JOSÉ CARLOS DE CAMARGO

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, TRIBOLÓGICAS, DE QUALIDADE DIMENSIONAL E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE PEÇAS IMPRESSAS EM PLA E ABS COM E SEM GRAFENO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Uberlândia - MG

2019

JOSÉ CARLOS DE CAMARGO

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, TRIBOLÓGICAS, DE QUALIDADE DIMENSIONAL E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE PEÇAS IMPRESSAS EM PLA E ABS COM E SEM GRAFENO

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação - Manufatura Aditiva.

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado.

Co-orientadora: Prof. Dra. Érica Cristina Almeida.

Uberlândia - MG

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

C172e
2019

Camargo, José Carlos de, 1960-
Estudo das propriedades mecânicas, tribológicas, de qualidade dimensional e condutividade elétrica de peças impressas em PLA e ABS com e sem grafeno [recurso eletrônico] / José Carlos de Camargo. - 2019.

Orientador: Álisson Rocha Machado.
Coorientadora: Érica Cristina Almeida.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Disponível em: http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.13
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. 2. Processos de fabricação. 3. Grafeno. 4. Propriedade mecânica. 5. Tribologia. 6. Condutividade elétrica I. Machado, Álisson Rocha, 1956-, (Orient.). II. Almeida, Érica Cristina, 1976-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Rejâne Maria da Silva – CRB6/1925

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br

ATA

Ata da defesa de Tese junto ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Defesa de Tese, nº 266, COPEM

Data: 08 de março de 2019 Hora início: 13h Hora encerramento: 17h40m

Discente: José Carlos de Camargo - 11423EMC007

Título do Trabalho: ***"Estudo das Propriedades Mecânicas, Tribológicas, de Qualidade Dimensional e Condutividade Elétrica de peças impressas em PLA e ABS com e sem grafeno"***

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Linha de pesquisa: Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)

Projeto de Pesquisa de vinculação:

Reuni-se no Anfiteatro B do Bloco 5O - Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Arthur Alves Fiocchi - FEMEC/UFU; Washington Martins da Silva Júnior - FEMEC/UFU; Luciano Antonio Mendes - PUCPR; Neri Volpato - UTFPR e Álisson Rocha Machado - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa Dr. Álisson Rocha Machado apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais.

Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato:

( ) Aprovado

(x) Aprovado com modificações a serem submetidas para a aprovação do orientador

( ) Aprovado com modificações a serem submetidas para a aprovação da banca

( ) Reprovado

Esta defesa de Tese de Doutorado é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

Assinaturas dos membros da banca via SEI

Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/03/2019, às 17:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Arthur Alves Fiocchi**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/03/2019, às 17:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Álisson Rocha Machado**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/03/2019, às 17:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Luciano Antonio Mendes**, **Usuário Externo**, em 08/03/2019, às 17:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Neri Volpato**, **Usuário Externo**, em 08/03/2019, às 17:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1069060** e o código CRC **C6024640**.

Referência: Processo nº 23117.017591/2019-61 SEI nº 1069060

"Aos meus pais, José Carlos (em memória) e Aurora,

À minha esposa Telma,

Aos meus filhos Taís e Felipe,

Aos meus irmãos,

Aos meus verdadeiros amigos."

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este doutorado;

Ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado pela orientação, dedicação, competência, paciência transmitidas durante o transcorrer deste trabalho e por ter aceitado este desafio;

A Profa. Dra. Érica Cristina Almeida pela co-orientação, oferecendo com extrema generosidade todos os recursos disponíveis;

Aos membros do LEPU - Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da UFU e o LAPMET - Laboratório de Projetos Mecânicos e Tribologia da UESC pelo apoio na realização dos experimentos, mas, principalmente, pela experiência e conhecimento adquiridos;

Aos professores da pós-graduação da Engenharia Mecânica da UFU em especial Dr. Solidônio e Dr. Rosemar ;

Aos professores da Engenharia Mecânica da Uesc em especial Msc. Erickson Fabiano Moura Sousa Silva e Msc Victor Hugo de Almeida;

À NZ-Cooperpolymer - Compostos Termoplásticos de Engenharia pela secção das matérias primas para injeção, a injeção dos corpos de prova e as máquinas do laboratório de ensaios mecânicos. Também agradeço aos funcionários desta empresa em especial o Sr. Nilson Zaude (Engenharia de Desenvolvimento), Keila R.P. Betega (Coordenadora da Qualidade) e o Sr. Sérgio Sartori (Comercial);

A Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UESC pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos;

À todos que em mim depositaram sua confiança e, mesmo não colaborando diretamente na área técnica, dirigiram suas boas energias, pensamentos, orações, palavras e intenções em favor da concretização de um sonho.

CAMARGO, J. C., **Estudo das Propriedades Mecânicas, Tribológicas, de Qualidade Dimensional e Condutividade Elétrica de Peças Impressas em PLA e ABS com e sem Grafeno** 2019. 262 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

A manufatura aditiva é uma tecnologia que permite fabricar produtos com geometrias complexas as quais não poderiam ser fabricadas pelos processos convencionais. Uma das tecnologias da manufatura aditiva é a modelagem por fusão e deposição, a qual vem sendo muito utilizada para produzir produtos com boa qualidade, geometrias complexas e de eficiente logística de fabricação e entrega. Devido a evolução, vem sendo utilizada como um processo alternativo ao da moldagem por injeção que somada as outras características, tem gerado um cenário de grandes oportunidades de pesquisa, tanto em materiais como em processos e aplicações. Nesta pesquisa, foram analisadas as alterações das propriedades mecânicas, tribológicas, de qualidade dimensional e condutividade elétrica de corpos de prova, impressos através do processo de modelagem por fusão e deposição, utilizando as matérias-primas PLA e ABS com e sem adição de grafeno. A melhoria destas propriedades, está associada ao estudo dos diversos parâmetros do processo de modelagem por fusão e deposição e da utilização de novos materiais. No planejamento de experimentos, para avaliação da interferência dos parâmetros de processo, foram selecionadas a porcentagem de preenchimento e espessura de camada, as quais, pela bibliografia pesquisada, possuem grande influência nas propriedades. Os resultados foram analisados e comparados com as propriedades obtidas através do mesmo processo de manufatura e que utilizaram as mesmas matérias-primas, ABS e PLA, porém sem grafeno. As propriedades mecânicas (tração e flexão), melhoraram com o aumento da porcentagem de preenchimento e da espessura de camada tanto para o PLA-grafeno quanto para o ABS-grafeno, no entanto, a adição de grafeno melhorou estas propriedades para os CPs que utilizaram a matéria-prima PLA-grafeno em relação ao PLA e piorou para o ABS-grafeno em relação ao ABS. A energia de impacto foi superior nas peças que utilizaram o ABS-grafeno em comparação ao PLA-grafeno. Nos ensaios de condutividade realizados nos CPs manufaturados com o PLA-grafeno, o valor obtido foi zero (não condutivo)

enquanto que os CPs que utilizaram o ABS-grafeno tiveram, em média, o valor de 0,24 $(\Omega.m)^{-1}$. Os resultados dos ensaios que determinaram o coeficiente de atrito, diminuíram com o aumento da carga normal, tanto para o PLA-grafeno quanto para o ABS-grafeno, exceto em peças manufaturadas por injeção por molde (PLA-granulado incolor). Os valores de desgaste aumentaram com o aumento da carga normal em todos os ensaios. O índice de qualidade IT dos CPs produzidos através do processo FDM com o PLA-Grafeno, tiveram valores entre 12 e 13 enquanto que para os CPs produzidos com ABS-grafeno este valor ficou entre 12 e 14. A rugosidade medida nos CPs manufaturados através do processo modelagem por fusão e deposição e que utilizaram a matéria-prima PLA-grafeno, foi superior aos resultados obtidos nas medições no CPs manufaturados através do mesmo processo e que utilizaram a matéria-prima ABS-grafeno, no entanto, estes resultados são conclusivos apenas para estas matérias-primas e processo selecionados, uma vez que se alteram significativamente quando se modificam as matérias-primas e parâmetros do processo de manufatura.

Palavras chave: Modelagem por fusão e deposição; Propriedades mecânicas, elétricas, tribológicas e de qualidade; PLA-grafeno; ABS-grafeno.

CAMARGO, J. C., **Study of the Mechanical, Tribological, Dimensional Quality and Electrical Conductivity Properties of PLA and ABS Printed Parts with and without Graphene** 2019. 262 f. Doctoral Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

Additive manufacturing is a technology that makes it possible to manufacture products with complex geometries that could not be manufactured by conventional processes. One of the additive manufacturing technologies is fused deposition modeling, which has been widely used to produce good quality products, complex geometries, and efficient manufacturing and delivery logistics. Due to the evolution, it has been used as an alternative process to that of injection moulding that added to the other characteristics, has generated a scenario of great research opportunities, both in materials as in processes and applications. In this research, the changes in the mechanical, tribological, dimensional quality and electrical conductivity properties of printed samples through the process of fused deposition modeling were analyzed by using PLA and ABS raw materials with and without graphene addition. The improvement of these properties is associated to the study of the several parameters of the process of fused deposition modeling and the use of new materials. In the planning of experiments to evaluate the interference of the process parameters, the percentage of fill and layer thickness were selected, which, by the bibliography researched, these have great influence in the properties. The results were analyzed and compared with the properties obtained through the same manufacturing process and using the same raw materials, ABS and PLA, but without graphene. Mechanical properties (tensile and bending) improved the increasing fill percentage and layer thickness for both PLA-graphene and ABS-graphene. However, the addition of graphene improved these properties for PCs using PLA-graphene compared to PLA and worsened for ABS-graphene compared to ABS. The impact energy was higher in the pieces that used ABS-graphene compared to PLA-graphene. In the conductivity tests performed on the sample manufactured with PLA-graphene the obtained value was zero (non-conductive) while the ABS-graphene had, on average, the value of 0,24 $(\Omega.m)^{-1}$.The results of the tests that determined the coefficient of friction decreased with the increase of the normal load, for both

PLA-graphene and ABS-graphene, except for injection moulding parts (PLA-colorless granules). Wear values increased with increasing normal load in all tests. The IT quality index of parts produced by the FDM process with PLA-Graphene had values between 12 and 13 whereas for the parts produced with ABS-graphene this value was between 12 and 14. The roughness measured in the sample manufactured through the process modeling and that utilized the PLA-graphene raw material, was superior to the results obtained in the measurements in the sample manufactured through the same process and that used the ABS-graphene. However, these results are conclusive only for these raw materials and process as they change significantly when the raw materials and parameters of the manufacturing process are modified.

Keywords: Fused deposition modeling; Mechanical, electrical, tribological and quality properties; PLA-graphene; ABS-graphene

Lista de Figuras

2.1 Projetos com canais complexos (extraído de (MARQUES et al., 2015)) 8

2.2 Número de publicações sobre manufatura por ano (adaptado de (ESMAEILIAN; BEHDAD; WANG, 2016)) 9

2.3 Uso de MA ao redor do mundo (adaptado de (JADHAV; WANKHADE, 2017)) . 10

2.4 Exemplos de arquivos STL com diferentes resoluções (fonte: Próprio autor) . . . 11

2.5 Etapas do processo e do planejamento de processo de MA (extraído de (VOLPATO, 2017)-Capítulo 5) 12

2.6 Representação das principais etapas do processo de manufatura por camadas (adaptado de (VANDRESEN, 2003)) 12

2.7 Representação do processo FDM (adaptado de (GOKCEK, 2012), p160) 14

2.8 Princípios da tecnologia FDM: 1-bico extrusor; 2-material depositado sobre a mesa de fabricação e 3-eixos de movimentação (adaptado de (ZUREK, 2008)) 15

2.9 Copolímero acrilonitrila butadieno estireno-ABS (adaptado de (PETRIE, 2003)) 20

2.10 Estrutura do $l-$;$d-$ e $d, l-$ácido láctico (adaptado de (JIMENEZ MERCEDES PELTZER, 2014) p5) 20

2.11 Rota de processo a base de amido para o bioplástico PLA (adaptado de (ENDRES et al., 2017)) 21

2.12 Representação da geometria do filamento extrudado (extraído de (VOLPATO, 2017) - Capítulo 7) 22

2.13 Representação dos principais parâmetros de controle de deposição no processo de deposição e trajetória do bico extrusor (adaptado de (VOLPATO, 2017); (HOSSAIN et al., 2013); (MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015) e (AGARWALA et al., 1996) 24

2.14 Padrão de preenchimento das camadas em processos de extrusão de material: (a)-*raster*, (b)-*contour* e (c)-combinação entre *raster* e *contour* (adaptado de (VOLPATO, 2017) - Capítulo 7) e (AGARWALA et al., 1996) 25
2.15 Estratégias adicionais de preenchimento de camadas (extraído de (SLIC3R, 2019)) 26
2.16 Representação gráfica da orientação de peças na mesa de impressão-processo de modelagem por fusão e deposição (adaptado de (BARNER, 2015)) 27
2.17 Planejamento do processo de MA para impressão de CP com necessidade de suporte. (fonte: Próprio autor) 28
2.18 Diagrama causa e efeito (Ishikawa) para os parâmetros do processo de modelagem por fusão e deposição (adaptado de (MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015)) 29
2.19 Principais componentes da unidade de alimentação no processo moldagem por injeção (fonte: (HURTADO, 2015)) 34
2.20 Principais componentes do molde no processo moldagem por injeção (fonte: (HURTADO, 2015)) 34
2.21 Representação esquemática de um sistema usado para medir a resistividade elétrica (extraído de (CALLISTER; RETHWISCH, 2015)) 36
2.22 Deformação elástica de um ponto de contato Hertzian (extraído de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)) 39
2.23 Força (F) necessária para superar o atrito e causar movimento por (a) rolamento ou (b) deslizamento (extraído de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)) 40
2.24 Variação do coeficiente de atrito (μ) com a carga normal (W), para o deslizamento não lubrificado do aço no alumínio no ar (adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)) 41
2.25 Diagrama esquemático mostrando como o coeficiente de atrito varia com a carga normal para o deslizamento de cilindros cruzados de um polímero vítreo com diferentes rugosidades (adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)) 41
2.26 Variação do coeficiente de atrito (μ) com a área aparente de contato (adaptado de (RABINOWICZ, 1995)) 42

2.27 Origem do atrito associado ao deslizamento de uma asperidade dura e lisa ao longo de uma superfície de um polímero (adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017) 44
2.28 Taxa de desgaste para polietileno de ultra peso molecular contra uma contraface de aço em função da rugosidade superficial do aço (com e sem lubrificação) (adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017) 44
2.29 Vista esquemática do teste *reciprocating* (adaptado da ASTM G133-05 (ASTM, 2016)) 45
2.30 Ensaio de determinação do CoF e desgaste no tribômetro Rtec® 46
2.31 Representação da tolerância para eixos/furos (adaptado de (ISO, 2010)) 46
2.32 Representação dos afastamentos em relação a medida nominal (adaptado de (ISO, 2010)) 46
2.33 Estruturas que compõem uma superfície (adaptado de (JOSSO; BURTON; LALOR, 2002)) 48
2.34 Comprimentos para avaliação de rugosidade superficial (adaptado de (JOSSO; BURTON; LALOR, 2002)) 48
2.35 Rugosidade média - R_a (adaptado de (JOSSO; BURTON; LALOR, 2002)) . . . 49
2.36 Rugosidade média - R_z (adaptado de (NOVASKI, 2014) 49
2.37 PCC para $\alpha_1 = 1,414$; $k = 2$ fatores (adaptado de (MONTGOMERY; C.RUNGER, 2016)) 52

3.1 Componentes de uma impressora 3D tipo Delta (adaptado de (BELL, 2015)) . . 60
3.2 Fluxograma geral dos experimentos/ensaios realizados (fonte: Próprio autor) . . 61
3.3 Fluxograma dos experimentos realizados para os ensaios mecânicos (fonte: Próprio autor) 62
3.4 Peça para impressão 3D simulada no software Simplify3D® (fonte: Próprio autor) 64
3.5 Molde utilizado para injeção dos CPs e CPs injetados (fonte: Catálogo NZ-Philpolymer - Equipamentos laboratoriais) 65
3.6 Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração, Tipo I, conforme norma ASTM D638-14 66

3.7 Procedimento para cálculo da inclinação *m* na curva tensão/deformação (adaptado de (CHACON et al., 2017)) 67
3.8 Dimensões do corpo de prova para ensaio de flexão, conforme norma ASTM D790-17 67
3.9 Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto, conforme norma ASTM D256 68
3.10 Esquema do método de quatro pontas para medição da resistividade elétrica (fonte: Próprio autor) 69
3.11 Fluxograma dos experimentos realizados para os ensaios elétricos (fonte: Próprio autor) 69
3.12 Dimensões do corpo de prova para ensaios das propriedades elétricas e tribológicas (CoF e desgaste) (fonte: Próprio autor) 70
3.13 Fluxograma dos experimentos realizados para os ensaios tribológicos (fonte: Próprio autor) 71
3.14 Fluxograma dos experimentos realizados para os ensaios de qualidade dimensional (fonte: Próprio autor) 72
3.15 CPs utilizados nos ensaios de qualidade (fonte: Próprio autor) 73
3.16 Identificação das posições de medição para o ensaio dimensional (fonte: Próprio autor) 73
3.17 Fluxograma dos experimentos realizados para os ensaios de qualidade-rugosidade (fonte: Próprio autor) 74
3.18 Identificação dos locais de ensaio para a medição da rugosidade superficial (fonte: Próprio autor) 75

4.1 Gráfico de Pareto: σ_t - matéria-prima: PLA-grafeno 79
4.2 MSR: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA-grafeno 80
4.3 Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_t - matéria-prima: PLA-grafeno 80
4.4 Gráficos: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA-grafeno 81
4.5 Gráfico de Pareto: σ_t - matéria-prima: PLA 83
4.6 MSR: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA 84

4.7 Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_t - matéria-prima: PLA 85
4.8 Gráficos: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA 86
4.9 Gráfico de Pareto: σ_t - matéria-prima: ABS-grafeno 88
4.10 MSR: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS-grafeno 89
4.11 Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto:: σ_t - matéria-prima: ABS-grafeno 90
4.12 Gráficos: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS-grafeno 91
4.13 Gráfico de Pareto: σ_t - matéria-prima: ABS 93
4.14 MSR: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS 93
4.15 Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_t - matéria-prima: ABS 94
4.16 Gráficos: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS 95
4.17 Gráfico comparativo geral: σ_t - matéria-prima: PLA/ABS 97
4.18 Gráfico de Pareto: σ_f - matéria-prima: PLA-grafeno 100
4.19 MSR: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA-grafeno 100
4.20 Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_f - matéria-prima: PLA-grafeno 101
4.21 Gráficos: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA-grafeno 102
4.22 Gráfico de Pareto: σ_f - matéria-prima: PLA 104
4.23 MSR: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA 105
4.24 Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_f - matéria-prima: PLA 106
4.25 Gráficos: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA 107
4.26 Gráfico de Pareto: σ_f - matéria-prima: ABS-grafeno 109
4.27 MSR: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS-grafeno 110
4.28 Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_f - matéria-prima: ABS-grafeno 110
4.29 Gráficos: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS-grafeno 111
4.30 Gráfico de Pareto: σ_f - matéria-prima: ABS 113

4.31 MSR: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS 114
4.32 Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_f - matéria-prima: ABS 115
4.33 Gráficos: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS 116
4.34 Gráfico comparativo geral: σ_f - matéria-prima: PLA/ABS 118
4.35 Gráfico de Pareto: E_i - matéria-prima: PLA-grafeno 120
4.36 MSR: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA-grafeno 121
4.37 Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: E_i - matéria-prima: PLA-grafeno 122
4.38 Gráficos: E_i x (*infill*/*height*) 123
4.39 Gráfico de Pareto: E_i - matéria-prima: PLA 124
4.40 MSR: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA 125
4.41 Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: E_i - matéria-prima: PLA 125
4.42 Gráficos: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA 126
4.43 Gráfico de Pareto: E_i - matéria-prima: ABS-grafeno 128
4.44 MSR: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS-grafeno 129
4.45 Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: E_i - matéria-prima: ABS-grafeno 129
4.46 Gráficos: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS-grafeno 130
4.47 Gráfico de Pareto: E_i - matéria-prima: ABS 132
4.48 MSR: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS 133
4.49 Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: E_i - matéria-prima: ABS 133
4.50 Gráficos: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS 134
4.51 Gráfico comparativo geral: E_i - matéria-prima: PLA/ABS 136
4.52 MEV do CP após ensaio de impacto com diferentes ampliações manufaturados com a matéria-prima PLA-grafeno 137
4.53 MEV do CP após ensaio de impacto com diferentes ampliações manufaturados com a matéria-prima ABS-grafeno 139

4.54 EDS do CP após ensaio de impacto com a matéria-prima ABS-grafeno 140
4.55 Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima - PLA-grafeno 142
4.56 Gráfico: CoF x tempo - amostra 01 142
4.57 Gráfico: CoF x tempo - amostra 02 143
4.58 Gráfico: CoF x tempo - amostra 03 143
4.59 Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-grafeno 144
4.60 Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: PLA-grafeno 145
4.61 Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: PLA-grafeno 145
4.62 Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: PLA-grafeno 146
4.63 Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: PLA-grafeno 146
4.64 Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: PLA-grafeno 147
4.65 Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: PLA-grafeno 147
4.66 Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima: PLA 148
4.67 Gráfico: CoF x tempo - amostra 01 149
4.68 Gráfico: CoF x tempo - amostra 02 149
4.69 Gráfico: CoF x tempo - amostra 03 150
4.70 Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA 151
4.71 Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: PLA 151

4.72 Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: PLA 152
4.73 Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: PLA 153
4.74 Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: PLA 153
4.75 Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: PLA 154
4.76 Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: PLA 154
4.77 Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima: PLA-granulado branco 155
4.78 Gráfico: CoF x tempo - amostra 01 156
4.79 Gráfico: CoF x tempo - amostra 02 156
4.80 Gráfico: CoF x tempo - amostra 03 157
4.81 Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-granulado branco 158
4.82 Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado branco 158
4.83 Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado branco 159
4.84 Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado branco 160
4.85 Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado branco 160
4.86 Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado branco 161
4.87 Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado branco 161

4.88 Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima: PLA-granulado incolor 162
4.89 Gráfico: CoF x tempo - amostra 01 163
4.90 Gráfico: CoF x tempo - amostra 02 163
4.91 Gráfico: CoF x tempo - amostra 03 164
4.92 Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-granulado incolor 165
4.93 Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado incolor 165
4.94 Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado incolor 166
4.95 Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado incolor 166
4.96 Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado incolor 167
4.97 Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado incolor 167
4.98 Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado incolor 168
4.99 Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima: ABS-grafeno 169
4.100Gráfico: CoF x tempo - amostra 01 169
4.101Gráfico: CoF x tempo - amostra 02 170
4.102Gráfico: CoF x tempo - amostra 03 170
4.103Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS-grafeno 171
4.104Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: ABS-grafeno 172
4.105Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: ABS-grafeno 172

4.106Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: ABS-grafeno 173
4.107Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: ABS-grafeno 173
4.108Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: ABS-grafeno 174
4.109Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: ABS-grafeno 175
4.110Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima: ABS 176
4.111Gráfico: CoF x tempo - amostra 01 176
4.112Gráfico: CoF x tempo - amostra 02 177
4.113Gráfico: CoF x tempo - amostra 03 177
4.114Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS 178
4.115Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: ABS 178
4.116Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: ABS 179
4.117Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: ABS 180
4.118Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: ABS 180
4.119Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: ABS 181
4.120Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: ABS 181
4.121Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima: ABS-granulado 182
4.122Gráfico: CoF x tempo - amostra 01 183

4.123Gráfico: CoF x tempo - amostra 02 183
4.124Gráfico: CoF x tempo - amostra 03 184
4.125Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS-granulado 185
4.126Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: ABS-granulado 185
4.127Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: ABS-granulado 186
4.128Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: ABS-granulado 186
4.129Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: ABS-granulado 187
4.130Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: ABS-granulado 188
4.131Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: ABS-granulado 188
4.132Valores do CoF (médios) em função das matérias-primas, processos de manufatura e carga normal 190
4.133Valores CoF (médios) em função das matérias-primas, processos de manufatura, rugosidade R_a e carga normal 192
4.134Valores de desgaste (representado pela cota Z do indentador) médio (mm) em função das matérias-primas, processos de manufatura e carga normal 193
4.135Imagens MEV: comportamento do desgaste do ABS-grafeno com a predominância do desgaste adesivo (caracterizado pela presença de detritos de grande tamanho) e processo de delaminação característica de cisalhamento 194
4.136Imagens MEV: comportamento do desgaste do PLA-grafeno - (a) predominância do desgaste adesivo (caracterizado pela presença de detritos de grande tamanho), (b) processo de delaminação característica de cisalhamento - adaptado de (BUSTILLOS et al., 2017). 195

4.137(a) Amostra PLA-grafeno com *tribofilm*, (b) presença de flocos de compósitos na trilha de desgaste - imagens extraídas de (BUSTILLOS et al., 2017). 195
4.138MEV e EDS em CP utilizado no ensaio de determinação do CoF (detalhe da região 01 ensaiada - Fig.4.139) - matéria-prima: PLA-grafeno 196
4.139Identificação dos locais de ensaio para determinação do CoF em CP produzido pelo processo FDM com matéria-prima: PLA-grafeno 197
4.140MEV e EDS em CP utilizado no ensaio de determinação do CoF (detalhe da região 02 fora da região de ensaio - Fig.4.139) - matéria-prima: PLA-grafeno 198
4.141MEV e EDS em CP utilizado no ensaio de determinação do CoF (detalhe da região 01 ensaiada - Fig.4.142) - matéria-prima: PLA 199
4.142Identificação dos locais de ensaio para determinação do CoF em CP produzido pelo processo FDM com matéria-prima: PLA 200
4.143MEV e EDS em CP utilizado no ensaio de determinação do CoF (detalhe da região 02 ensaiada - Fig.4.142) - matéria-prima: PLA 201
4.144Gráfico: valores medidos em cada posição - furo quadrado - PLA-grafeno 202
4.145Gráfico: valores medidos em cada posição - furo redondo - PLA-grafeno 202
4.146Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo quadrado - PLA-grafeno 203
4.147Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo redondo - PLA-grafeno 203
4.148Gráfico: valores medidos em cada posição - furo quadrado - PLA 204
4.149Gráfico: valores medidos em cada posição - furo redondo - PLA 204
4.150Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo quadrado - PLA 205
4.151Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo redondo - PLA 205
4.152Gráfico: valores medidos em cada posição - furo quadrado - ABS-grafeno 206
4.153Gráfico: valores medidos em cada posição - furo redondo - ABS-grafeno 206
4.154Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo quadrado - ABS-grafeno 207
4.155Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo redondo - ABS-grafeno 207
4.156Gráfico: valores medidos em cada posição - furo quadrado - ABS 208
4.157Gráfico: valores medidos em cada posição - furo redondo - ABS 208
4.158Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo quadrado - ABS 209
4.159Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo redondo - ABS 209

4.160Gráfico: valores de rugosidade - R_a (μm) - matéria-prima: PLA-grafeno 211
4.161Gráfico: valores de rugosidade - R_z (μm) - matéria-prima: PLA-grafeno 211
4.162Gráfico: valores de rugosidade - R_a (μm) - matéria-prima: PLA 212
4.163Gráfico: valores de rugosidade - R_z (μm) - matéria-prima: PLA 212
4.164Gráfico: valores de rugosidade - R_a (μm) - matéria-prima: ABS-grafeno 213
4.165Gráfico: valores de rugosidade - R_z (μm) - matéria-prima: ABS-grafeno 213
4.166Gráfico: valores de rugosidade - R_a (μm) - matéria-prima: ABS 214
4.167Gráfico: valores de rugosidade - R_z (μm) - matéria-prima: ABS 214

Lista de Tabelas

2.1 Parâmetros de controle dos arquivos STL da Fig. 2.4 10

2.2 Classificação das tecnologias de MA conforme princípio de processamento das camadas (norma ISO/ASTM 52900:2015) - extraído de (VOLPATO, 2017)-Capítulo 1 13

2.3 Sumário de publicações de estudo e otimização de processos modelagem por fusão e deposição (adaptado de (MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015)) 33

2.4 Tabela de Qualidade de Trabalho e suas utilizações 47

2.5 Tabela de processos de fabricação e suas respectivas qualidade de trabalho (IT) . 47

3.1 Tabela de especificações técnicas da matéria-prima PLA-grafeno 56

3.2 Tabela de especificações técnicas da matéria-prima: PLA 57

3.3 Tabela de especificações técnicas da matéria-prima: PLA-granulado 57

3.4 Tabela de especificações técnicas da matéria-prima: ABS 58

3.5 Tabela de especificações técnicas da matéria-prima: ABS-granulado 59

3.6 Especificações da impressora 3D-Delta 59

3.7 Valores para os parâmetros *infill*/*height* 62

3.8 Parâmetro para o processo MA por extrusão de material (ensaios mecânicos) . . 63

3.9 Parâmetros do processo de moldagem por injeção 65

3.10 Parâmetro para o processo MA por extrusão de material para os CPs utilizados nos ensaios de condutividade e tribológicos) 70

3.11 Parâmetros ensaio tribológicos - tribômetro 72

3.12 Parâmetro para o processo MA por extrusão de material (Ensaios de Qualidade) 74

4.1 Valores experimentais obtidos no ensaio de tração com PLA-grafeno (FDM) . . 77

4.2 ANOVA: Ensaio de tração - tensão de escoamento (PLA-grafeno) 78
4.3 ANOVA: Ensaio de tração - módulo de elasticidade (PLA-grafeno) 78
4.4 ANOVA: Ensaio de tração - deformação (PLA-grafeno) 78
4.5 Valores experimentais obtidos no ensaio de tração com PLA(FDM) 82
4.6 ANOVA: Ensaio de tração - tensão de escoamento (PLA) 82
4.7 ANOVA: Ensaio de tração - módulo de elasticidade (PLA) 82
4.8 ANOVA: Ensaio de tração - deformação (PLA) 83
4.9 Valores experimentais do ensaio de tração com a matéria-prima PLA-granulado (moldagem por injeção) 85
4.10 Valores experimentais obtidos no ensaio de tração com ABS-grafeno (FDM) . . 87
4.11 ANOVA: Ensaio de tração - tensão de escoamento (ABS-grafeno) 87
4.12 ANOVA: Ensaio de tração - módulo de elasticidade (ABS-grafeno) 87
4.13 ANOVA: Ensaio de tração - deformação (ABS-grafeno) 88
4.14 Valores experimentais obtidos no ensaio de tração com ABS (FDM) 90
4.15 ANOVA: Ensaio de tração - tensão de escoamento (ABS) 92
4.16 ANOVA: Ensaio de tração - módulo de elasticidade (ABS) 92
4.17 ANOVA: Ensaio de tração - deformação (ABS) 92
4.18 Valores experimentais do ensaio de tração com a matéria-prima ABS-granulado (moldagem por injeção) 94
4.19 Valores (ótimos) obtidos na equação de simulação do modelo para (σ_t): processo FDM 98
4.20 Valores experimentais obtidos no ensaio de flexão com PLA-grafeno (FDM) . . . 98
4.21 ANOVA: Ensaio de flexão - tensão de escoamento (PLA-grafeno) 99
4.22 ANOVA: Ensaio de flexão - módulo de elasticidade (PLA-grafeno) 99
4.23 ANOVA: Ensaio de flexão - deformação (PLA-grafeno) 99
4.24 Valores experimentais obtidos no ensaio de flexão com PLA (FDM) 103
4.25 ANOVA: Ensaio de flexão - tensão de escoamento (PLA) 103
4.26 ANOVA: Ensaio de flexão - módulo de elasticidade (PLA) 103
4.27 ANOVA: Ensaio de flexão - deformação (PLA) 104

4.28 Valores experimentais do ensaio de flexão com a matéria-prima PLA-granulado (moldagem por injeção) 105
4.29 Valores experimentais obtidos no ensaio de flexão com ABS-grafeno (FDM) . . . 108
4.30 ANOVA: Ensaio de flexão - tensão de escoamento (ABS-grafeno) 108
4.31 ANOVA: Ensaio de flexão - módulo de elasticidade (ABS-grafeno) 108
4.32 ANOVA: Ensaio de flexão - deformação (ABS-grafeno) 109
4.33 Valores experimentais obtidos no ensaio de flexão com ABS (FDM) 112
4.34 ANOVA: Ensaio de flexão - tensão de escoamento (ABS) 112
4.35 ANOVA: Ensaio de flexão - módulo de elasticidade (ABS) 112
4.36 ANOVA: Ensaio de flexão - deformação (ABS) 113
4.37 Valores experimentais do ensaio de flexão com ABS-granulado (moldagem por injeção) 115
4.38 Valores (ótimos) obtidos na equação de simulação do modelo para (σ_f): processo FDM 119
4.39 Valores experimentais obtidos no ensaio de impacto com PLA-grafeno (FDM) . . 119
4.40 ANOVA: Ensaio de impacto - energia de impacto (PLA-grafeno) 120
4.41 Valores experimentais obtidos no ensaio de impacto com PLA (FDM) 122
4.42 ANOVA: Ensaio de impacto - energia de impacto (PLA) 124
4.43 Valores experimentais do ensaio de impacto com a matéria-prima: PLA-granulado (moldagem por injeção) 127
4.44 Valores experimentais obtidos no ensaio de impacto com a matéria-prima: ABS-grafeno (FDM) 127
4.45 ANOVA: Ensaio de impacto - energia de impacto (ABS-grafeno) 128
4.46 Valores experimentais obtidos no ensaio de impacto com ABS (FDM) 131
4.47 ANOVA: Ensaio de impacto - energia de impacto (ABS) 131
4.48 Valor experimental do ensaio de impacto com a matéria-prima ABS-granulado (moldagem por injeção) 135
4.49 Tab. dos valores de resistividade/condutividade elétrica: matéria-prima ABS-grafeno 140
4.50 Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-grafeno 141

4.51 Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-grafeno 144
4.52 Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA 148
4.53 Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA 150
4.54 Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-granulado branco 155
4.55 Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-granulado branco 157
4.56 Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-granulado incolor 162
4.57 Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-granulado incolor 164
4.58 Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS-grafeno 168
4.59 Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS-grafeno 171
4.60 Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS 175
4.61 Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS 175
4.62 Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS-granulado 182
4.63 Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS-granulado 184
4.64 Valores do CoF e desgaste (mm) médios, obtidos nos ensaios experimentais . . . 189
4.65 Tabela comparativa das Tolerâncias Fundamentais (IT) - dimensional furos/eixos 210
4.66 Rugosidade superficial: média e desvio padrão. CPs manufaturados com a matéria-prima: PLA-grafeno 210
4.67 Rugosidade superficial: média e desvio padrão. CPs manufaturados com a matéria-prima: PLA 210

4.68 Cálculo dos valores: média, desvio padrão e rugosidade superficial 211
4.69 Cálculo dos valores: média, desvio padrão e rugosidade superficial 212
4.70 Tabela de rugosidade superficial medidos nos CPs manufaturados pelos processos FDM/moldagem por injeção com as matérias-primas: PLA/ABS 215

Lista de Símbolos

SÍMBOLOS GREGOS

ρ	-	resistividade elétrica
σ	-	condutividade elétrica ou desvio padrão
σ_t	-	tensão de escoamento à tração
σ_f	-	tensão de escoamento à flexão
ε_t	-	deformação à tração
ε_f	-	deformação à flexão
α_1	-	rotacional (planejamento de experimentos)

SÍMBOLOS LATINOS

Cp	-	capacidade do processo
E_i	-	energia de impacto
E_t	-	módulo de elasticidade à tração
E_f	-	módulo de elasticidade à flexão
i	-	corrente elétrica (teste condutividade)
P_{value}	-	nível de significância
R	-	resistência (teste condutividade)
R_a	-	rugosidade média
R_z	-	altura máxima do perfil de rugosidade
R^2	-	quadrado do coeficiente de correlação múltipla
V	-	voltagem (teste condutividade)
$\bar{S}$	-	desvio padrão da amostra

TERMINOLOGIA

flat	-	orientação plana para os CPs na mesa da impressora 3D
F	-	valor crítico de distribuição
infill	-	preenchimento
height	-	altura de camada
load	-	carga normal (ensaio tribológico)
on-edge	-	orientação sobre a aresta para os CPs na mesa da impressora 3D
raster	-	filamento
gap	-	distância (folga) entre filamentos
printer3D	-	impressora 3D
up-right	-	orientação "em pé" para os CPs na mesa da impressora 3D

SIGLAS

ABS	-	*Acrynonitrile Butadiene Styrene*
ANOVA	-	Análise de variância
ASTM	-	*American Society for Testing and Materials*
CAD	-	*Computer Aided Design*
EDS	-	Espectroscopia de Energia Dispersiva
EVA	-	Copolímero etileno/acetato de vinila
FDM	-	Modelagem por fusão e deposição
HiPS	-	Poliestireno de alto impacto
HDPE	-	Polietileno de alta densidade
IT	-	Qualidade de trabalho (tolerância dimensional)
LDPE	-	Polietileno de baixa densidade
LIE	-	Limite inferior de especificação
LSE	-	Limite superior de especificação
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura
MA	-	Manufatura Aditiva
MSR	-	Método de Superfície de Resposta
PA	-	Poliamida (nome genérico: *Nylon*)
PAN	-	Poliacrilonitrila
PBT	-	Poli(tereftalato de butila)
PCC	-	Planejamento Composto Central
PC	-	Policarbonato
PE	-	Polietileno
PET	-	Politereftalato de Etileno
PMMA	-	Poli(metacrilato de metila)
PEFE	-	Poli(tetrafluoroetileno)
PETG	-	*Polyethylene Terepthalate Glycol*
PEEK	-	Poli Éter Éter Cetona
PLA	-	Ácido Poliláctico
PVC	-	Poli Cloreto de Vinila
PP	-	Polipropileno Sindiotático
PPO	-	Poli(óxido de propileno)
PR	-	Prototipagem Rápida
PS	-	Poliestireno
SAN	-	Copolímero estireno/acrilonitrila
SLS	-	*Selective Laser Sintering*
SLA	-	*Sterolithography*
STL	-	*Standard Tesselation/Triangulation Language*
TE	-	Termoplásticos de engenharia
UTS	-	*ultimate tensile strength*
OG	-	Óxido de grafeno

SUMÁRIO

Lista de Figuras **xii**

Lista de Tabelas **xxv**

1 INTRODUÇÃO **1**

1.1 Objetivo geral 6

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **7**

2.1 Manufatura aditiva 7

2.1.1 Conceitos de manufatura aditiva 7

2.2 Processo de MA por extrusão de material 12

2.2.1 Princípios 12

2.2.2 Materiais utilizados no processo modelagem por fusão e deposição 15

2.2.3 Parâmetros do processo de modelagem por fusão e deposição 21

2.2.4 Influência dos parâmetros de processo de modelagem por fusão e deposição de material, nas propriedades mecânicas, tribológicas e da qualidade . . 28

2.3 Moldagem por Injeção 32

2.4 Comparação entre processos 34

2.5 Resistividade e condutividade elétrica 35

2.6 Tribologia 37

2.6.1 Topografia de superfícies 38

2.6.2 Contato entre superfícies 39

2.6.3 Atrito 40

2.6.4 Tribologia de polímeros 43

2.6.5 Determinação do (CoF) e desgaste 45
2.7 Qualidade 45
2.7.1 Qualidade dimensional 45
2.7.2 Qualidade superficial - Rugosidade 47
2.7.3 Qualidade superficial - Peças impressas 49
2.8 Modelos estatísticos de análise 50
2.8.1 Planejamento de experimentos 50
2.8.2 Metodologia de superfície de resposta (MSR) 51
2.8.3 Teste de significância do modelo 52
2.8.4 Controle estatístico da qualidade 54

3 METODOLOGIA 55

3.1 Materiais 55
3.1.1 Matéria-prima PLA-grafeno 56
3.1.2 Matéria-prima PLA 56
3.1.3 Matéria-prima PLA-granulado 57
3.1.4 Matéria-prima ABS-grafeno 57
3.1.5 Matéria-prima ABS 58
3.1.6 Matéria-prima ABS-granulado 58
3.2 Máquinas, equipamentos e softwares 59
3.2.1 Impressora 3D 59
3.2.2 Injetora 59
3.2.3 Software CAD 60
3.2.4 Software para fatiamento (*slicing*) 60
3.2.5 Software estatístico 60
3.2.6 Software matemático 60
3.3 Procedimentos experimentais 61
3.3.1 Ensaios mecânicos 61
3.3.2 Ensaio para determinação da resistividade e condutividade elétrica 68
3.3.3 Ensaio para determinação do (CoF) e desgaste 70

3.3.4 Ensaios para determinar a tolerância dimensional 72
3.3.5 Ensaios para determinação da rugosidade superficial 74
3.3.6 Significância do modelo 76

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 77

4.1 Resultados dos ensaios de tração 77
4.1.1 Ensaio de tração-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno 77
4.1.2 Ensaio de tração-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA 81
4.1.3 Ensaio de tração-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado 85
4.1.4 Ensaio de tração-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno 86
4.1.5 Ensaio de tração-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS 89
4.1.6 Ensaio de tração-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima ABS-granulado 94
4.1.7 Ensaio de tração-Discussão dos resultados 95
4.2 Resultados dos ensaios de flexão 98
4.2.1 Ensaio de flexão-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno 98
4.2.2 Ensaio de flexão-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA 101
4.2.3 Ensaio de flexão-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado 105
4.2.4 Ensaio de flexão-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno 106
4.2.5 Ensaio de flexão-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS 111

4.2.6 Ensaio de flexão-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima ABS-granulado . . . 114
4.2.7 Ensaio de flexão-Discussão dos resultados . . . 115
4.3 Resultados dos ensaios de impacto . . . 119
4.3.1 Ensaio de impacto-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno . . . 119
4.3.2 Ensaio de impacto-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA . . . 121
4.3.3 Ensaio de impacto-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado . . . 126
4.3.4 Ensaio de impacto-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno . . . 127
4.3.5 Ensaio de impacto-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS . . . 131
4.3.6 Ensaio de impacto-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria prima ABS-granulado . . . 134
4.3.7 Ensaio de impacto-Discussão dos resultados . . . 135
4.4 Resultados dos ensaios resistividade e condutividade elétrica . . . 138
4.4.1 Ensaio de resistividade e condutividade elétrica-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno . . . 138
4.4.2 Ensaio de resistividade e condutividade elétrica-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria prima ABS-grafeno . . . 138
4.5 Resultados dos ensaios tribológicos . . . 141
4.5.1 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno . . . 141
4.5.2 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA . . . 148
4.5.3 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado branco . . 155

4.5.4 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado incolor . . . 159
4.5.5 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno 168
4.5.6 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS 174
4.5.7 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo moldagem por injeção com a matéria-prima ABS-granulado 181
4.5.8 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-Discussão dos resultados . 187
4.6 Resultados dos ensaios de qualidade 197
4.6.1 Ensaios de qualidade dimensional-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno 197
4.6.2 Ensaios de qualidade dimensional-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA 197
4.6.3 Ensaios de qualidade dimensional-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno 199
4.6.4 Ensaios de qualidade dimensional-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS 200
4.6.5 Ensaios de qualidade dimensional-Discussão dos resultados 200
4.7 Resultados dos ensaios de rugosidade superficial 202
4.7.1 Ensaio de rugosidade superficial-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno 202
4.7.2 Ensaio de rugosidade superficial-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA 203
4.7.3 Ensaio de rugosidade superficial-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno 204
4.7.4 Ensaio de rugosidade superficial-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS 205
4.7.5 Ensaio de rugosidade superficial-Discussão dos resultados 206

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 216

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 218

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Atualmente, a competição é intensa quando se refere ao desenvolvimento de um produto. As empresas investem na procura de ferramentas necessárias para continuarem competitivas tendo como objetivos principal a entrega de produtos com rapidez, alta qualidade e baixo custo.

