427405	427405	0,003450

Como pode ser observado, em todos os casos a  $H_0$  é rejeitada, o que significa que os fatores analisados influenciam diretamente no módulo. Já a coluna MS (média quadrática) nos revela qual variável tem mais influência no módulo. Neste caso, o material é o fator de maior influência (maior valor de MS).

Seguindo com a análise da interação de variáveis, é apresentado o gráfico da figura 10, onde são mostrados os efeitos do material (eixo x) e formato dos defeitos (linhas azul e vermelha) no módulo (eixo y).

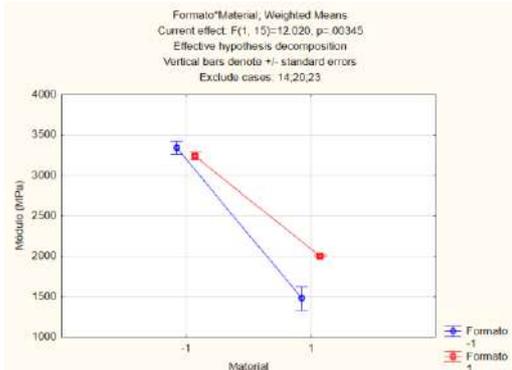


Figura 10. Gráfico do material e formato do defeito no módulo.

Verifica-se através do gráfico uma considerável diminuição do módulo em função do material, onde os valores são maiores para os CP feitos em PLA (-1). Os diferentes resultados para os módulos dos grupos de ensaio 1 a 4 são comparados entre si a partir do teste de Fisher LSD, como mostrado na Tabela 11.

Tabela 11. Tabela de teste Fisher LSD de comparação de pares de intervalos de dados de módulo.

LSD test; variable Módulo (MPa) (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)						
Probabilities for Post Hoc Tests						
Error: Between MS = 35559., df = 15.000						
Exclude cases: 14;20;23						
Cell No.	Formato	Material	{1}	{2}	{3}	{4}
1	-1	-1		0,000000	0,356339	0,000000
2	-1	1	0,000000		0,000000	0,002486
3	1	-1	0,356339	0,000000		0,000000
4	1	1	0,000000	0,002486	0,000000	

Pela tabela, considerando a  $H_0$  de que não há diferença entre o par de intervalos de dados comparados, a única comparação onde  $p > 0,05$  é a 1 x 3, que correspondem

aos dois tipos de defeitos dos CPs feitos em PLA ( $p = 0,36$ ). Isto confirma o que pode ser verificado visualmente na figura 10, ou seja, para os CPs em PLA, não houve impacto da geometria do dano no módulo. Já para os CPs produzidos em ABS, a geometria teve um impacto estatisticamente significativo no módulo ( $p=0,002$ ), sendo os módulos em torno de 500MPa menores obtidos com dano do tipo circular (1500MPa) em comparação ao dano do tipo losango (2000MPa).

• TENSÃO MÁXIMA

Para esta será utilizada a mesma abordagem de análise que foi feita para o módulo. Na figura 11 estão os valores previstos x resíduos.

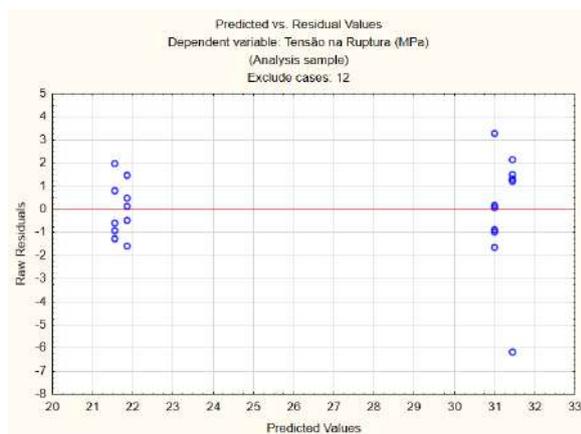


Figura 11. Gráfico de valores previstos x resíduos.

No teste da homocedasticidade de Cochran-Bartlett (tabela 12), a  $H_0$  não é rejeitada ( $p = 0,118$ ), logo não há diferença nas variâncias, demonstrando a homogeneidade das variâncias da amostra. O resultado é confirmado também pelo teste de Levene's, na tabela 13 ( $p=0,22$ )

Tabela 12. Teste de Cochran-Bartlett para homocedasticidade.

Tests of Homogeneity of Variances (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)						
Effect: Formato*Material						
Exclude cases: 12						
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr	df	p	
Tensão na Ruptura (MPa)	9,363464	0,659825	5,866736	3	0,118277	

Tabela 13. Teste de Levene's para homocedasticidade.