Segundo (MACHADO et al., 2011) e (SANTOS; SALES, 2007), fabricar consiste em transformar a matéria-prima em produto acabado ou semiacabado. As modificações pelas quais passam as matérias-primas, durante a transformação em produto, caracterizam os processos de fabricação. Cada processo de fabricação possui características próprias as quais se distinguem das demais, porém podemos classificá-los em: "com remoção de material " e "sem remoção de material". Dentre os processos de fabricação "sem remoção de material" estão a manufatura aditiva ou impressão 3D e processo de moldagem por injeção. A impressão 3D está entre as tecnologias da 4^a revolução industrial, segundo (SCHWAB, 2016), pois se enquadra no novo conceito de utilização de peças que empregam polímero como matéria-prima: atualmente fabrica-se o produto e envia-se para o local onde será utilizado/montado. No futuro o local de utilização/montagem possuirá uma impressora 3D e o fabricante enviará o projeto digital com os parâmetros de processo para se imprimir o produto no local de uso e a matéria-prima mais adequada a ser utilizada.

A manufatura aditiva (MA)[1], segundo (VOLPATO, 2017); (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015); (CHUA; LEONG; LIM, 2003); (KAMRANI; NASR, 2010); (A.BANDYOPADHYAY; BOSE, 2016); (COOPER, 2001); (SRIVATSAN; SUDARSHAN, 2016); (NGO et al., 2018) e

[1]O termo manufatura aditiva em inglês corresponde a *additive manufacturing* (AM)

(KOMARNICKI, 2017), significa processo de fabricação através da deposição de material camada por camada. Esta tecnologia permite fabricar produtos com formas complexas as quais, nos processos convencionais de usinagem, seriam de grande complexidade. Uma das tecnologias de MA disponíveis para fabricar produtos, é o processo FDM[2], segundo (VOLPATO, 2017), (GOKCEK, 2012); (CANTRELL et al., 2017); (KAMRANI; NASR, 2010); (SANTANA; ALVES; NETTO, 2017); (SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2010) e (AHN et al., 2002). Um dos tipos do processo FDM é a impressão 3D a qual permite fabricar componentes físicos em 3D, com informações obtidas diretamente do modelo geométrico gerado no sistema CAD. O processo inicia com o modelo 3D da peça no CAD sendo "fatiado" eletronicamente, obtendo-se curvas de níveis 2D (movimentos no plano XY) que definirão, em cada camada (direção Z), onde existe ou não material a ser adicionado (PHAM; GAULT, 1998).

A melhoria das propriedades mecânicas, de qualidade e tribológicas pode ser alcançadas através do estudo dos diversos parâmetros do processo FDM e testes de materiais. Segundo (CHUA; LEONG; LIM, 2003) e (DAWOUD; TAHA; EBEID, 2016), as peças produzidas através do processo FDM, podem possuir até 85% da resistência das peças produzidas através do processo de moldagem por injeção com o mesmo material, porém dependem bastante dos parâmetros de processo, tais como: orientação do CP na mesa de impressão, espessura da camada, ângulo de *raster*, largura, densidade e padrões de preenchimento, velocidade de impressão, diâmetro do extrusor, dentre outros. Estes parâmetros possuem efeito substancial na qualidade e desempenho das peças. Produtos produzidos pelo processo de modelagem por fusão e deposição tem comportamento anisotrópico; ou seja, as propriedades variam de acordo com os parâmetros de processos selecionados.

O estudo de (DIZON et al., 2018) concluiu que, dependendo da orientação do *raster*, as amostras que utilizaram a mátéria-prima ABS, tiveram resistência à tração, entre 10% e 73% da resistência obtidas nos CPs produzidos pelo processo de moldagem por injeção e que utilizaram a mesma matéria-prima .

Diversos são os estudos ((GOKCEK, 2012), (CANTRELL et al., 2017), (CHACON et al., 2017), (SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2010), (AHN et al., 2002), (DOMINGO-ESPIN

[2]O termo FDM, em inglês, significa *fused deposition modeling* e em português, modelagem por fusão e deposição

et al., 2015), (FORUZANMEHR et al., 2016), (MELENKA et al., 2016), (ZHUANG et al., 2017), (SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2012), (DURGUN; ERTAN, 2014), (LEE; ABDULLAH; KHAN, 2005) e (WENG et al., 2016)) que destacam o impacto dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas.

O estudo de (WITTBRODT; PEARCE, 2015) abordou os efeitos das cores (foram utilizados cinco cores de filamento: branco, preto, azul, cinza e natural) e temperatura de processamento nas propriedades mecânicas da matéria-prima PLA. O estudo concluiu que existe uma temperatura crítica de impressão para otimizar a cristalinidade com base nos resultados dos ensaios que utilizaram o filamento branco.

Durante longo período, o processo de manufatura utilizado para fabricar peças com polímeros foi a moldagem por injeção. Este processo tem como característica a produção em grandes quantidades e a necessidade de um molde. Segundo (DOWCHEMICAL, 2018), consiste em fundir o plástico na extrusora, utilizando o parafuso desta para injetar o plástico em um molde, onde é resfriado. Velocidade e consistência são essenciais para o êxito de uma operação de moldagem por injeção. É, segundo (DAWOUD; TAHA; EBEID, 2016), visto como alternativo ao processo FDM e na maioria dos casos o fator custo e as propriedades mecânicas, elétricas, tribológicas e de qualidade são decisivos na escolha do processo a ser utilizado (processo modelagem por fusão e deposição ou moldagem por injeção). Os materiais mais utilizados nos processos FDM/injeção são geralmente os termoplásticos os quais podem ser polietileno, teflon, polipropileno, *Acrylonitrile Butadiene Styrene*-(ABS), *Ácido Poliláctico* -(PLA), *High Impact Polystyrene*-(HiPS),*Polyethylene Terepthalate Glycol*-(PETG), Poliamida-(PA) nome genérico-Nylon, Poli Éter Éter Cetona-(PEEK), entre outros.

Uma das matérias-primas bastante utilizada na atualidade é o PLA porque possui características mecânicas superiores ao ABS e por ser biodegradável. Os plásticos, segundo (EQUBAL; SOOD, 2015), possuem muitas propriedades atrativas que incluem baixa densidade, boa conformação, refletividade, resistência à abrasão, porém possuem algumas limitações nas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas. Em determinados projetos estas propriedades podem ser exigidas e o material utilizado tem forte influência. A fabricante de polímeros (RTP, 2019) estuda a adição de materiais aos polímeros para melhorar o coeficiente de atrito e desgaste. Os materiais aditivos mais utilizados são: PTFE (*polytetrafluoroethylene*), fibra, silicone, bissulfeto

de molibdênio, grafeno, PFPE (*perfluoropolyether*), entre outros. Devido as suas características, o grafeno tem sido muito utilizado pois altera significativamente as propriedades mecânicas, elétricas, tribológicas e de qualidade.

O estudo de (BUSTILLOS et al., 2017) abordou o comportamento tribológico (CoF e desgaste) dos CPs manufaturados pelo processo FDM, utilizando a matéria-prima PLA com grafeno e os comparou com os CPs que utilizaram a matéria-prima PLA sem grafeno e manufaturadas pelo mesmo processo. A resistência ao desgaste aumentou 14% para os CPs que utilizaram a matéria-prima PLA-grafeno em relação ao PLA. Em relação ao CoF, os CPs que utilizaram a matéria-prima PLA-grafeno apresentaram uma diminuição de 65% em relação ao PLA no primeiro estágio do ensaio. No segundo estágio, o comportamento do CoF foi semelhante para ambos os materiais. Conclui-se que CPs produzidos com o PLA-grafeno mostraram melhora significativa do CoF e desgaste em relação ao PLA e demonstrou que a impressão 3D pode ser um método de manufatura alternativo ao processo de moldagem por injeção.

O estudo feito por (ANITHA; ARUNACHALAM; RADHAKRISHNAN, 2001) verificou que parâmetros críticos que influenciam na rugosidade de peças produzidas por FDM são: espessura de camada, espessura do *raster* e velocidade de deposição. Foi utilizada a técnica estatística de Taguchi para analisar os dados experimentais e o fator mais significativo, segundo os ensaios realizados, foi a espessura de camada.

No estudo feito por (REDDY et al., 2018) os CPs foram impressos variando-se a orientação de construção (variou entre o ângulo de 10° e 90°), espessura da camada, material de preenchimento e qualidade de impressão. Foi investigada a influência destes fatores na textura superficial. Concluiu que os valores experimentais e previstos das rugosidade R_p, R_v, R_z, R_a e RS_m diminuíram com o aumento da inclinação de CP em relação a mesa de impressão, e aumentaram com o aumento da espessura da camada. Tanto os valores experimentais como os previstos para o RPc (contagem dos picos no perfil de rugosidade) aumentaram com o aumento da inclinação do CP em relação a mesa de impressão e diminuíram com o aumento da espessura da camada.

No estudo de (RAHMATI; VAHABLI, 2015) , modelos analíticos foram apresentados para expressar a distribuição da rugosidade da superfície em peças manufaturadas pelo processo FDM em função das variações no ângulo de construção da superfície, considerado o principal fator que afeta a qualidade da superfície.

Segundo os estudos de (SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2010) e (AFROSE et al., 2016), o dificilmente se determina um modelo teórico para se avaliar a precisão dimensional. Os parâmetros do processo influenciam nas respostas de uma maneira altamente não linear, embora o estudo de (MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2016b) tenha abordado a otimização dos parâmetros de processo FDM (espessura de camada, folga entre *raster*, ângulo de *raster*, orientação de posicionamento do CP na mesa de impressão, largura do *raster* e número de contorno) e verificou a influência destes parâmetros na precisão dimensional usando o critério I-*optmality*.

Segundo (MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015), uma das mais importantes metodologias de análise de experimentos para o processo FDM é a RMS (metodologia de superfície de resposta). Este método, segundo (MONTGOMERY; C.RUNGER, 2016), é usado para caracterizar o processo através de fatores mais significativos e seus efeitos. Um dos projetos experimentais utilizados para ajustar modelos de segunda ordem é o PCC (planejamento composto central) com 2 fatores.

Em termos de aplicação, a manufatura aditiva inicialmente se restringia a obtenção de protótipos com menores exigências materiais, precisão dimensional e desempenho. Com o aumento da percepção do potencial oferecido pela MA e da melhoria contínua do processo, o campo de aplicação se ampliou consideravelmente. Estas características passaram a exigir mais dos processos em termos de melhoria geral da qualidade dos componentes produzidos, dos materiais e das suas funcionalidades. Permitiram que se possa planejar, executar e antecipar muitos dos problemas durante o processo de manufatura e encontrar soluções antes que seja iniciado . Estas características têm gerado um cenário de grandes oportunidades de pesquisas, tanto em materiais como em processos e aplicações. O desenvolvimento de novos materiais com adição de componentes específicos (neste caso o grafeno) e a sua utilização em um processo de impressão 3D, visto como uma alternativa cada vez mais viável ao processo de moldagem por injeção, é uma das características que justificam o ineditismo desta pesquisa.

1.1 Objetivo geral

Analisar as alterações das propriedades mecânicas, tribológicas, de qualidade dimensional e condutividade elétrica de corpos de prova impressos através do processo de modelagem por fusão e deposição, utilizando as matérias-primas PLA e ABS com e sem adição de grafeno.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de conhecer o estado da arte sobre a determinação das propriedades mecânicas, de qualidade dimensional, tribológicas e condutividade elétrica de corpos de prova fabricados pelo processos de modelagem por fusão e deposição e moldagem por injeção, foi desenvolvida uma extensa revisão bibliográfica abordando os temas: manufatura aditiva ou impressão 3D, moldagem por injeção, comparação entre os processos de modelagem por fusão e deposição e moldagem por injeção, propriedades mecânicas, elétricas, tribológicas e de qualidade dimensional e conceitos estatísticos.

2.1 Manufatura aditiva

2.1.1 Conceitos de manufatura aditiva

A manufatura aditiva, segundo a norma ASTM F2792-12a (ASTM, 2012), pode ser definida como qualquer processo que una materiais para originar peças a partir de dados de um modelo tridimensional, geralmente camada sobre camada, em oposição aos métodos de manufatura subtrativa e de conformação. Esta tecnologia permite fabricar produtos com geometrias complexas totalmente funcionais, as quais não poderiam ser fabricadas por processos convencionais. Entre as possíveis aplicações, está a área de fabricação de moldes para o processo de moldagem por injeção e a bio-engenharia. Em função da necessidade de resfriamento tanto do

molde quanto do produto após o processo de moldagem por injeção, é necessário que se construa os canais complexos[1]. Estes moldes fabricados pelos métodos convencionais de usinagem, prevê a execução destes canais pelo processo de furação e executados na geometria retilínea. Isto, na maior parte dos casos, não propicia refrigeração homogênea tanto do molde quanto do processo. Esta característica não otimiza o processo e prejudica a qualidade do produto. A fabricação destes mesmos canais através do processo de modelagem por fusão e deposição podem não ser retilíneos como no processo convencional e propiciam ganhos de produtividade e qualidade (conforme ilustração da Fig. 2.1).

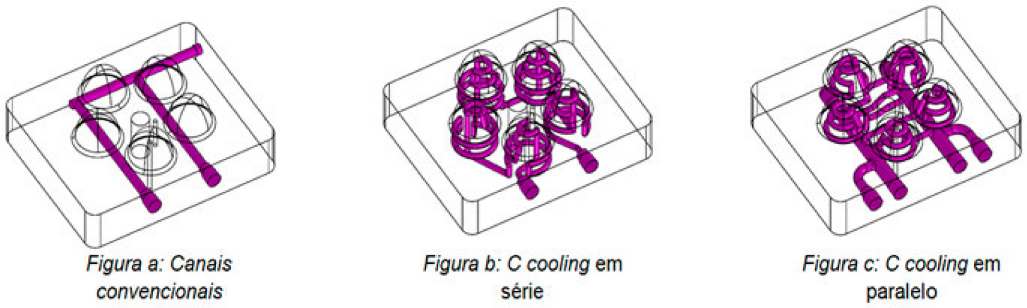


Figura 2.1 – Projetos com canais complexos (extraído de (MARQUES et al., 2015))

Nos processos convencionais de usinagem com retirada de material, segundo (MACHADO et al., 2011), consome-se tempo e energia para criação de um bloco ou *blank* maior para posteriormente consumir ainda mais energia para remoção dos excessos até que o produto final tome forma. A manufatura aditiva consome energia para criar o produto/peça final e na produção da matéria-prima, porém minimiza desperdícios de material/custos ao contrário dos processos convencionais.

Na medida em que evoluiu, o número de aplicações se expandiu chegando as mais diversas áreas de engenharia, incluindo a indústria eletrônica, automobilística, aeronáutica e também na área de saúde, com a fabricação de próteses médicas e dentárias. As propriedades mecânicas e de acabamento superficial dos produtos manufaturados através do processo FDM se aproximaram dos valores das peças manufaturadas através dos processos convencionais de moldagem por injeção (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015); (A.BANDYOPADHYAY; BOSE, 2016); (LIOU, 2008) e (CUNICO, 2013).

[1] O termo canais complexo em inglês corresponde a *conformal cooling*

Segundo (ESMAEILIAN; BEHDAD; WANG, 2016), as publicações que envolvem os conceitos de manufatura aditiva e impressão 3D tem aumentado a partir de 2012 conforme Fig. 2.2.

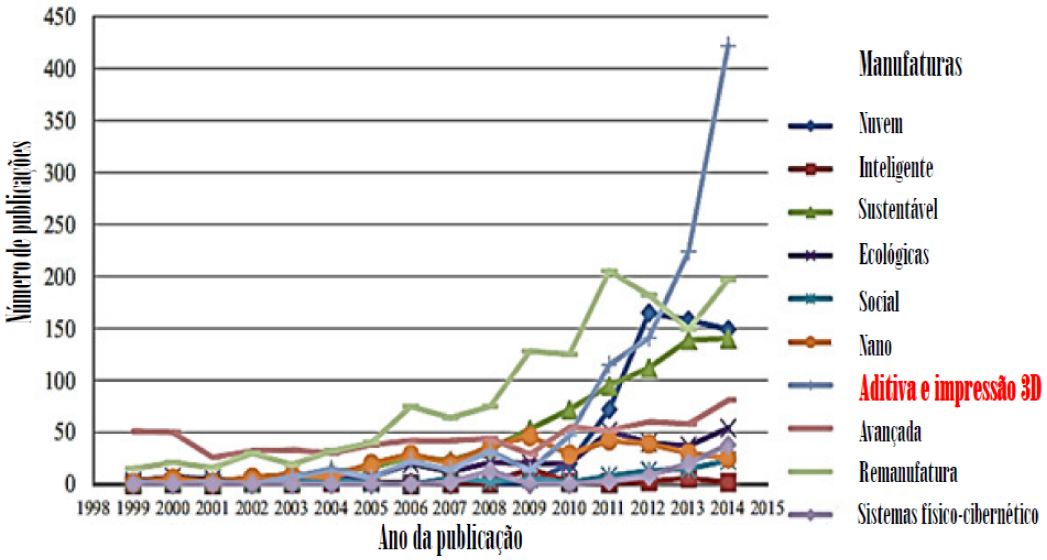


Figura 2.2 – Número de publicações sobre manufatura por ano (adaptado de (ESMAEILIAN; BEHDAD; WANG, 2016))

Segundo (JADHAV; WANKHADE, 2017) e (VOLPATO, 2017)-Capítulo 1, vários são os segmentos que estão utilizando o processo de MA por extrusão de material (Fig. 2.3), entre elas a indústria aeroespacial, automobilística, de bioengenharia, acadêmicos entre outros. A medida que aumenta o número de profissionais e empresas que tomam conhecimento dessas tecnologias aumenta-se também os campos de aplicação.

Todos os modelos de MA, segundo (VOLPATO, 2017)-Capítulo 4, dependem de uma representação geométrica tridimensional (3D) dos objetos para serem fabricados. O principal meio de geração dos modelos geométricos são os sistemas CAD 3D, porém é possível obtê-los também por *scanners* 3D, ultrassonografia 3D, ressonância magnética entre outros. O formato mais utilizado é o **ST**ereo**L**ithography (STL) e caracteriza-se por ser uma forma simples e robusta de representar modelos tridimensionais por meio de uma malha triangular os quais recobrem todas as superfícies de um objeto. É considerado um padrão para a indústria de equipamentos de MA. A conversão do modelo sólido em uma representação de malhas de polígonos (caso do STL), conduz a erros de aproximação de superfície e não conseguem representá-las de forma suavizada. O controle de diferentes parâmetros como ângulo e flecha geram arquivos com representação de

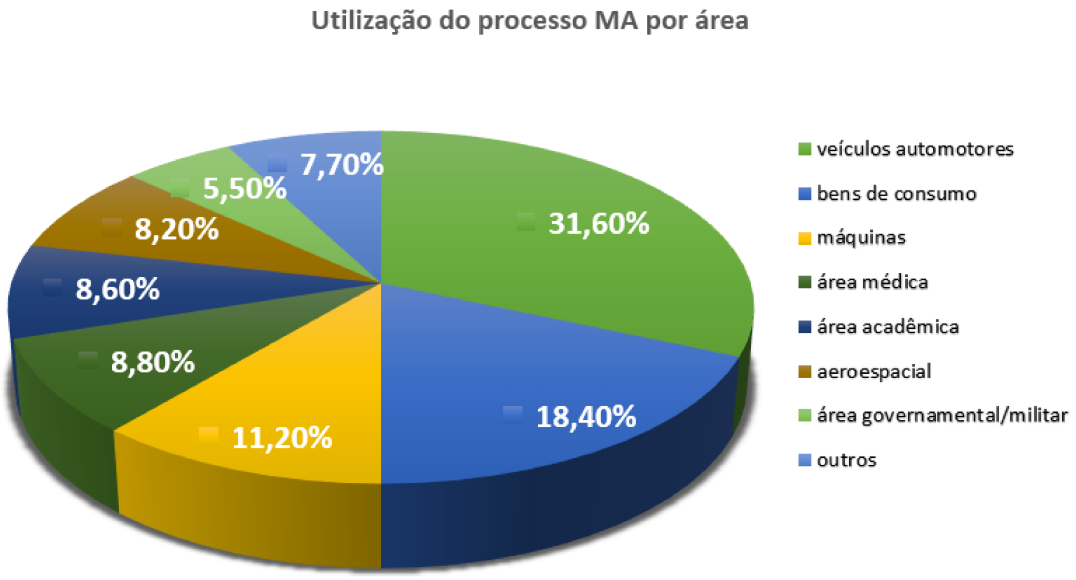


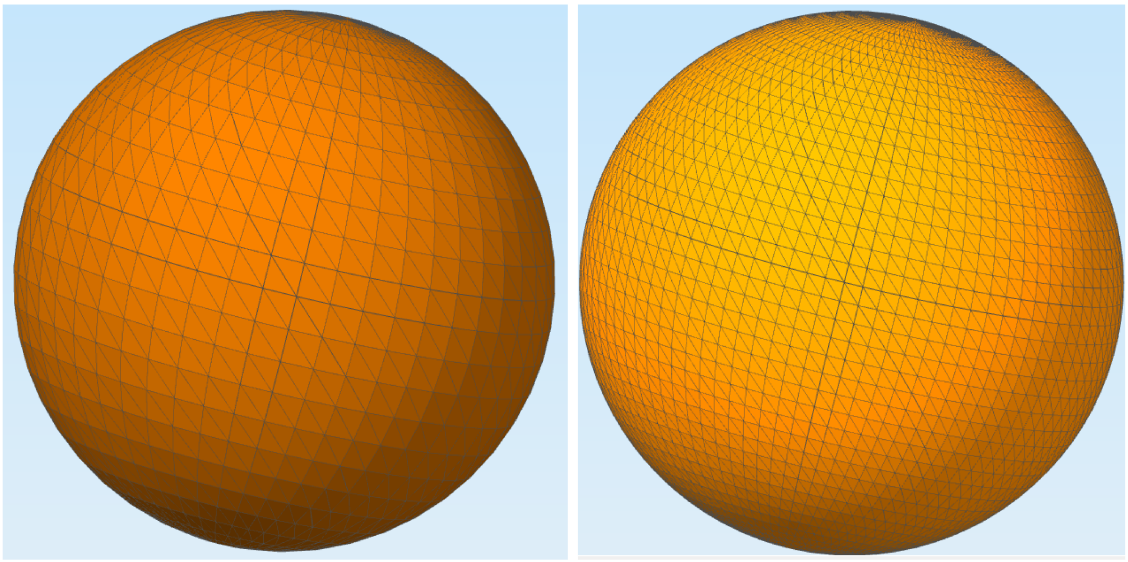
Figura 2.3 – Uso de MA ao redor do mundo (adaptado de (JADHAV; WANKHADE, 2017))

malha mais grosseira ou mais refinada. Na geração dos arquivos STL é possível haver descontinuidades as quais são incompatíveis com o processo de impressão 3D. Nestes casos é necessário fazer uma reparação nestes arquivos, com softwares específicos, de modo a eliminá-las. A Tab. 2.1 contém uma simulação do número de triângulos e tamanho do arquivo em função dos parâmetros de controle de arquivos STL gerados a partir do software Solidworks®. Os valores do ângulo e flecha foram selecionados conforme disponibilidade no módulo de geração dos arquivos padrão STL (valores extremos e um intermediário). Verifica-se que quanto mais refinada a malha maior o número de triângulos que representam a superfície, maior o tamanho do arquivo e também maior a exigência de processamento.

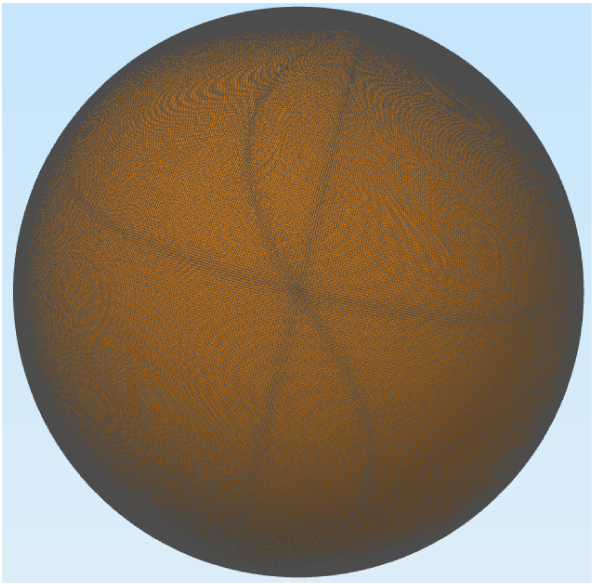
Tabela 2.1 – Parâmetros de controle dos arquivos STL da Fig. 2.4

Modelo	Esfera (padrão STL)					
	Fig. 2.4a		Fig. 2.4b		Fig. 2.4c	
Parâmetros de controle STL	ângulo (graus)	flecha (mm)	ângulo (graus)	flecha (mm)	ângulo (graus)	flecha (mm)
	30^o	0,1650	5^o	0,0051	$0,5^o$	0,0069
Número de triângulos	2.352		7832		516.960	
Tamanho do arquivo (Kbytes)	114.9		382.5		25242.3	

Segundo (VOLPATO, 2017)-Capítulo 5, o planejamento do processo MA envolve: lei-



(a) 30^o x 0,1650 mm (b) 5^o x 0,0051 mm



(c) $0{,}5^o$ x 0,0069 mm

Figura 2.4 – Exemplos de arquivos STL com diferentes resoluções (fonte: Próprio autor)

tura dos modelos geométricos 3D; orientação e posicionamento de cada geometria no volume disponível para impressão; fatiamento computacional da geometria; quando necessárias, cálculo das estruturas de suportes; cálculo do preenchimento de acordo com a estratégia e parâmetros do processo e geração dos dados a serem enviados ao equipamento de MA e quando necessário, pós-processamento (Figuras 2.5 e 2.6).

Segundo (SILVA, 2015), há mais de 30 processos de MA comerciais com importância econômica. Visando utilizar os diferentes príncipios como método de classificação das tecnologias

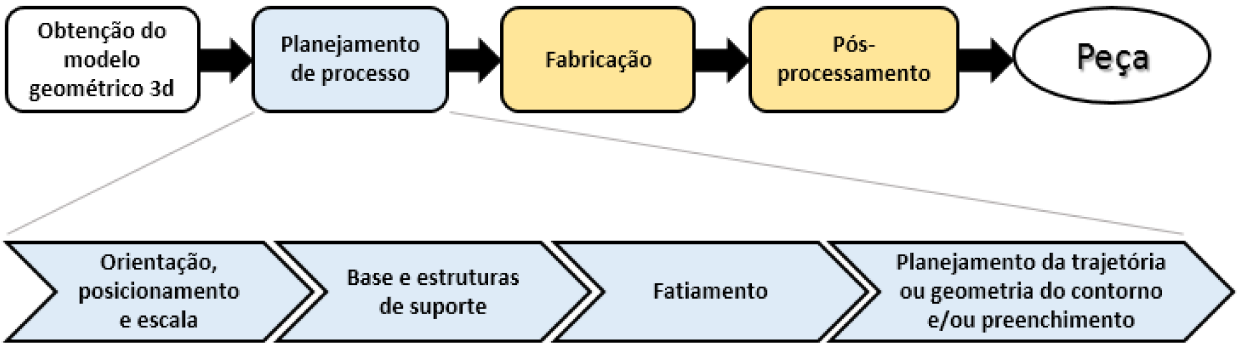


Figura 2.5 – Etapas do processo e do planejamento de processo de MA (extraído de (VOLPATO, 2017)-Capítulo 5)

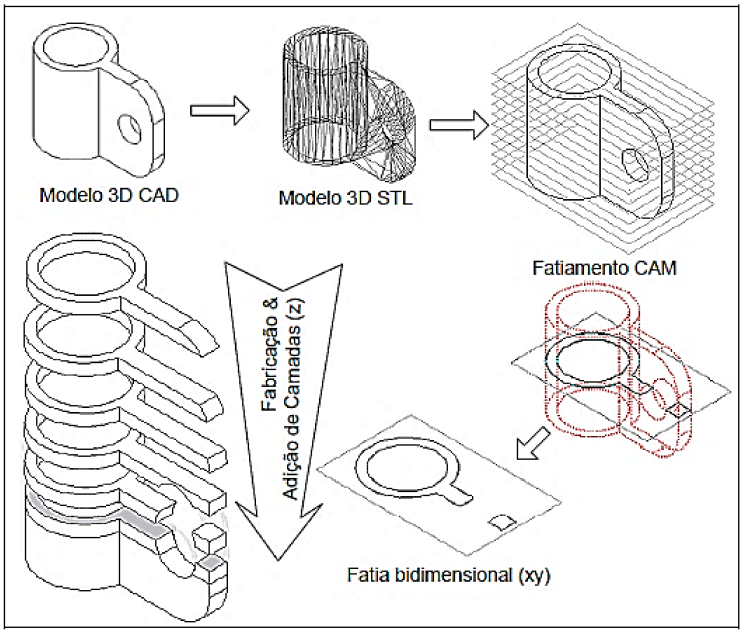


Figura 2.6 – Representação das principais etapas do processo de manufatura por camadas (adaptado de (VANDRESEN, 2003))

de MA, a norma ISO/ASTM[2] 52900:2015(E) propõe o enquadramento em sete categorias ou grupos, conforme descritos na Tab. 2.2.

2.2 Processo de MA por extrusão de material

2.2.1 Princípios

Uma das classes de MA disponíveis para fabricar produtos, é o processo por extrusão de material. Uma das tecnologias desta categoria (conforme Tab. 2.2) é o processo de

[2] *American Society for Testing and Materials*

Tabela 2.2 – Classificação das tecnologias de MA conforme princípio de processamento das camadas (norma ISO/ASTM 52900:2015) - extraído de (VOLPATO, 2017)-Capítulo 1

Classificação das tecnologias MA	Descrição dos princípios	Algumas tecnologias na categoria
Fotopolimerização em cuba	Polímero fotossensível líquido é curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por luz.[1]	Esteriolitografia (*stereolithography* - SL), produção contínua com interface líquida (*continuous liquid interface production*-CLIP), tecnologia da empresa Invision-TEC, outros.
Extrusão de material	Material é extrudado através de um bico ou orifício, sendo seletivamente depositado.	Modelagem por fusão e deposição (*fused deposition modeling* - FDM), Makerbot, RepRap, Fab@Home, outros.
Jateamento de material	Material é depositado em pequenas gotas de forma seletiva.	PolyJet, impressão de múltiplos jatos (*MultiJet printing*-MJP), tecnologia da Solidscape, outros.
Jateamento de aglutinante	Um agente aglutinante líquido é seletivamente depositado para unir materiais em pó.	Impressão colorida por jato (*ColorJet Printing*-CJP), tecnologia de VoxelJet, tecnologia da ExOne, outros.
Fusão de leito de pó	Energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó.	Sinterização seletiva a *laser* (*selective laser sintering*-SLS), sinterização direta de metal a *laser* (*direct metal laser sintering*-DMLS), fusão seletiva a *laser* (*selective laser melting*-SLM), LaserCUSING, fusão por feixe de elétrons (*electron beam melting*-EBM), outros.
Adição de lâminas	Lâminas recortadas de material são unidas (coladas) para formar um objeto	Manufatura laminar de objetos (*laminated object manufacturing*-LOM), tecnologia da Solido, deposição seletiva de laminados (*selective deposition lamination*-SDL),outros.
Deposição com energia direcionada	Energia térmica é usada para fundir materiais à medida que estes são depositados	Forma final obtida com *laser* (*laser engineered net shaping*-LENS), deposição direta de metal (*direct metal deposition*-DMD), revestimento a *laser* tridimensional (*3D laser cladding*), outros.

[1]Observação: os processos que utilizam projeção de luz UV (com ou sem máscara) e cujo material não fica necessariamente em uma cuba estão inclusos nesse grupo

modelagem por fusão e deposição (FDM) ((KAMRANI; NASR, 2010), (GOKCEK, 2012), (CANTRELL et al., 2017), (SANTANA; ALVES; NETTO, 2017), (SOOD; OHDAR; MAHAPATRA,

2010) (AHN et al., 2002), (DIZON et al., 2018), (VOLPATO, 2017), (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015), (CHUA; LEONG; LIM, 2003), (KAMRANI; NASR, 2010), (A.BANDYOPADHYAY; BOSE, 2016), (COOPER, 2001); (LIOU, 2008) e (LAM, 2008)), a qual permite fabricar componentes físicos em 3D, com informações obtidas diretamente do modelo geométrico gerado no sistema CAD. Normalmente, esse sistema opera sobre uma plataforma de construção constituída de um mecanismo elevador, que se desloca para baixo na direção do eixo Z ao término de cada camada, numa distância equivalente à espessura de uma camada. Há também a possibilidade de o cabeçote extrusor se deslocar para cima, enquanto a plataforma permanece estacionária. O processo consiste na deposição de material na forma de um filamento de diâmetro reduzido, que é obtido pelo princípio da extrusão em um bico calibrado e é repetido a cada camada de material depositado, até que a peça seja construída. O processo inicia com o modelo 3D da peça no CAD sendo "fatiado" eletronicamente, obtendo-se curvas de níveis 2D (movimentos no plano XY) que definirão, em cada camada (direção Z), onde existe ou não material a ser adicionado (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015), (SRIVATSAN; SUDARSHAN, 2016).

A empresa Stratasys, Inc., EUA, está entre as primeiras a iniciar suas atividades na área de MA. Segundo (CHUA; LEONG; LIM, 2003), apesar da tecnologia FDM ter sido desenvolvida em 1988, o primeiro equipamento foi comercializado em 1992. A Fig. 2.7 ilustra o processo FDM e destaca algumas partes importantes como o bico extrusor e a deposição do filamento fundido.

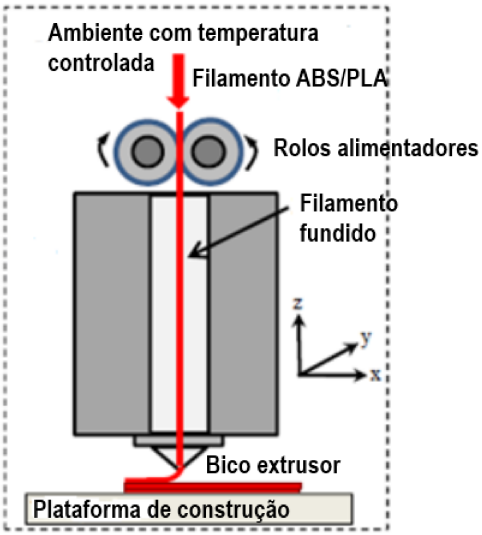


Figura 2.7 – Representação do processo FDM (adaptado de (GOKCEK, 2012), p160)

Para se obter a geometria de cada camada, o cabeçote extrusor é normalmente mon-

tado sobre um sistema com movimentos controlados no plano X-Y (conforme Fig. 2.8). As trilhas são depositadas lado a lado, até formar uma camada. As demais, vão sendo sobrepostas até que este empilhamento tome a forma do objeto final (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

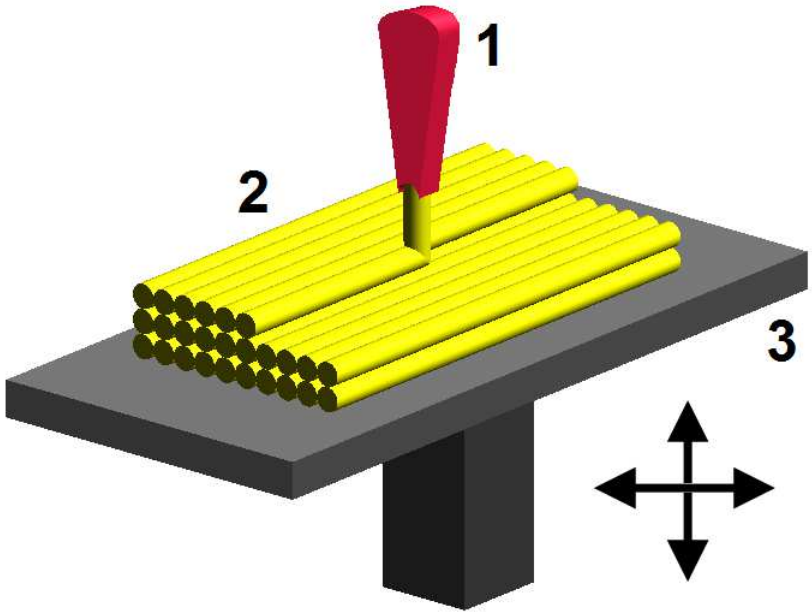


Figura 2.8 – Princípios da tecnologia FDM: 1-bico extrusor; 2-material depositado sobre a mesa de fabricação e 3-eixos de movimentação (adaptado de (ZUREK, 2008))

Uma vez extrudado, espera-se que as trilhas (constituídas por filamentos fundidos depositados lado a lado) tenham um processo de solidificação uniforme, para que o conjunto não sofra distorções, ne entanto, a gravidade e as tensões superficiais podem provocar alterações significativas na forma final do produto. Dependendo da geometria e complexidade das peças, é necessário que o processo de resfriamento, seja controlado a ponto do gradiente de temperatura não interferir nas propriedades dimensionais.

2.2.2 Materiais utilizados no processo modelagem por fusão e deposição

Os principais materiais utilizados nos processos FDM são os termoplásticos. Segundo (CALLISTER; RETHWISCH, 2015), os polímeros naturais (aqueles derivados de plantas e animais) tem sido usados há muitos séculos. Estes materiais incluem madeira, borracha, algodão, lã, couro e seda. Outros polímeros naturais, como proteínas, enzimas, amidos e celulose, são importantes em processos biológicos e fisiológicos nas plantas e nos animais. As atuais ferramentas de pesquisa científica, tornaram possível a determinação das estruturas moleculares desse grupo

de materiais e o desenvolvimento de inúmeros polímeros, que são sintetizados a partir de moléculas orgânicas pequenas. Muitos plásticos, borrachas e materiais fibrosos que nos são úteis são polímeros sintéticos. De fato, desde o término da Segunda Guerra Mundial, o campo dos materiais foi virtualmente revolucionado pelo advento dos polímeros sintéticos. Os materiais sintéticos podem ser produzidos a baixos custos, se comparados aos produtos naturais, e suas propriedades podem ser alteradas a valores que os tornam muitos superiores aos seus análogos naturais. Em algumas aplicações, as peças metálicas e de madeira foram substituídas por plásticos, os quais tem propriedades satisfatórias e podem ser produzidos a custos mais baixos. Como ocorre para os metais e as cerâmicas , as propriedades dos polímeros estão relacionadas de maneira complexa com os elementos estruturais do material.

Segundo (CANEVAROLO, 2010), a matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. Dependendo do tipo de monômero (estrutura química), do número médios de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, pode-se dividir os polímeros em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras.

O desenvolvimento científico, segundo (CANEVAROLO, 2010), gerou até o momento um grande número de polímeros para atender as mais diversas áreas de aplicações. Muitos deles são variações e/ou desenvolvimentos sobre moléculas já conhecidas. Assim, é possível listar uma série deles, agrupados de acordo com uma determinada classificação. Nesta sub-unidade, aborda-se quatro diferentes classificações: quanto à estrutura química, ao seu método de preparação, às suas características tecnológicas e quanto ao seu comportamento mecânico. Todas estas classificações possuem sub divisões, no entanto, a subdivisão do comportamento mecânico é a mais explorada nesta pesquisa e, segundo (CANEVAROLO, 2010), podem ser classificados em:

- Plásticos
  - Termoplásticos: plásticos que, quando sob um aumento substancial da temperatura e marginal da pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados nestas condições. Retirada a solicitação (T e P) se solidificam adquirindo a forma do molde. Novas aplicações de temperatura e pressão reiniciam o processo, portanto são recicláveis. São solúveis e possuem cadeia linear ou ramificada. Exemplos: PE, PP, PVC, etc.
  - Termorrígidos: também conhecidos por termofixos, termoendurecidos, polímero em

rede ou em retículo, são plásticos que, quando sujeitos a um aumento substancial da temperatura e marginal da pressão, amolecem e fluem, adquirindo a forma do molde, reagem quimicamente, formando ligações cruzadas entre cadeias e se solidificam. Subsequentes aumentos de temperatura e pressão não têm mais influência, tornando-os materiais insolúveis, infusíveis e não-recicláveis. Assim, os termorrígidos são moldados quando ainda estão na forma de pré-polímero (antes da cura, sem ligações cruzadas). Exemplos: resina de fenol-formaldeído (baquelite), epóxi (araldite), etc.

  - Baroplásticos: plásticos que, com um aumento substancial da pressão e marginal da temperatura, fluem através de rearranjos em sua conformação.

- Elastômeros: polímeros que na temperatura ambiente podem deformar-se no mínimo duas vezes o seu comprimento inicial, retomando ao comprimento original rapidamente depois de retirado o esforço.

- Fibras: termoplástico orientado (com um sentido longitudinal dito eixo principal da fibra) satisfazendo a condição geométrica de $L/D \geq 100$. A orientação das cadeias e dos cristais, feita de modo forçado durante a fiação, aumenta a resistência mecânica desta classe de materiais, tornando-os possíveis de serem usados na forma de fios finos. Como exemplos, têm-se as fibras de poliacrilonitrila (PAN), os náilons , o poliéster (PET), etc.

Quanto ao desempenho mecânico, segundo (CANEVAROLO, 2010), podem ser classificados em:

- Termoplásticos convencionais: são polímeros de baixo custo, baixo nível de exigência mecânica, alta produção, facilidade de processamento, etc. A produção destes termoplásticos somados, corresponde a aproximadamente 90% da produção total de polímeros no mundo. Como exemplos, temos as poliolefinas (LDPE, HDPE, PP), o poliestireno (PS) e o policloreto de vinila (PVC).

- Termoplásticos especiais: são polímeros com um custo levemente superior aos convencionais, mas com algumas características um pouco melhores. Nesta classe têm-se os copolímeros de etileno-acetato de vinila (EVA) e estireno-acrilonitrila (SAN) e os homopolímeros de politetrafluoro-etileno (PTFE) e polimetacrilato de metila (PMMA). Em dois

deles (PMMA e SAN), procura-se alta transparência e em outro (PTFE), alta estabilidade térmica e química.

- Termoplásticos de engenharia (TE): a confecção de peças de bom desempenho para aplicações em dispositivos mecânicos (engrenagens, peças técnicas para a indústria eletroeletrônica e automobilística, etc.) exige do polímero alta resistência mecânica (rigidez), boa tenacidade e excelente estabilidade dimensional. Isso é conseguido nos TE tendo-se como exemplos as poliamidas (náilons em geral), os poliésteres termoplásticos (polietileno-tereftalato PET e polibutileno-tereftalato PBT), poliacetais (homopolímeros e copolímeros), o policarbonato (PC), copolímero de estireno-butadieno-acrilonitrila (ABS), ácido poliláctico (PLA) e polioxi-fenileno (PPO).

- Termoplásticos de engenharia especiais: em aplicações em que alta temperatura é a exigência maior, são utilizados polímeros com grande quantidade de anéis aromáticos na cadeia principal, a qual aumenta a estabilidade térmica para uso ininterrupto a temperaturas acima de 150°C. Como exemplos, têm-se polímeros contendo enxofre (polisulfonas, polisulfeto de fenileno PPS), poliamidas, alguns poliuretanos, polieter-eter-cetona (PEEK) e polímeros de cristal líquido polimérico.