Levene's Test for Homogeneity of Variances (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)				
Effect: Formato*Material				
Degrees of freedom for all F's: 3, 17				
Exclude cases: 12				
	MS Effect	MS Error	F	p
Tensão na Ruptura (MPa)	2,688048	1,627310	1,651835	0,214908

Foi então gerado o gráfico da figura 12, onde se verifica a não rejeição da  $H_0$  pelo teste de Lilliefors ( $p=0,20$ ), demonstrando a normalidade de resíduos, embora tal hipótese tenha sido rejeitada por Shapiro-Wilks ( $p=0,03$ ).

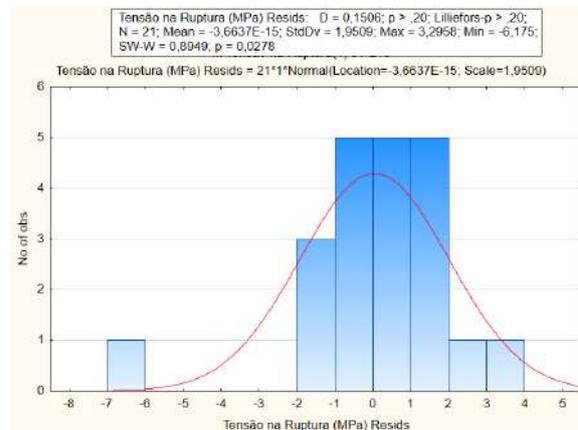


Figura 12. Histograma dos resíduos – tensão na ruptura.

Na tabela 14, do efeito dos fatores de entrada sobre a variável de resposta tensão máxima, a  $H_0$  não é rejeitada para o formato e a interação entre o formato e material, ou seja, estes fatores de entrada não têm influência na tensão máxima para o nível de significância adotado. Apenas o material teve influência significativa ( $p \rightarrow 0$ ).

Tabela 14. Efeito das variáveis.

Univariate Results for Each DV (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)			
Sigma-restricted parameterization			
Effective hypothesis decomposition			
Exclude cases: 12			
Effect	Tensão na Ruptura (MPa) SS	Tensão na Ruptura (MPa) MS	Tensão na Ruptura (MPa) p
Intercept	14620,88	14620,88	0,000000
Formato	0,73	0,73	0,692304
Material	472,56	472,56	0,000000
Formato*Material	0,03	0,03	0,938183

Pelo gráfico da figura 14 são mostrados os efeitos do material (eixo x) e formato dos defeitos (linhas azul e vermelha), desta vez na tensão de ruptura (eixo y).

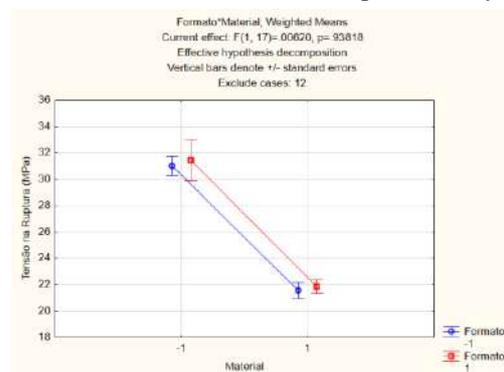


Figura 14. Gráfico do material e formato do defeito na tensão máxima.

Realizando análise semelhante à feita para o módulo, pode-se verificar através do gráfico uma considerável diminuição da tensão máxima em função do material, onde os valores são maiores para os CP feitos em PLA (-1). No caso dos tipos de defeitos é possível verificar, através da tabela 15 que, de fato, a geometria não foi significativa tanto para os cps em PLA ( $p=0,73$ ) quanto para os CPs em ABS ( $p=0,82$ ).

Tabela 15. Tabela de teste Fisher LSD de comparação de pares de intervalos de dados de tensão de ruptura.

LSD test: variable Tensão na Ruptura (MPa) (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)  
Probabilities for Post Hoc Tests  
Error: Between MS = 4.4778, df = 17.000  
Exclude cases: 12

Cell No.	Formato	Material	(1)	(2)	(3)	(4)
1	-1	-1		0,000001	0,732155	0,000002
2	-1	1	0,000001		0,000001	0,825304
3	1	-1	0,732155	0,000001		0,000002
4	1	1	0,000002	0,825304	0,000002	

• DEFORMAÇÃO MÁXIMA

Continuando a análise, desta vez da deformação máxima, na figura 15 é apresentado o gráfico de valores previstos x resíduos.