Os materiais mais utilizados nos processos FDM e moldagem por injeção são geralmente os plásticos, os quais podem ser Polietileno, Teflon, Polipropileno, *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS), Ácido Poliláctico (PLA), HiPS, PETG, Nylon, PEEK, entre outros, ou seja grande parte são termoplásticos de engenharia (TE). A exceção é o PLA, o qual é um biopolímero que é produzido por seres vivos ou a partir de matérias-primas oriundas de fontes renováveis como: milho, cana de açúcar, celulose, soja; ou seja, são biodegradáveis (SIN A.R. RAHMAT, 2012). O desenvolvimento de matrizes de biopolímeros e a sua utilização em aplicações diversas é objeto de crescente interesse por numerosos grupos de investigação, uma vez que, estes materiais são considerados aptos a substituírem certos termoplásticos sintéticos. Também contribuem para o aumento no número de estudos sobre estes materiais a preocupação da sociedade com os aspectos ambientais e a sustentabilidade dos bens de consumo, bem como regulamentações governamentais sobre o uso de termoplásticos não degradáveis (JIMENEZ MERCEDES PELTZER, 2014). Existem diversos biopolímeros, entretanto, o PLA se mostra o mais promissor dentre eles, devido

à sua alta rigidez, elevada resistência mecânica e facilidade de manipulação (NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010). Em algumas áreas a utilização ainda é restrita devido ao baixo desempenho térmico, baixa resistência ao impacto e baixa temperatura de transição vítrea (em torno de 55 a 60^{o}C). Dentre os materiais citados os mais pesquisados são o ABS e o PLA ((AFROSE et al., 2016), (CANTRELL et al., 2017), (CASAVOLA et al., 2016), (CHACON et al., 2017), (LEBEDEV et al., 2018), (SONG et al., 2017).

A fabricante de polímeros (RTP, 2019) estuda a adição de materiais aos polímeros para melhorar o coeficiente de atrito e desgaste. Os materiais aditivos mais utilizados são: PTFE (*polytetrafluoroethylene*), fibra, silicone, bissulfeto de molibdênio, grafeno, PFPE (*perfluoropolyether*). Devido as suas propriedades do grafeno, sua adição aos polímeros torna-se uma alternativa atraente a outros materiais que podem ser utilizados como reforço, pois não alteram significativamente algumas das propriedades importantes da matéria-prima base. Devido a suas características, o grafeno, segundo (PHIRI et al., 2018), é um cristal bidimensional formado por ligações entre átomos de Carbono. É um dos materiais mais resistentes até agora conhecido, além de ser elástico e flexível. Pode ser caracterizado como uma camada de carbono com espessura de um átomo. Estima-se que uma pilha de 3 milhões de folhas de grafeno meça cerca de 1 milímetro de espessura. Segundo (SOLDANO; MAHMOOD; DUJARDIN, 2010), possui módulo de Young-(E) que pode atingir 1 100 GPa ($\sim$ 5 vezes mais resistente que o aço (207 GPa)), resistência à tração em torno de 130 GPa, ponto de fusão superior a 3000^{o}C e condutividade elétrica 0,96 x 10^6 $(\Omega.m)^{-1}$ (a do cobre é igual a 0,60 x 10^6 $(\Omega.m)^{-1}$).

Neste estudo foram utilizados uma matéria-prima de base estirênica (ABS) e um biopolímero (PLA). Em ambos foi adicionado grafeno com o objetivo de se estudar as alterações das propriedades destes materiais decorrente desta adição.

- ABS: É denominado copolímero enxertado ou grafitizado, pois, a estrutura química deste copolímero é formada principalmente por uma cadeia de polibutadieno (PB) enxertada (ligação covalente) com uma cadeia do copolímero aleatório de estireno-acrilonitrila. A fórmula estrutural desse polímero é ilustrada na Fig. 2.9. A porção acrilonitrila fornece resistência ao calor, mecânica e química. A porção butadieno (borracha) é responsável por melhorar a resistência ao impacto, tenacidade e flexibilidade. A porção estireno é responsável pela rigidez e aspecto brilhante da superfície. A proporção geral é de aproximadamente

20% a 30% de acrilonitrila, 20% a 30% de butadieno e 40% a 60%. A relação dos vários componentes pode ser controlada para aproveitar ao máximo uma única propriedade ou conjuntos de propriedades (PETRIE, 2003).

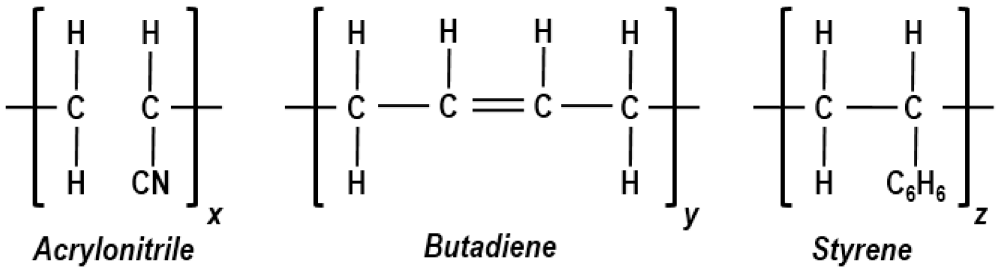


Figura 2.9 – Copolímero acrilonitrila butadieno estireno-ABS (adaptado de (PETRIE, 2003))

- PLA: O ácido poliláctico é um biopolímero formado por moléculas de ácido láctico e fórmula molecular $C_3H_6O_3$ estrutural $CH_3-CH(OH)-COOH$ (de acordo com a IUPAC, o ácido lático é conhecido como ácido 2-hidroxipropanóico ou ácido α-hidroxipropanóico), o qual é extraído dos amidos ou açúcares de milho, beterraba ou outras fontes naturais (SIN A.R. RAHMAT, 2012). O ácido lático é uma molécula quiral e existe na forma de dois estereoisomeros opticamente ativos, l-ácido láctico (levógiro) e d-ácido láctico (dextrógiro) e d,l-ácido láctico (racêmico) (Fig.2.10). A Fig. 2.11 mostra, como exemplo, as taxas de produção e trilhas de conversão do PLA a partir do milho até o bioplástico.

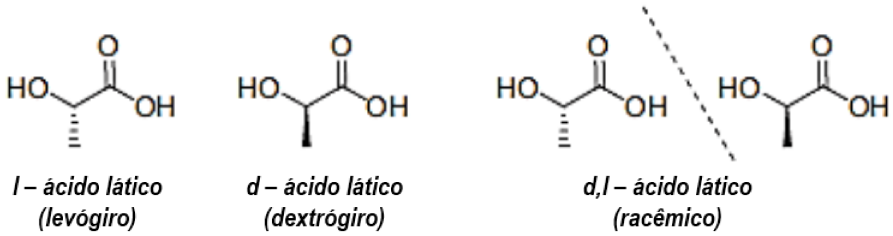


Figura 2.10 – Estrutura do $l-$;$d-$ e $d,l-$ácido láctico (adaptado de (JIMENEZ MERCEDES PELTZER, 2014) p5)

Além das propriedades mecânicas, tribológicas, de qualidade e elétricas, é muito importante se conhecer também as temperaturas de fusão, de transição vítrea e de deflexão térmica dos polímeros. Entende-se por temperatura de transição vítrea (T_g), a temperatura abaixo da qual um polímero amorfo se torna duro e frágil (estado vítreo), e acima da qual o mesmo polímero se

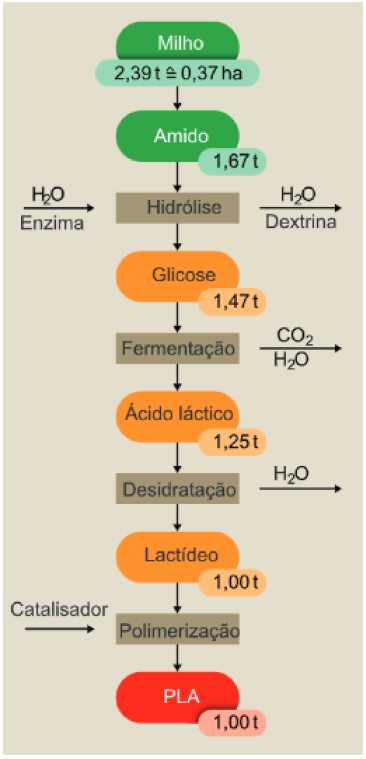


Figura 2.11 – Rota de processo a base de amido para o bioplástico PLA (adaptado de (ENDRES et al., 2017))

apresenta no estado "amolecido", ou seja, é a temperatura na qual as cadeias que formam os cristais se desprendem umas das outras, tornando-se amorfas. A temperatura de fusão (T_f) é aquela na qual as cadeias poliméricas adquirem mobilidade e o mesmo se torna viscoso, podendo ser moldado. A T_g é menor do que a T_f. A temperatura de deflexão vítrea (HDT), segundo a norma ISO 75, é aquela na qual um material apresenta decréscimo de suas propriedades mecânicas. Esta temperatura de "amolecimento", está relacionada a temperatura de transição vítrea para polímeros amorfos e semicristalinos e com a temperatura de fusão para os cristalinos. Basicamente é a temperatura que cada material suporta sem se deformar plasticamente. Esta temperatura para o PLA é em torno de 60^{o}C; ou seja, a partir desta temperatura o material da peça começa a fluidificar. Este comportamento não é desejável para peças que são utilizadas com exposição ao sol, entretanto, é favorável em impressoras abertas.

2.2.3 Parâmetros do processo de modelagem por fusão e deposição

Atualmente as peças fabricadas através do processo de modelagem por fusão e deposição são utilizadas principalmente nas áreas educacionais e protótipos de montagem. Com a

evolução, este processo vem ganhando importância em diversas áreas entre elas a bio-engenharia e as indústrias aeroespacial e automotiva. Entender como estas peças se comportarão quando submetidas a cargas mecânicas, e avaliar sua adequação a uma determinada aplicação, torna-se obrigatório aos projetistas. É um processo de relativa complexidade e possui elevado número de parâmetros que influenciam nas propriedades mecânicas, de qualidade, tribológicas e elétricas porém possui grande flexibilidade. Investigar e estudar estas propriedades e o comportamento mecânico para diferentes categorias de materiais e conjuntos de parâmetros de processo/condições de fabricação representa um importante passo em termos de interesse e pesquisa (POPESCU et al., 2018).

Segundo (VOLPATO, 2017) - Capitulo 7, os principais parâmetros de processo de modelagem por fusão e deposição são:

1. Parâmetros do filamento extrudado: A deposição do filamento, depois de extrudado, geralmente apresenta largura maior que a espessura e a seção transversal se assemelha a uma elipse, porque é pressionado contra a camada anterior e promove um achatamento (Fig. 2.12). Segundo (AGARWALA et al., 1996), o diâmetro do filamento ao sair do bico

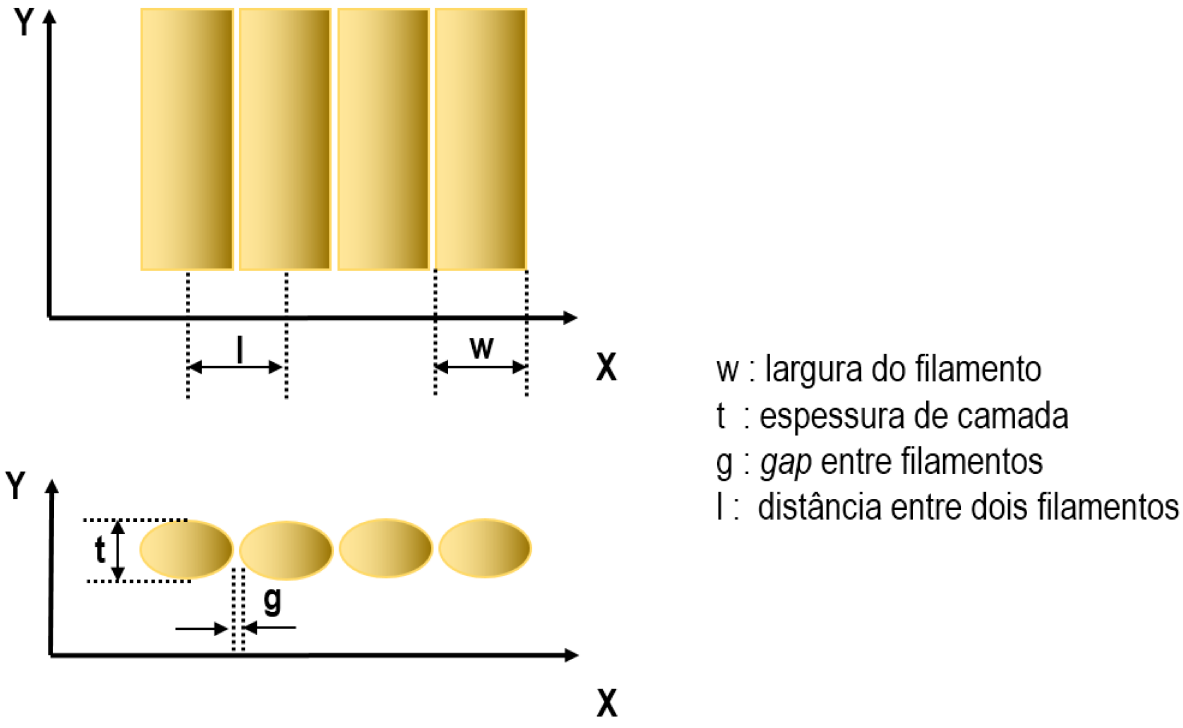
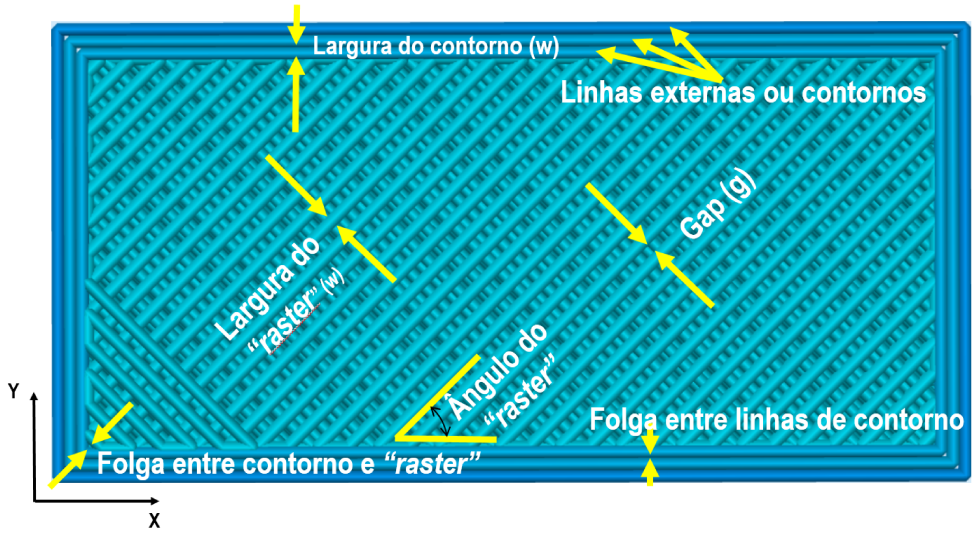


Figura 2.12 – Representação da geometria do filamento extrudado (extraído de (VOLPATO, 2017) - Capítulo 7)

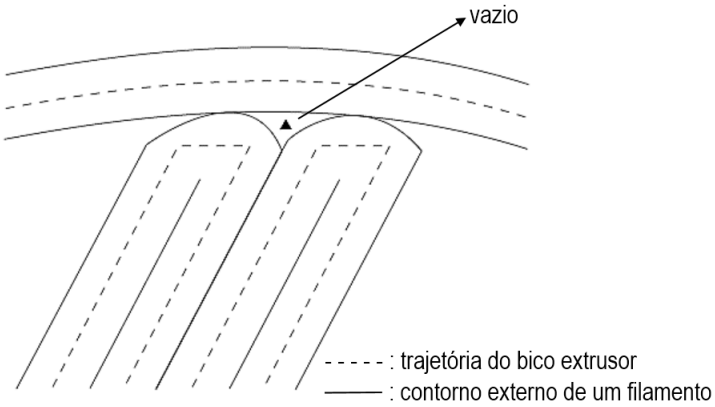
extrusor não é menor que 1,2 a 1,5 vezes o diâmetro do próprio bico. Os principais parâmetros relacionados ao filamento são: largura do filamento (para contorno e preenchimento); espessura de camada e *gap* e/ou distância entre filamentos. A largura e a espessura do filamento (Fig. 2.12), são definidas pelo usuário através do planejamento do processo. Independente da estratégia de deposição, o processo se inicia com a deposição do filamento que forma o contorno ou perímetro sendo em seguida preenchido o interior. A largura do filamento de contorno pode ser diferente da largura do preenchimento (Fig. 2.13). Outro parâmetro importante é o espaçamento (*gap*) entre filamentos adjacentes (Fig. 2.12 e Fig. 2.13a). O *gap* pode ser zero ou negativo quando há um contato lateral ou sobreposição entre filamentos adjacentes. Se for positivo, existirá uma distância maior entre os mesmos. Alguns sistemas de planejamento de processo, tratam essa opção de espaçamento através do percentual de preenchimento. A espessura de camada é outro parâmetro importante. Ela é constante ao longo da fabricação da peça e pode ser escolhida em uma faixa de acordo com o diâmetro do bico extrusor e o material utilizado.

2. Estratégias de preenchimento e construção: na deposição do contorno delimita-se as regiões que conterão material em uma camada. Além da largura do filamento, pode-se definir o número de contornos desejados. Gera-se neste perímetro uma "casca" com espessura delimitada pelo número de contornos, os quais são configuráveis. As principais opções de preenchimentos disponíveis são em relação às estratégias de deposição do material na área interna delimitado pelo contorno. As estratégias mais tradicionais são denominadas preenchimento tipo *raster*, *contour* (ou *offset* ou concêntrico), bem como a combinação entre os dois, representados esquematicamente na Fig. 2.14) e descritas a seguir:

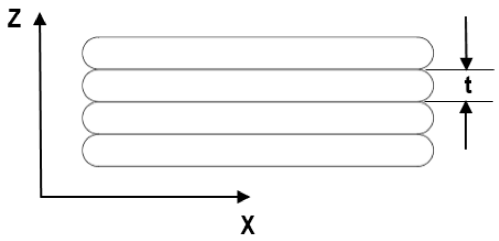
   (a) Preenchimento tipo *raster*: é um preenchimento por meio de deslocamentos lineares paralelos alternados, gerando uma trajetória tipo zigue-zague (Fig. 2.14a). Pode ser entendida como duas entidades: as linhas de *raster* e a ligação entre elas. A ligação entre duas linhas de *raster* segue a trajetória do perfil do contorno. O parâmetro *gap* estipula a distância ente filamentos tanto do preenchimento quanto do contorno. Um parâmetro fundamental nessa estratégia é a definição do ângulo de inclinação das linhas de *raster* (Fig. 2.13 a).



(a) Parâmetros do processo: largura do filamento do contorno e do preenchimento, *gap*, ângulo de *raster*



(b) Trajetória do bico extrusor.



(c) Parâmetros do processo: espessura de camada.

Figura 2.13 – Representação dos principais parâmetros de controle de deposição no processo de deposição e trajetória do bico extrusor (adaptado de (VOLPATO, 2017); (HOSSAIN et al., 2013); (MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015) e (AGARWALA et al., 1996)

(b) Preenchimento tipo *contour*: é um preenchimento com uma trajetória contendo contornos fechados e equidistantes, obtido a partir da geometria do contorno da camada (Fig. 2.14 b).

(c) Preenchimento combinado *raster*/*contour*: é a combinação entre as duas estratégias de preenchimento (*raster*/*contour*). Inicia-se com alguns contornos equidistantes e finaliza com o preenchimento das áreas, com estratégia tipo *raster* (Fig. 2.14 c).

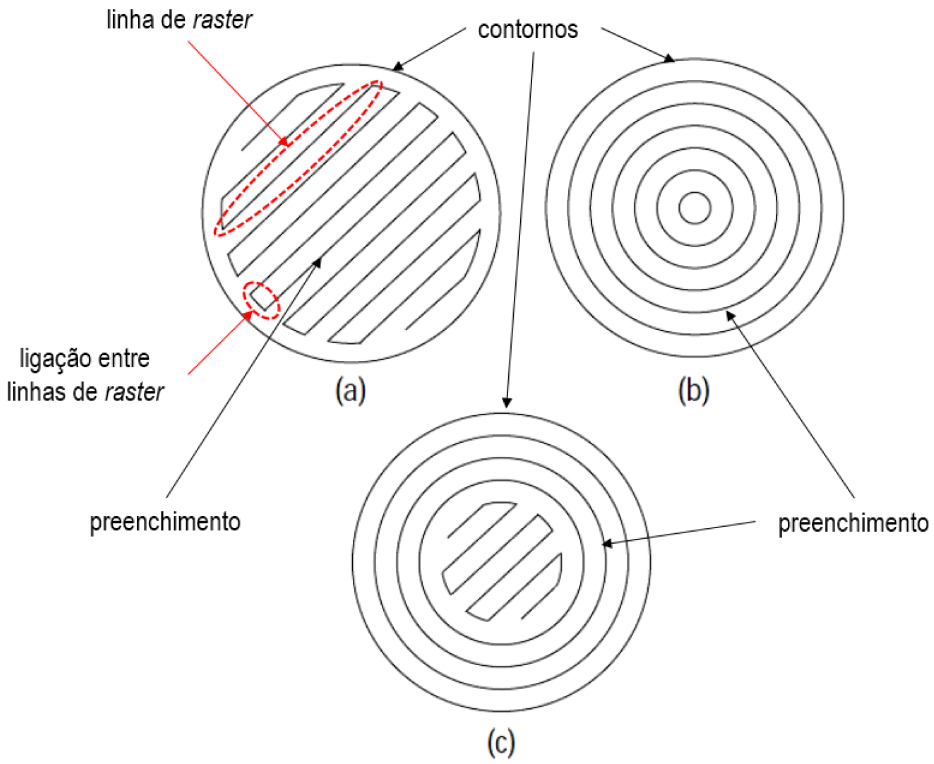
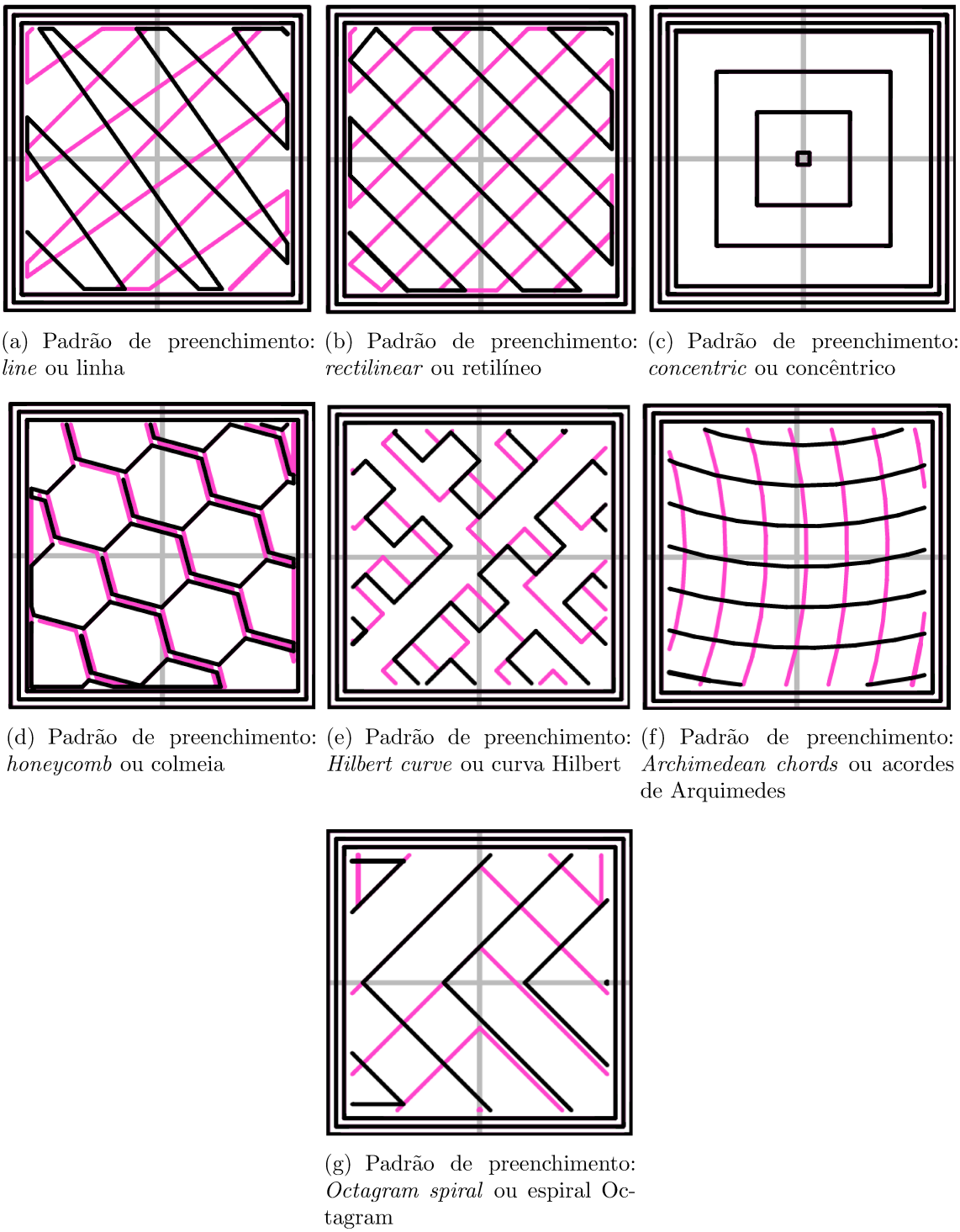


Figura 2.14 – Padrão de preenchimento das camadas em processos de extrusão de material: (a)-*raster*, (b)-*contour* e (c)-combinação entre *raster* e *contour* (adaptado de (VOLPATO, 2017) - Capítulo 7) e (AGARWALA et al., 1996)

Estratégias adicionais de preenchimento podem ser definidas, com as disponíveis no sistema de planejamento de processo (SLIC3R, 2019) (Fig. 2.15). Essas estratégias nem sempre estão todas disponíveis nos processos comerciais de modelagem por fusão e deposição de material. O preenchimento tipo *raster* é o mais empregado devido a velocidade de construção e possibilidade de alterar a direção do ângulo de *raster* em 90° ou qualquer outro. Esta alternância de preenchimento, confere máximo empacotamento e mínimos espaços vazios entre filamentos. A consequência é uma melhor resistência mecânica da peça ((GOKCEK, 2012), (CANTRELL et al., 2017), (SOOD; OHDAR; MAHAPATRA,



(a) Padrão de preenchimento: *line* ou linha

(b) Padrão de preenchimento: *rectilinear* ou retilíneo

(c) Padrão de preenchimento: *concentric* ou concêntrico

(d) Padrão de preenchimento: *honeycomb* ou colmeia

(e) Padrão de preenchimento: *Hilbert curve* ou curva Hilbert

(f) Padrão de preenchimento: *Archimedean chords* ou acordes de Arquimedes

(g) Padrão de preenchimento: *Octagram spiral* ou espiral Octagram

Figura 2.15 – Estratégias adicionais de preenchimento de camadas (extraído de (SLIC3R, 2019))

2010), (DURGUN; ERTAN, 2014), (LEE; ABDULLAH; KHAN, 2005)).

3. Estratégias de geração da base e das estruturas de suporte: para a fabricação de uma peça, as tecnologias de extrusão de material podem ou não construir uma base para a peça sobre a mesa de impressão. As estratégias adotadas podem variar entre as tecnologias, no entanto,

as primeiras camadas da base (e também das estruturas de suporte) são construídas com um afastamento maior entre *raster*. Este procedimento se repete, até que a última camada utilize um espaçamento mais refinado, gerando um superfície plana que receberá o material da peça. Peças muito esbeltas (grande relação entre espessura e seção transversal), podem possuir grande instabilidade quando posicionadas na mesa de impressão. Na medida do permitido, recomenda-se um planejamento do processo, de forma a selecionar uma posição que possua a maior área possível de contato com a mesa de impressão. Segundo (POPESCU et al., 2018), a orientação de construção mais utilizadas estão contidas na Fig. 2.16.

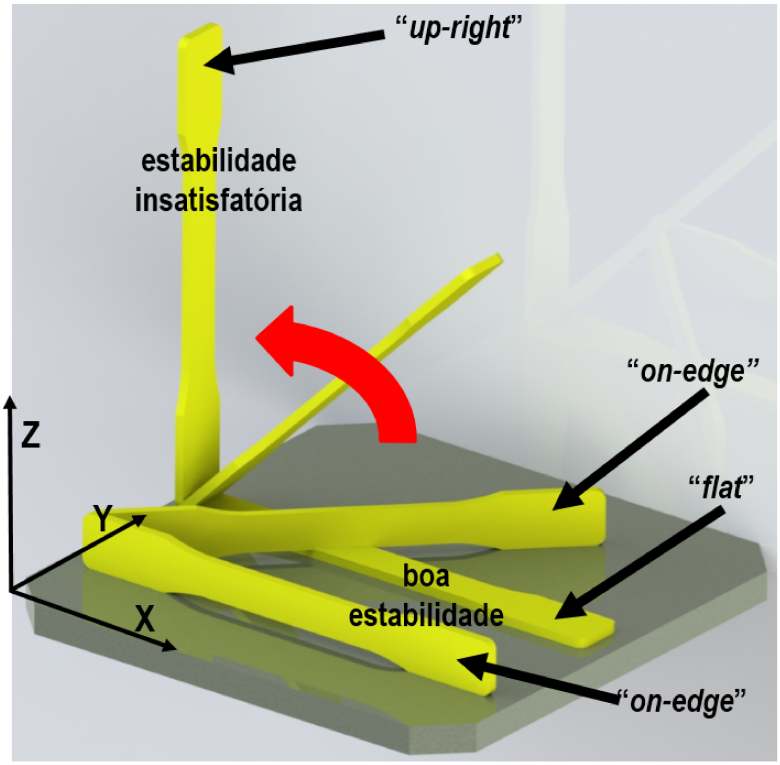


Figura 2.16 – Representação gráfica da orientação de peças na mesa de impressão-processo de modelagem por fusão e deposição (adaptado de (BARNER, 2015))

Quanto maior a área de contato com a mesa de impressão maior a estabilidade da peça no processo de modelagem por fusão de deposição de material. Definida a melhor orientação, deve-se planejar, nos casos pertinentes, a necessidade de estruturas de suporte, tanto ao redor da peça quanto nas posições onde não há apoios suficientes para manterem a estabilidade da peça durante o processo de manufatura. A Fig. 2.17 contém um exemplo onde se fez necessário a criação de suportes.

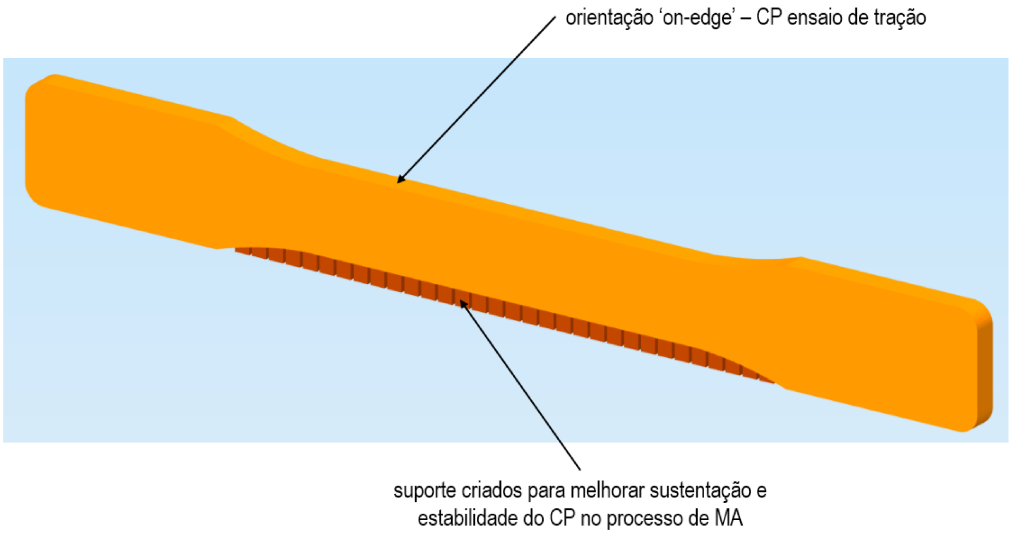


Figura 2.17 – Planejamento do processo de MA para impressão de CP com necessidade de suporte. (fonte: Próprio autor)

2.2.4 Influência dos parâmetros de processo de modelagem por fusão e deposição de material, nas propriedades mecânicas, tribológicas e da qualidade

Segundo (MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015), os parâmetros de processo por modelagem por fusão e deposição, tem influência significativa nas propriedades mecânicas, tribológicas e da qualidade. O diagrama da Fig. 2.18 organiza estes parâmetros e auxilia no delineamento dos experimentos a serem estudados.

Todos estes parâmetros afetam de formas diferentes as propriedades mecânicas, porém alguns são mais significativos. Segundo (POPESCU et al., 2018) considerando o grande número de parâmetros, os estudos de (CANTRELL et al., 2017), (AFROSE et al., 2016), (BAICH; MANOGHARAN; MARIE, 2015), (CHACON et al., 2017), (TYMRAK; KREIGER; PEARCE, 2014), (NING et al., 2017), (WU et al., 2015), (PANES JUAN CLAVER,), (RANKOUHI et al., 2016), (LIU et al., 2017) e (MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2016a), propõem soluções para reduzir o número de experimentos e métodos de otimização para identificar as melhores combinações de parâmetros os quais melhoram as propriedades mecânicas.

A orientação de construção, tem um papel importante nas propriedades estruturais das peças produzidos pelo processo de modelagem por fusão e deposição, e se refere em qual direção uma amostra é posicionada na mesa da impressora 3D. Como as propriedades mecânicas dependem desta orientação, o comportamento dos materiais utilizados no processo de modelagem

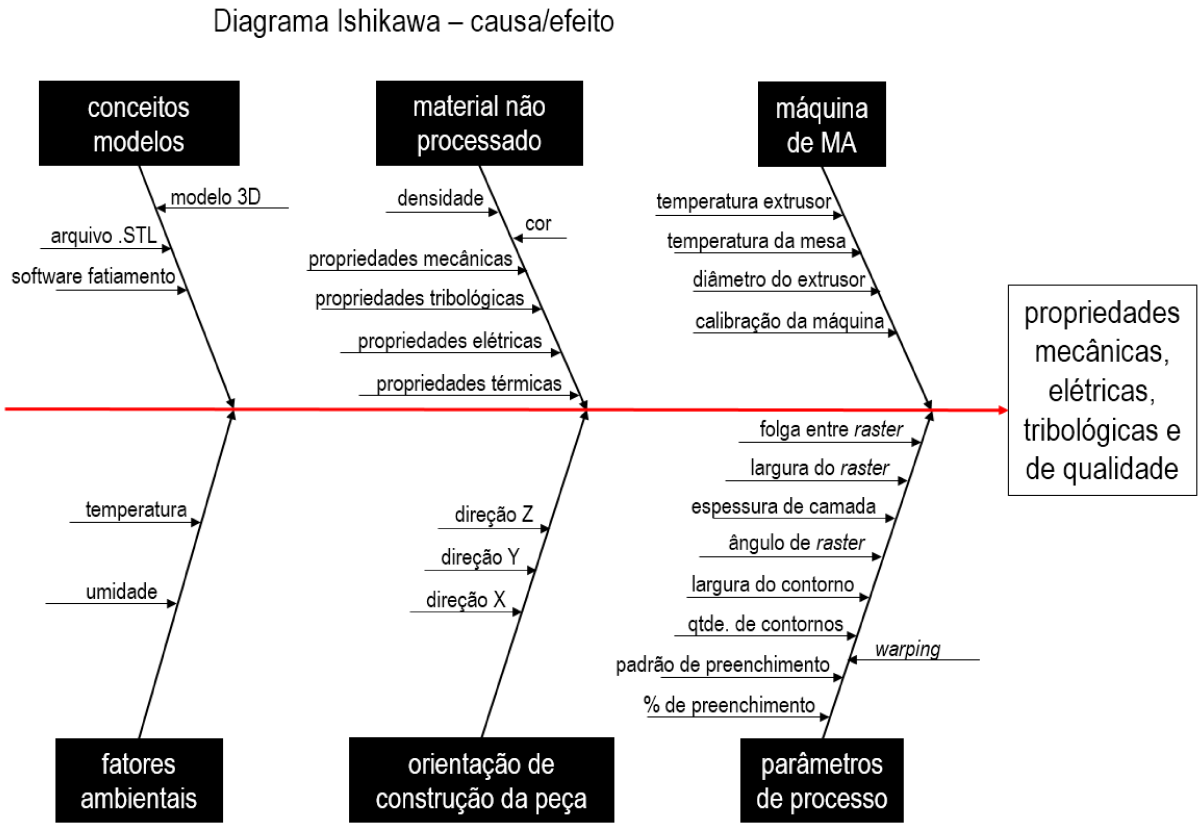


Figura 2.18 – Diagrama causa e efeito (Ishikawa) para os parâmetros do processo de modelagem por fusão e deposição (adaptado de (MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015))

por fusão e deposição é anisotrópico. Os efeitos da orientação de construção foram estudados por (CANTRELL et al., 2017), (SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2010), (CHACON et al., 2017), (DOMINGO-ESPIN et al., 2015), (BARNER, 2015), (ZALDIVAR et al., 2017) e (LEBEDEV et al., 2018). Estes autores concordam que a melhor orientação de construção, para os corpos de prova ensaiados, é aquela, onde a área de contato da peça com a plataforma de construção é maior (Figure 2.16). Ainda segundo estes autores, as propriedades mecânicas são melhores na orientação de construção $flat$ e $on-edge$, porém esta última, tem grande dificuldade de manufatura por ter pequena área de contato com a mesa de impressão, gerando assim uma instabilidade grande e necessitando de muitos suportes para serem construídas, obviamente se o perfil não for complexo.

Um dos parâmetros mais estudados é a espessura de camada ($height$). De acordo com (TYMRAK; KREIGER; PEARCE, 2014), foram avaliados os parâmetros orientação do padrão de preenchimento e espessura de camada. Concluiu-se que a tensão de escoamento a tração aumentou com o decréscimo da espessura de camada (valores máximos de 29,7 MPa (ABS) e

60,4 MPa (PLA) para a espessura de camada = 0,20 mm e orientação $0°/90°$), porém as amostras que utilizaram o PLA teve grande variabilidade entre os parâmetros testados. De acordo com (LANZOTTI et al., 2015), foram estudados os parâmetros espessura de camada, orientação do preenchimento e número de contornos nos CPs manufaturados através do processo FDM, e utilizando a matéria-prima PLA. A análise dos experimentos foi feita com a técnica CCD (*central composite design*), com três fatores e o valor máximo da UTS (*ultimate tension strenght*) foi 50,67 MPa, atingida através da combinação da espessura de camada = 0,15 mm, da orientação do preenchimento = $45°$ e do número de contornos no perímetro, 6 no total. Neste estudo, o comportamento da UTS variou com a espessura de camada de maneira não linear e dependeu também da combinação/variação dos outros parâmetros. De acordo com (SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2010), foram estudados os parâmetros orientação de construção, espessura de camada (0,1270; 0,1780 e 0,2540 mm), ângulo de *raster*, espessura e folga entre $raster$ dos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima ABS. O planejamento de experimento 2^k foi utilizado e as respostas analisadas foram tensão de escoamento para ensaios de tração e flexão e impacto. O valor máximo da tensão de escoamento à tração foi 18,09 MPa com a espessura de camada = 0,1270mm, da tensão de escoamento à flexão foi 38,10 MPa com a espessura de camada = 0,2540 mm e da energia de foi 0,48 MJ/m^2 para a mesma espessura de camada. Concluiu-se que a tensão de escoamento à tração foi máxima para a mínima espessura de camada; a tensão de escoamento à flexão foi máxima para a máxima espessura de camada e a energia de impacto foi máxima para a máxima espessura de camada. Importante também informar que os valores obtidos tiveram a influência dos outros parâmetros combinados. De acordo com (CHACON et al., 2017), foram estudados os parâmetros orientação de construção, espessura de camada e velocidade de extrusão. Foi concluído que a orientação "$on-edge$" teve melhor desempenho nas características: resistência, rigidez e ductibilidade. Se o comportamento ductibilidade em função do tempo de impressão, resistência e rigidez forem requisitos de projeto, recomenda-se pequena espessura de camada e alta velocidade de extrusão nas orientações de construção "$flat$" e "$on-edge$". De acordo com (LI et al., 2018), foi estudado apenas o fator espessura de camada e as respostas tensão de escoamento à tração e grau de ligação. A máxima tensão de escoamento foi de 27,22 MP para a menor espessura de camada (0,05 mm), ou seja a tensão decresceu com o aumento da espessura de camada. O valor mínimo da tensão de

escoamento foi 16,15 MPa para espessura de camada = 0,35 mm. Nos estudos apresentados não foi possível identificar relação entre as características mecânicas e a espessura de camada, pois o comportamento depende fortemente da combinação dos outros fatores estudados.

Outro parâmetro importante é o padrão de preenchimento. Os estudos citados abordam, quase que na totalidade, o padrão de preenchimento $rectilinear$ e com 100% de densidade de preenchimento ou *gap* = zero. De acordo com (FERNANDEZ-VICENTE et al., 2016), foram estudados os efeitos dos padrões de preenchimento ($line$, $rectilinear$ e $honeycomb$), nas características mecânicas. Considerando as mesmas porcentagens de preenchimento, o padrão $honeycomb$ foi o que apresentou melhor tensão de escoamento à tração (para uma porcentagem de preenchimento = 50% as peças manufaturadas com o padrão de preenchimento $honeycomb$ obtiveram a tensão de escoamento = 21,78 MPa, contra 19,58 MPa do padrão $rectilinear$ e 20,06 MPa com padrão $line$). De acordo com (BARNER, 2015), foram também estudadas as propriedades mecânicas de peças, manufaturadas com o padrão de preenchimento $honeycomb$ e produzidas pelo processo de modelagem por fusão e deposição SLS, e com duas orientação de construção ($flat$ e $edgewise$ ou $on-edge$). Concluiu que os melhores resultados foram, nos CPs produzidos na orientação de construção $edgewise$. A porcentagem de preenchimento pode ser bastante importante quando se deseja diminuir a relação limite de escoamento/tempo de impressão e limite de escoamento/peso.

O estudo de (GOMEZ-GRAS et al., 2018), abordou a influência da porcentagem e padrão de preenchimento, diâmetro do extrusor, espessura de camada e velocidade de impressão sobre o desempenho de fadiga de amostras cilíndricas utilizando planejamento de experimentos de Taguchi. As conclusões foram: o padrão de preenchimento hexagonal é o recomendado para fabricar peças através do processo FDM e a combinação dos valores do parâmetros: 75% de porcentagem de preenchimento, 0,5 mm de diâmetro do extrusor e 0,3 mm de espessura de camada resultaram em menor fadiga (35,8 MPa).

O estudo de (HARISH; RAJEEV, 2018), determinou o coeficiente de atrito (CoF) e desgaste no teste *reciprocating* para ligas de alumínio em função da carga normal (N) e o comprimento total de 400 m e velocidade média de 0,4 m/s, sem utilização de lubrificantes (a seco). O CoF diminuiu com o aumento da carga normal para a distância de deslizamento considerada. Isto se deve à maior deformação plástica quando se aumentam as cargas, o que

permitiu que a rugosidade aumentasse.