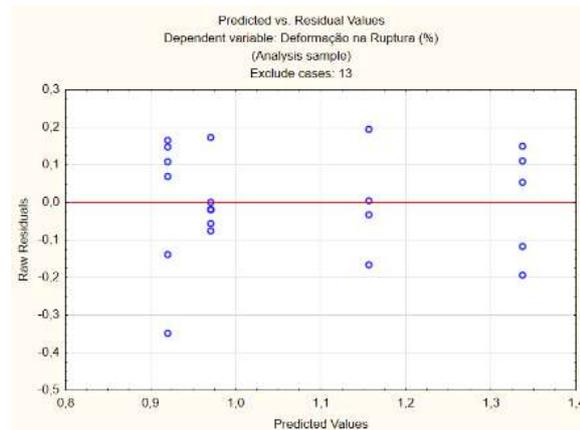


Figura 15 Gráfico de valores previstos x resíduos.

No teste da homocedasticidade de Cochran-Bartlett (tabela 16), a  $H_0$  não é rejeitada ( $p = 0,42$ ), logo não há diferença nas variâncias, o que é confirmado pelo teste de Levene's na tabela 17 ( $p = 0,17$ ), demonstrando a homogeneidade das variâncias da amostra.

Tabela 16. Teste de Cochran-Bartlett para homocedasticidade.

Tests of Homogeneity of Variances (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)  
Effect: Formato\*Material  
Exclude cases: 13

	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr	df	p
Deformação na Ruptura (%)	5,264708	0,441294	2,841678	3	0,416685

Tabela 17. Teste de Levene's para homocedasticidade.

Levene's Test for Homogeneity of Variances (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)  
Effect: Formato\*Material  
Degrees of freedom for all F's: 3, 17  
Exclude cases: 13

	MS Effect	MS Error	F	p
Deformação na Ruptura (%)	0,011685	0,006172	1,893274	0,169057

Gerado então o gráfico da figura 16, onde se verifica pelo teste de Lilliefors ( $p = 0,20$ ) e Shapiro-Wilks ( $p = 0,37$ ) a não rejeição da  $H_0$ , confirmando assim a normalidade dos resíduos.

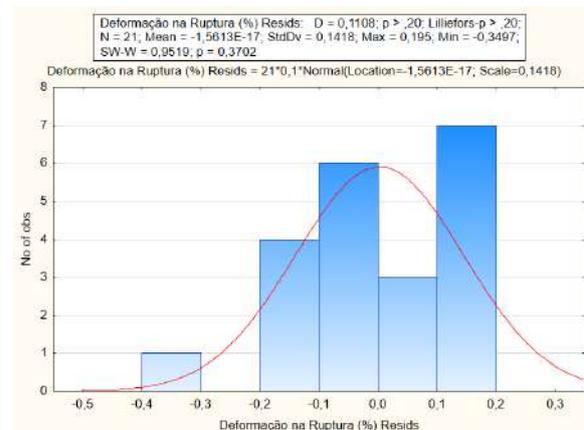


Figura 16. Histograma dos resíduos – Deformação na ruptura

Na análise da tabela 18 do efeito dos fatores de entrada sobre a variável de resposta deformação máxima, assim como para a tensão máxima, a  $H_0$  não é rejeitada para o formato e a interação entre o formato e material, ou seja, estes fatores de entrada não têm influência na deformação máxima para o nível de significância adotado. Apenas o material teve influência significativa ( $p \rightarrow 0$ ).

Tabela 18. Efeito das variáveis.

Univariate Results for Each DV (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)  
Sigma-restricted parameterization  
Effective hypothesis decomposition  
Exclude cases: 13

Effect	Deformação na Ruptura (%) SS	Deformação na Ruptura (%) MS	Deformação na Ruptura (%) p
Intercept	24,55824	24,55824	0,000000
Formato	0,02148	0,02148	0,354145
Material	0,46321	0,46321	0,000371
Formato*Material	0,06794	0,06794	0,108429

Pelo gráfico da figura 17, onde também são mostrados os efeitos do material (eixo x) e formato dos defeitos (linhas azul e vermelha), desta vez na deformação máxima (eixo y).