O estudo de (SUDEEPAN et al., 2014), determinou o coeficiente de atrito (CoF) e desgaste para compósito ABS/ZnO, utilizando a técnica de Taguchi. Foram considerados 3 parâmetros na análise (% de adição de ZnO no ABS, carga normal e velocidade). Na análise de variância (ANOVA), o menor CoF ocorreu quando houve 5% de adição de ZnO, 35N de carga normal e 120 rpm de velocidade de ensaio (CoF = 0,2097). Este estudo, no entanto, não abordou polímeros e foi utilizado apenas como referência dos ensaios utilizados.

O estudo de (BUSTILLOS et al., 2017), determinou o coeficiente de atrito (CoF) para o PLA com e sem grafeno. O comportamento do CoF foi diferente nos materiais ensaiados. No início dos ensaios, para o PLA-grafeno, o CoF foi menor para o maior carregamento e inverteu a partir de aproximadamente 7 min. Quanto ao desgaste, o volume perdido foi em torno de 4 mm^3 para o PLA grafeno e em torno de 3,5 mm^3 para o PLA.

No estudo de (ANITHA; ARUNACHALAM; RADHAKRISHNAN, 2001) foram relacionados a rugosidade R_a com os parâmetros espessura de camada, largura do filamento depositado e velocidade de deposição, todos com três níveis. O parâmetro espessura de camada foi o mais significativo.

Na Tab. 2.3 foram relacionadas algumas destas pesquisas com as informações de quem as fez, métodos estatísticos de análise, material utilizado, parâmetros de processo e respostas estudadas. Também foram apresentados quais parâmetros de processo foram significativos.

2.3 Moldagem por Injeção

Segundo (HURTADO, 2015), o processo de moldagem por injeção é mundialmente utilizado na indústria de plásticos. Basicamente, todos os tipos de polímeros, conhecidos também como resinas, podem ser utilizados. Consiste, basicamente, no aquecimento do material polimérico até um estado, relativamente fluido, para ser injetado sob pressão na cavidade de um molde até que o material se solidifique. Resumidamente, uma máquina injetora possui duas partes: a unidade de injeção e a de fechamento. A unidade de injeção funde, dosa, e injeta o material na velocidade e pressão programadas para dentro do molde. Já a unidade de fechamento comporta o molde que contém a cavidade e deverá movimentá-lo (abrir e fechar). O molde fica fechado

Tabela 2.3 – Sumário de publicações de estudo e otimização de processos modelagem por fusão e deposição (adaptado de (MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015))

Referência	Métodos	Material	Parâmetros de processo	Respostas	Parâmetros significativos
(AFROSE et al., 2016)	—-	PLA	Orientação de construção; ângulo de *raster*	Tensão de fadiga	—-
(CANTRELL et al., 2017)	—-	ABS/PC	Orientação de construção; ângulo de *raster*	Ensaio de tração e cisalhamento	—-
(CASAVOLA et al., 2016)	Teoria clássica *laminate*	PLA e ABS	Ângulo de *raster*	Tensão de escoamento e módulo de Young	—-
(CHACON et al., 2017)	RMS, ANOVA	PLA	Orientação de construção; espessura de camada e velocidade do extrusor	Resistência à tração e flexão	Todos parâmetros de entrada
(LEBEDEV et al., 2018)	—	Compósitos de PLA	Orientação de construção; adição de materiais	Resistência à tração; módulo de elasticidade e deformação	—
(DOMINGO-ESPIN et al., 2015)	FEA	PC	Orientação de construção	Resistência à tração; módulo de Young e deformação	—
(SONG et al., 2017)	—	PLA	Ângulo de *raster*	Tensão; compressão e impacto	—
(ZALDIVAR et al., 2017)	—	Termoplástico; Ultem® 9085	Orientação de construção; ângulo de*raster*	Resistência tração; deformação; coeficiente de Poisson e expansão térmica	—
(SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2009)	Taguchi	ABS-P400	Orientação de construção; espessura de camada; ângulo e espessura do *raster* e *gap*	Previsão dimensional	—
(SUDEEPAN et al., 2014)	Taguchi	ABS	% de preenchimento; carga normal e velocidade do extrusor	Coeficiente de atrito e desgaste	carga normal
(ANITHA; ARUNACHALAM; RADHAKRISHNAN, 2001)	Taguchi, (S/N) e ANOVA	ABS	Espessura de camada; largura do filamento e velocidade de deposição	Rugosidade superficial	Espessura de camada
(GOMEZ-GRAS et al., 2018)	Taguchi	PLA	Espessura de camada; diâmetro do extrusor; % de preenchimento; velocidade de impressão	Fadiga	Densidade de preenchimento
(LEE; ABDULLAH; KHAN, 2005)	Taguchi e ANOVA	ABS	*Gap*; ângulo e espessura do *raster* e espessura de camada	Desempenho elástico	*gap*; ângulo de *raster* e espessura de camada

para suportar a pressão e é aberto para extrair a peça. A Fig. 2.19 representa os principais componentes da unidade de injeção e a Fig. 2.20 contém um desenho esquemático da unidade de fechamento.

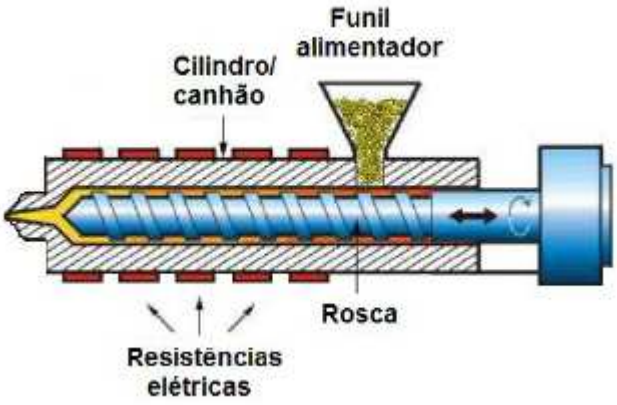


Figura 2.19 – Principais componentes da unidade de alimentação no processo moldagem por injeção (fonte: (HURTADO, 2015))

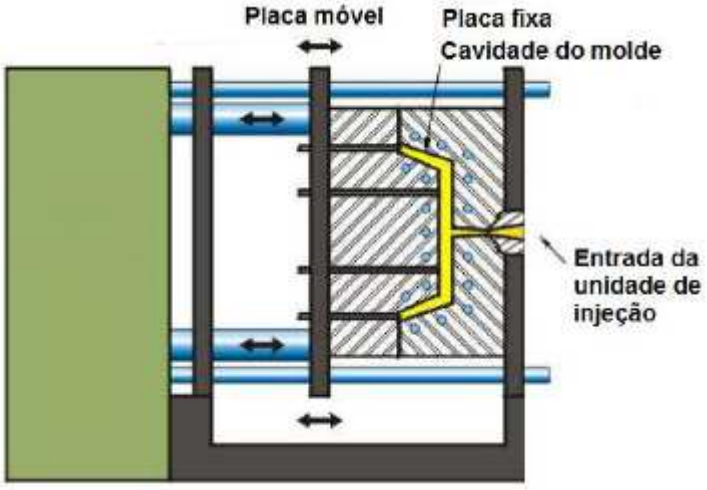


Figura 2.20 – Principais componentes do molde no processo moldagem por injeção (fonte: (HURTADO, 2015))

2.4 Comparação entre processos

Segundo (CHUA; LEONG; LIM, 2003) e (DAWOUD; TAHA; EBEID, 2016), as peças produzidas pelo processo de modelagem por fusão e deposição possuem até 85% da resistência das peças obtidas pelo processo de moldagem por injeção com o mesmo material. O estudo de (KING; KUMAR; VIJAYARAGAHAVAN, 2018), abordou o comportamento mecânico (ensaios de tração, flexão e impacto) do PLA reforçado por fibras de basalto e bagaço naturais em CPs manufaturados pelo processo de moldagem por injeção. O estudo de (WANG; GRAMLICH; GARDNER, 2017), abordou o energia de impacto tendo como fatores a espessura de camada e a temperatura da mesa de impressão. Além da resistência mecânica, outros parâmetros importantes

também devem ser considerados quando se necessita decidir qual dos processos a utilizar é mais competitivo. Um desses parâmetros é o custo. A comparação dos custos de produção de peças por cada um dos processos torna-se necessária para tomada de decisão sobre o processo a ser adotado. Parâmetros como quantidade de peças a produzir, característica mecânicas, tribológicas e de qualidade, devem ser amplamente estudados e conhecidos para se determinar o ponto ótimo de produção, o qual corresponde a quantidade de peças a ser produzida por um dos processos, que atendam as especificações de projeto e que iguale os custos.

2.5 Resistividade e condutividade elétrica

Segundo (CALLISTER; RETHWISCH, 2015), a condutividade elétrica é uma propriedade dos materiais sólidos que está relacionada com a capacidade de conduzir corrente elétrica. De acordo com (ASHBY; CEBON, 2012), os materiais sólidos são feitos de átomos que contém elétrons que portam carga negativa e um núcleo que contém prótons, que portam carga positiva. Se estes portadores de carga puderem se mover, a força com que fluem pelo material produzirá condução de carga e por este motivo podem ser classificados como condutores. O que diferencia um material condutor de outro não condutor, é a propriedade de possuírem elétrons livres. Assim a condutividade é proporcional à densidade de elétrons livres e a mobilidade do elétron, e é diretamente proporcional ao caminho livre médio.

A **lei de Ohm** relaciona a corrente (i) ou taxa de passagem de cargas ao longo do tempo, à voltagem aplicada (V) e a resistência do material (R) através do qual a corrente está passando (Eq. 2.1).

$$V = Ri \tag{2.1}$$

As unidades para *V*, *R* e *i* são respectivamente, volts (J/C), ohms (V/A) e amperes (C/s). O valor de R é influenciado pela configuração da amostra, e para muitos materiais ele é independente da corrente. A **resistividade elétrica** é uma medida da oposição de um material ao fluxo de corrente elétrica. Quanto mais baixa a resistividade, mais facilmente o material permite a passagem de uma carga elétrica. É representada pela letra grega ρ, e independe da geometria da amostra. É relacionada a *R* pela expressão 2.2 ou 2.3. Não existe uma norma específica para este

tipo ensaio, entretanto, consiste em medir a resistência ôhmica (Ω) através de um multímetro digital e calcular a resistividade conforme expressão 2.3.

$$\rho = \frac{RA}{l} \tag{2.2}$$

ou

$$\rho = \frac{VA}{il} \tag{2.3}$$

onde l é a distância entre os dois pontos onde a voltagem é medida, A é a área da seção transversal perpendicular à direção da corrente. A unidade para ρ é ohm.metro (Ω.m).

A Fig. 2.21 é um diagrama esquemático de um arranjo experimental para medição da resistividade elétrica.

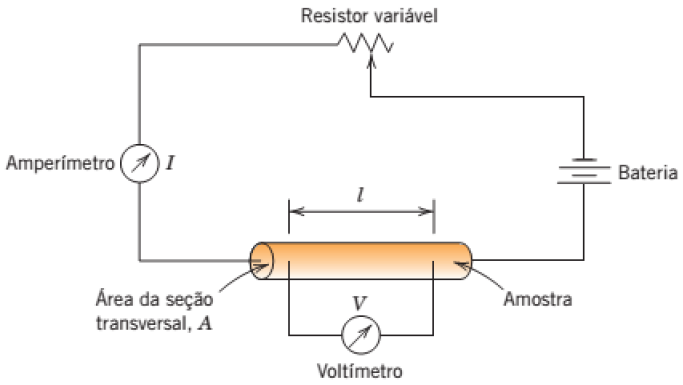


Figura 2.21 – Representação esquemática de um sistema usado para medir a resistividade elétrica (extraído de (CALLISTER; RETHWISCH, 2015))

A **condutividade elétrica** (σ) é considerada para especificar a natureza elétrica de um material. Ela é simplesmente o inverso da resistividade e está conforme a expressão 2.4. É o indicador da facilidade pela qual um material é capaz de conduzir corrente elétrica. A unidade para σ é o inverso de $(\Omega.m)$ $[(\Omega.m)^{-1}]$ que é igual S/m (Siemens por metro).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{2.4}$$

2.6 Tribologia

Segundo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017) e (RABINOWICZ, 1995), tribologia pode ser definida como "ramo da ciência e da tecnologia relacionada com a interação entre superfícies em movimento relativo e dos assuntos relacionados". Inclui o estudo do atrito, desgaste, lubrificação e projeto de rolamentos.

Os sistemas mecânicos em que as superfícies não deslizam ou rolam entre si, são raros. A tribologia é, portanto, uma tecnologia chave que permite uma aplicação muito ampla como nas áreas de engenharia, materiais, física e química. No contexto da biotecnologia, que diz respeito aos organismos vivos, a tribologia se torna ainda mais ampla e inclui as ciências médicas e biológicas. Avanços na tribologia sustentaram grande parte do progresso da engenharia mundial. Seu alcance se estende a todos os aspectos da tecnologia moderna, no sentido mais amplo da palavra, na qual as superfícies se movem umas contra as outras, desde a geração de energia e transporte até a engenharia médica, ciência de alimentos e cosméticos.

Embora o assunto tribologia seja mais amplo do que o estudo do atrito, este possui papel central no desempenho de conjuntos mecânicos. Em alguns casos, o baixo atrito é desejável e até mesmo essencial. O funcionamento satisfatório das articulações humanas e de portas, nos suportes de pontes e mancais de impressoras 3D exigem baixa força de atrito. O trabalho realizado para superar o atrito nos rolamentos e engrenagens nas máquinas é dissipado como calor e, ao reduzir o atrito, podemos obter um aumento na eficiência geral. Entretanto um baixo atrito não é necessariamente benéfico em todos os casos. Nos freios e embreagens, o atrito adequado e controlado é essencial para dissipar a energia cinética e transferir o torque; alto atrito é similarmente desejável entre um pneu de veículo e a superfície de estrada, da mesma maneira que está entre o pé humano e o chão para andar.

Sempre que as superfícies se moverem, ocorrerá desgaste: danos em uma ou em ambas as superfícies, geralmente envolvendo perda progressiva de material. Às vezes, o desgaste é imperceptível, mas também pode ser extremamente rápido. Na maioria dos casos, o desgaste é prejudicial, talvez causado por maiores folgas entre os componentes em movimento, liberdade indesejada de movimento e perda de precisão. Muitas vezes, leva à vibração, ao aumento da carga mecânica e ao desgaste mais rápido, e às vezes à falha por fadiga. A perda por desgaste de

quantidades relativamente pequenas de material pode ser suficiente para causar a falha completa de máquinas grandes e complexas, e infelizmente há casos em que as causas de grandes desastres de engenharia podem ser rastreadas até o desgaste. As altas taxas de desgaste, no entanto, às vezes são desejáveis. Retificação e polimento são processos de fabricação amplamente utilizados e que empregam o desgaste para remover o material de maneira controlada. Uma pequena quantidade inicial de desgaste, é muitas vezes antecipada e bem-vinda durante o processo de "entrada" em alguns tipos de máquinas.

A ação dos elementos ou a interação entre ambos varia amplamente dependendo da estrutura do par tribológico. O resultado desta interação entre as superfícies resultam nas seguintes manifestações:

1. Dissipação de energia, geralmente manifestado pela liberação de calor e pequena quantidade de ruído, decorrente da resistência ao movimento representada pelo coeficiente de atrito;

2. Durante o escorregamento relativo, as superfícies em contato modificam suas propriedades, tais como: acabamento superficial, físicas (dureza, perda de material) e químicas (existência de corrosão, oxidação e hidratação).

O comportamento dos pares tribológicos podem ser compreendidos quando, segundo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017) e (RAHMATI; VAHABLI, 2015), se estuda a influência da topografia da superfície e da interação das superfícies em contato, o atrito, os lubrificantes e a lubrificação na interface dos materiais em contato.

As variáveis a serem consideradas nos ensaios são:

- carga normal (N);

- Tempo de duração do teste (em horas ou minutos ou segundos); O tempo total será determinado em função do comprimento total a ser ensaiado e a frequência de oscilação (em Hz).

2.6.1 Topografia de superfícies

O estudo da topografia das superfícies tem grande importância porque influencia fortemente as propriedades físicas e mecânicas das superfícies em contato. Existem diversos equi-

pamentos que podem avaliar esta topografia, entre eles, o rugosímetro e o perfilômetro 3D. Este assunto foi discutido com mais detalhes na Seção 2.7.2.

2.6.2 Contato entre superfícies

Segundo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017), quando duas superfícies nominalmente planas e paralelas são suavemente unidas, o contato ocorrerá inicialmente em apenas alguns pontos. À medida que a carga normal é aumentada, as superfícies se aproximam e um número maior de áreas mais altas ou asperidades nas duas superfícies entram em contato. Estas asperidades determinam os únicos pontos em que as superfícies se tocam e são responsáveis por suportar a carga normal na superfície e por gerar quaisquer forças de atrito que atuam entre elas. Se uma corrente elétrica passar de uma superfície para outra, ela deve se propagar pelos pontos de contato. Uma compreensão da maneira pela qual as asperidades de duas superfícies interagem sob cargas variadas é, portanto, essencial para qualquer estudo de atrito, desgaste ou resistência elétrica de contato; é o conceito de contato de aspereza que fornece uma explicação física para muitas observações tribológicas comuns.

Segundo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017), existem dois tipos de deformação quando duas superfícies estão em contato e carregadas pela força normal. São as deformações elásticas e plásticas. A Fig. 2.22 representa a deformação elástica na região de contato entre duas esferas de raios diferentes carregadas pela força normal (W).

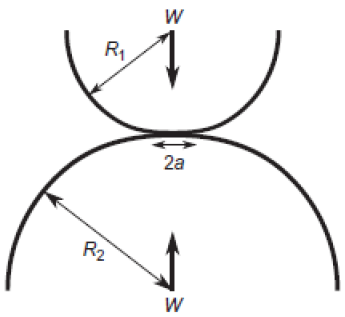


Figura 2.22 – Deformação elástica de um ponto de contato Hertzian (extraído de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017))

À medida que a carga normal aplicada nos corpos de contato é aumentada, um deles pode começar a deformar plasticamente. O regime plástico ocorre primeiro no ponto onde o critério de rendimento é primeiramente satisfeito.

2.6.3 Atrito

Segundo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017), a força conhecida como atrito decorre da resistência de escorregamento encontrada por um corpo que move-se sobre outro. Essa ampla definição abrange duas classes importantes de movimento relativo: deslizamento e rolamento. A distinção entre ambos é importante, entretanto não são mutuamente exclusivos. Para ambas as classes (Fig. 2.23), o coeficiente de atrito (μ) - (Eq. 2.5), pode ser expressado pela razão entre a força tangencial (F) e a carga normal aplicada (W).

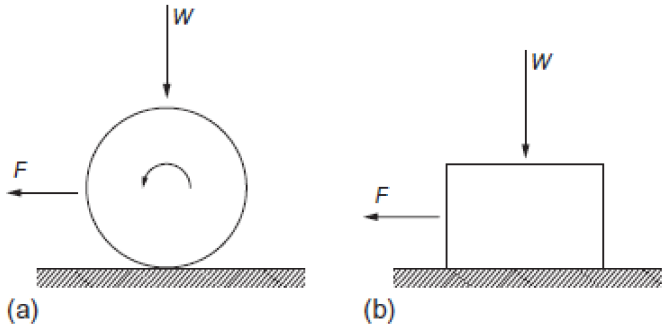


Figura 2.23 – Força (F) necessária para superar o atrito e causar movimento por (a) rolamento ou (b) deslizamento (extraído de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017))

$$\mu = F/W \tag{2.5}$$

As leis do atrito podem ser estabelecidas como:

1^a lei: A força de atrito é proporcional a carga normal (coeficiente de atrito é constante) - Fig. 2.24. É verdadeira também para contatos a seco (sem lubrificação) com exceção para polímeros.

Segundo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017), em cargas baixas e em superfícies moderadamente ásperas, onde a área real de contato é uma pequena fração da área aparente, a área de contato permanece efetivamente proporcional à carga normal e o coeficiente de atrito é, portanto, constante e independente da carga normal. A Fig. 2.25 ilustra esse caso, para o atrito de cilindros cruzados com cargas baixas, quando suas superfícies foram torneadas para produzir rugosidade moderada da superfície. Quando a carga é aumentada ou se as superfícies são lisas e polidas, o coeficiente de atrito cai com o aumento da carga. Sob essas condições, embora a força de atrito permaneça proporcional à área real de contato, essa área não é mais proporcional

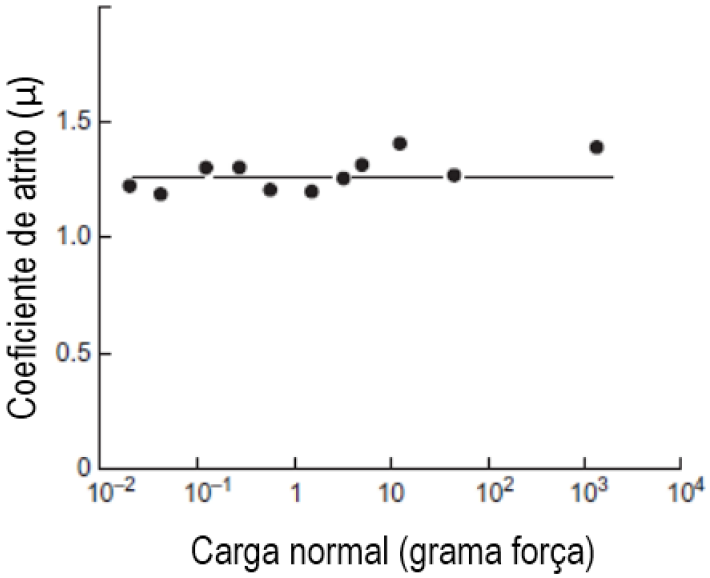


Figura 2.24 – Variação do coeficiente de atrito (μ) com a carga normal (W), para o deslizamento não lubrificado do aço no alumínio no ar (adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017))

à carga normal.

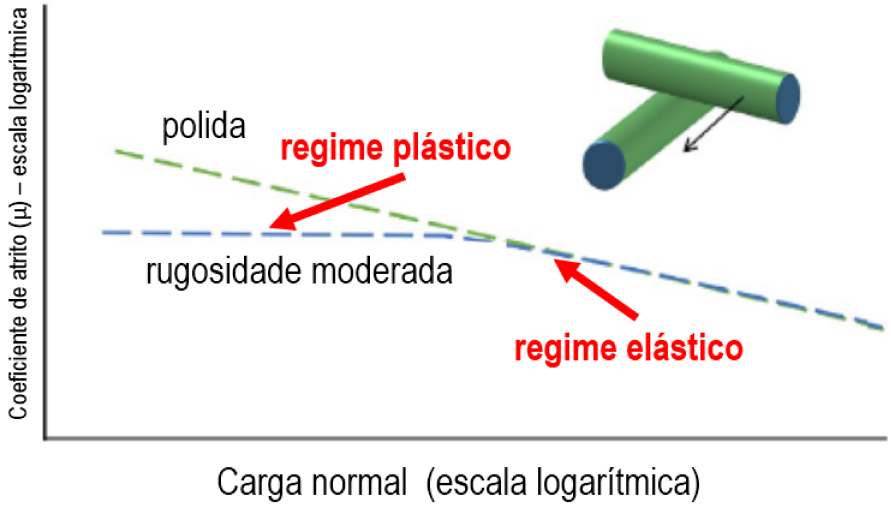


Figura 2.25 – Diagrama esquemático mostrando como o coeficiente de atrito varia com a carga normal para o deslizamento de cilindros cruzados de um polímero vítreo com diferentes rugosidades (adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017))

2^a lei: A força de atrito é independente da área aparente de contato - Fig. 2.26. É também verdadeira para contatos a seco (sem lubrificação) com exceção para polímeros.

3^a lei: A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

A terceira lei do atrito, segundo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017), é menos bem fun-

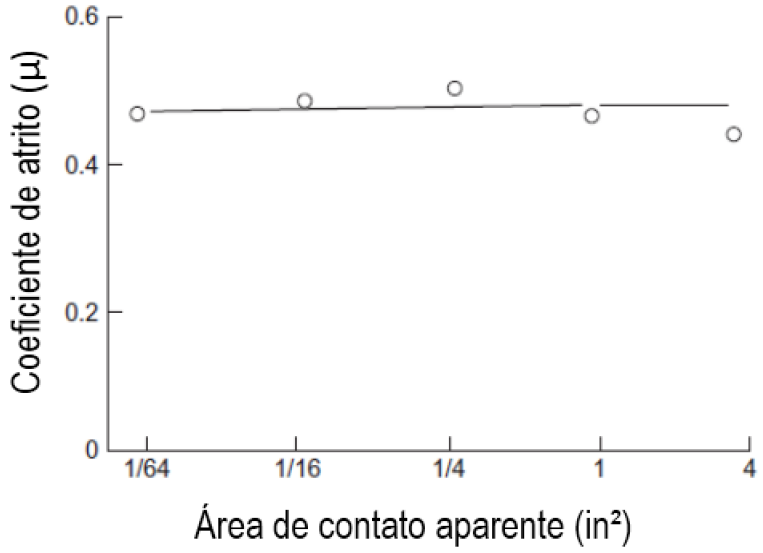


Figura 2.26 – Variação do coeficiente de atrito (μ) com a área aparente de contato (adaptado de (RABINOWICZ, 1995))

damentada do que as duas primeiras. É uma questão de observação comum, que a força de atrito necessária para iniciar o deslizamento é geralmente maior do que a necessária para mantê-la e, portanto, o coeficiente de atrito estático (μ_s) é maior que o coeficiente de atrito dinâmico ou cinético (μ_d). Após o início do movimento, (μ_d) tende a ser independente da velocidade de deslizamento, embora em altas velocidades de deslizamento, da ordem de dezenas ou centenas de metros por segundo para metais, (μ_d) caia com o aumento da velocidade. De acordo com a 3^a lei verifica-se que: $\mu_s > \mu_d$.

Pela teoria do atrito (modelo de Coulomb), previa-se que a maior contribuição para a força de atrito era devido a interação mecânica entre a parte rígida e as asperidades deformadas elasticamente. Desta forma, a força de atrito é provocada por duas fontes: adesão (desenvolvida nas áreas reais de contato) e deformação (necessária para indentar (penetrar, riscar,etc) as asperidades da superfície "dura" contra a superfície "mole") e pode ser expressada pela Eq. 2.6.

$$F = F_{adh} + F_{def} \tag{2.6}$$

onde: F = força de atrito; F_{adh} = componente da força de atrito devido a adesão e F_{def} = componente da força de atrito devido a deformação.

2.6.4 Tribologia de polímeros

O contato entre polímeros, ou entre um polímero e um metal, é predominantemente elástico. Neste importante aspecto, o atrito dos polímeros difere fundamentalmente dos metais. As borrachas também fazem contato elasticamente. Um segundo fator que desempenha um papel importante no atrito dos polímeros, é a forte dependência do tempo de suas propriedades mecânicas: a maioria dos polímeros é viscoelástica e também mostra um aumento acentuado da tensão de escoamento com a taxa de deformação.

Os coeficientes de atrito entre os polímeros que escorregam contra si mesmos, ou contra metais ou cerâmicas, encontram-se comumente na faixa de 0,1 a 0,5, embora valores fora dessa faixa também sejam vistos. Nesses materiais, para os quais as Leis de Amontons nem sequer são amplamente aplicáveis μ varia tanto com a carga normal quanto a velocidade de deslizamento e a temperatura.

O atrito de polímeros, como dos metais, pode ser atribuído a duas fontes: deformação, envolvendo a dissipação de energia em um volume bastante grande em torno da área local de contato e de adesão, originado da interface entre o controle deslizante e a contraface. As regiões onde essas duas fontes de atrito se originam são ilustradas na Fig. 2.27, e representa o deslizamento de uma asperidade dura sobre uma superfície do polímero. Segundo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017), se a contraface tem baixa rugosidade, o desgaste decorre da adesão entre as superfícies de contato e envolve deformação apenas nas camada superficiais do polímero. Por outro lado se a superfície tem grande rugosidade, ocorrerá deformação do polímero a uma profundidade significativa (desgaste coesivo). A Fig. 2.27 mostra um desenho esquemático da ocorrência desses dois tipos de desgaste.

O nível de rugosidade na qual ocorre a transição entre os desgastes adesivo e coesivo depende da natureza do polímero, entretanto, situam-se entre 0,01 e 0,1 μm para rugosidade média (R_a). Em geral, polímeros que deslizam sobre superfícies duras e com baixa rugosidade, sofrem mecanismo de desgaste adesivo, enquanto o que deslizam sobre superfícies de alta rugosidade apresentam desgaste coesivo. A transição entre os dois regimes pode levar a um ponto mínimo de desgaste em relação a certa rugosidade superficial, como ilustrado na Fig. 2.28.

Existem, segundo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017), diversas outras correlações entre

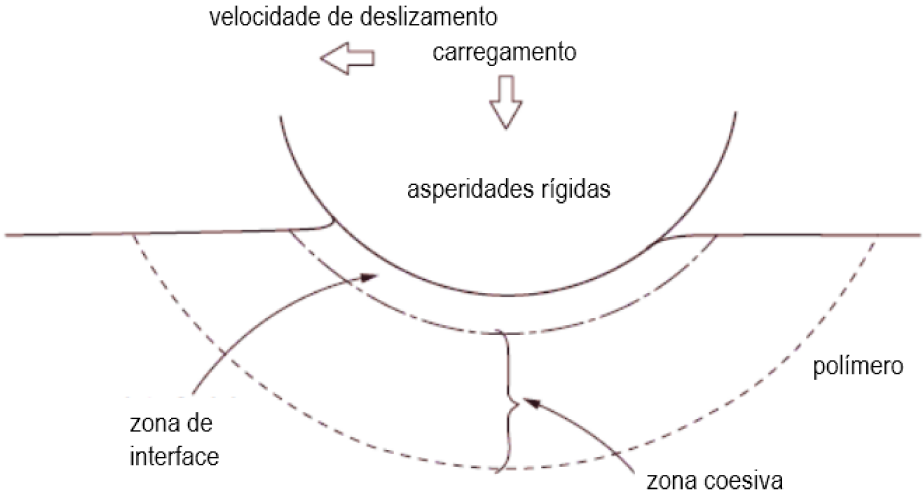


Figura 2.27 – Origem do atrito associado ao deslizamento de uma asperidade dura e lisa ao longo de uma superfície de um polímero (adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)

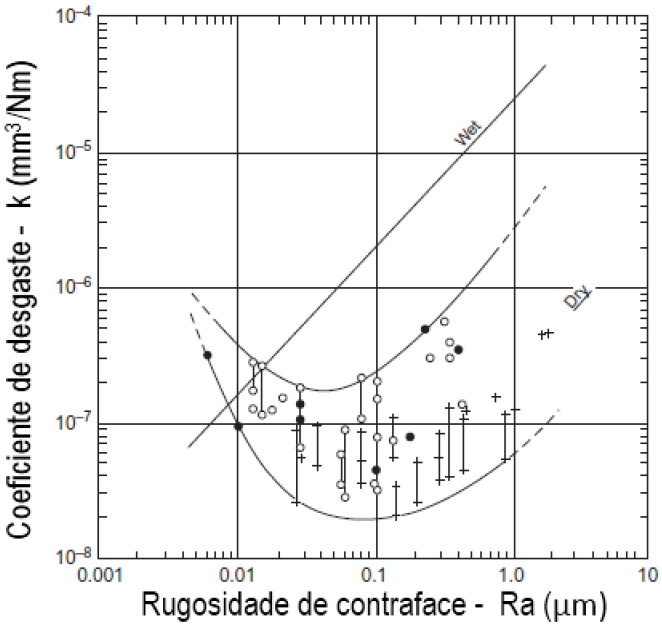


Figura 2.28 – Taxa de desgaste para polietileno de ultra peso molecular contra uma contraface de aço em função da rugosidade superficial do aço (com e sem lubrificação) (adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)

o coeficiente de desgaste. Entre elas, pode-se citar o módulo de elasticidade e rugosidade da contraface, Ratner-Lancaster ($\frac{1}{\sigma_u \varepsilon_u}$).

2.6.5 Determinação do (CoF) e desgaste

Segundo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017), existem diversos procedimentos para estimar o desgaste, entretanto, os mais comumente utilizados são: perda de volume e análise através de um perfilômetro 3D com a estimativa total da cota Z de penetração do indentador. A determinação do coeficiente de atrito (CoF) segundo a norma ASTM G133-05 (ASTM, 2016), pode ser feita através do ensaio *Mehod for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding* conforme diagrama esquemático das Figuras 2.29 e 2.30. O desgaste foi estimado através da variação da cota Z do indentador do tribômetro.

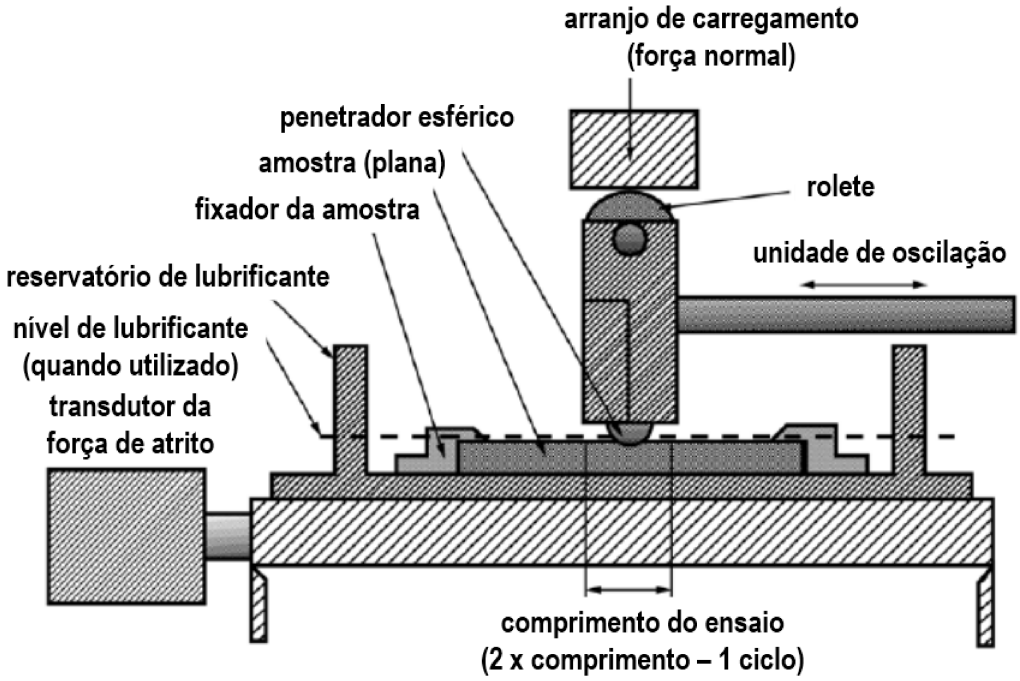


Figura 2.29 – Vista esquemática do teste *reciprocating* (adaptado da ASTM G133-05 (ASTM, 2016))

2.7 Qualidade

2.7.1 Qualidade dimensional

A norma ISO 286-1:2010 (ISO, 2010), estabelece o conjunto de princípios, regras e tabelas a serem aplicadas à tecnologia mecânica, afim de permitir escolha racional de tolerâncias e ajustes, visando a fabricação de peças intercambiáveis. A tolerância é definida como sendo a variação entre as dimensões máxima e mínima de uma peça (Fig. 2.31).



Figura 2.30 – Ensaio de determinação do CoF e desgaste no tribômetro Rtec®

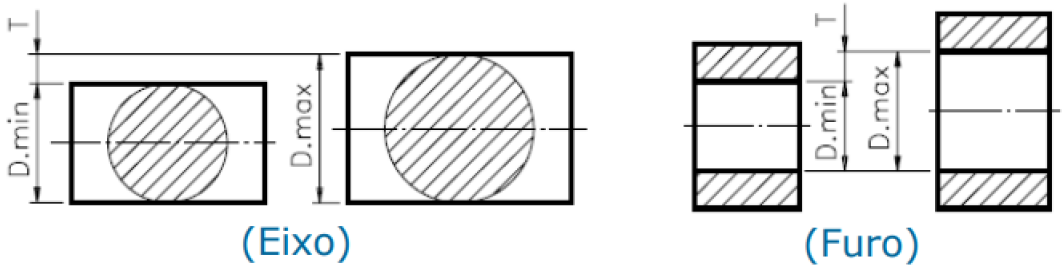


Figura 2.31 – Representação da tolerância para eixos/furos (adaptado de (ISO, 2010))

Afastamentos: desvios aceitáveis da dimensão nominal, para mais ou para menos (Fig. 2.32).



Medida nominal: 20 mm
Afastamento superior: 0,28 mm
Afastamento inferior: 0,18 mm

Dimensão máxima: 20,28 mm
Dimensão mínima: 20,18 mm
Tolerância: 0,10 mm

Figura 2.32 – Representação dos afastamentos em relação a medida nominal (adaptado de (ISO, 2010))

A qualidade de trabalho é definida como a precisão de um determinado processo de fabricação. A Tab. 2.4 contém o intervalo de classes de qualidade e suas respectivas utilizações.

Tabela 2.4 – Tabela de Qualidade de Trabalho e suas utilizações

Classe de qualidade	Utilização
01 a 04	Instrumentos de verificação (calibres, padrões, etc.)
05 a 06	Construção mecânica de grande precisão
07 a 08	Construção mecânica cuidadosa
09 a 11	Construção mecânica corrente
12 a 18	Construção mecânica grosseira (laminação, estampagem, fundição, forjamento)

A Tab. 2.5 contém alguns processos de fabricação e as respectivas qualidade de trabalho (IT)[3].

Tabela 2.5 – Tabela de processos de fabricação e suas respectivas qualidade de trabalho (IT)

Processos	Qualidade IT
Polimento	04 a 06
Rasqueateamento	05 a 08
Torneamento (acabamento)	05 a 08
Retificação	05 a 09
Brochamento	05 a 09
Mandrilamento	06 a 11
Torneamento (desbaste)	06 a 12
Aplainamento	06 a 12
Fresamento	10 a 12
Furação	10 a 12

2.7.2 Qualidade superficial - Rugosidade

Segundo (JOSSO; BURTON; LALOR, 2002), uma superfície é composta por três componentes: forma, ondulação e rugosidade. Forma é a componente mais grosseira, mais fácil de observar e pode ser esférica, cilíndrica, plana, e assim por diante. Se chegarmos mais próximos dessa superfície, observa-se que também possui diversas ondulações, as quais são constituídas de estruturas ainda menores, pequenos picos e vales, representando a rugosidade da peça (Fig. 2.33).

Cada vez é dada mais importância à análise da rugosidade superficial, visto que ela influencia em diversas propriedades de um determinado componente. Resistência à corrosão, ao desgaste e à fadiga de uma determinada peça, por exemplo, podem ser alterados pelo acabamento

[3]as faixas de qualidade de trabalho IT são apenas referências. Pode haver extrapolação destas faixas a depender dos parâmetros de processo utilizados

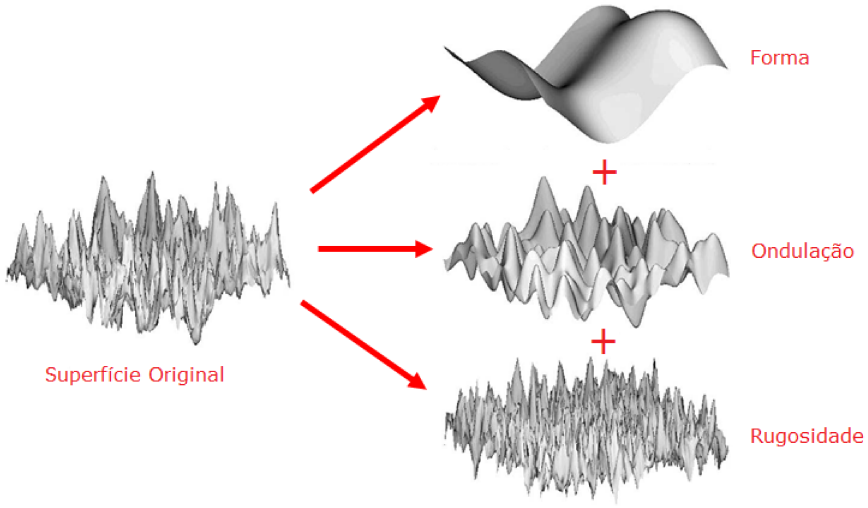


Figura 2.33 – Estruturas que compõem uma superfície (adaptado de (JOSSO; BURTON; LALOR, 2002))

superficial e também pelo coeficiente de atrito entre duas peças. A rugosidade superficial pode ser medida mecânica ou opticamente, dividindo-se a região medida (*lm*) em cinco sub-regiões (*le*) e calculando um linha média para o perfil, para a qual a área dos picos acima e abaixo da linha é igual (Fig. 2.34).

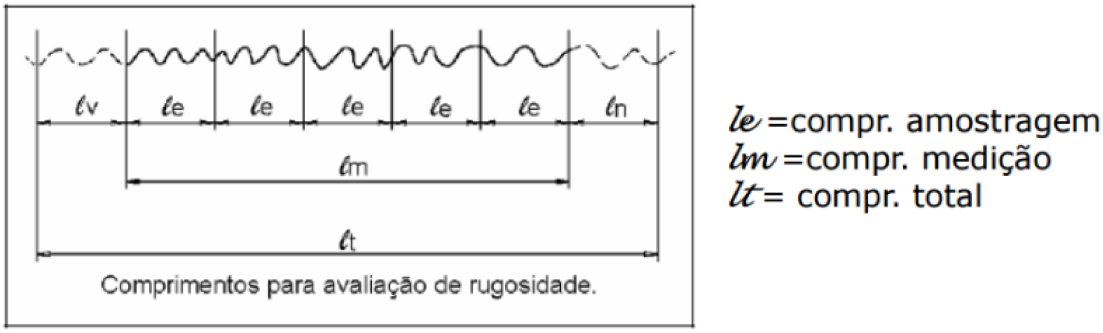


Figura 2.34 – Comprimentos para avaliação de rugosidade superficial (adaptado de (JOSSO; BURTON; LALOR, 2002))

Destas medidas, é possível calcular diversos parâmetros para representar a rugosidade superficial, sendo os principais:

Rugosidade média (R_a): Projeta-se a superfície que se encontra abaixo da linha média para cima desta linha e calcula-se a média desses novos valores (picos verdes e azuis - Fig. 2.35).

Rugosidade média (R_z): é a média aritmética dos 5 valores da rugosidade parcial (Z_i), a qual é definida como a soma dos valores absolutos das ordens dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes dentro de um comprimento de amostragem (l_e). Na

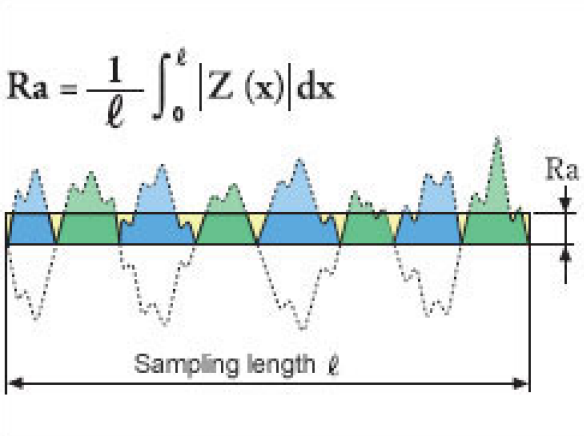


Figura 2.35 – Rugosidade média - R_a (adaptado de (JOSSO; BURTON; LALOR, 2002))

representação gráfica do perfil, este valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, dentro do comprimento de amostragem (l_e) - Fig. 2.36.

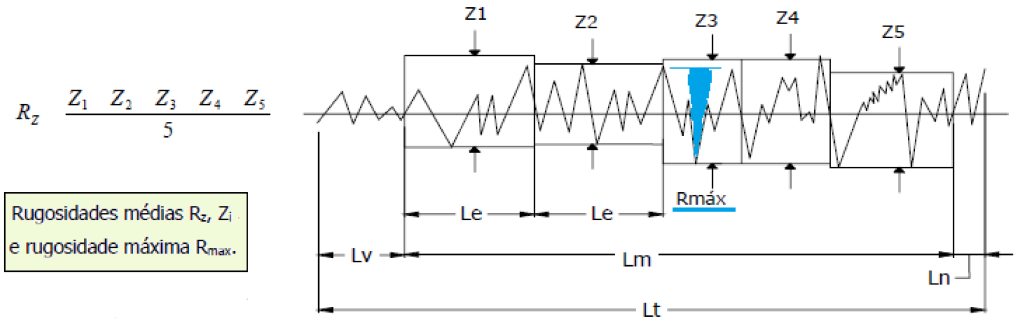


Figura 2.36 – Rugosidade média - R_z (adaptado de (NOVASKI, 2014)

2.7.3 Qualidade superficial - Peças impressas

Segundo (VOLPATO, 2017) - Capítulo 7, da mesma forma que as demais tecnologias de MA, a qualidade das superfícies produzidas por extrusão varia com a orientação em que são fabricadas em relação ao plano de construção. Superfícies planas, paralelas ao plano X-Y, oriundas de camadas superiores (última camada), resultam em um acabamento característico dos processos por extrusão, ou seja, com ondulações conforme a geometria dos filamentos adjacentes depositados (Fig. 2.12). Superfícies planas na direção vertical (90^o em relação ao plano X-Y) tendem a ter uma rugosidade que é função do formato elíptico do filamento e da espessura de camada. Nas superfícies planas inclinadas ou curvas, o acabamento varia com a inclinação, de acordo com o efeito degrau de escada. Quanto menor o ângulo de inclinação, mais este efeito é observado.

As superfícies da peça que ficam em contato com a superfície da mesa de impressão, ou com as estruturas de suporte, são afetadas pela qualidade da superfície dessas estruturas. O zeramento do cabeçote extrusor e a planicidade da mesa de impressão também exercem forte influência no acabamento da peça. A primeira camada acaba copiando as irregularidades das superfícies que servem de apoio ao material da peça durante o processamento, prejudicando assim, o seu acabamento. A precisão dimensional também é afetada por este procedimento.

Uma opção para melhorar o acabamento e a precisão dimensional na direção Z de construção na tecnologia de modelagem por fusão e deposição, é alterar a configuração dos parâmetros de deposição das camadas da base ou das estruturas de suporte, por meio da redução do espaçamento entre filamentos e/ou da duplicação da última camada refinada da base.

2.8 Modelos estatísticos de análise

2.8.1 Planejamento de experimentos

Segundo (MONTGOMERY; C.RUNGER, 2016) e (BUTTON, 2005), o planejamento ou delineamento experimental, representa um conjunto de ensaios estabelecido com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo.

Os objetivos de um planejamento de experimentos podem ser:

- determinar quais variáveis (fatores) são mais influentes nos resultados (respostas);
- atribuir valores às variáveis influentes de modo a otimizar e minimizar a variabilidade dos resultados ;
- atribuir valores às variáveis influentes de modo a minimizar a influência de variáveis não controláveis;

Os benefícios da utilização das técnicas de planejamento de experimentos podem ser:

- redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;
- estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- determinação da confiabilidade dos resultados;

- realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios;
- seleção das variáveis que influem num processo com número reduzido de ensaios;
- representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

Dentre as principais ferramentas que podem ser utilizadas no planejamento de experimentos podem-se citar: MSR (método de superfície de resposta) ou RSM[4]; planejamento fatoriais (completo e 2^K); regressão linear e múltipla, dentre outras. As metodologias de superfície de resposta mais utilizadas, segundo (MOHAMED; MASOOD; BHOWMIK, 2015) e (MONTGOMERY; C.RUNGER, 2016), são: o PCC (planejamento composto central) ou CCD[5], e o planejamento Box-Behnken.

2.8.2 Metodologia de superfície de resposta (MSR)

Segundo (MONTGOMERY; C.RUNGER, 2016), a metodologia de superfície de resposta (MSR), é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas as quais são úteis para modelagem e análise de aplicações em que a resposta de interesse seja influenciada por muitas variáveis e tem como objetivo principal **otimizar estas respostas**. Esta metodologia é usada, frequentemente, para refinar modelos após a determinação dos fatores importantes por meio de filtragem dos experimentos fatoriais, especialmente quando existe suspeita de curvatura na superfície de resposta.

Na maioria dos problemas de MSR, a relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. Assim, a primeira etapa na MSR é encontrar uma aproximação adequada para a relação verdadeira entre a resposta e as variáveis independentes. Se a resposta for bem modelada por uma função linear das variáveis independentes, esta função de aproximação será o modelo de primeira ordem (Eq. 2.7). Se houver curvatura no sistema, então um polinômio de maior grau terá que ser usado, tal como o modelo de segunda ordem (Eq. 2.8).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_k x_k + \varepsilon \tag{2.7}$$

[4]O termo RSM em inglês corresponde a *response surface method*
[5]O termo CCD em inglês corresponde a *central composite design*

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \tag{2.8}$$

O PCC é composto de três partes, que são:

- A parte fatorial ou cúbica contendo 2^k experimentos, sendo k o número de fatores;
- A parte axial formada por *2k* pontos com todas as coordenadas nulas exceto a que tiver o valor do rotacional α_1 ou $-\alpha_1$.
- O ponto central

Na Fig. 2.37 estão representadas as três partes que compõem o PCC.

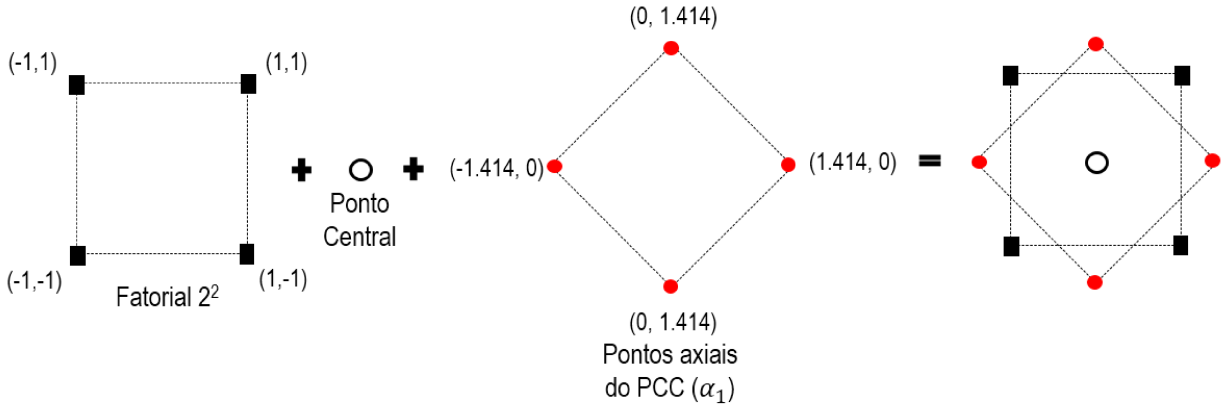


Figura 2.37 – PCC para $\alpha_1 = 1,414$; *k* = 2 fatores (adaptado de (MONTGOMERY; C.RUNGER, 2016))

2.8.3 Teste de significância do modelo

Segundo (MONTGOMERY; C.RUNGER, 2016), este teste é realizado como um procedimento de análise de variância (ANOVA). Calcula-se a razão entre a média quadrática dos termos de regressão, utilizando o número de graus de liberdade (df) e a média quadrática do erro e encontra-se a variável estatística *F*. Comparando-se esta variável estatística com o valor crítico da distribuição *F*, obtido a partir do nível de significância desejado, conclui-se sobre a significância do modelo. Se *F* for maior que F_{crtico} (o que equivale a um P_{value} menor que o nível de significância), então o modelo é adequado. Nas tabelas ANOVA, as siglas significam:

- SS - *sum of squares* ou soma dos quadrados;

- df - *degrees of freedom* ou graus de liberdade;
- MS - *mean squares* ou média dos quadrados;
- F - F_{ratio} - razão entre o modelo e seu erro;
- P - P_{value} - menor nível de significância que conduz à rejeição da hipótese nula, nas análises estatísticas;
- L - linear;
- Q - quadrático;

Existem, segundo (VIJAYARAGHAVAN et al., 2015), cinco parâmetros estatísticos que validam um modelo. Dentre os cinco, pode-se citar o quadrado do coeficiente de correlação múltipla ou de determinação (Eq. 2.9), o qual compara a variância dos pontos experimentais em relação ao ajuste proposto, com a variância da própria população de pontos experimentais. Um valor do coeficiente de correlação ou determinação igual a 0,9, indica que 90% de variabilidade dos dados é explicada pela equação. Um valor zero indica que não existe correlação. Quanto mais próximo da unidade estiver o valor do coeficiente de correlação, melhor será o ajuste proposto.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(A_i - \bar{A}_i\right)\left(M_i - \bar{M}_i\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(A_i - \bar{A}_i\right)^2 \sum_{i=1}^{n} \left(M_i - \bar{M}_i\right)^2}} \right)^2 \tag{2.9}$$

onde A_i e M_i são os valores previstos e observados respectivamente e $\bar{A}_i$ e $\bar{M}_i$ são as médias dos valores previstos e observados respectivamente.

Outro parâmetro de validação de um modelo é o RSME [6] ou erro quadrático médio (Eq. 2.10), o qual é uma regra de pontuação quadrática que também mede a magnitude média do erro. É a raiz quadrada da média das diferenças quadradas entre os valores previstos e observados e observação real. O RMSE não aumenta necessariamente com a variação dos erros, ele aumenta com a variância da distribuição de frequência das magnitudes do erro. Não existe um valor recomendado para o RSME, entretanto, quanto menor o valor mais representativo ele é na validação do modelo.

[6] O termo RMSE em inglês corresponde a *root mean square error*

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left| M_i - A_i \right|^2}{N}} \tag{2.10}$$

onde A_i e M_i são os valores previstos e observados respectivamente e N o número de experimentos.

2.8.4 Controle estatístico da qualidade

Segundo (MONTGOMERY; C.RUNGER, 2016), a capacidade de um processo (Cp) mostra estatisticamente quantas peças defeituosas espera-se encontrar em um determinado processo. Uma das maneiras de estimar esta capacidade é dada pela Eq. 2.11. Estima-se, segundo (MONTGOMERY; C.RUNGER, 2016), que o índice de capacidade é considerado bom quando for maior ou igual a 1,33.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \tag{2.11}$$

onde *LSE* é o limite superior de especificação, *LIE* o limite inferior de especificação e σ o desvio padrão

Um estimador não tendencioso do desvio populacional ($\hat{\sigma}$) segundo (MONTGOMERY; C.RUNGER, 2016) é dado pela Eq. 2.12.

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{S}}{C_4} \tag{2.12}$$

onde $\bar{S}$ é o desvio-padrão da amostra e C_4 uma constante tabelada para vários tamanhos de amostra.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os materiais, máquinas, equipamentos e os procedimentos experimentais empregados para investigar as propriedades mecânicas, elétricas, tribológicas e de qualidade (dimensional e rugosidade), de peças fabricadas pelo processo MA por extrusão de material, utilizando as matérias-primas PLA e ABS com e sem grafeno e pelo processo de moldagem por injeção, utilizando as matérias-primas PLA e ABS granulados. Os ensaios foram realizados no LAPMET - Laboratório de Projetos Mecânicos e Tribologia da UESC, no LEPU - Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU e nos laboratórios de ensaios da empresa NZ-Cooperpolymer - compostos termoplásticos de engenharia.

Antes de desenvolver os testes a fim de atingir os objetivos propostos, foram feitos diversos testes preliminares com várias velocidades de deslocamento do extrusor, temperaturas de fusão e da mesa de impressão e com produtos fixadores das peças às mesas de impressão, para obter a configuração ideal de manufatura na impressora 3D das peças a serem ensaiadas, utilizando as respectivas matérias-primas.

3.1 Materiais

As matérias-primas utilizadas neste estudo e fornecidas para o processo de impressão 3D, foram o PLA-grafeno produzido pela Haydale®, na cor preta, o PLA produzido/fornecido

pela 3DLab®, na cor branca, ABS-grafeno fornecido pela Up3D®, na cor preta e ABS produzido/fornecido pela 3DLab®, na cor branca. Todos os materiais fornecidos para a impressora 3D foram em filamentos de 1,75 mm de diâmetro. As matérias-primas fornecidas para o processo de moldagem por injeção, foram grãos de PLA virgem, nas cores branca e incolor (estas são disponibilizadas comercialmente), distribuído pela 3DLab e fabricado pela NatureWorks® e ABS granulado fabricado pela NZCooperpolymer®, na cor preta.

Não são todos os fabricantes/distribuidores que fornecem especificações técnicas detalhadas de cada um dos materiais, entretanto seguem as informações as quais puderam ser obtidas.

3.1.1 Matéria-prima PLA-grafeno

As propriedades disponibilizadas pela fabricante Haydale® estão contidas na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Tabela de especificações técnicas da matéria-prima PLA-grafeno

	propriedades para o processo: moldagem por injeção		propriedades dos filamentos	
	valores	norma	valores	norma
Índice de fluidez[1]	11,7 g/10 min.	ISO 1133	11,7 g/10 min.	ISO 1133
Resistência a tração[2]	41 MPa	ISO 527-2	53 MPa	norma interna
Módulo elasticidade a tração[2]	2,6 GPa	ISO 527-2	2,9 GPa	norma interna
Deformação a tração[2]	4,7 %	ISO 527-2	5,1 %	norma interna
Módulo elasticidade a flexão[2]	2,8 GPa	ISO 178	N/A	——
Resistência ao impacto[2]	34 KJ/m^2	ISO 179 tipo 1	N/A	——
Densidade[2]	1,11 gm/cm^3	norma interna	1,11 gm/cm^3	norma interna

[1]- (210^{o}C/2,16 Kg)
[2]- (23^{o}C)

Informações de processo e utilização: O filamento pode ser processado por todas as impressoras 3D, e recomenda-se uma temperatura de extrusão de 200^{o}C e da mesa de impressão, em torno de 58^{o}C, para se obter boa adesão da primeira camada. A temperatura de extrusão pode ser menor (em torno de 170^{o}C) caso seja importante ao processo, entretanto nunca deve exceder 220^{o}C.

3.1.2 Matéria-prima PLA

As propriedades disponibilizadas pelo fabricante 3DLab®, estão contidas na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 – Tabela de especificações técnicas da matéria-prima: PLA

Propriedades	Valores	Norma
Densidade	1,24 g/cm^3	——
T_f[1]	185^{o}C	——
T_g[2]	60^{o}C	——
HDT[3]	55,11^{o}C	ISO 75
Tensão de escoamento (tração)	24,8 MPa	ASTM D638
Módulo de elasticidade (tração)	1,9 GPa	ASTM D638
Tensão de ruptura (tração)	46 MPa	ASTM D638
Deformação (tração)	3,69 %	ASTM D638
Dureza Shore D	85	ASTM 2240

[1] - T_f: temperatura de fusão
[2] - T_g: temperatura de transição vítrea
[3] - HDT: temperatura de deflexão térmica

Informações de processo e utilização: Recomenda-se uma temperatura de extrusão de 180^{o}C e da mesa de impressão 60^{o}C. A T_g é igual a 60^{o}C. Recomenda-se também a utilização de um líquido aderente, com composição a base de solventes, resina e propelentes, entre a mesa de impressão e a peça a ser impressa. Esta aderência, deve ocorrer entre a primeira camada da peça e a mesa de impressão, e tem como objetivo evitar empenamento (*warping*).

3.1.3 Matéria-prima PLA-granulado

As propriedades disponibilizadas pelo fabricante 3DLab®, estão contidas na Tab. 3.3.

Tabela 3.3 – Tabela de especificações técnicas da matéria-prima: PLA-granulado

Propriedades	Valores	Norma
Tensão de escoamento (flexão)	66 MPa	ASTM D790
Tensão de ruptura (flexão)	130 MPa	ASTM D790
Módulo de elasticidade (flexão)	4,35 GPa	ASTM D790

3.1.4 Matéria-prima ABS-grafeno

O distribuidor desta matéria-prima no Brasil (Up3D®), não disponibiliza no site as propriedades físicas.

Informações de processo e utilização: Recomenda-se temperatura de extrusão de 210 a 260^{o}C. A temperatura da mesa de impressão 110^{o}C. Segundo o distribuidor, a condução de

eletricidade se dá pela inserção de grafeno, porém não especifica a proporção. A resistividade aproximada é 220KΩ em 100 mm de comprimento.

3.1.5 Matéria-prima ABS

As propriedades disponibilizadas pelo fabricante 3DLab® estão contidas na Tab. 3.4.

Tabela 3.4 – Tabela de especificações técnicas da matéria-prima: ABS

Propriedades	Valores	Norma
Densidade	1,04 g/cm^3	——
T_f[1]	220^{o}C	——
T_g[2]	100^{o}C	——
HDT[3]	86,13^{o}C	ISO 75
Tensão de escoamento (tração)	14,7 MPa	ASTM D638
Módulo de elasticidade (tração)	1,3 GPa	ASTM D638
Tensão de ruptura (tração)	29 MPa	ASTM D638
Deformação (tração)	7,08 %	ASTM D638
Dureza Shore D	74	ASTM 2240

[1] - T_f: temperatura de fusão
[2] - T_g: temperatura de transição vítrea
[3] - HDT: temperatura de deflexão térmica

Informações de processo e utilização: Recomenda-se uma temperatura de extrusão de 220 a 230^{o}C, e Tg de 100^{o}C. A temperatura da mesa de impressão é recomendada em 110^{o}C. Recomenda-se também a utilização de um líquido aderente, com composição a base de solventes, resina e propelentes, entre a mesa de impressão e a peça a ser impressa. Esta aderência, deve ocorrer entre a primeira camada da peça e a mesa de impressão, e tem como objetivo evitar empenamento (*warping*). O pós-processamento (acabamento superficial) pode ser feito através de lixamento ou utilizando acetona industrial sob condições especiais (vaporização).

3.1.6 Matéria-prima ABS-granulado

As propriedades disponibilizadas pelo fabricante NZCooperpolymers® estão contidas na Tab. 3.5.

Tabela 3.5 – Tabela de especificações técnicas da matéria-prima: ABS-granulado

Propriedades	Valores	Norma
Tensão de ruptura (tração)	39 MPa (mínimo)	ASTM D638
Deformação (tração)	5,0% (mínimo)	ASTM D638
Módulo de elasticidade (flexão)	1,5 GPa (mínimo)	ASTM D790
Tensão de ruptura (flexão)	120 MPa (mínimo)	ASTM D790
Resistência ao impacto (Izod)	80 (mínimo) J/m	ASTM D 256
Densidade	1,00 - 1,08 g/cm^3	ASTM D 792
Temperatura de fusão	160 - 175^{o}C	ASTM D 3418
Temperatura HDT	95^{o}C	ISO 75-1
Vicat 50N, 120^{o}C/h	100^{o}C	ISO 306
Dureza Shore D	82 (mínimo)	ASTM 2240

3.2 Máquinas, equipamentos e softwares

3.2.1 Impressora 3D

A máquina utilizada para fabricar os corpos de prova pelo processo MA por extrusão de material, foi uma impressora Delta, cujos componentes estão ilustrados na Fig.3.1 e as especificações contidas na Tab. 3.6.

Tabela 3.6 – Especificações da impressora 3D-Delta

Impressora	Capacidade de Impressão		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
	135 mm	135 mm	270 mm
	Diâmetro do filamento		1,75 mm
	Diâmetro do bico extrusor		0,40 mm
	Resolução de camada		100 μm
	Conectividade		USB / SD
	Vel. máxima de impressão		60 mm/s
	Temp. máxima do extrusor		260^{o}C
	Temp. máxima mesa		110^{o}C

3.2.2 Injetora

A máquina utilizada para fabricar os corpos de prova através do processo de moldagem por injeção, foi uma injetora marca Haitian HTF86X, espaçamento entre colunas 360x360mm, volume de injeção 134 g, motor de 13 Kw e pressão de fechamento 86T.

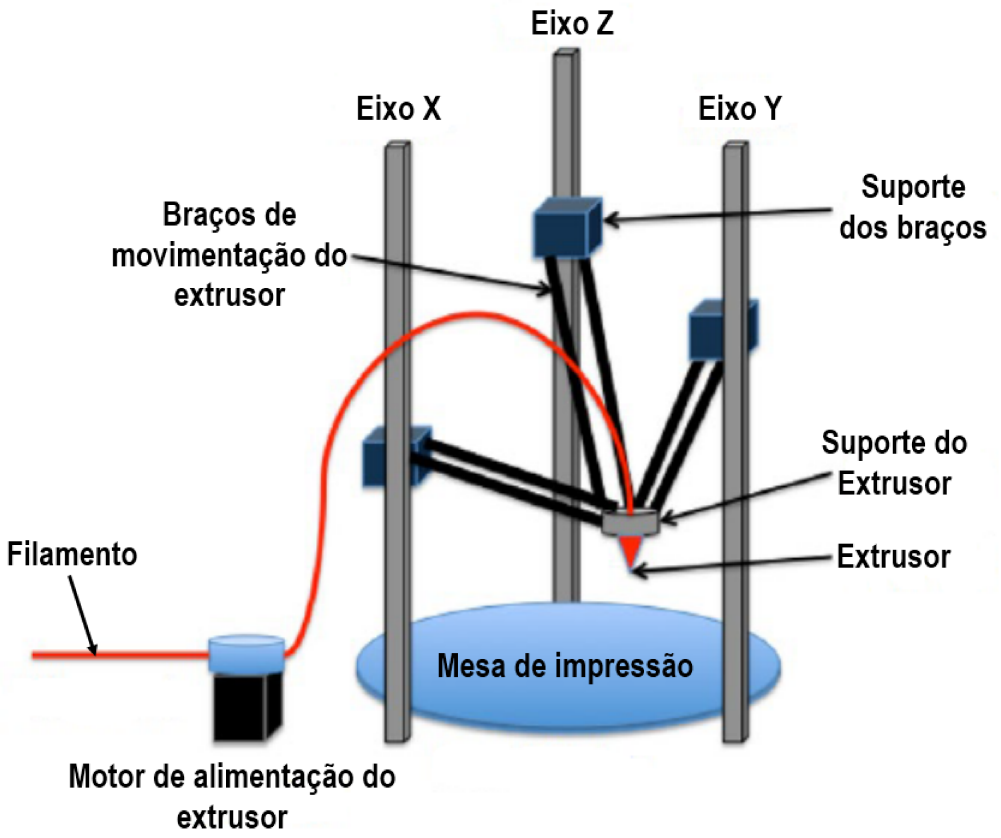


Figura 3.1 – Componentes de uma impressora 3D tipo Delta (adaptado de (BELL, 2015))

3.2.3 Software CAD

O software CAD utilizado para gerar os sólidos e os arquivos STL, foi o Solidworks®.

3.2.4 Software para fatiamento (slicing)

O software CAM utilizado para fazer o planejamento do processo e realizar a interface com a impressora 3D, foi o Simplify3D®.

3.2.5 Software estatístico

O software estatístico utilizado foi o Statistica®.

3.2.6 Software matemático

O software matemático utilizado para gerar os gráficos, superfícies RMS, cálculo das características mecânicas no ensaio de flexão e a determinação gráfica do Cof e desgaste, foi o Matlab®.

3.3 Procedimentos experimentais

Neste trabalho foram avaliadas as propriedades propriedades mecânicas (tração, flexão e impacto), elétricas (condutividade e resistividade), tribológicas (CoF e desgaste) e de qualidade (dimensional e rugosidade) de peças manufaturadas pelo processo MA por extrusão de material, utilizando as matérias-primas PLA e ABS com e sem a adição de grafeno e pelo processo de moldagem por injeção, utilizando matérias-primas PLA e ABS granulados. Os ensaios experimentais foram delineados conforme fluxograma da Fig.3.2.

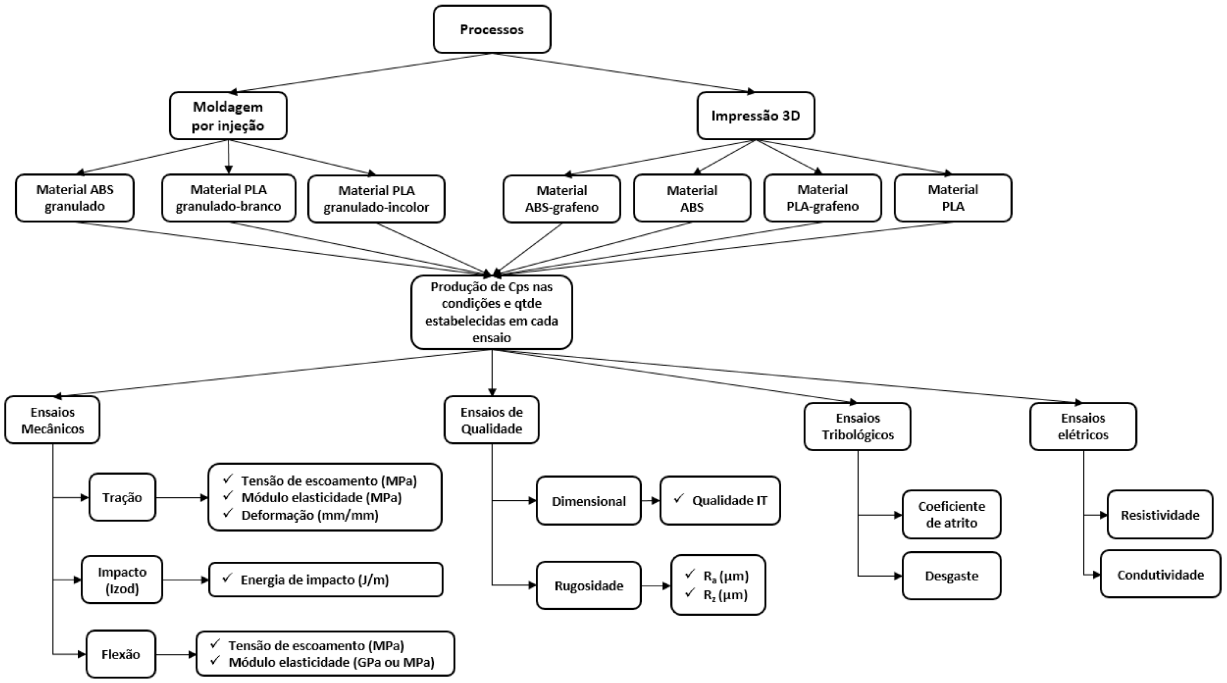


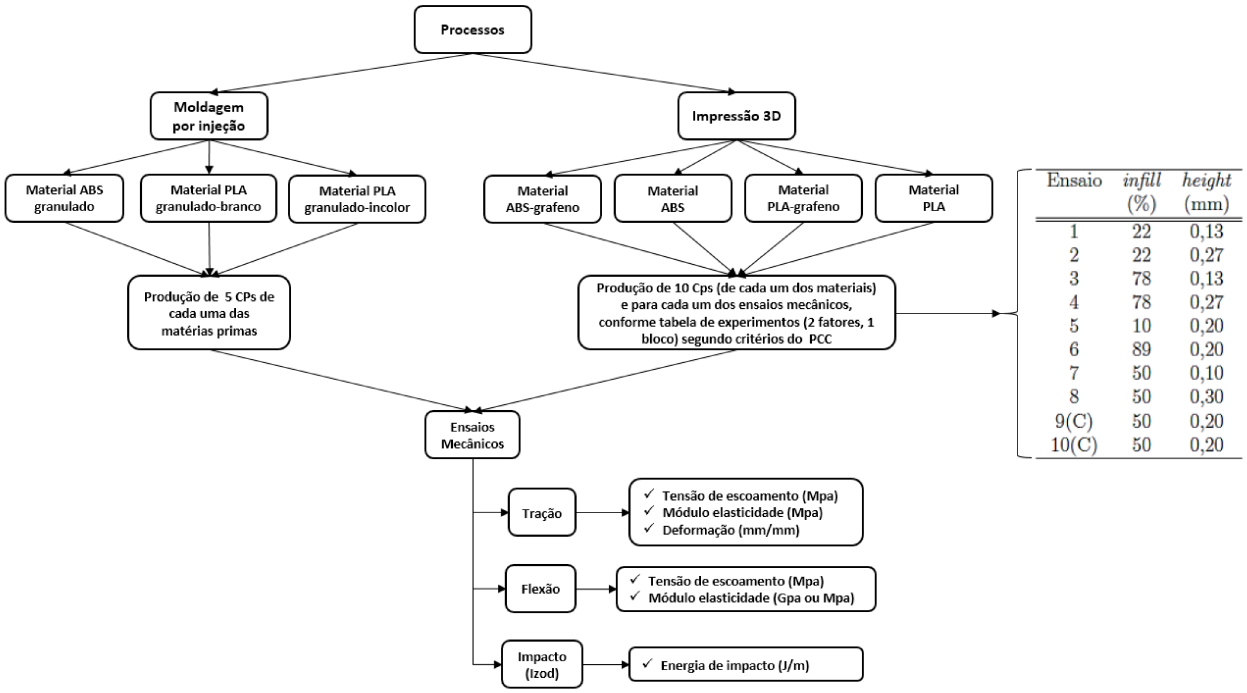
Figura 3.2 – Fluxograma geral dos experimentos/ensaios realizados (fonte: Próprio autor)

Para cada um dos ensaios foi estabelecido um planejamento de experimento específico, observando as características de cada um dos processos de manufatura. Os planejamentos dos experimentos estão detalhados em cada um dos ensaios.

3.3.1 Ensaios mecânicos

O planejamento dos experimentos bem como a quantidade de peças a serem fabricadas pelo processo MA por extrusão de material, foram estabelecidos conforme o PCC para 2 fatores, 1 bloco e 10 experimentos (Seção 2.8.2) e Tab. 3.7). Os ensaios foram delineados conforme fluxograma da Fig.3.3. A sigla (C), que aparece nos ensaios 9 e 10 são referentes ao termo

central e significa que houve réplica. Para o processo de moldagem por injeção, foram fabricados 5 CPs de cada uma das matérias-primas, uma vez que os parâmetros de processo foram mantidos constantes.



Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)
1	22	0,13
2	22	0,27
3	78	0,13
4	78	0,27
5	10	0,20
6	89	0,20
7	50	0,10
8	50	0,30
9(C)	50	0,20
10(C)	50	0,20

Figura 3.3 – Fluxograma dos experimentos realizados para os ensaios mecânicos (fonte: Próprio autor)

Tabela 3.7 – Valores para os parâmetros *infill*/*height*

Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)
1	22	0,13
2	22	0,27
3	78	0,13
4	78	0,27
5	10	0,20
6	89	0,20
7	50	0,10
8	50	0,30
9(C)	50	0,20
10(C)	50	0,20

Os dois parâmetros de processo selecionados para os ensaios foram: porcentagem de preenchimento (*infill*) e espessura de camada (*heigth*). Foram determinados com o auxílio do diagrama de Ishikawa ou Causa e Efeito (Fig.2.18) e conforme diversos estudos publica-

dos ((GOKCEK, 2012), (CANTRELL et al., 2017), (CHACON et al., 2017), (SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2010), (AHN et al., 2002), (DOMINGO-ESPIN et al., 2015), (FORUZANMEHR et al., 2016), (MELENKA et al., 2016), (ZHUANG et al., 2017), (SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2012), (DURGUN; ERTAN, 2014), (LEE; ABDULLAH; KHAN, 2005) e (WENG et al., 2016)). Todos destacam o impacto dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas dos CPs, fabricados pelo processo de MA por extrusão de material utilizando principalmente as matérias-primas PLA ou ABS. O padrão de preenchimento utilizado foi o *fullhoneycomb* e foi selecionado conforme padrões disponíveis (Fig. 2.15d da Seção 2.2.3), e também por apresentar comportamento mecânico superior aos outros padrões de preenchimento ((BARNER, 2015) e (FERNANDEZ-VICENTE et al., 2016)).

Os parâmetros de processo MA por extrusão de material, estabelecidos para manufatura dos CPs estão contidos na Tab. 3.8. Foram selecionados de acordo com as características da impressora 3D, das matérias-primas utilizadas na fabricação e dos CPs. Os fabricantes das matérias-primas, recomendam a temperatura de extrusão e da mesa de impressão e velocidade de deslocamento do extrusor. Os outros parâmetros são selecionados conforme testes práticos ou calculados automaticamente pelo software de planejamento do processo.

Tabela 3.8 – Parâmetro para o processo MA por extrusão de material (ensaios mecânicos)

Parâmetros	Especificação			
Matérias-primas	PLA-grafeno	PLA	ABS-grafeno	ABS
Diâmetro do extrusor	0,40 mm			
Espessura de camada	conforme Tab. 3.7			
Qtde de camadas superiores	4 camadas			
Qtde de camadas inferiores	4 camadas			
Núm. de linhas perímetro	2 linhas			
Padrão preenchimento int.	*full honeycomb*			
Padrão preenchimento ext.	*rectilinear*			
Porcentagem preenchimento	conforme Tab. 3.7			
Ângulo do preenchimento int.	45^o			
Temp. extrusor	200^oC		235^oC	225^oC
Temp. mesa de impressão	60^oC	70^oC	110^oC	
Vel. deslocamento extrusor	3000 mm/min.		2000 mm/min.	
Diâmetro filamento	1,75 mm			
Densidade filamento	1,11 g/cm^3	1,25 g/cm^3	1,04 g/cm^3	

Conforme (CANTRELL et al., 2017), a orientação dos corpos de prova para fabricação na impressora 3D utilizada na fabricação dos CPs foi a *printed flat* (Fig.2.16): CP na posição paralela a mesa de impressão (eixo X). Os corpos de prova produzidos através do processo MA por

extrusão de material, foram criados no Solidworks®, exportados para o padrão STL e importados pelo software de fatiamento Simplify3D®, onde foram criados os G-code utilizados na impressora 3D. O processo de fabricação dos CPs (MA por extrusão de material) incluindo as camadas de fechamento inferiores e superiores, padrão interno de preenchimento e as linhas de perímetro estão representados na Fig.3.4.

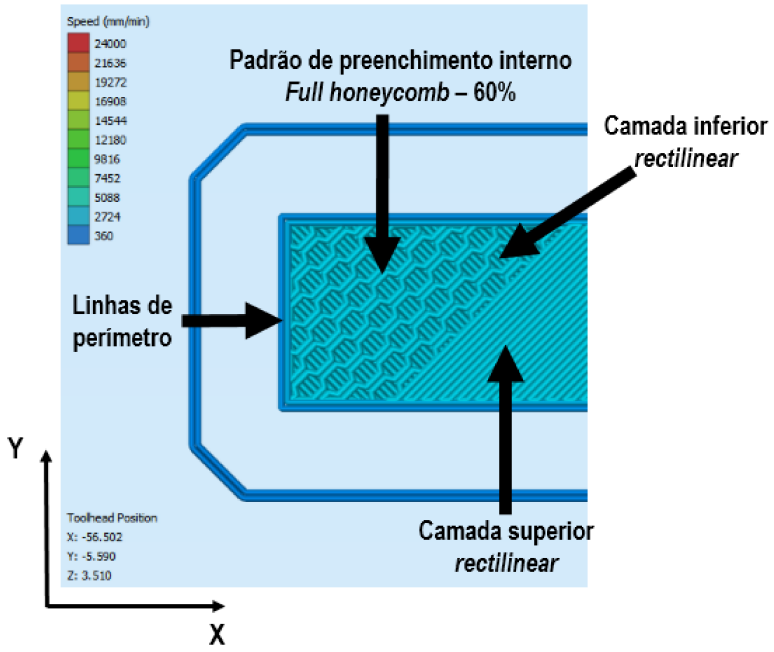


Figura 3.4 – Peça para impressão 3D simulada no software Simplify3D® (fonte: Próprio autor)

Os mesmos ensaios mecânicos foram feitos nas peças produzidas pelo processo por moldagem por injeção, em função dos parâmetros de processo estabelecidos nas Tabelas 3.9 e delineados conforme fluxograma da Fig.3.3, porém a quantidade de peças ensaiadas foram 5 (para cada tipo de matéria-prima) pois os parâmetros de processo foram mantidos constantes.

O molde utilizado para injeção dos CPs é o da Fig.3.5. Possui 4 cavidades e injeta os CPs para os ensaios de tração, flexão e impacto além do CP para verificação da coloração. As especificações do molde são de propriedade da NZ-Philpolymer® - Divisão máquinas e embalagens.

Os ensaios de tração foram feitos segundo a norma ASTM D638-14 (ASTM, 2014). As respostas avaliadas neste teste foram: tensão de escoamento - (σ_t), em MPa ou GPa, módulo de elasticidade à tração (E_t), em MPa, determinado considerando a parte linear da curva tensão/deformação e a deformação (ε_f) em mm/mm. Os corpos de prova utilizados nos experi-

Tabela 3.9 – Parâmetros do processo de moldagem por injeção

Parâmetros	Valores	
Matérias-primas	PLA	ABS
Rotação da rosca[1]	75 rpm	
Pressão de injeção[2]	107 Kg/cm^2	
Pressão de fechamento	45 Kg/cm^2	95 Kg/cm^2
Tempo de espera[3]	12 s	
Temperatura de injeção[4]	135 a 170^{o}C	175 a 210^{o}C

[1]-*screw speed*
[2]-*clamping pressure*
[3]-Tempo para extrair a peça do molde-*holding time*
[4]-Intervalo de temperatura utilizada nos 5 estágios



Figura 3.5 – Molde utilizado para injeção dos CPs e CPs injetados (fonte: Catálogo NZ-Philpolymer - Equipamentos laboratoriais)

mentos foram produzidos segundo a norma ASTM D638-14 (ASTM, 2014), tipo 1. As dimensões estão conforme Fig.3.6. A máquina utilizada para ensaio de tração foi uma WDT-20KN fabricada pela Philpolymer® Equipamentos Laboratoriais.

Os testes de flexão foram feitos segundo a norma ASTM D790-17 (ASTM, 2017) e foi utilizado o método de 3 pontos. As respostas avaliadas neste teste foram:

- tensão de flexão (σ_f em MPa ou GPa): pode ser calculada pela fórmula da Eq. 3.1.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \tag{3.1}$$

onde *P* é a carga aplicada (N); *L* é a distância entre suportes (mm); *b* largura do CP (mm)

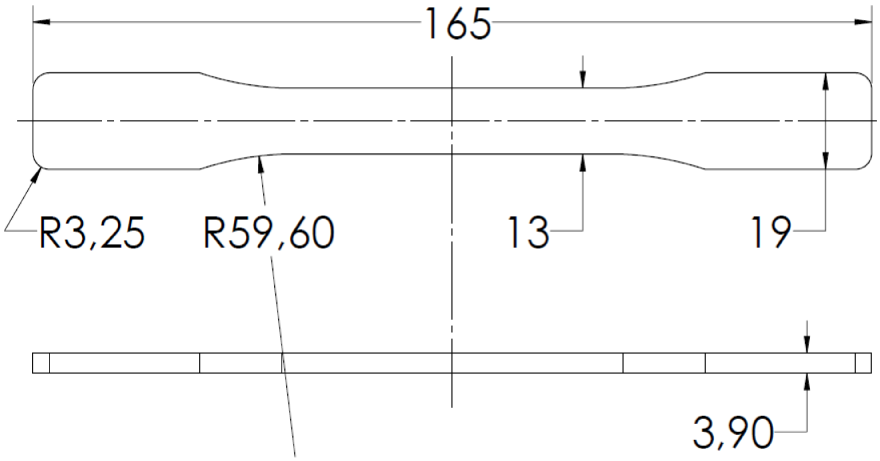


Figura 3.6 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração, Tipo I, conforme norma ASTM D638-14

e *d* a espessura do CP (mm).

- deformação a flexão (ε_f em mm/mm), a qual pode ser calculada pela Eq. 3.2.

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \tag{3.2}$$

onde *D* é o máximo deslocamento (centro do CP) (mm); *d* a espessura do CP (mm); *L* é a distância entre suportes (mm).

- módulo de elasticidade (E_B em MPa ou GPa) , o qual pode ser calculado pela Eq. 3.3.

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \tag{3.3}$$

onde *L* é a distância entre suportes (mm); *m* é a inclinação da tangente da reta obtida pela regressão linear no gráfico Carga x deformação (N/mm); *b* largura do CP (mm) e *d* a espessura do CP (mm).

Conforme procedimentos também adotados por (CHACON et al., 2017), a inclinação *m* foi medida entre os 25% e 75% da carga máxima (Fig.3.7). Utilizou-se a análise de regressão utilizando o métodos dos mínimos quadrados no intervalo [(0,25 $F_{max.}$, $\varepsilon_{0,25F_{max.}}$),(0,75 $F_{max.}$, $\varepsilon_{0,75F_{max.}}$)].

Os corpos de prova utilizados nos experimentos foram produzidos segundo a norma ASTM D790-17 (ASTM, 2017). As dimensões conforme Fig.3.8. A máquina utilizada para ensaio

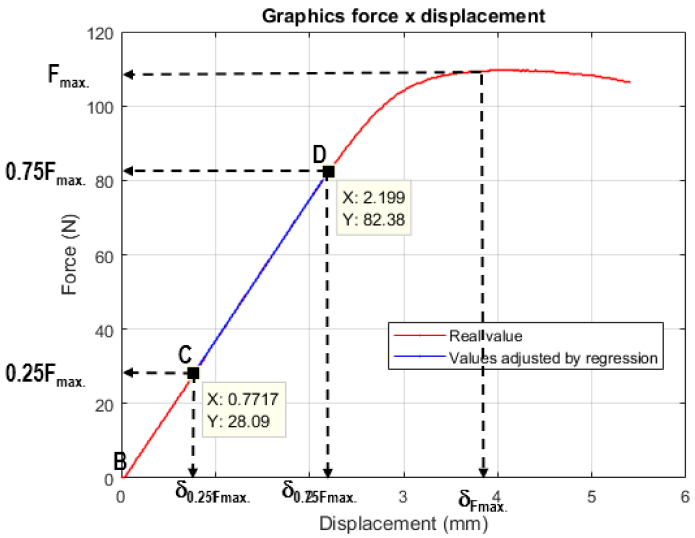


Figura 3.7 – Procedimento para cálculo da inclinação *m* na curva tensão/deformação (adaptado de (CHACON et al., 2017))

de flexão foi uma Shimadzu® AG-100KNXplus-90KN.

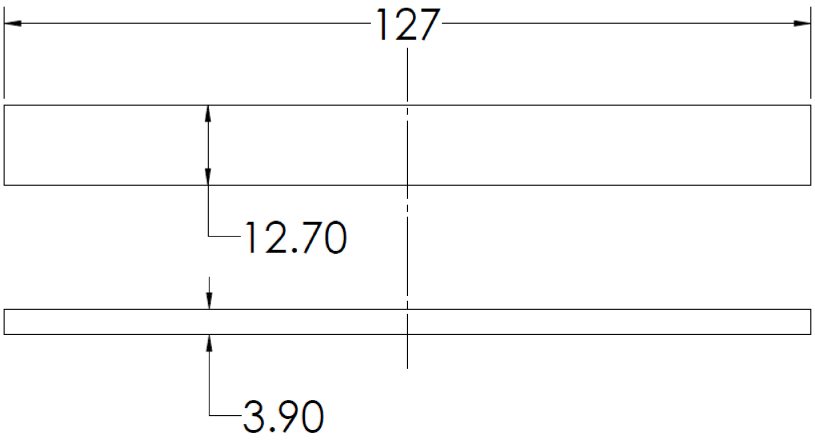


Figura 3.8 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de flexão, conforme norma ASTM D790-17

Os testes de impacto foram feitos segundo a norma ASTM 256-10 (ASTM, 2010) e foi do tipo Izod. A resposta avaliada foi a energia de impacto (E_i) em J/m. Os corpos de prova utilizados nos experimentos foram produzidos segundo a norma ASTM 256-10 (ASTM, 2010) e dimensões conforme Fig.3.9. A máquina utilizada para o ensaio de impacto (Izod) uma XJC 25D fabricada pela Philpolymer® Equipamentos Laboratoriais.