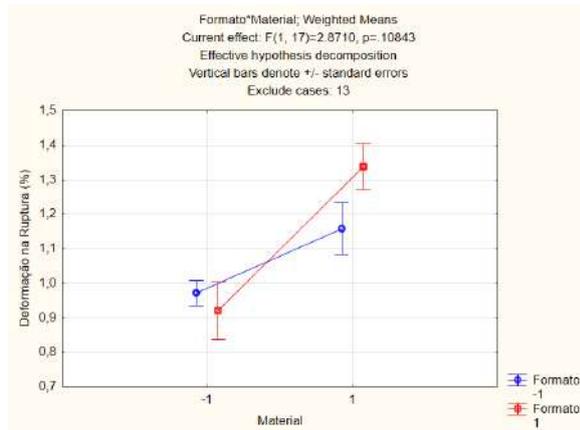


Figura 17. Gráfico do material e formato do defeito na deformação máxima.

Desta vez, diferentemente dos gráficos para o módulo e tensão máxima, pode-se verificar através do gráfico um considerável aumento da tensão máxima em função do material, onde os valores são maiores para os CP feitos em ABS (1).

Tabela 19. Tabela de testes LSD – Fisher

LSD test: variable Deformação na Ruptura (%) (PLANILHA DADOS PARA TRATAMENTO - Artigo)  
 Probabilities for Post Hoc Tests  
 Error: Between MS = .02367, df = 17.000  
 Exclude cases: 13

Cell No.	Formato	Material	{1}	{2}	{3}	{4}
1	-1	-1		0,078599	0,577074	<b>0,001081</b>
2	-1	1	0,078599		<b>0,029288</b>	0,098822
3	1	-1	0,577074	<b>0,029288</b>		<b>0,000336</b>
4	1	1	<b>0,001081</b>	0,098822	<b>0,000336</b>	

No caso dos tipos de defeitos é possível verificar, através da tabela 19 que, a geometria não foi significativa tanto para os CPs em PLA ( $p=0,58$ ) quanto para os CPs em ABS ( $p=0,099$ ). Para os defeitos circulares, onde  $p=0,079$ , o material não foi significativo, porém, para os losangos, o material foi estatisticamente significativo ( $p=0,00034$ ), onde o PLA teve uma deformação de cerca de 0,9%, enquanto o ABS de cerca de 1,35% (uma diferença de 0,45%).

### CONCLUSÃO

De forma geral, foi possível concluir que as propriedades mecânicas dos materiais escolhidos para impressão 3D de peças são, como esperado, fortemente dependentes dos materiais selecionados, cabendo, portanto, na etapa de design de produto, proceder-se com a correta seleção do material polimérico mais adequado do ponto de vista técnico, considerando as propriedades térmicas e mecânicas mediante o cenário de aplicação, mas também do ponto de vista de viabilidade técnica e econômica. Do ponto de vista de geometria dos defeitos, foi possível provar estatisticamente que a geometria dos defeitos ou vazios encontrados nas peças poliméricas produzidas via manufatura aditiva podem impactar diretamente variáveis tipicamente utilizadas para fins de projeto de peças e equipamentos para, pelo menos,

alguns materiais (por exemplo, ABS), como foi observado para a rigidez do material, devendo esse fator ser levado em conta tanto no design de produtos expostos a carregamentos estáticos mas também dinâmicos, somando-se a ele fatores como distribuição, quantidade e profundidade dos defeitos.

### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Laboratório de Prototipagem Mecânica (LabProM-IPqM) e ao Laboratório de Materiais do IPqM.

### REFERÊNCIAS

- 3DLAB. Fabricante de Filamentos 3DLab. 2023. Disponível em: <<https://3dlab.com.br>>. Acesso em: 12abr2023.
- AHN, S. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. Rapid prototyping journal, 2002.
- CHACÓN, J.M., CAMINERO, M.A., GARCÍA-PLAZA E., NÚÑEZ, P.J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. Materials & Design, Volume 124, 2017, Pages 143-157, ISSN 0264-1275.
- ELKOLALI, M. et al. Void content determination of carbon fiber reinforced polymers: A comparison between destructive and non-destructive methods. Polymers, v. 14, n. 6, 2022. ISSN 2073-4360. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/14/6/1212>>.
- GORNI, A. A. Introdução a prototipagem rápida e seus processos. Revista Plástico Industrial, p. 230–239, 2001.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 527-2: Plastics - determination of tensile properties - part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. Rio de Janeiro, 2012. 11 p.
- LIGON, S. C. et al. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. Chemical Reviews, n. 117, p. 10212–10290, 2017.
- LOVO, J. & FORTULAN, C.. (2017). Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo FDM.
- MENDONÇA, E. C. et al. Desenvolvimento de um veículo submarino autônomo de baixo custo utilizando manufatura aditiva. Revista Pesquisa Naval, n. 32, p. 10-16, 2020.
- WOLFF, E. G. Moisture effects on polymer matrix composites. SAMPE Journal, v. 29, n. 3, p. 11–19, 1993.