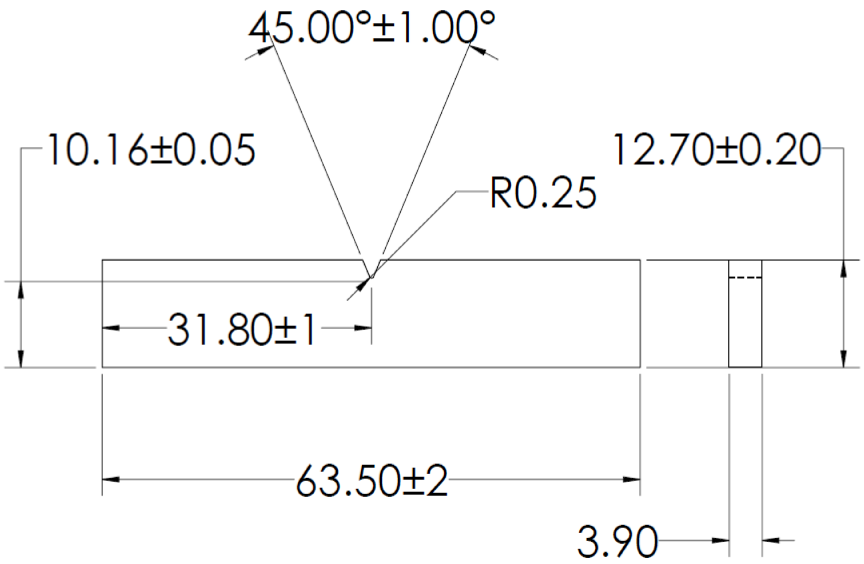


Figura 3.9 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto, conforme norma ASTM D256

3.3.2 Ensaio para determinação da resistividade e condutividade elétrica

Os ensaios experimentais para se determinar a resistividade e condutividade elétrica foram feitos pelo método de quatro pontas (Fig.3.10) e foram delineados conforme fluxograma da Fig.3.11. A resposta avaliada foi a resistividade (ρ em Ω.m). As geometrias/dimensões dos CPs fabricados para os ensaios, estão conforme desenho da Fig.3.12. Os CPs foram manufaturadas pelo processo MA por extrusão de material utilizando as matérias-primas PLA-grafeno e ABS-grafeno. Os parâmetros do processo de manufatura estão conforme Tab. 3.10. A quantidade de CPs ensaiados foram 3 (para cada tipo de matéria-prima) pois os parâmetros de processo foram mantidos constantes.

O método de determinação de resistividade consiste na montagem de uma bancada conforme Fig.3.10. Esta bancada é composta por uma fonte de fornecimento de eletricidade e dois multímetros (um para medir a voltagem e outro a amperagem). Os eletrodos são fixados nos vértices do corpo de prova e são anotadas as voltagens e amperagens de acordo com cada potencial de eletricidade. A resistividade (ρ) é calculada segundo a Eq. 2.2 ou 2.3.

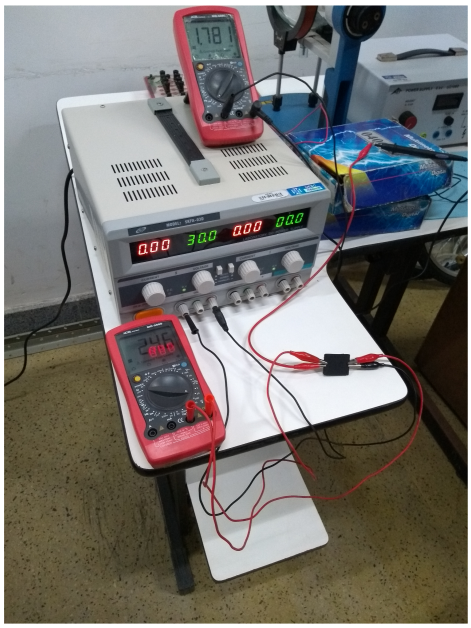


Figura 3.10 – Esquema do método de quatro pontas para medição da resistividade elétrica (fonte: Próprio autor)

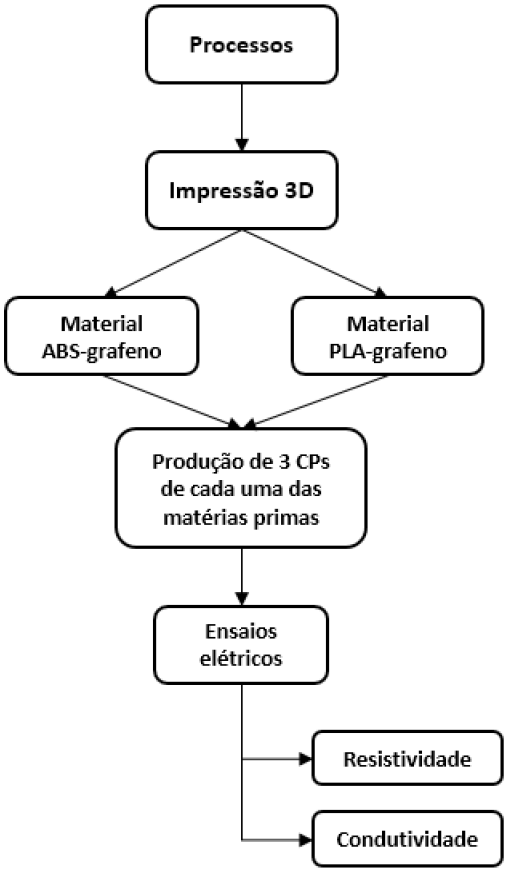


Figura 3.11 – Fluxograma dos experimentos realizados para os ensaios elétricos (fonte: Próprio autor)

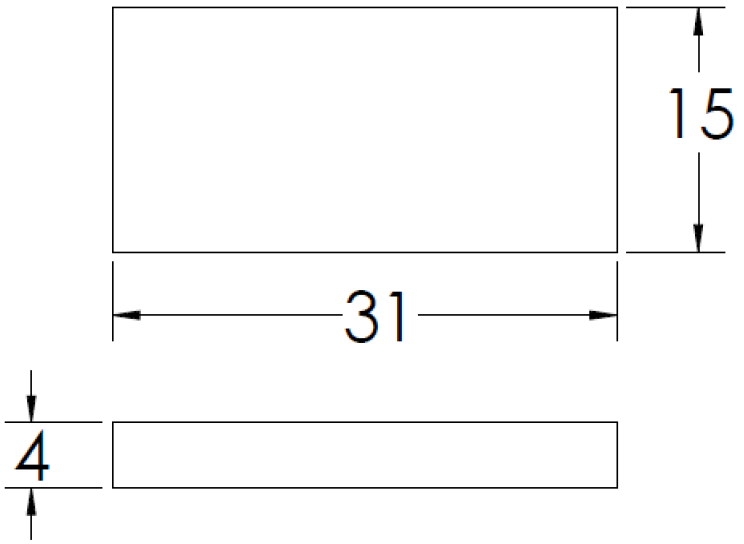


Figura 3.12 – Dimensões do corpo de prova para ensaios das propriedades elétricas e tribológicas (CoF e desgaste) (fonte: Próprio autor)

Tabela 3.10 – Parâmetro para o processo MA por extrusão de material para os CPs utilizados nos ensaios de condutividade e tribológicos)

Parâmetros	Especificação			
Matérias-primas	PLA-grafeno	PLA	ABS-grafeno	ABS
Diâmetro do extrusor	0,40 mm			
Espessura de camada	0,20 mm			
Qtde de camadas superiores	4 camadas			
Qtde de camadas inferiores	4 camadas			
Núm. de linhas do perímetro	2 linhas			
Padrão preenchimento int.	*rectilinear*			
Padrão preenchimento ext.	*rectilinear*			
Porcentagem preenchimento	100%			
Ângulo do preenchimento int.	$\pm 45^o$			
Temp. extrusor	200^oC		235^oC	225^oC
Temp. mesa de impressão	60^oC	70^oC	110^oC	
Vel. deslocamento extrusor	3000 mm/min.		2000 mm/min.	
Diâmetro filamento	1,75 mm			
Densidade filamento	1,11 g/cm^3	1,25 g/cm^3	1,04 g/cm^3	

3.3.3 Ensaio para determinação do (CoF) e desgaste

Foram fabricadas 3 peças pelo processo MA por extrusão de material utilizando as matérias-primas PLA-grafeno e ABS-grafeno e pelo processo de moldagem por injeção utilizando as matérias-primas ABS (granulado na cor preta) e PLA (granulado e nas cores branca e incolor). Os parâmetros do processo foram mantidos constantes. Os ensaios foram delineados conforme fluxograma da Fig.3.13.

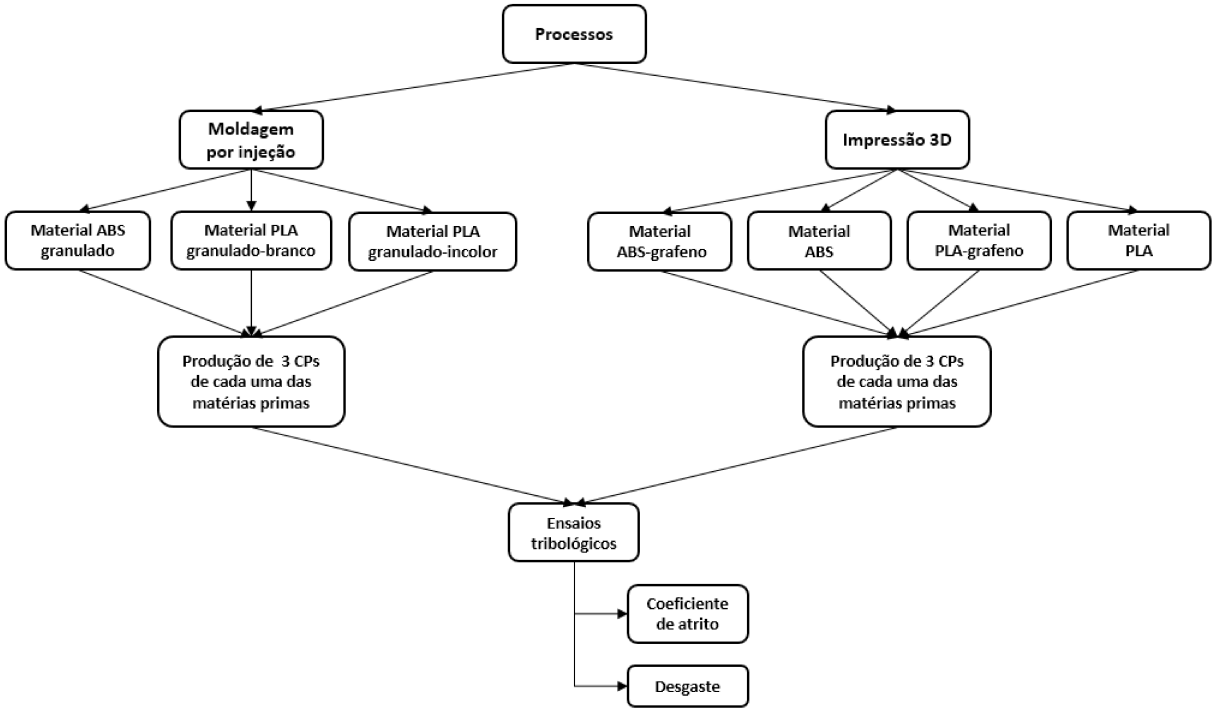


Figura 3.13 – Fluxograma dos experimentos realizados para os ensaios tribológicos (fonte: Próprio autor)

Os parâmetros de processo para o ensaio tribológicos foram: carga normal (N) e tempo de duração do teste (em horas ou minutos ou segundos), o qual foi determinado em função do comprimento total a ser ensaiado e a frequência de oscilação (em Hz). As respostas avaliadas foram: CoF e desgaste. Os ensaios foram feitos segundo norma ASTM G133-05 (ASTM, 2016) e através do ensaio *Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding*. Os parâmetros dos testes tribológicos utilizados nos ensaios *Reciprocating* estão contidos na Tab. 3.11 e foram selecionados levando-se em consideração as condições que o material deve suportar. Uma das aplicações é a de implantes ortopédicos. O tempo estabelecido foi de 29,8 min. (1788 seg.) e está alinhado com testes semelhantes feitos por (BUSTILLOS et al., 2017). A velocidade de deslocamento do indentador dependerá da frequência e foi estabelecida em 8 Hz. Em função das características do equipamento e das dimensões do corpo de prova, o comprimento de cada um dos "golpes" foi estabelecido em 14,0 mm. Os parâmetros foram selecionados tomando-se como base estudos realizados por (BUSTILLOS et al., 2017) com os mesmos tipos de matérias-primas. As geometrias/dimensões dos CPs fabricados para os ensaios estão conforme desenho da Fig.3.12. A máquina utilizada para determinação do coeficiente de atrito (CoF) e desgaste foi um tribômetro Multifuncional com Perfilômetro Ótico 3D Integrado, marca Rtec®, modelo MFT

5000.

Tabela 3.11 – Parâmetros ensaio tribológicos - tribômetro

Parâmetro	Valor	Unidade
Comprimento dos ”golpes”	14,0	mm
Comprimento total	400	m
Ciclos	14286	–
Frequência	8	Hz
Velocidade	0,224	m/s
Tempo (total)	29,8	min.
Geometria (indentador)	esférico	
Diâmetro (indentador)	6,35	mm
Material (indentador)	E52100	

3.3.4 Ensaios para determinar a tolerância dimensional

O planejamento dos experimentos bem como a quantidade de peças a serem fabricadas pelo processo MA por extrusão de material utilizando as matérias-primas PLA e ABS com e sem grafeno, foram delineados conforme fluxograma da Fig.3.14.

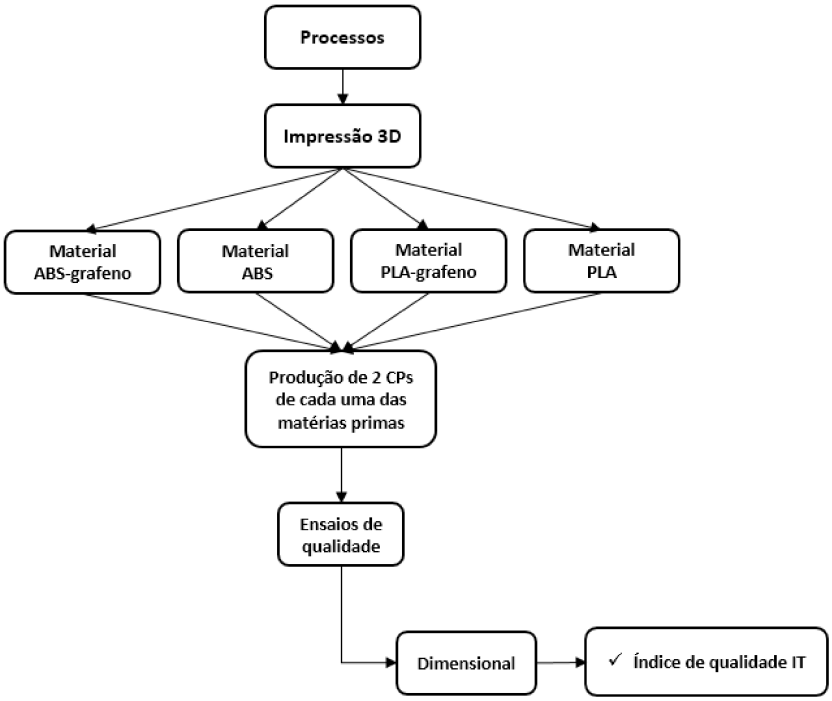
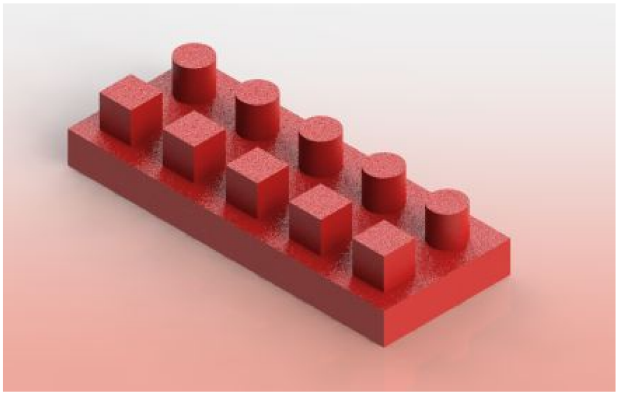


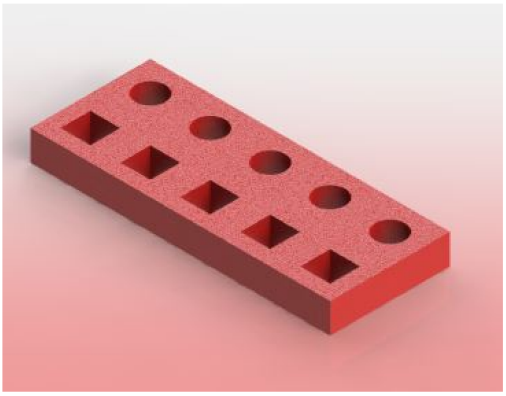
Figura 3.14 – Fluxograma dos experimentos realizados para os ensaios de qualidade dimensional (fonte: Próprio autor)

Foi fabricada 1 peça para cada tipo de ensaio dimensional (índice de qualidade IT), sendo uma para eixos e outra para furos. Não há uma norma específica para fabricação dos

CPs, entretanto foram desenvolvidos conforme Fig.3.15a e b. O ensaio dimensional nas peças produzidas pelo processo de moldagem por injeção, não foi realizado porque não há um molde específico para injetar tais peças.



(a) Peça para ensaio dimensional (índice IT)-eixos



(b) Peça para ensaio dimensional (índice IT/Rugosidade)-furos

Figura 3.15 – CPs utilizados nos ensaios de qualidade (fonte: Próprio autor)

A identificação dos elementos geométricos a serem medidos e as posições de medição estão conforme Fig.3.16.

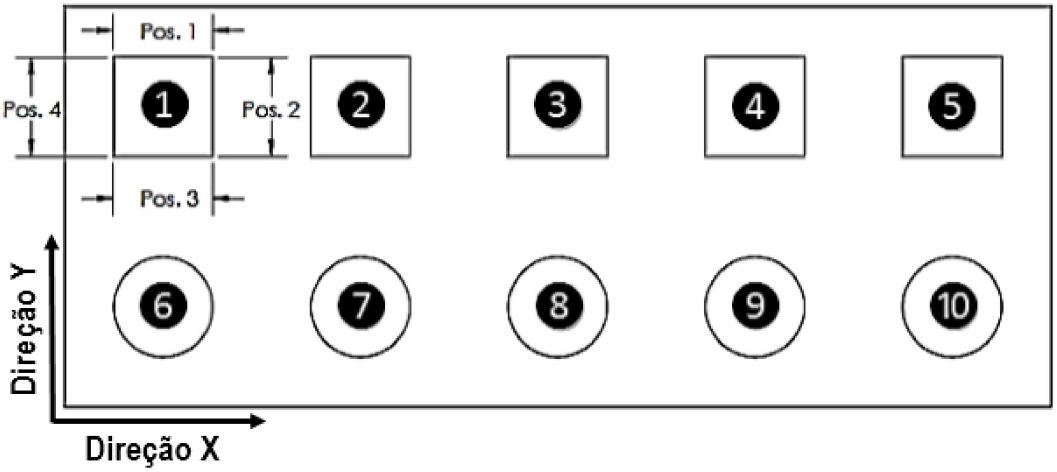


Figura 3.16 – Identificação das posições de medição para o ensaio dimensional (fonte: Próprio autor)

Os parâmetros de processo MA por extrusão de material estabelecidos para manufatura dos CPs, estão contidos na Tab. 3.12

O equipamento utilizado para medir as dimensões dos eixos e furos, foi um paquímetro digital da marca ® de 150 mm e com resolução de 0,01 mm.

Tabela 3.12 – Parâmetro para o processo MA por extrusão de material (Ensaios de Qualidade)

Parâmetros	Especificação			
Matérias-primas	PLA-grafeno	PLA	ABS-grafeno	ABS
Diâmetro do extrusor	0,40 mm			
Espessura de camada	0,20 mm			
Qtde de camadas superiores	4 camadas			
Qtde de camadas inferiores	4 camadas			
Núm. de linhas perímetro	2 linhas			
Padrão preenchimento int.	*full honeycomb*			
Padrão preenchimento ext.	*rectilinear*			
Porcentagem preenchimento	60%			
Ângulo do preenchimento int.	45^o			
Temp. extrusor	200^oC		235^oC	225^oC
Temp. mesa de impressão	60^oC	70^oC	110^oC	
Vel. deslocamento extrusor	3000 mm/min.		2000 mm/min.	
Diâmetro filamento	1,75 mm			
Densidade filamento	1,11 g/cm^3	1,25 g/cm^3	1,04 g/cm^3	

3.3.5 Ensaios para determinação da rugosidade superficial

Foi fabricada 1 peça pelo processo MA por extrusão de material utilizando as matérias-primas PLA-grafeno e ABS-grafeno. Também foi fabricada, 1 peça pelo processo de moldagem por injeção utilizando as matérias-primas ABS (granulado na cor preta) e PLA (granulado e nas cores branca e incolor). Os ensaios foram delineados conforme fluxograma da Fig.3.17.

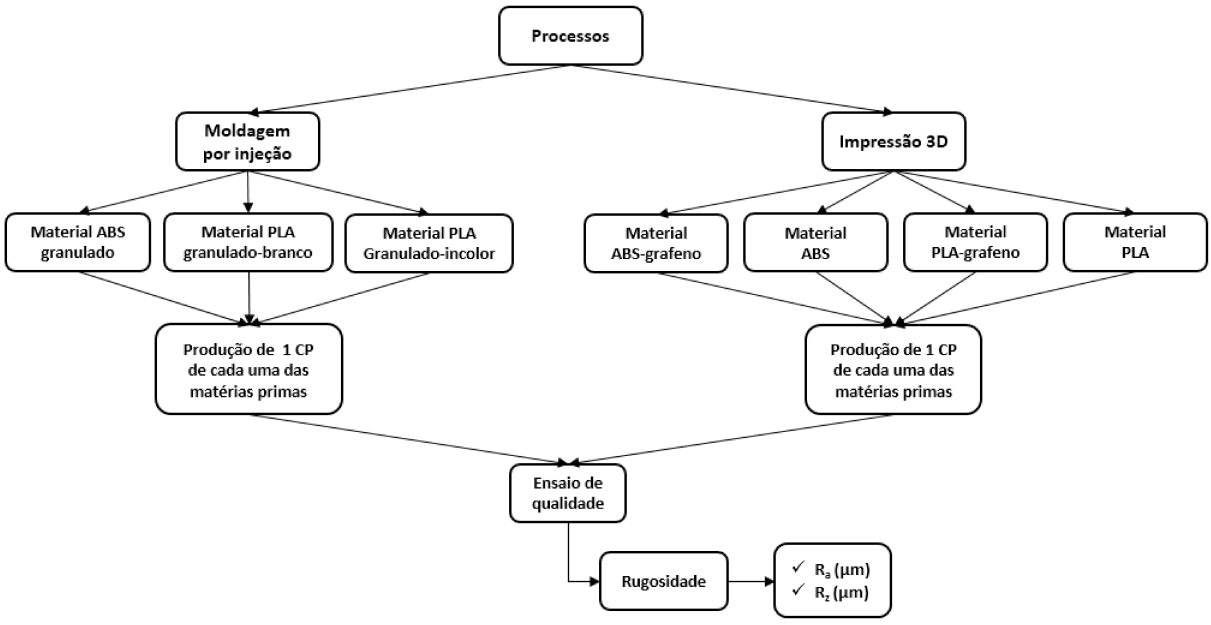


Figura 3.17 – Fluxograma dos experimentos realizados para os ensaios de qualidade-rugosidade (fonte: Próprio autor)

Os corpos de prova, produzidos pelo processo de MA e utilizados nos experimentos para

os ensaios de rugosidade superficial não são normalizados, entretanto, os CPs foram desenvolvidos conforme Fig.3.15b. A identificação dos locais de medição da rugosidade estão conforme Fig.3.18. As medições realizadas nas posições 1 a 4 foram feitas a 90^o em relação ao ângulo de *raster* referente a última camada e as medições realizadas nas posições 5 a 8 foram feitas a 45^o em relação ao ângulo de *raster*. Os valores finais R_a e R_z, foram calculados através da média das 8 medições.

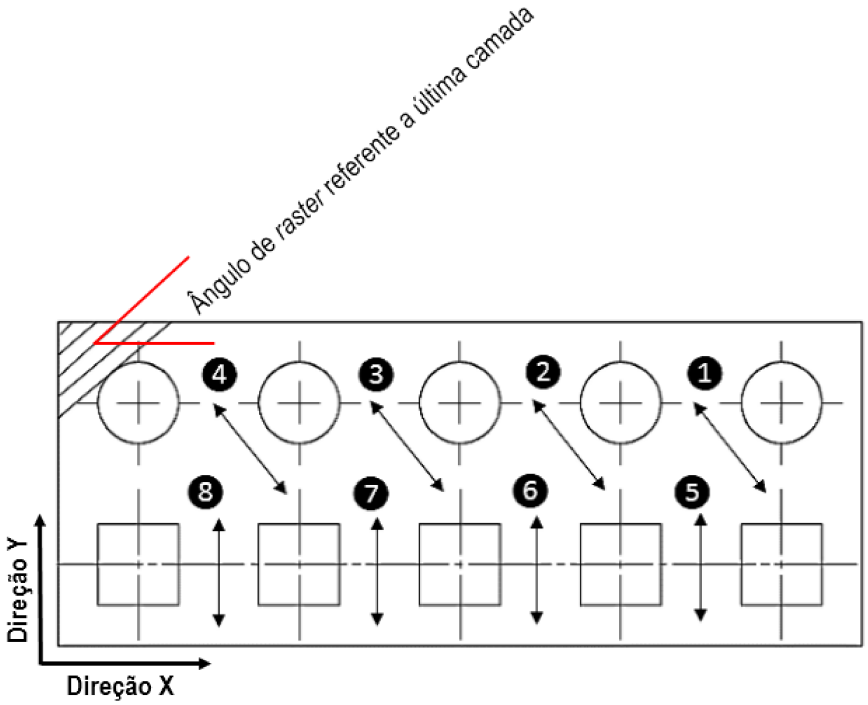


Figura 3.18 – Identificação dos locais de ensaio para a medição da rugosidade superficial (fonte: Próprio autor)

Os parâmetros de processo de MA por extrusão de material, selecionados para a produção dos CPs utilizados nos ensaios de rugosidade estão conforme a Tab. 3.12 e foram mantidos constantes. As respostas avaliadas foram: rugosidade - R_a e R_z em (μm). Foi utilizado um cut-off de 2,5 no equipamento de medição de rugosidade e os procedimentos para medição seguiram os conceitos estabelecidos na Seção 2.7.3. O equipamento utilizado para medir a rugosidade superficial foi o rugosímetro portátil MA Instruments® Inc modelo SRT-6200 com resolução de 0,01 μm.

3.3.6 Significância do modelo

Em todas as análises ANOVA, o nível de significância adotado foi de 95% que significa um $P_{value} \leqslant 0{,}05$ (Seção 2.8.3).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes experimentais planejados e descritos na metodologia, bem como as discussões.

4.1 Resultados dos ensaios de tração

4.1.1 Ensaio de tração-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno

Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA-grafeno, foram transcritos na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 – Valores experimentais obtidos no ensaio de tração com PLA-grafeno (FDM)

Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)	σ_t (MPa)	E_t (MPa)	ε_t (mm/mm)
1	22	0,13	15,347	180,442	7,199
2	22	0,27	24,586	385,822	9,113
3	78	0,13	21,440	239,068	6,366
4	78	0,27	33,668	362,171	10,403
5	10	0,20	12,947	197,963	5,742
6	89	0,20	30,692	246,443	8,197
7	50	0,10	21,124	219,149	8,114
8	50	0,30	32,478	907,759	4,619
9(C)	50	0,20	27,529	802,739	6,242
10(C)	50	0,20	23,026	166,479	7,740

A partir dos dados da Tab. 4.1, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para as respostas: tensão de escoamento-σ_t, em MPa, módulo de elasticidade-E_t, em MPa e a deformação-ε_t, em mm/mm. Os resultados foram compilados nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4.

Tabela 4.2 – ANOVA: Ensaio de tração - tensão de escoamento (PLA-grafeno)

ANOVA: Var.: σ_t (MPa); R^2=0,93963; Adj: 0,86417; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=6,564066					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	199,6330	1	199,6330	30,41301	0,0055277
infill(%)(Q)	16,0294	1	16,0294	2,44199	0,193162
(2)*height*(mm)(L)	176,0061	1	176,0061	26,81358	0,006615
height(mm)(Q)	1,6394	1	1,6394	0,24976	0,643488
1L by 2L	2,2335	1	2,2335	0,34027	0,590982
Erro	26,2563	4	6,5641		
Total SS	434,9388	9			

Tabela 4.3 – ANOVA: Ensaio de tração - módulo de elasticidade (PLA-grafeno)

ANOVA: Var.: E_t (MPa); R^2=0,57017; Adj: 0,03287; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=68651,74					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	785,8	1	785,8	0,011447	0,919949
infill(%)(Q)	112194,4	1	112194,4	1,634255	0,270254
(2)*height*(mm)(L)	212006,2	1	212006,2	3,088140	0,153699
height(mm)(Q)	927,8	1	927,8	0,013514	0,913056
1L by 2L	1692,4	1	1692,4	0,024652	0,882845
Erro	274607,0	4	68651,7		
Total SS	638868,3	9			

Tabela 4.4 – ANOVA: Ensaio de tração - deformação (PLA-grafeno)

ANOVA: Var.: ε_t (mm/mm); R^2=0,14947; Adj: 0,0; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=5,558059					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	2,00681	1	2,006814	0,361064	0,580306
infill(%)(Q)	0,67638	1	0,676381	0,121694	0,744793
(2)*height*(mm)(L)	0,12709	1	0,127090	0,022866	0,887126
height(mm)(Q)	0,03157	1	0,031571	0,005680	0,943541
1L by 2L	1,12678	1	1,126782	0,202729	0,675851
Erro	22,23224	4	5,558059		
Total SS	26,13941	9			

Pelos resultados apresentados, conclui-se que somente a ANOVA referente a tensão de escoamento, teve o R^2 mais significativo dentre as três respostas (R^2 = 0,9396 para a tensão de escoamento (Tab. 4.2), R^2 = 0,03287 para o módulo de elasticidade (Tab. 4.3) e R^2 = 0,14947 para deformação (Tab. 4.4)).

O gráfico de Pareto (Fig.4.1), para a tensão de escoamento à tração, mostra que os fatores *infill* (L) e *height* (L) foram os mais significativos ao contrário dos fatores quadráticos (Q) e a interação linear entre ambos.

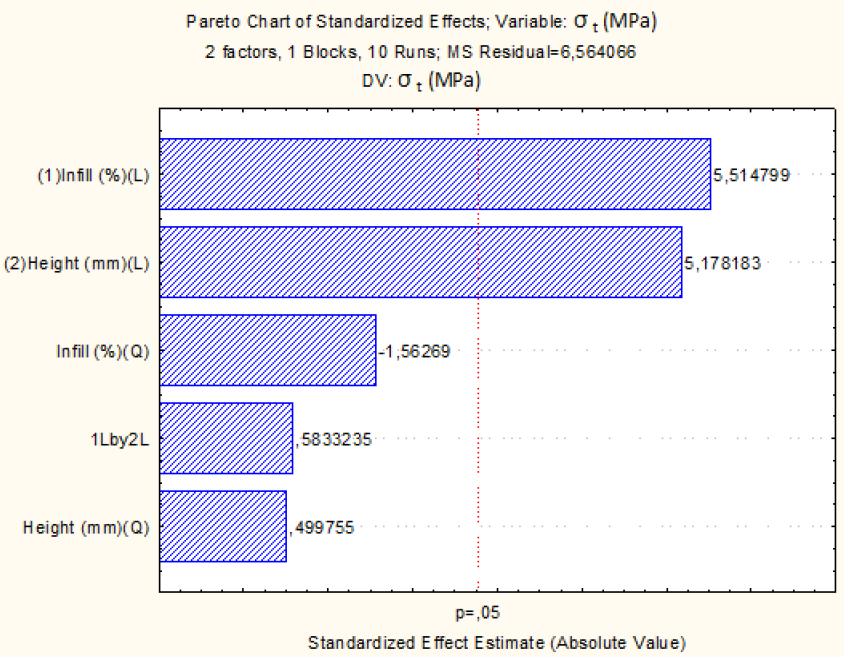


Figura 4.1 – Gráfico de Pareto: σ_t - matéria-prima: PLA-grafeno

Devido a significância, pode-se determinar o modelo de tensão de escoamento à tração (σ_t) em função dos parâmetros *infill* (%) e *height* (mm) como mostrado na Fig.4.2 e na Eq. 4.1.

$$\sigma_t = 5,6926 + 0,3421x - 0,0024x^2 - 0,9126y + 122,1431y^2 + 0,3812xy \qquad (4.1)$$

Onde: x = *infill* e y = *height*.

O gráfico da Fig.4.3, faz um comparativo entre o modelo proposto, valores observados e os erros absolutos entre ambos. Verifica-se que a tensão de escoamento (σ_t) é maior, quanto maiores forem o *infill* e *height*. O RMSE dos resíduos foi igual a 1,6278.

Pelos gráficos da Figuras 4.4a e 4.4b, verifica-se que a tensão de escoamento au-

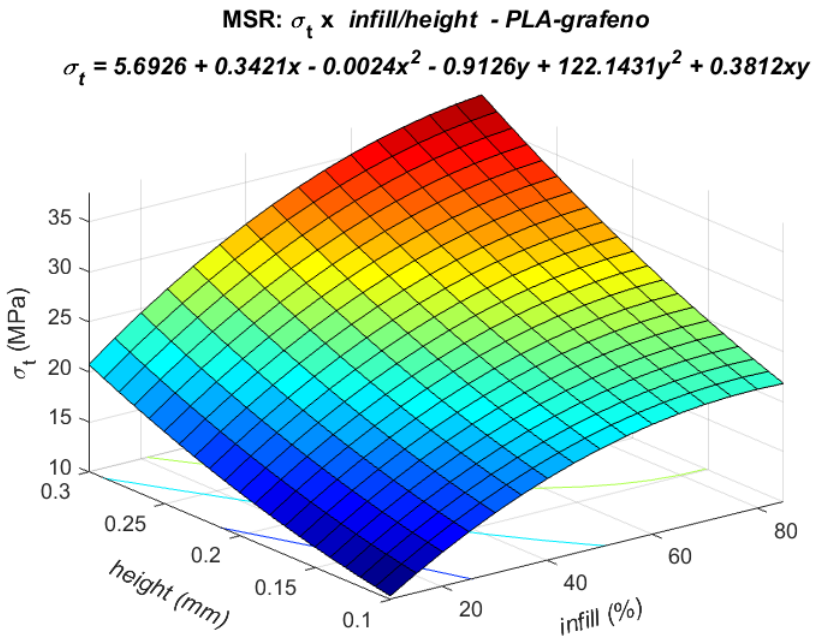


Figura 4.2 – MSR: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA-grafeno

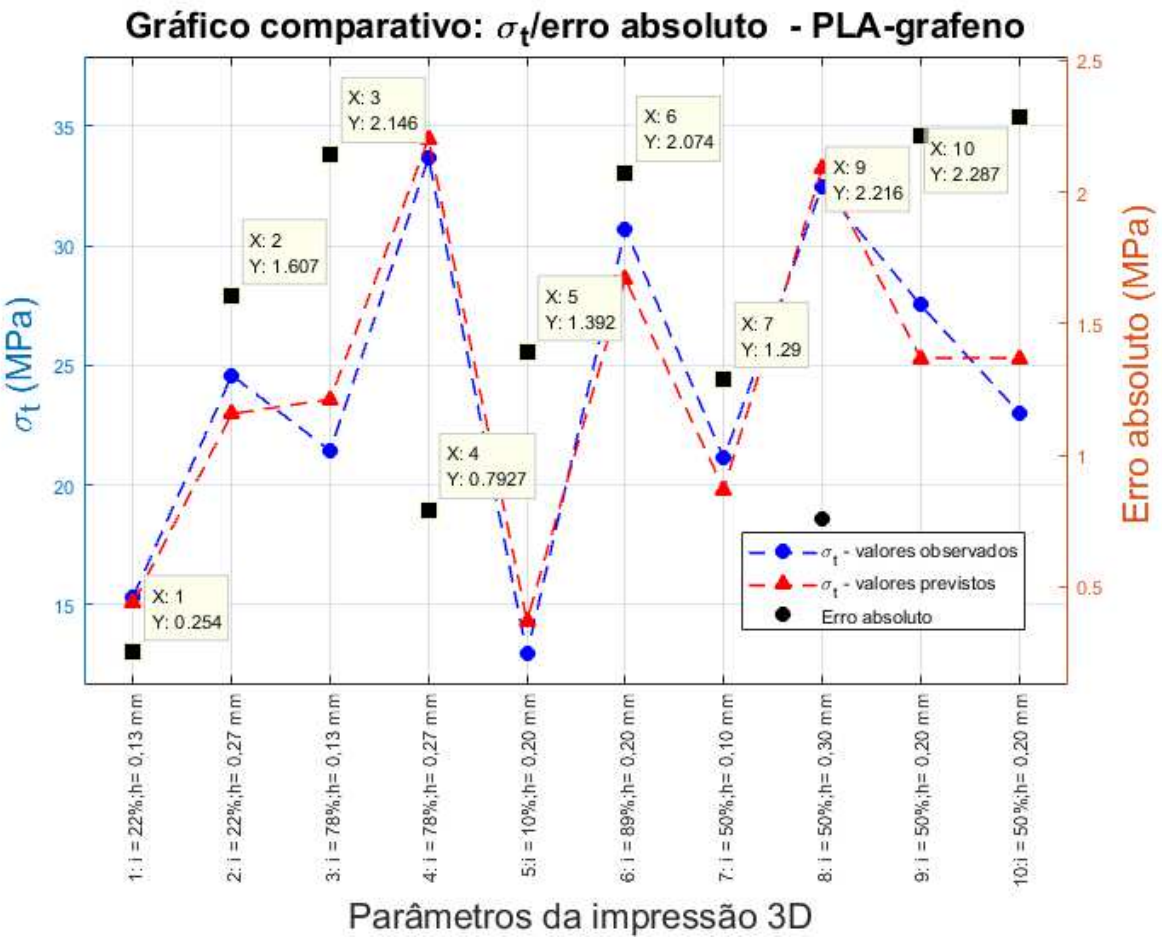
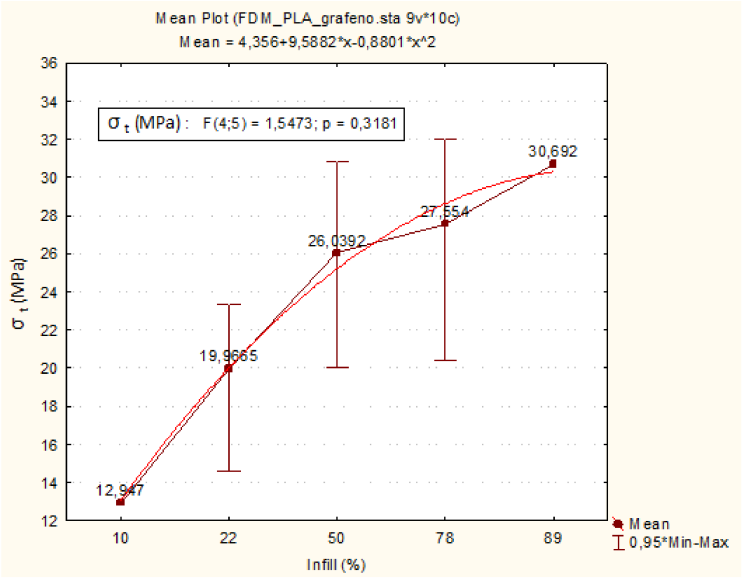
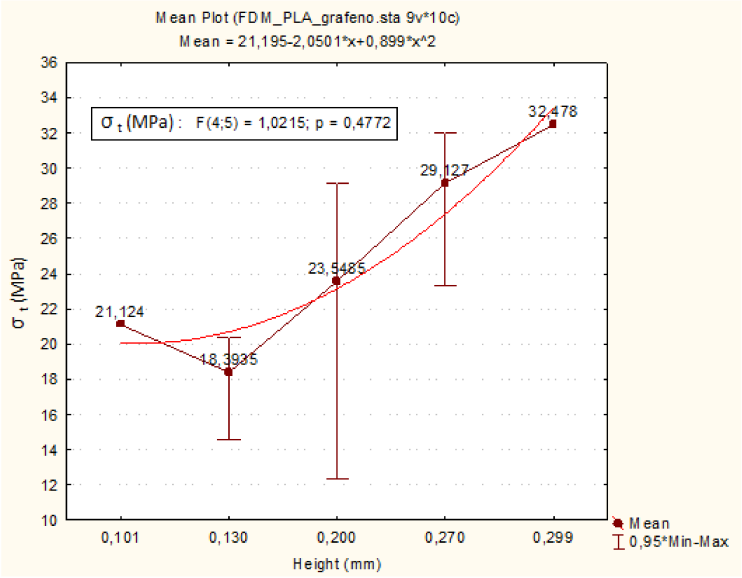


Figura 4.3 – Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_t - matéria-prima: PLA-grafeno

menta em função do aumento, tanto do *infill* quanto *height*, sendo que o parâmetro *infill* possui significância ligeiramente maior que o *height* (conforme análise ANOVA (Tab. 4.2).



(a) Gráfico: σ_t x *infill*



(b) Gráfico: σ_t x *height*

Figura 4.4 – Gráficos: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA-grafeno

4.1.2 Ensaio de tração-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA

Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA, foram transcritos na Tab. 4.5.

A partir dos dados da Tab. 4.5, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para os três tipos de respostas: (tensão de escoamento-σ_t, em MPa, módulo de elasticidade-E_t, em MPa

Tabela 4.5 – Valores experimentais obtidos no ensaio de tração com PLA(FDM)

Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)	σ_t (MPa)	E_t (MPa)	ε_t (mm/mm)
1	22	0,13	11,787	194,423	5,285
2	22	0,27	22,163	185,844	8,073
3	78	0,13	13,363	219,912	5,992
4	78	0,27	25,213	249,657	10,236
5	10	0,20	13,519	189,058	8,073
6	89	0,20	21,027	254,451	7,989
7	50	0,10	12,574	351,851	6,325
8	50	0,30	26,769	475,161	10,361
9(C)	50	0,20	21,091	223,236	9,529
10(C)	50	0,20	21,398	211,450	12,026

e a deformação-ε_t, em mm/mm. Os resultados foram compilados nas Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8.

Tabela 4.6 – ANOVA: Ensaio de tração - tensão de escoamento (PLA)

ANOVA: Var.: σ_t (MPa); R^2=0,98221; Adj: 0,95998; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=1,237224					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	27,8498	1	27,8498	22,5099	0,009008
infill(%)(Q)	19,8133	1	19,8133	16,0143	0,016106
(2)*height*(mm)(L)	223,6693	1	223,6693	180,7832	0,000177
height(mm)(Q)	3,5706	1	3,5706	2,8860	0,164581
1L by 2L	0,5432	1	0,5432	0,4390	0,543824
Error	4,9489	4	1,2372		
Total SS	278,2126	9			

Tabela 4.7 – ANOVA: Ensaio de tração - módulo de elasticidade (PLA)

ANOVA: Var.: E_t (MPa); R^2=0,6639; Adj: 0,2433; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=6290,211					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	3888,22	1	3888,22	0,618138	0,475702
infill(%)(Q)	2670,81	1	2670,81	0,42599	0,550194
(2)*height*(mm)(L)	4780,11	1	4780,11	0,759928	0,432550
height(mm)(Q)	23509,28	1	23509,28	3,737439	0,125347
1L by 2L	367,18	1	367,18	0,058374	0,820966
Error	25160,85	4	6290,21		
Total SS	74814,48	9			

Pelos resultados apresentados, conclui-se que somente a ANOVA referente as respostas

Tabela 4.8 – ANOVA: Ensaio de tração - deformação (PLA)

ANOVA: Var.: ε_t (mm/mm); R^2=0,85992; Adj: 0,68483; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=1,464781					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	0,79234	1	0,79234	0,54093	0,502845
infill(%)(Q)	11,09858	1	11,09858	7,57695	0,051236
(2)*height*(mm)(L)	20,28770	1	20,28770	13,85033	0,020446
height(mm)(Q)	9,08685	1	9,08685	6,20355	0,067434
1L by 2L	0,52998	1	0,52998	0,36182	0,579927
Error	5,85912	4	1,46478		
Total SS	41,82779	9			

tensão de escoamento e deformação tiveram o R^2 mais significativo dentre as três respostas (R^2 = 0,98221 para a tensão de escoamento (Tab. 4.6), R^2 = 0,6639 para o módulo de elasticidade (Tab. 4.7) e R^2 = 0,8599 para a deformação (Tab. 4.8)). Embora ambos significativos, a significância da resposta tensão de escoamento foi superior e foi utilizada para efeito de comparação entre os ensaios com a matéria-prima PLA.

O gráfico de Pareto (Fig.4.5), para a tensão de escoamento à tração, mostra que os fatores *height* (L) e *infill* (L e Q) foram os mais significativos ao contrário do fator quadrático (Q) do fator *height* e a interação linear de ambos.

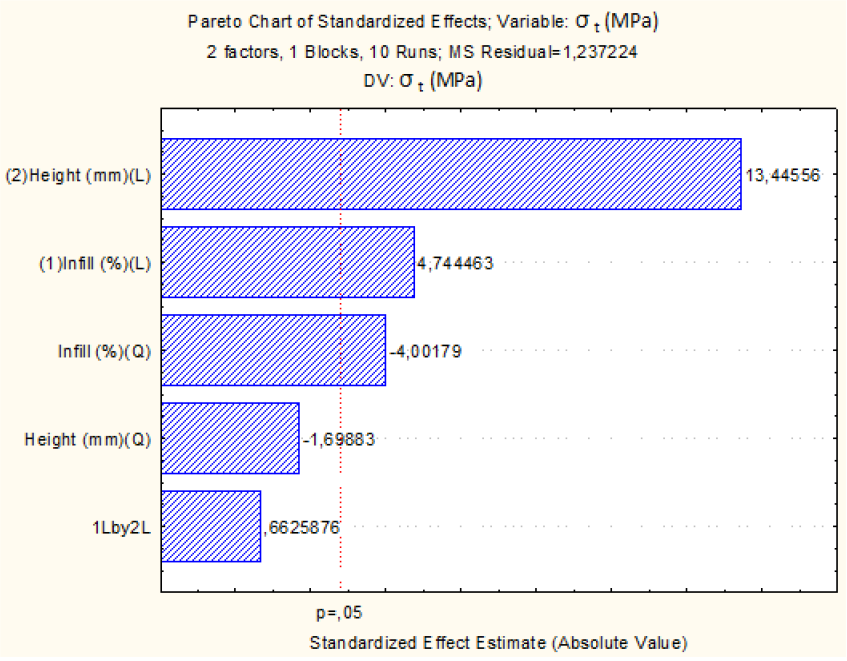


Figura 4.5 – Gráfico de Pareto: σ_t - matéria-prima: PLA

Devido a significância, pode-se determinar o modelo da tensão de escoamento à tração

(σ_t) em função dos parâmetros *infill* (%) e *height* (mm) como mostrado na Fig.4.6 e na Eq. 4.2.

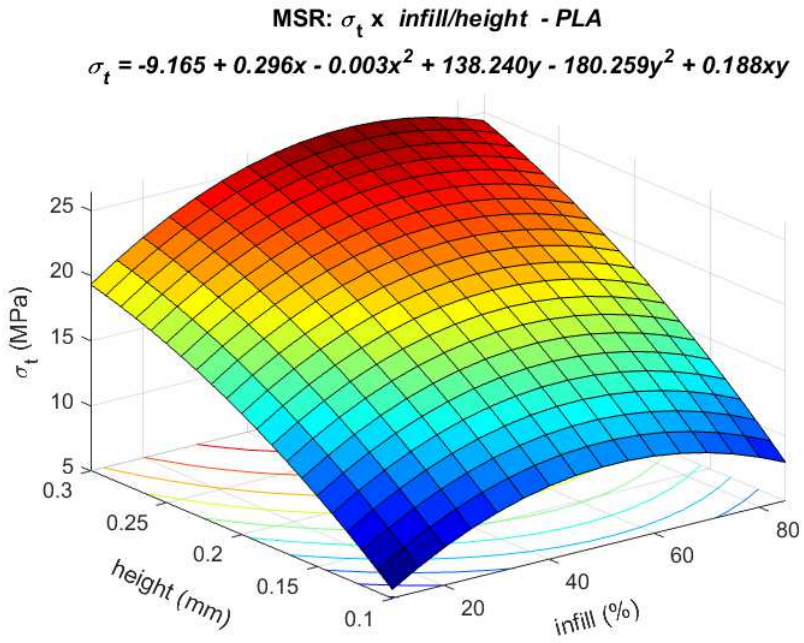


Figura 4.6 – MSR: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA

$$\sigma_t = -9,165 + 0,296x - 0,003x^2 + 138,240y - 180,259y^2 + 0,188xy \qquad (4.2)$$

Onde: x = *infill* e y = *height*.

Obs.: os coeficientes identificados pela cor vermelha são significativos dentro do índice $P_{value} \leqslant$ 0,05.

O gráfico da Fig.4.7, faz um comparativo entre o modelo proposto, valores observados e os erros absolutos entre ambos. Verifica-se que a tensão de escoamento (σ_t) é maior quanto maiores forem o *infill* e *height*. O RMSE dos resíduos foi igual a 1,5130.

Pelos gráficos das Fig.4.8a e Fig.4.8b, verifica-se que a tensão de escoamento aumenta em função do aumento tanto do *infill* quanto *height*, sendo que o fator *height* teve significância maior que o *infill* (conforme análise ANOVA (Tab. 4.6).

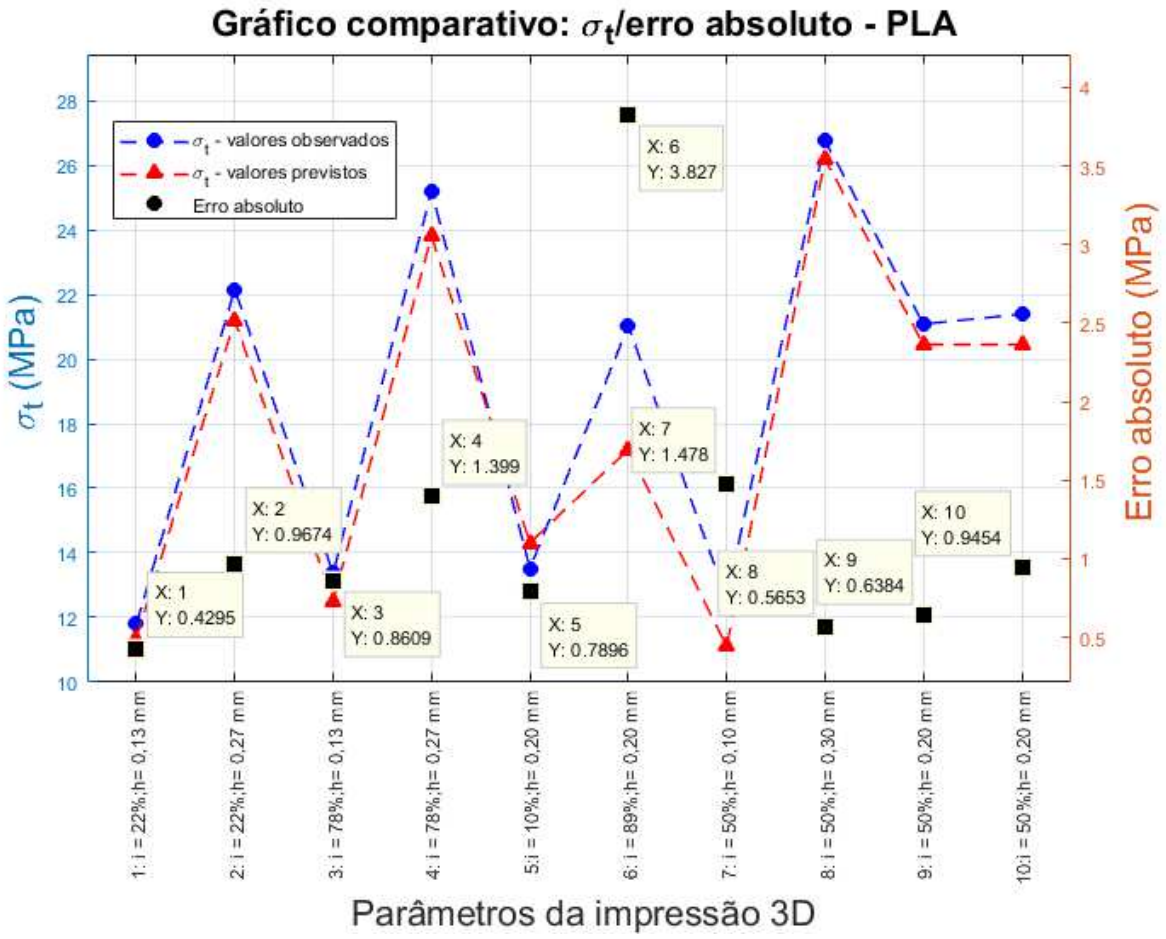


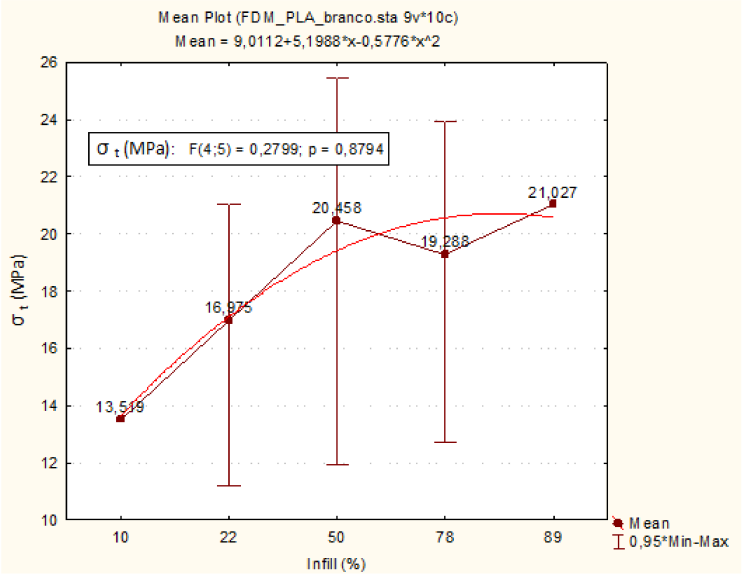
Figura 4.7 – Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_t - matéria-prima: PLA

4.1.3 Ensaio de tração-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado

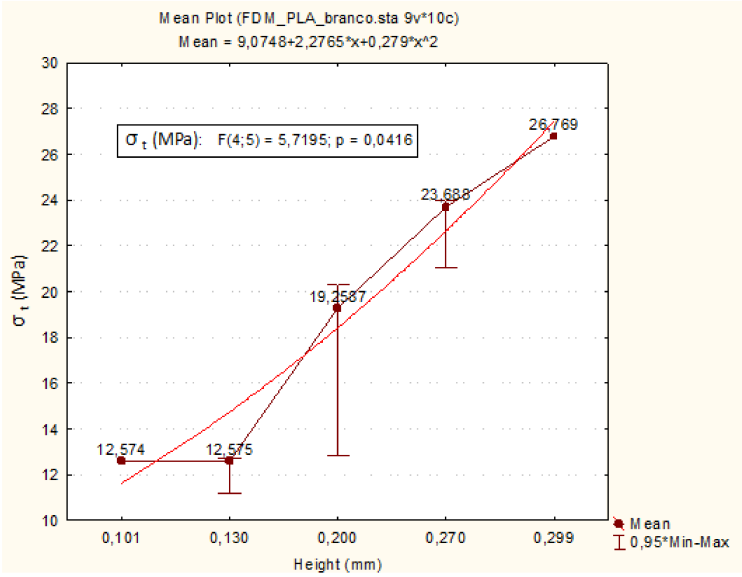
Os valores experimentais (média de 5 amostras), dos CPs produzidos pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado (branco e incolor), foram transcritos na Tab. 4.9.

Tabela 4.9 – Valores experimentais do ensaio de tração com a matéria-prima PLA-granulado (moldagem por injeção)

Matéria-prima	σ_t (MPa)	E_t (MPa)	ε_t (mm/mm)
PLA-granulado (branco)	59,760	828,725	12,650
PLA-granulado (incolor)	63,119	831,631	11,692



(a) Gráfico: σ_t x *infill*



(b) Gráfico: σ_t x *height*

Figura 4.8 – Gráficos: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA

4.1.4 Ensaio de tração-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno

Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima ABS-grafeno, foram transcritos na Tab. 4.10.

A partir dos dados da Tab. 4.10, realizou-se a análise de variância (ANOVA), para as respostas: tensão de escoamento-σ_t, em MPa, módulo de elasticidade-E_t, em MPa e a deformação-ε_t, em mm/mm. Os resultados foram compilados nas Tabelas 4.11, 4.12 e 4.13.

Pelos resultados apresentados, conclui-se que somente a ANOVA referente a tensão de

Tabela 4.10 – Valores experimentais obtidos no ensaio de tração com ABS-grafeno (FDM)

Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)	σ_t (MPa)	E_t (MPa)	ε_t (mm/mm)
1	22	0,13	4,720	336,484	5,285
2	22	0,27	8,645	196,251	7,740
3	78	0,13	6,243	258,433	4,203
4	78	0,27	10,405	184,128	9,030
5	10	0,20	5,551	172,543	5,617
6	89	0,20	9,610	197,764	7,490
7	50	0,10	5,098	159,725	3,870
8	50	0,30	9,498	260,267	6,741
9(C)	50	0,20	8,496	322,875	7,615
10(C)	50	0,20	8,588	239,279	6,949

Tabela 4.11 – ANOVA: Ensaio de tração - tensão de escoamento (ABS-grafeno)

ANOVA: Var.: σ_t (MPa); R^2=0,97002; Adj: 0,93254; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=0,291619					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	10,01472	1	10,01472	34,34179	0,004232
infill(%)(Q)	0,99527	1	0,99527	3,41291	0,138405
(2)*height*(mm)(L)	25,59537	1	25,59537	87,76989	0,000723
height(mm)(Q)	1,71375	1	1,71375	5,87666	0,072435
1L by 2L	0,01404	1	0,01404	0,04815	0,837052
Erro	1,16648	4	0,29162		
Total SS	38,90284	9			

Tabela 4.12 – ANOVA: Ensaio de tração - módulo de elasticidade (ABS-grafeno)

ANOVA: Var.: E_t (MPa); R^2=0,25367; Adj: 0,0; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=6384,909					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	436,28	1	436,284	0,068330	0,806691
infill(%)(Q)	6199,42	1	6199,42	0,970949	0,380229
(2)*height*(mm)(L)	654,32	1	654,318	0,102479	0,764899
height(mm)(Q)	2653,04	1	2653,036	0,415517	0,554289
1L by 2L	1086,63	1	1086,625	0,170187	0,701099
Erro	25539,63	4	6384,909		
Total SS	34220,51	9			

escoamento teve o R^2 mais significativo dentre as três respostas (R^2 = 0,97002 para a tensão de escoamento (Tab. 4.11), R^2 = 0,25367 para o módulo de elasticidade (Tab. 4.12) e R^2 = 0,8773 para deformação (Tab. 4.13)).

Tabela 4.13 – ANOVA: Ensaio de tração - deformação (ABS-grafeno)

ANOVA: Var.: ε_t (mm/mm); R^2=0,8773; Adj: 0,72392; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=0,7622671					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	1,00366	1	1,00366	1,31667	0,315154
infill(%)(Q)	0,20398	1	0,20398	0,26760	0,632237
(2)*height*(mm)(L)	16,08071	1	16,08071	21,09590	0,010084
height(mm)(Q)	3,17958	1	3,17958	4,17122	0,110647
1L by 2L	1,40660	1	1,40660	1,84528	0,245895
Erro	3,04907	4	0,76227		
Total SS	24,84937	9			

O gráfico de Pareto (Fig.4.9), para a tensão de escoamento à tração, mostra que os fatores *height* (L) e *infill* (L) foram os mais significativos ao contrário dos fatores quadráticos (Q) e a interação linear entre ambos.

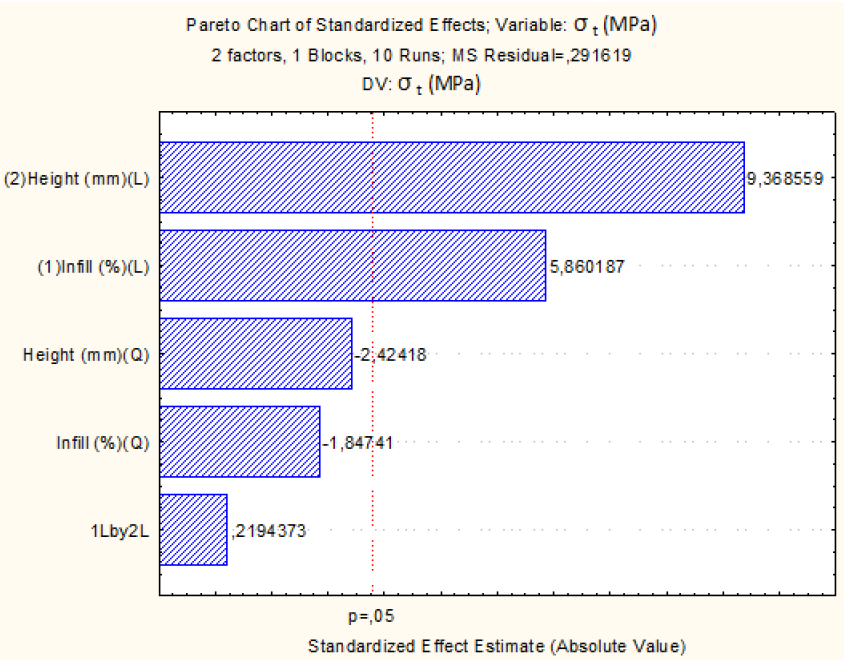


Figura 4.9 – Gráfico de Pareto: σ_t - matéria-prima: ABS-grafeno

Devido a significância, pode-se determinar o modelo de tensão de escoamento à tração (σ_t) em função dos parâmetros *infill* (%) e *height* (mm) como mostrado na Fig.4.10 e na Eq. 4.3.

$$\sigma_t = -4,745 + 0,094x - 0,001x^2 + 73,994y - 124,882y^2 + 0,030xy \qquad (4.3)$$

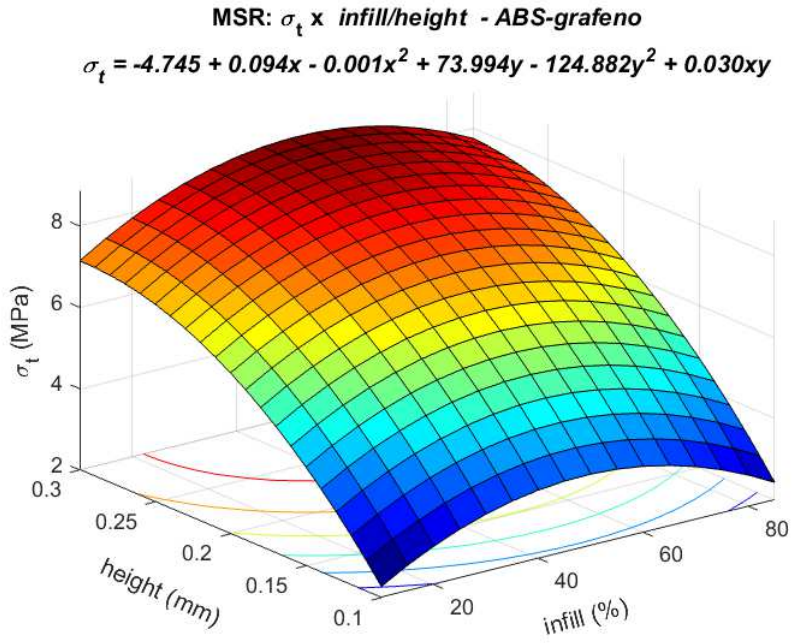


Figura 4.10 – MSR: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS-grafeno

Onde: x = *infill* e y = *height*.

Obs.: os coeficientes identificados pela cor vermelha são significativos dentro do índice $P_{value} \leqslant$ 0,05.

O gráfico da Fig.4.11, faz um comparativo entre o modelo proposto, valores observados e os erros absolutos entre ambos. Verifica-se que a tensão de escoamento (σ_t) é maior quanto maiores forem o *infill* e *height*. O RMSE dos resíduos foi igual a 1,6465.

Pelos gráficos da Figuras 4.12a e 4.12b, verifica-se que a tensão de escoamento aumenta em função do aumento, tanto do *infill* quanto *height*, sendo que o parâmetro *height* possui significância maior que o *infill* (conforme análise ANOVA (Tab. 4.11)).

4.1.5 Ensaio de tração-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS

Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima ABS, foram transcritos na Tab. 4.14.

A partir dos dados da Tab. 4.14, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para as respostas: tensão de escoamento - σ_t, em MPa, módulo de elasticidade - E_t, em MPa e a deformação ε_t, em mm/mm. Os resultados foram compilados nas Tabelas 4.15, 4.16 e 4.17.

Pelos resultados apresentados, conclui-se que somente a ANOVA referente a tensão de

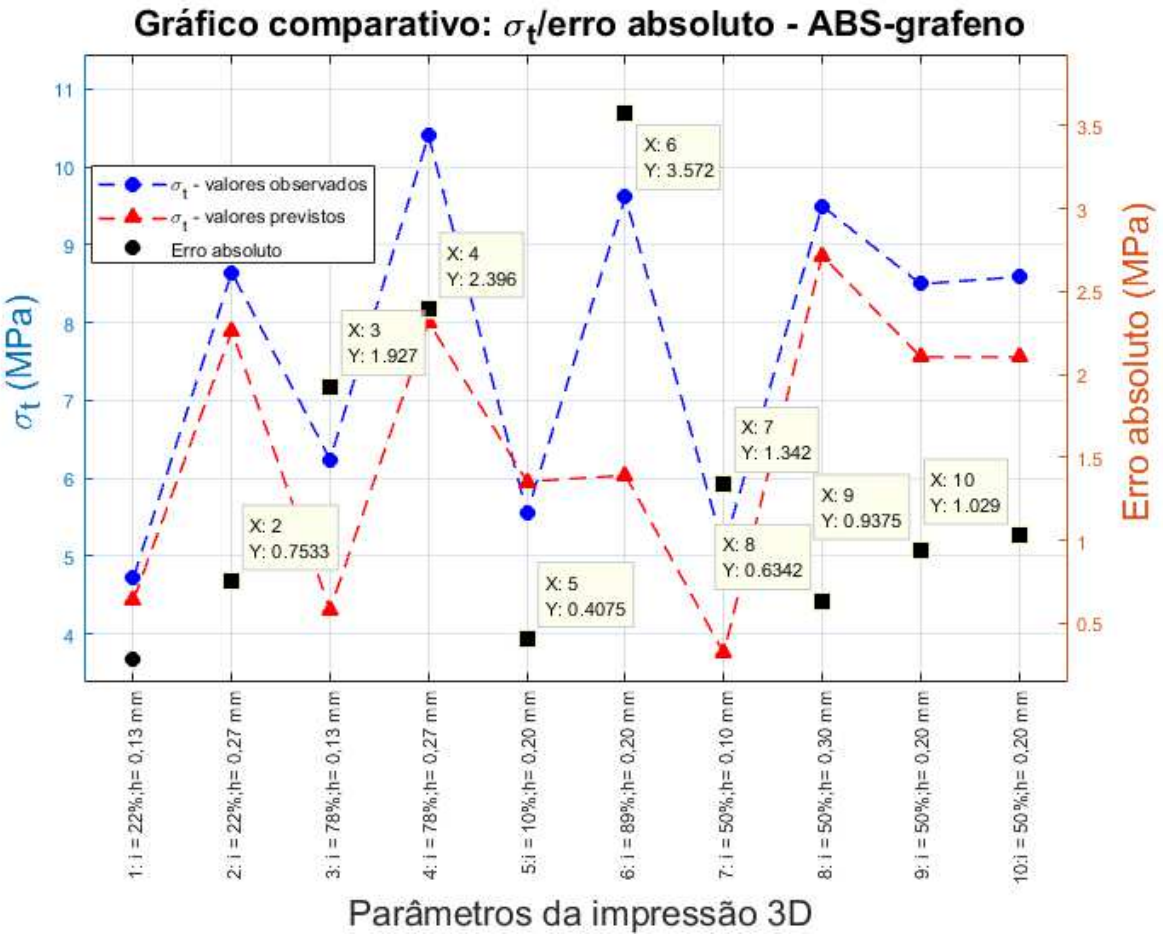
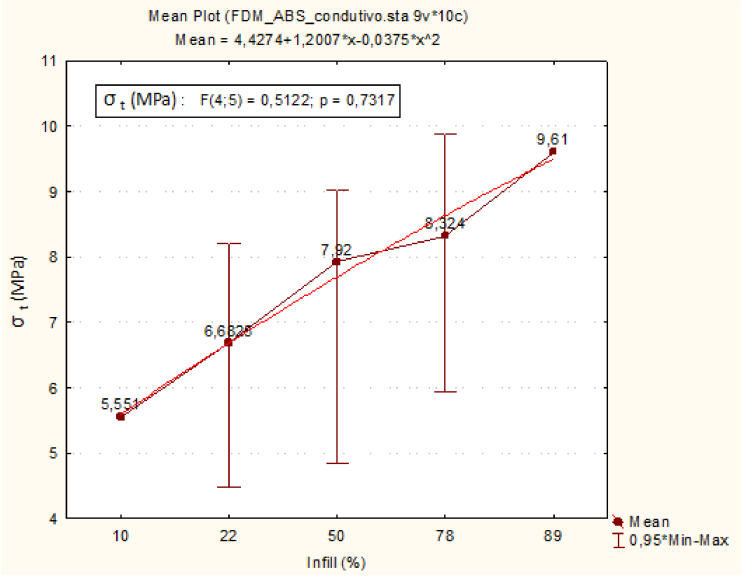


Figura 4.11 – Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto:: σ_t - matéria-prima: ABS-grafeno

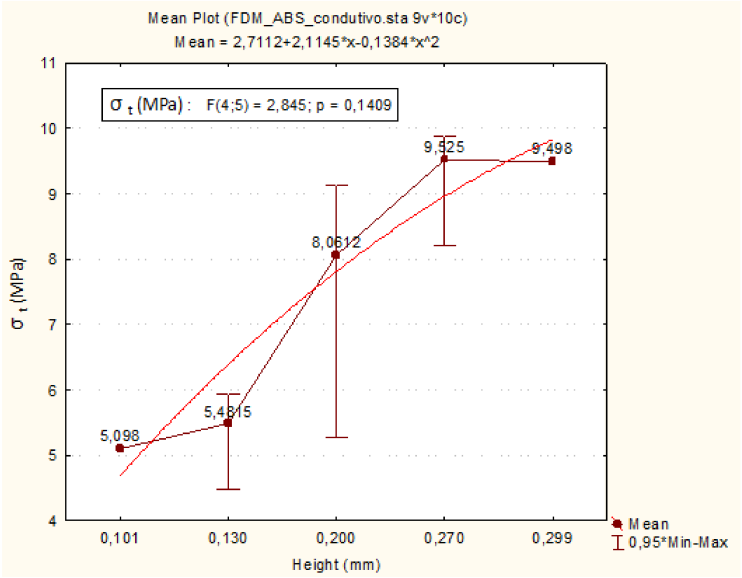
Tabela 4.14 – Valores experimentais obtidos no ensaio de tração com ABS (FDM)

Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)	σ_t (MPa)	E_t (MPa)	ε_t (mm/mm)
1	22	0,13	10,100	187,451	6,616
2	22	0,27	17,633	172,713	9,612
3	78	0,13	14,129	323,549	6,949
4	78	0,27	20,130	259,166	7,407
5	10	0,20	12,760	121,143	10,236
6	89	0,20	18,002	197,251	8,530
7	50	0,10	12,422	200,165	7,906
8	50	0,30	18,833	253,515	8,530
9(C)	50	0,20	16,396	187,202	9,113
10(C)	50	0,20	18,221	273,963	6,325

escoamento teve o R^2 mais significativo dentre as três respostas (R^2 = 0,95691 para a tensão de escoamento (Tab. 4.15), R^2 = 0,61343 para o módulo de elasticidade (Tab. 4.16) e R^2 = 0,5208 para deformação (Tab. 4.17)).



(a) Gráfico: σ_t x *infill*



(b) Gráfico: σ_t x *height*

Figura 4.12 – Gráficos: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS-grafeno

O gráfico de Pareto (Fig.4.13), para a tensão de escoamento à tração, mostra que os fatores *height* (L) e *infill* (L) foram os mais significativos ao contrário dos fatores quadráticos (Q) e a interação linear entre ambos.

Devido a significância, pode-se determinar o modelo de tensão de escoamento à tração (σ_t) em função dos parâmetros *infill* (%) e *height* (mm) como mostrado na Fig.4.14 e na Eq. 4.4.

Tabela 4.15 – ANOVA: Ensaio de tração - tensão de escoamento (ABS)

ANOVA: Var.: σ_t (MPa); R^2=0,95691; Adj: 0,90305; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=1,058594					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	23,79044	1	23,79044	22,47361	0,009033
infill(%)(Q)	4,18617	1	4,18617	3,95446	0,117641
(2)*height*(mm)(L)	63,84796	1	63,84796	60,31391	0,001482
height(mm)(Q)	3,27623	1	3,27623	3,09488	0,153355
1L by 2L	0,58676	1	0,58676	0,55428	0,497935
Erro	4,23438	4	1,05859		
Total SS	98,26868	9			

Tabela 4.16 – ANOVA: Ensaio de tração - módulo de elasticidade (ABS)

ANOVA: Var.: E_t (MPa); R^2=0,61343; Adj: 0,13022 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=3023,895					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	13408,66	1	13408,66	4,434234	0,102981
infill(%)(Q)	2675,54	1	2675,54	0,884799	0,400149
(2)*height*(mm)(L)	1,69	1	1,69	0,000558	0,982292
height(mm)(Q)	368,99	1	368,99	0,122025	0,744463
1L by 2L	616,16	1	616,16	0,203763	0,675092
Erro	12095,58	4	3023,89		
Total SS	31289,45	9			

Tabela 4.17 – ANOVA: Ensaio de tração - deformação (ABS)

ANOVA: Var.: ε_t (MPa); R^2=0,5208; Adj: 0,0; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=1,849119					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	2,23233	1	2,232327	1,207238	0,333571
infill(%)(Q)	1,32932	1	1,329324	0,718896	0,444262
(2)*height*(mm)(L)	2,35062	1	2,350621	1,271211	0,322592
height(mm)(Q)	0,00692	1	0,00692	0,003741	0,954164
1L by 2L	1,61036	1	1,610361	0,870880	0,403541
Erro	7,39648	4	1,849119		
Total SS	15,43516	9			

$$\sigma_t = -5,767 + 0,223x - 0,001x^2 + 119,196y - 172,668y^2 - 0,195xy \tag{4.4}$$

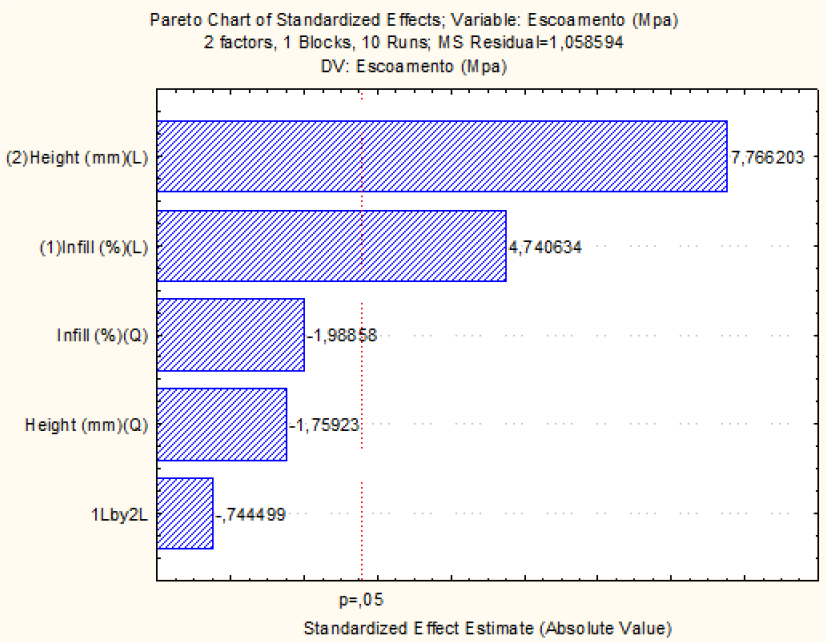


Figura 4.13 – Gráfico de Pareto: σ_t - matéria-prima: ABS

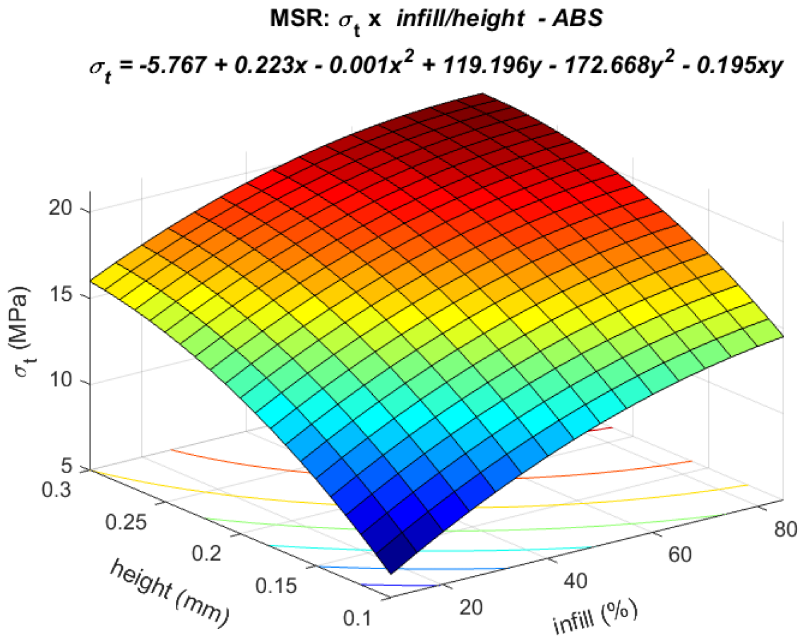


Figura 4.14 – MSR: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS

Onde: x = *infill* e y = *height*.

O gráfico da Fig.4.15, faz um comparativo entre o modelo proposto, valores observados e os erros absolutos entre ambos. Verifica-se que a tensão de escoamento (σ_t) é maior quanto maiores forem o *infill* e *height*. O RMSE dos resíduos foi igual a 1,1103.

Pelos gráficos das Figuras 4.16a e 4.16b, verifica-se que a tensão de escoamento à tração aumenta em função do aumento tanto do *infill* quanto *height*, sendo que o parâmetro

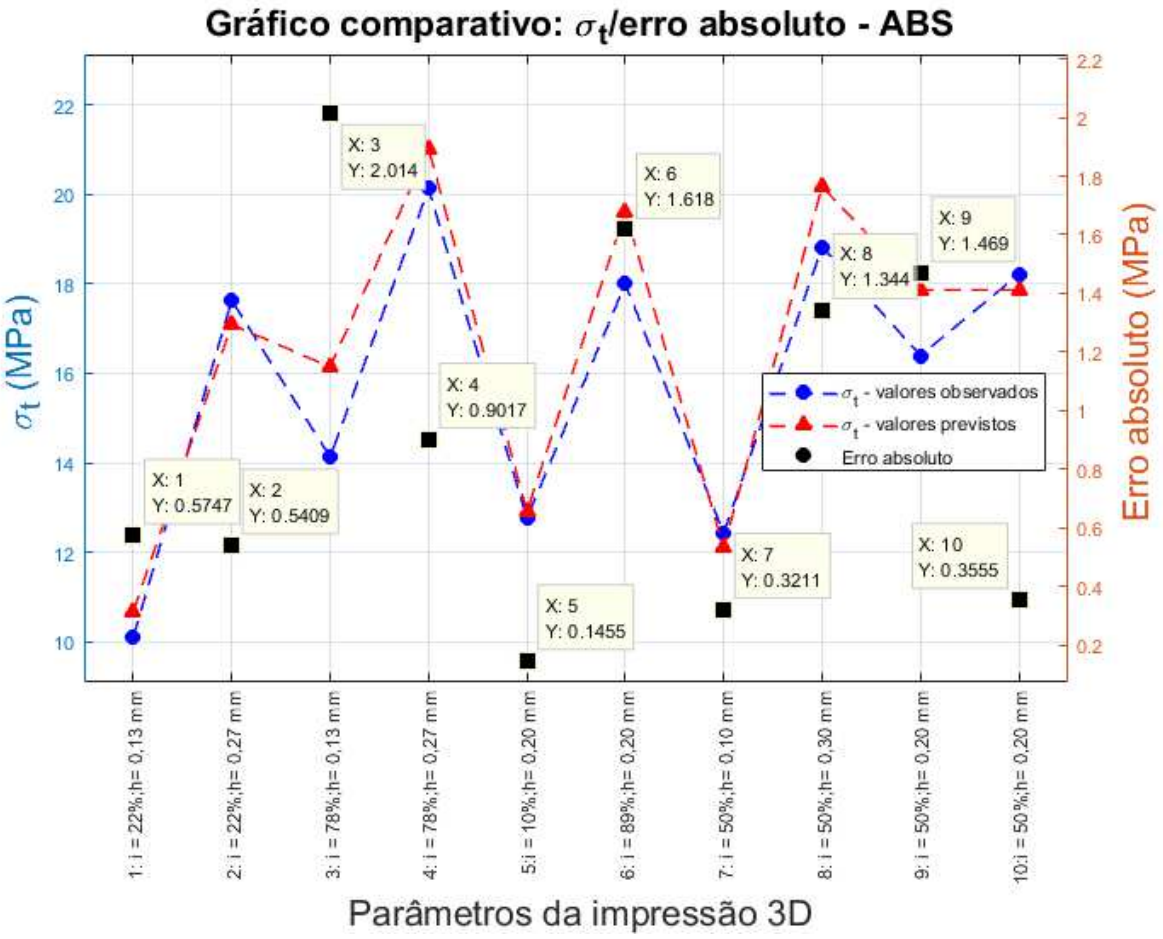


Figura 4.15 – Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_t - matéria-prima: ABS

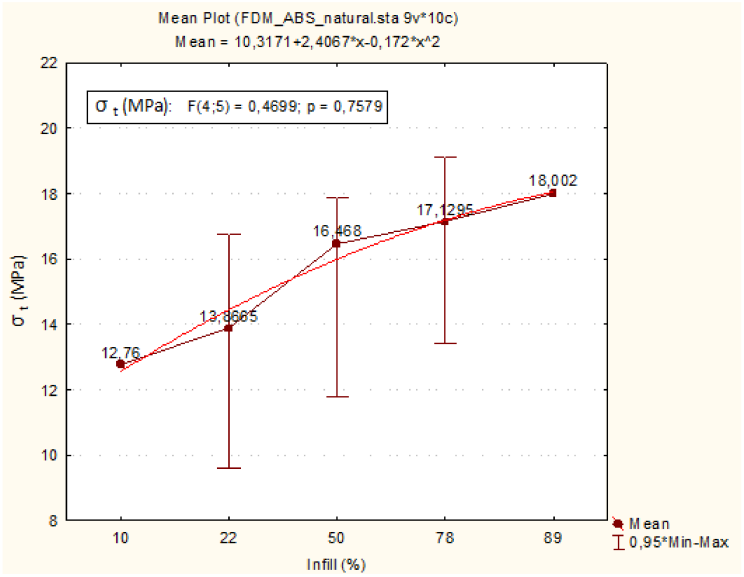
height possui significância maior que o *infill* (conforme análise ANOVA (Tab. 4.15)).

4.1.6 Ensaio de tração-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima ABS-granulado

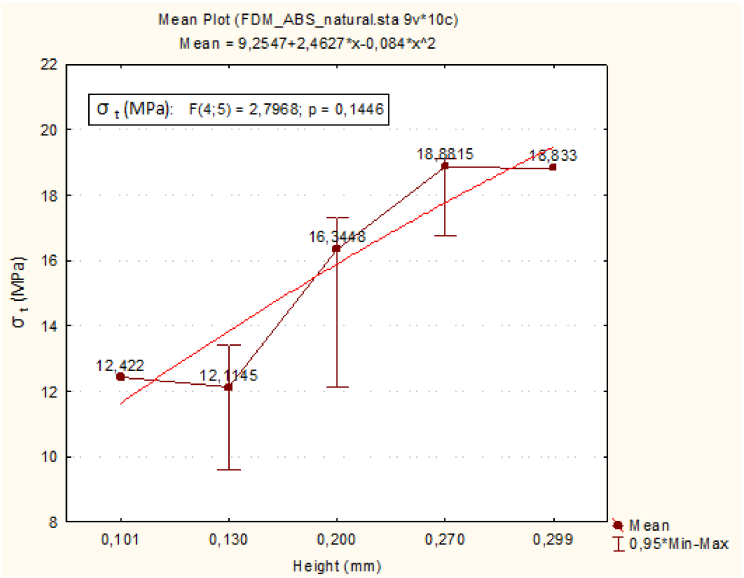
Os valores experimentais (média de 5 amostras), dos CPs produzidos pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima ABS-granulado, foram transcritos na Tab. 4.18.

Tabela 4.18 – Valores experimentais do ensaio de tração com a matéria-prima ABS-granulado (moldagem por injeção)

Matéria-prima	σ_t (MPa)	E_t (MPa)	ε_t (mm/mm)
ABS-granulado (preto)	47,777	566,549	19,973



(a) Gráfico: σ_t x *infill*



(b) Gráfico: σ_t x *height*

Figura 4.16 – Gráficos: σ_t x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS

4.1.7 Ensaio de tração-Discussão dos resultados

O gráfico da Fig.4.17 mostra que há diferença na tensão de escoamento à tração nos CPs manufaturados pelo processo FDM e por moldagem por injeção e também quando se utiliza as matérias-primas PLA e ABS com e sem a adição de grafeno. A tensão de escoamento à tração dos CPs manufaturados por moldagem por injeção com a matéria-prima PLA foi em média 28,6% superior ao ABS manufaturado pelo mesmo processo. Segundo (DAWOUD; TAHA; EBEID, 2016), este comportamento era esperado porque a peça moldada por injeção apresenta estrutura

bem compactada, pois a matéria-prima inserida no molde sob pressão, permite a formação de cristais os quais melhoram as propriedades mecânicas em contraste com o processo FDM, onde os filamentos fundidos são depositados em camadas sobre uma mesa (mantida a 60^oC para a matéria-prima PLA e 110^oC para a matéria-prima ABS) e posteriormente resfriados lentamente ao ar, condição que favorece a estrutura amorfa e menos resistente.

No processo FDM, os CPs manufaturados com o PLA-grafeno tiveram, em média, tensão de escoamento à tração 28,5% maior que os as peças que utilizaram o PLA. Já os CPs manufaturados pelo processo de moldagem por injeção tiveram a mesma tensão de escoamento 5,6% maior, variando-se somente a cor da matéria-prima utilizada (incolor e branco). Pode-se também afirmar que a tensão de escoamento dos CPs injetados são em média 153,05% maior que os CPs manufaturados pelo processo FDM utilizando a matéria-prima PLA-grafeno. Se for considerado valor máximo da tensão de escoamento para o PLA-grafeno (33,67 MPa) este percentual é reduzido para 82,5%.

No mesmo processo FDM os CPs manufaturados com o ABS tiveram, em média, limite de escoamento 106,4% maior que os CPs que utilizaram o ABS-grafeno. Pode-se afirmar também que a tensão de escoamento dos CPs injetados são em média 201,3% maior que dos CPs manufaturados pelo processo FDM, utilizando a matéria-prima ABS. Se for considerado o valor máximo da tensão de escoamento para o ABS (20,13 MPa) este percentual é reduzido para 137,4%.

Na comparação entre as duas matérias-primas PLA e ABS, o limite de escoamento à tração (σ_t), observado nos CPs manufaturados pelo processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA-grafeno é, em média, 215,9% superior aos CPs que utilizam o ABS-grafeno e manufaturados pelo mesmo processo. Este limite quando se utiliza o PLA em relação ao ABS foi 19,1% superior. Neste caso específico a adição do grafeno aumentou o limite de escoamento para o PLA-grafeno e diminui para o ABS-grafeno. Pelos resultados, conclui-se que a adição de grafeno altera os valores do limite de escoamento à tração, porém, é proporcional a porcentagem adicionada e a reatividade que esta matéria-prima tem com os outros componentes químicos do polímero.

Com relação a influência dos parâmetros de impressão na resposta tensão de escoamento à tração e especificamente em relação aos parâmetros: porcentagem de preenchimento (*infill*) e espessura de camada (quanto *height*) são, segundo diversos estudos, bastante signi-

ficativos. Quanto menor a porcentagem de preenchimento menor a quantidade de material e maior o *gap* entre os *raster*. Esta distância entre os *raster*, fragiliza a peça e consequentemente diminui a tensão de escoamento à tração. Com relação a espessura de camada, quanto maior seu valor maior a tensão de escoamento, entretanto, este comportamento é bastante dependente da orientação de construção e do *raster* e da direção da força de tração aplicada nos ensaios.

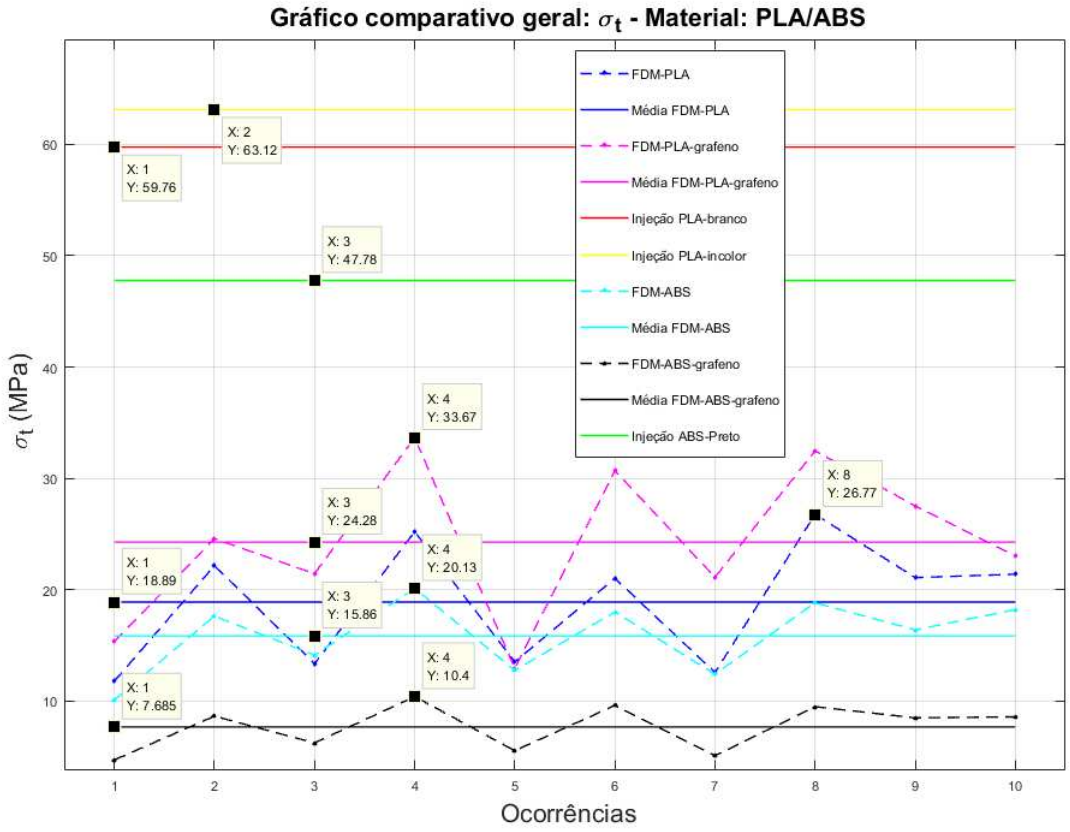


Figura 4.17 – Gráfico comparativo geral: σ_t - matéria-prima: PLA/ABS

Através da equação do modelo (Eq. 4.1 para o matéria-prima PLA-grafeno, Eq. 4.2 para a matéria-prima PLA, Eq. 4.3 para o ABS-grafeno e Eq. 4.4 para o ABS), foram determinadas os valores ótimos da tensão de escoamento à tração-(σ_t) e transcritos na Tab. 4.19. O valor de $\sigma_{tmax.}$ foi 325,8% superior para o PLA-grafeno em relação ao ABS-grafeno.

Tabela 4.19 – Valores (ótimos) obtidos na equação de simulação do modelo para (σ_t): processo FDM

Matéria-prima	$\sigma_{tmax.}$ (MPa)	*infill* (%)	*height* (mm)
PLA-grafeno	37,9	85	0,3
PLA	26,4	60	0,3
ABS-grafeno	8,9	50	0,3
ABS	21,2	80	0,3

4.2 Resultados dos ensaios de flexão

4.2.1 Ensaio de flexão-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno

Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA-grafeno foram transcritos na Tab. 4.20.

Tabela 4.20 – Valores experimentais obtidos no ensaio de flexão com PLA-grafeno (FDM)

Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)	σ_f (MPa)	E_f (GPa)	ε_f (mm/mm)
1	22	0,13	32,075	1,541	0,044
2	22	0,27	53,479	2,226	0,040
3	78	0,13	45,709	2,182	0,039
4	78	0,27	60,906	2,473	0,037
5	10	0,20	37,131	1,484	0,039
6	89	0,20	59,120	2,423	0,038
7	50	0,10	34,900	1,731	0,039
8	50	0,30	55,667	2,316	0,039
9(C)	50	0,20	47,698	2,211	0,039
10(C)	50	0,20	36,439	2,027	0,038

A partir dos dados da Tab. 4.20, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para as respostas: tensão de escoamento à flexão-σ_f, em MPa, módulo de elasticidade à flexão-E_f, em GPa e deformação- ε_f, em mm/mm. Os resultados foram compilados nas Tabelas 4.21, 4.22 e 4.23.

Pelos resultados apresentados, conclui-se que tanto a ANOVA referente a tensão de escoamento e módulo de elasticidade, tiveram R^2 mais significativos dentre as três respostas (R^2 = 0,91566 para a tensão de escoamento à flexão (Tab. 4.21), R^2 = 0,93904 para o módulo de elasticidade à flexão (Tab. 4.22) e R^2 = 0,56829 para a deformação (Tab. 4.23)).

Tabela 4.21 – ANOVA: Ensaio de flexão - tensão de escoamento (PLA-grafeno)

ANOVA: Var.: σ_f (MPa); R^2=0,91566; Adj: 0,81023; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=21,77912					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	346,210	1	346,2103	15,89644	0,016305
infill(%)(Q)	51,883	1	51,883	2,38222	0,197597
(2)*height*(mm)(L)	544,005	1	544,0047	24,97827	0,007502
height(mm)(Q)	16,637	1	16,6371	0,76390	0,431446
1L by 2L	9,632	1	9,6317	0,44225	0,542422
Error	87,116	4	21,7791		
Total SS	1032,889	9			

Tabela 4.22 – ANOVA: Ensaio de flexão - módulo de elasticidade (PLA-grafeno)

ANOVA: Var.: E_f (GPa); R^2=0,93904; Adj: 0,86283; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=0,0174289					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	0,609941	1	0,609941	34,99594	0,004089
infill(%)(Q)	0,012895	1	0,012895	0,73986	0,438207
(2)*height*(mm)(L)	0,406493	1	0,406493	23,32293	0,008465
height(mm)(Q)	0,001772	1	0,001772	0,10167	0,765787
1L by 2L	0,038809	1	0,038809	2,22670	0,209922
Error	0,069716	4	0,017429		
Total SS	1,143562	9			

Tabela 4.23 – ANOVA: Ensaio de flexão - deformação (PLA-grafeno)

ANOVA: Var.: ε_f (mm/mm); R^2=0,56829; Adj: 0,02865; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=0,0000034					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	0,000011	1	0,000011	3,208765	0,147726
infill(%)(Q)	0,000000	1	0,000000	0,106238	0,760808
(2)*height*(mm)(L)	0,000005	1	0,000005	1,319450	0,314709
height(mm)(Q)	0,000001	1	0,000001	0,413128	0,555376
1L by 2L	0,000001	1	0,000001	0,293211	0,616920
Error	0,000014	4	0,000003		
Total SS	0,000032	9			

O gráfico de Pareto (Fig.4.18), para a tensão de escoamento à flexão, mostra que os fatores *height* (L) e *infill* (L) foram os mais significativos ao contrário dos fatores quadráticos (Q) e a interação linear entre ambos.

Devido a significância, pode-se determinar o modelo da tensão de escoamento à flexão

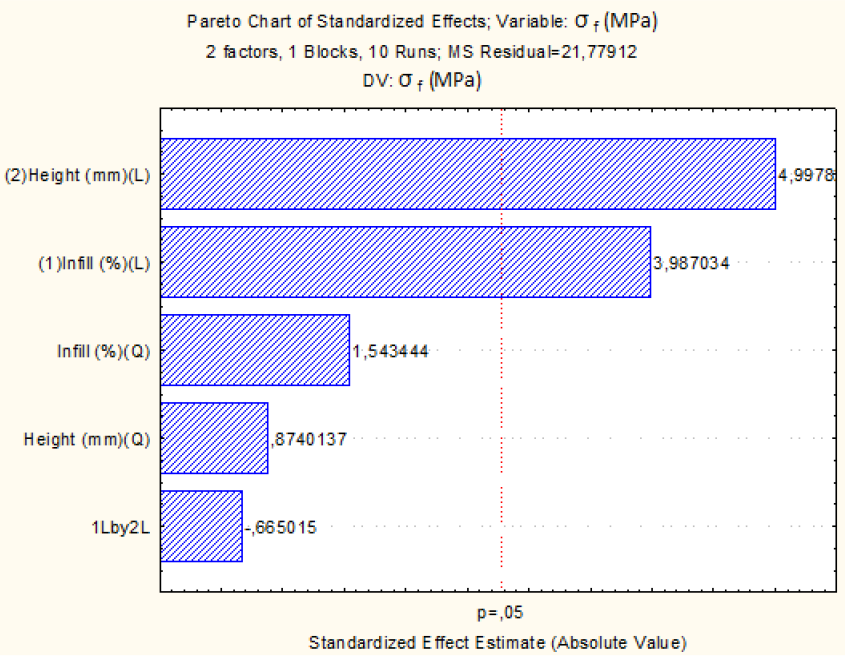


Figura 4.18 – Gráfico de Pareto: σ_f - matéria-prima: PLA-grafeno

(σ_f) em função dos parâmetros *height* (mm) e *infill* (%) como mostrado na Fig. 4.19 e na Eq. 4.5.

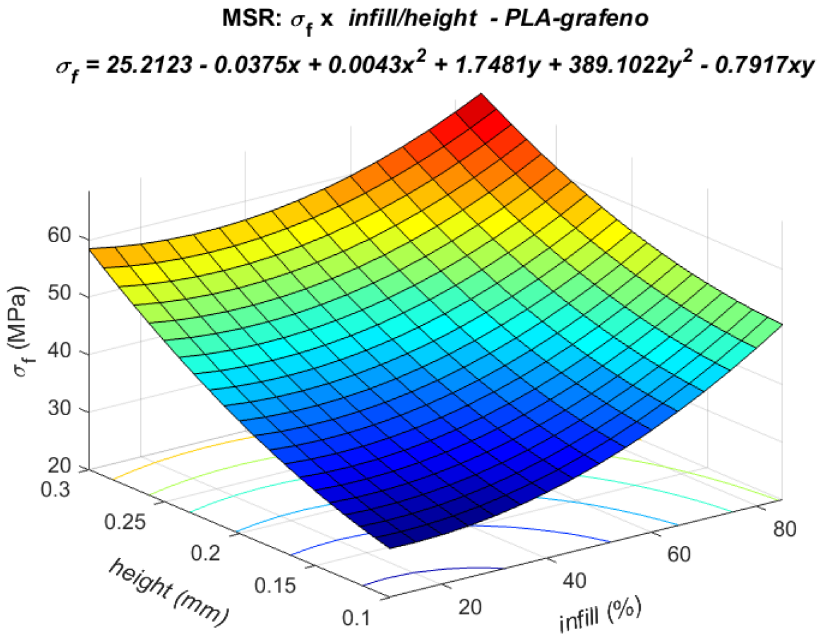


Figura 4.19 – MSR: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA-grafeno

$$\sigma_f = 25,2123 - 0,0375x + 0,0043x^2 + 1,7481y + 389,1022y^2 - 0,7917xy \qquad (4.5)$$

Onde: $x =$ *infill* e $y =$ *height*.

O gráfico da Fig.4.20, faz um comparativo entre o modelo proposto, valores observados e os erros absolutos entre ambos. Verifica-se que a tensão de escoamento à flexão (σ_f) é maior quanto maiores forem o *infill* e *height*. O RMSE dos resíduos foi igual a 2,9661 .

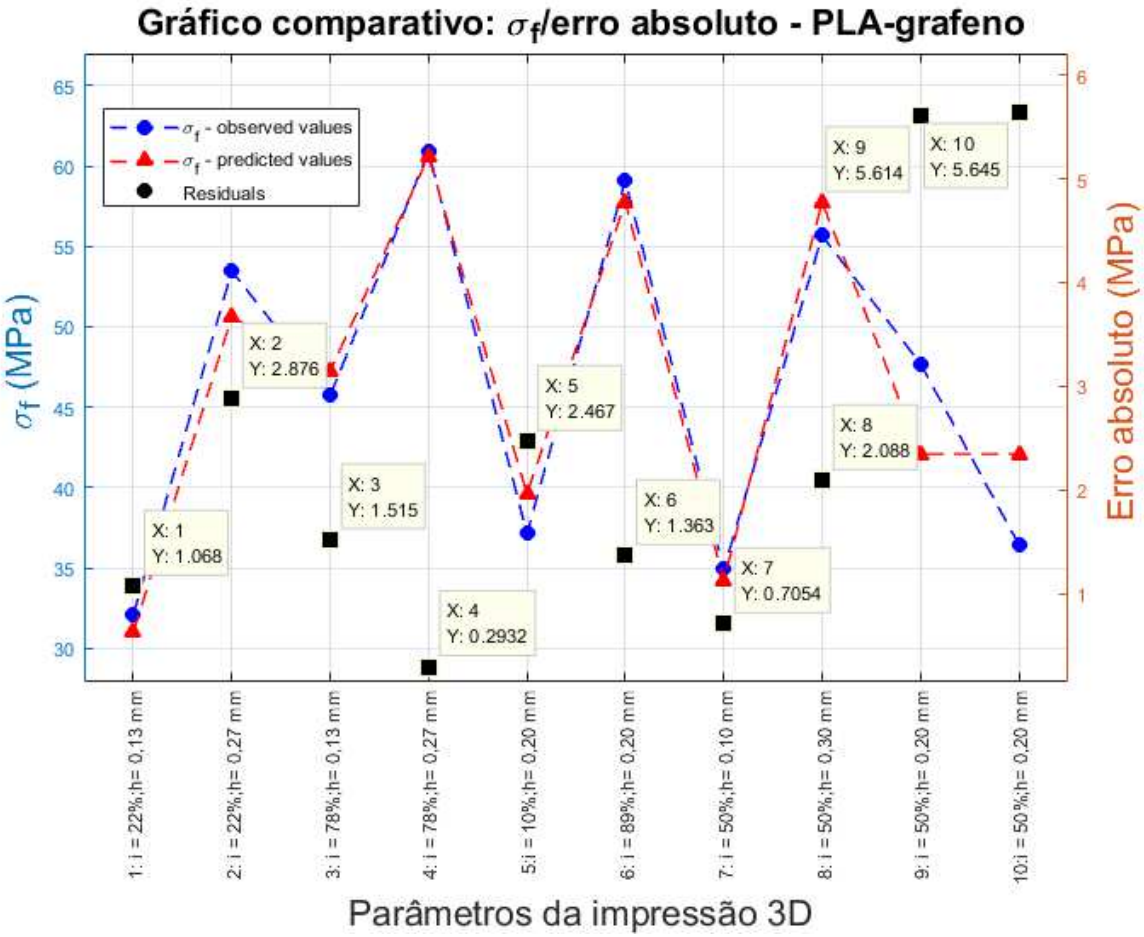


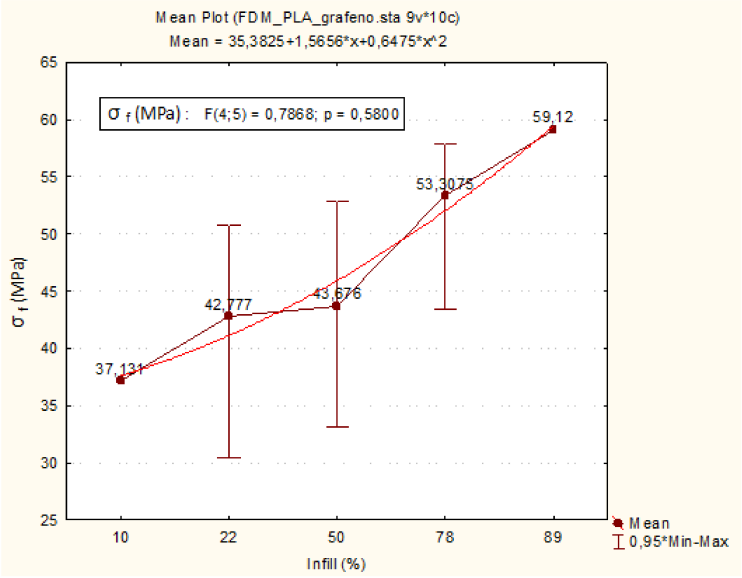
Figura 4.20 – Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_f - matéria-prima: PLA-grafeno

Pelos gráficos da Fig.4.21a e 4.21b, verifica-se que a tensão de escoamento à flexão aumenta em função do aumento tanto do *infill* quanto *height*, sendo que o parâmetro *height* possui significância ligeiramente maior que o *infill* (conforme ANOVA (Tab. 4.21)).

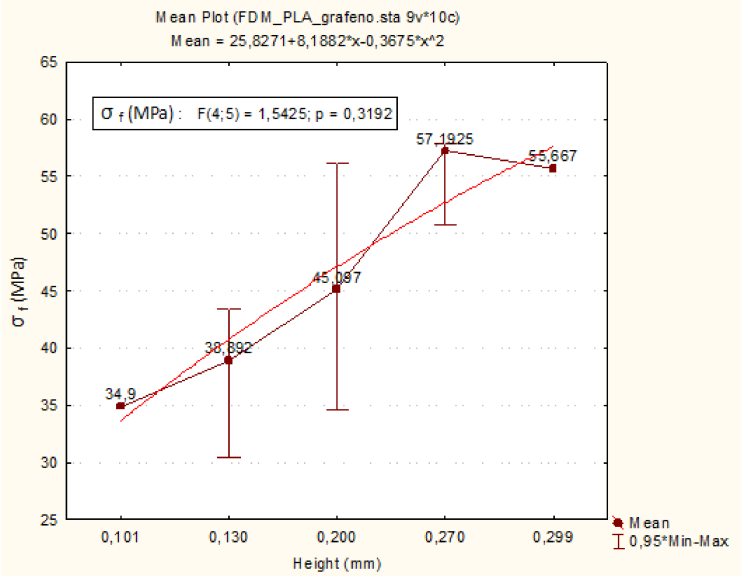
4.2.2 Ensaio de flexão-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA

Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA foram transcritos na Tab. 4.24.

A partir dos dados da Tab. 4.24, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para as



(a) Gráfico: σ_f x *infill*



(b) Gráfico: σ_f x *height*

Figura 4.21 – Gráficos: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA-grafeno

respostas: tensão de escoamento à flexão-σ_f, em MPa, módulo de elasticidade à flexão-E_f, em GPa e deformação- ε_f, em mm/mm. Os resultados foram compilados nas Tabelas 4.25, 4.26 e 4.27.

Pelos resultados apresentados, conclui-se que tanto a ANOVA referente a tensão de escoamento e módulo de elasticidade à flexão, tiveram R^2 significativos dentre as três respostas (R^2 = 0,9563 para a tensão de escoamento (Tab. 4.25), R^2 = 0,93107 para o módulo de elasticidade (Tab. 4.26) e R^2 = 0,01887 para a deformação (Tab. 4.27)).

O gráfico de Pareto (Fig.4.22), para a tensão de escoamento à flexão mostra que

Tabela 4.24 – Valores experimentais obtidos no ensaio de flexão com PLA (FDM)

Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)	σ_f (MPa)	E_f (GPa)	ε_f (mm/mm)
1	22	0,13	25,751	1,116	0,088
2	22	0,27	43,628	1,826	0,077
3	78	0,13	32,616	1,365	0,076
4	78	0,27	51,615	2,221	0,071
5	10	0,20	23,701	1,199	0,035
6	89	0,20	48,231	2,201	0,051
7	50	0,10	26,724	1,404	0,047
8	50	0,30	51,676	2,150	0,049
9(C)	50	0,20	46,083	2,152	0,042
10(C)	50	0,20	44,928	2,089	0,081

Tabela 4.25 – ANOVA: Ensaio de flexão - tensão de escoamento (PLA)

ANOVA: Var.: σ_f (MPa); R^2=,9563; Adj:0,90167; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=12,13152					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	298,341	1	298,341	24,59225	0,007711
infill(%)(Q)	96,658	1	96,658	7,96753	0,047698
(2)*height*(mm)(L)	650,946	1	650,9456	53,65736	0,001848
height(mm)(Q)	40,850	1	40,8502	3,36727	0,879849
1L by 2L	0,315	1	0,3147	0,02594	0,879849
Error	48,526	4	12,1315		
Total SS	1110,357	9			

Tabela 4.26 – ANOVA: Ensaio de flexão - módulo de elasticidade (PLA)

ANOVA: Var.: E_f (GPa); R^2=0,93107; Adj: 0,84491; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=0,0316387					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	0,511686	1	0,511686	16,17277	0,015844
infill(%)(Q)	0,259711	1	0,259711	8,20865	0,045695
(2)*height*(mm)(L)	0,858707	1	0,858707	27,14102	0,06473
height(mm)(Q)	0,183068	1	0,183068	5,78620	0,073918
1L by 2L	0,005329	1	0,05329	0,16843	0,702540
Error	0,126555	4	0,031639		
Total SS	1,836068	9			

os fatores *height* (L) e *infill* (L) e (Q) foram os mais significativos ao contrário dos fatores quadráticos (Q) do *height* e a interação linear entre ambos.

Devido a significância, pode-se determinar o modelo da tensão de escoamento à flexão

Tabela 4.27 – ANOVA: Ensaio de flexão - deformação (PLA)

ANOVA: Var.: ε_f (mm/mm); R^2=0,01887; Adj: 0; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=0,0007805					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	0,000003	1	0,000003	0,003973	0,952764
infill(%)(Q)	0,000007	1	0,000007	0,008560	0,930734
(2)*height*(mm)(L)	0,000022	1	0,000022	0,027785	0,875703
height(mm)(Q)	0,000008	1	0,000008	0,010488	0,923359
1L by 2L	0,000009	1	0,000009	0,011531	0,919656
Error	0,003122	4	0,000781		
Total SS	0,003182	9			

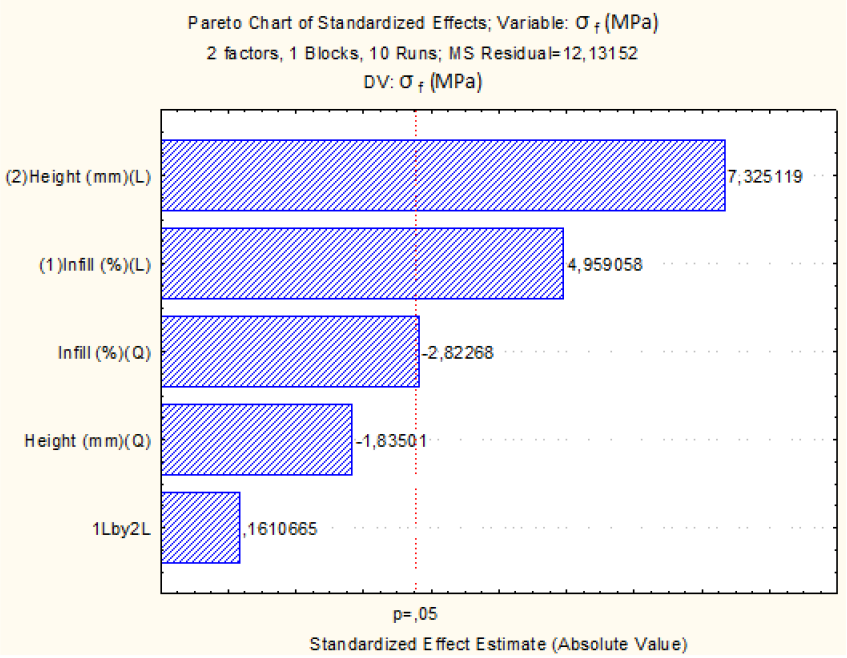


Figura 4.22 – Gráfico de Pareto: σ_f - matéria-prima: PLA

(σ_f) em função dos parâmetros *height* (mm) e *infill* (%) como mostrado na Fig.4.23 e na Equação 4.6.

$$\sigma_f = -28,766 + 0,778x - 0,006x^2 + 365,591y - 609,708y^2 + 0,143xy \qquad (4.6)$$

Onde: x = *infill* e y = *height*.

O gráfico da Fig.4.24, faz um comparativo entre o modelo proposto, valores observados e os erros absolutos entre ambos. Verifica-se que a tensão de escoamento à flexão (σ_f) é maior

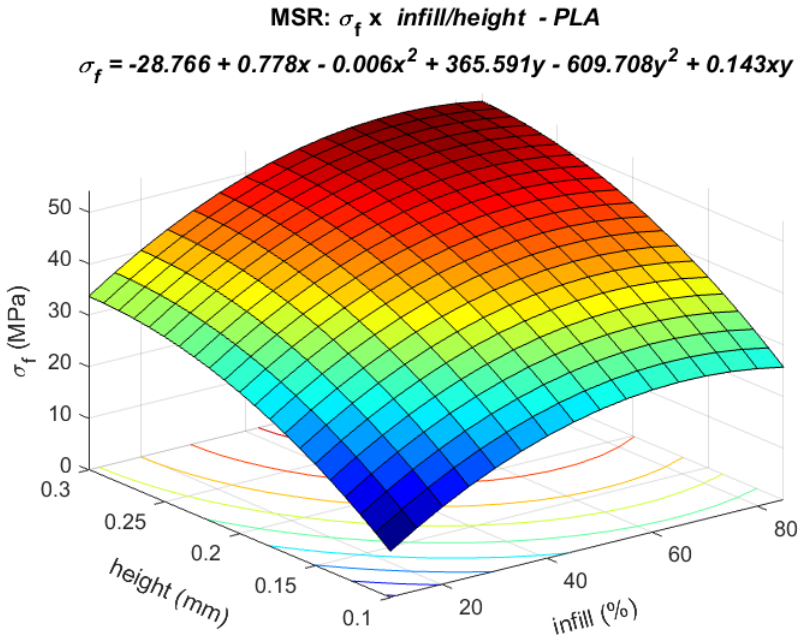


Figura 4.23 – MSR: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA

quanto maiores forem o *infill* e *height*. O RMSE dos resíduos foi igual a 2,2586.

Pelos gráficos da Fig.4.25a e 4.25b, verifica-se que a tensão de escoamento à flexão aumenta em função do aumento tanto do *infill* quanto *height*, sendo que o parâmetro *height* possui significância ligeiramente maior que o *infill* (conforme ANOVA (Tab. 4.25)).

4.2.3 Ensaio de flexão-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado

Os valores experimentais (média de 5 amostras), dos CPs produzidos pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado (branco e incolor), foram transcritos na Tab. 4.28.

Tabela 4.28 – Valores experimentais do ensaio de flexão com a matéria-prima PLA-granulado (moldagem por injeção)

Matéria-prima	σ_f (MPa)	E_f (MPa)	ε_f (mm/mm)
PLA-granulado (branco)	83,549	3,761	0,030
PLA-granulado (incolor)	93,494	3,680	0,033

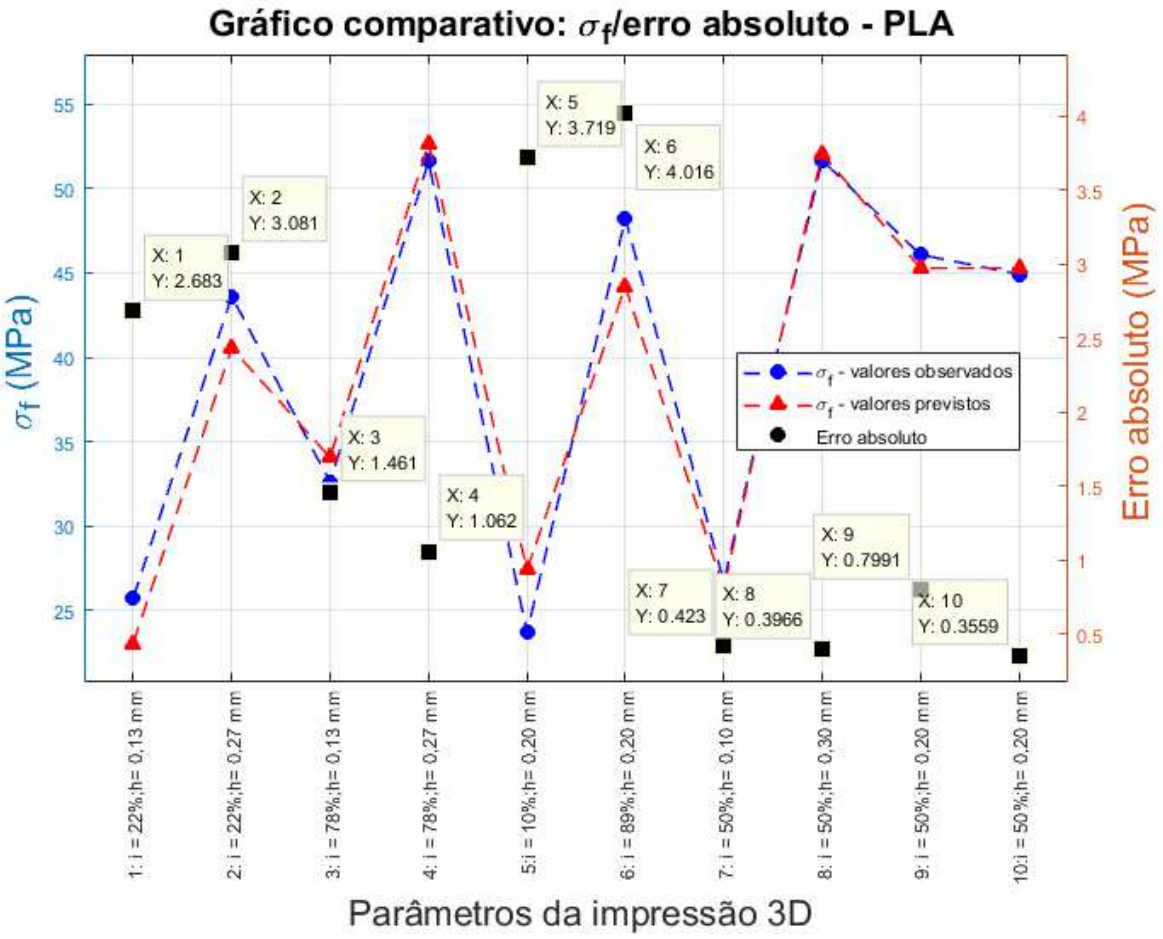


Figura 4.24 – Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_f - matéria-prima: PLA

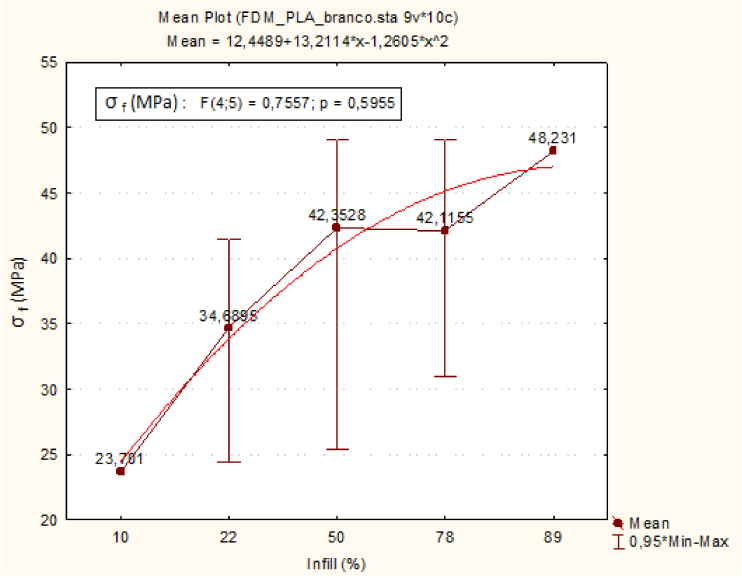
4.2.4 Ensaio de flexão-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno

Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima ABS-grafeno, foram transcritos na Tab. 4.29.

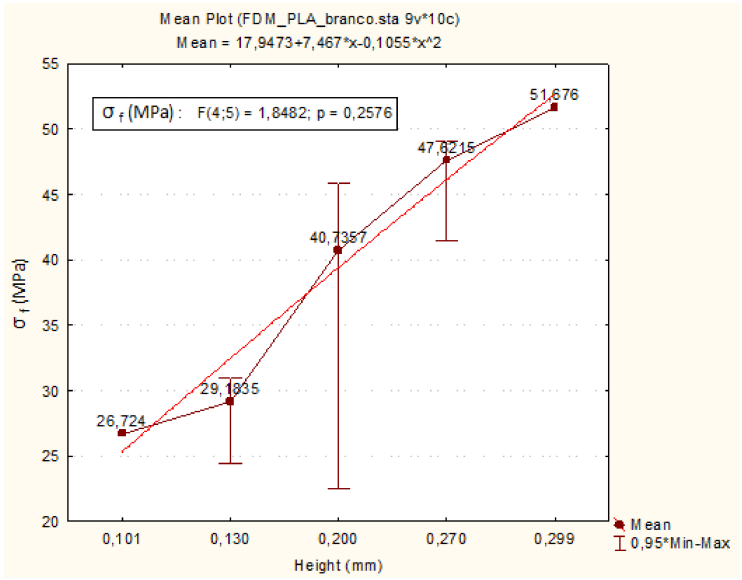
A partir dos dados da Tab. 4.29, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para as respostas: tensão de escoamento à flexão-σ_f, em MPa, módulo de elasticidade à flexão-E_f, em GPa e deformação- ε_f, em mm/mm. Os resultados foram compilados nas Tabelas 4.30, 4.31 e 4.32.

Pelos resultados apresentados, conclui-se que tanto a ANOVA referente a tensão de escoamento e módulo de elasticidade à flexão, tiveram R^2 significativos dentre as três respostas (R^2 = 0,90981 para a tensão de escoamento (Tab. 4.30), R^2 = 0,9558 para o módulo de elasticidade (Tab. 4.31) e R^2 = 0,59336 para a deformação (Tab. 4.32)).

O gráfico de Pareto (Fig.4.26), para a tensão de escoamento à flexão mostra que os



(a) Gráfico: σ_f x *infill*



(b) Gráfico: σ_f x *height*

Figura 4.25 – Gráficos: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA

fatores *infill* (L) e *height* (L) foram os mais significativos, ao contrário dos fatores quadráticos (Q) e a interação linear entre ambos.

Devido a significância, pode-se determinar o modelo da tensão de escoamento à flexão (σ_f) em função dos parâmetros *height* (mm) e *infill* (%) como mostrado na Fig.4.27 e na Eq. 4.7.

$$\sigma_f = -11,032 + 0,448x - 0,002x^2 + 134,893y - 160,950y^2 - 0,626xy \qquad (4.7)$$

Tabela 4.29 – Valores experimentais obtidos no ensaio de flexão com ABS-grafeno (FDM)

Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)	σ_f (MPa)	E_f (GPa)	ε_f (mm/mm)
1	22	0,13	12,752	0,505	0,037
2	22	0,27	20,362	1,069	0,035
3	78	0,13	18,770	0,948	0,035
4	78	0,27	21,474	1,070	0,035
5	10	0,20	10,268	0,679	0,030
6	89	0,20	22,513	1,174	0,033
7	50	0,10	14,050	0,398	0,036
8	50	0,30	22,289	1,131	0,035
9(C)	50	0,20	20,709	1,119	0,034
10(C)	50	0,20	19,762	1,041	0,035

Tabela 4.30 – ANOVA: Ensaio de flexão - tensão de escoamento (ABS-grafeno)

ANOVA: Var.: σ_f (MPa); R^2=0,90981; Adj: 0,79707; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=3,82189					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	73,2253	1	73,22531	19,15945	0,011901
infill(%)(Q)	12,8166	1	12,81656	3,35346	0,141023
(2)*height*(mm)(L)	60,3115	1	60,31153	15,78055	0,016505
height(mm)(Q)	2,8466	1	2,84665	0,74483	0,436793
1L by 2L	6,0172	1	6,01721	1,57441	0,277880
Error	15,2876	4	3,82189		
Total SS	169,5048	9			

Tabela 4.31 – ANOVA: Ensaio de flexão - módulo de elasticidade (ABS-grafeno)

ANOVA: Var.: E_f (GPa); R^2=0,9558; Adj: 0,90054; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=0,0078585					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	0,161056	1	0,161056	20,49438	0,010601
infill(%)(Q)	0,018459	1	0,018459	2,34886	0,200144
(2)*height*(mm)(L)	0,370927	1	0,370927	47,20054	0,002351
height(mm)(Q)	0,096538	1	0,096538	12,28451	0,024785
1L by 2L	0,048841	1	0,048841	6,21503	0,067268
Error	0,031434	4	0,07859		
Total SS	0,711118	9			

Onde: x = *infill* e y = *height*.

Obs.: os coeficientes identificados pela cor vermelha são significativos dentro do índice $P_{value} \leqslant 0,05$.

Tabela 4.32 – ANOVA: Ensaio de flexão - deformação (ABS-grafeno)

ANOVA: Var.: ε_f (mm/mm); R^2=0,59336; Adj: 0,08507; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=0,0000033					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	0,000001	1	0,000001	0,170669	0,700704
infill(%)(Q)	0,000005	1	0,000005	1,433661	0,297272
(2)*height*(mm)(L)	0,000001	1	0,000001	1,441024	0,542952
height(mm)(Q)	0,000005	1	0,000005	1,363873	0,307730
1L by 2L	0,000001	1	0,000001	0,302671	0,611489
Error	0,000013	4	0,000003		
Total SS	0,000032	9			

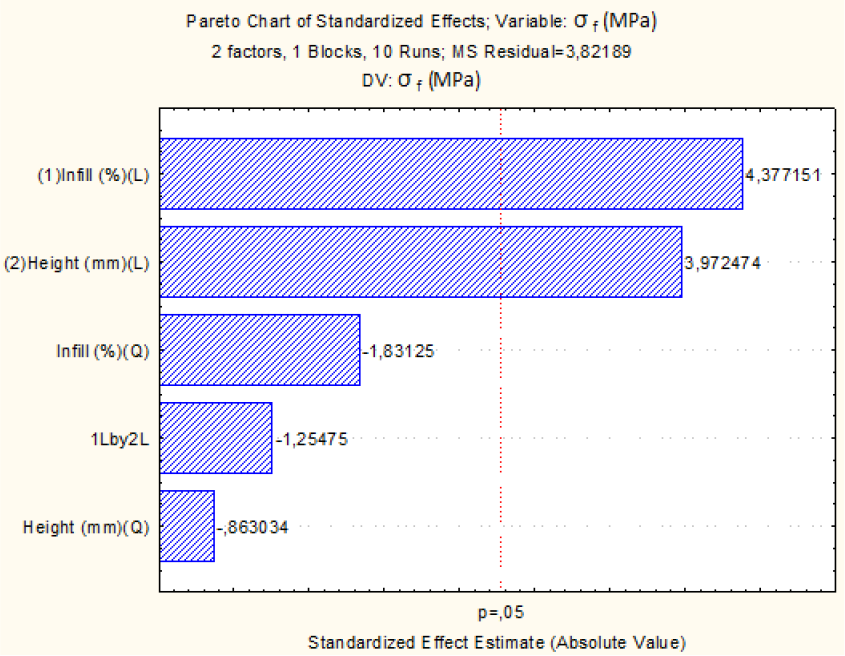


Figura 4.26 – Gráfico de Pareto: σ_f - matéria-prima: ABS-grafeno

O gráfico da Fig.4.28, faz um comparativo entre o modelo proposto, valores observados e os erros absolutos entre ambos. Verifica-se que a tensão de escoamento (σ_f) é maior quanto maiores forem o *infill* e *height*. O RMSE dos resíduos foi igual a 2,2686.

Pelos gráficos da Fig.4.29a e 4.29b, verifica-se que a tensão de escoamento à flexão aumenta, em função do aumento tanto do *infill* quanto *height*, sendo que o parâmetro *infill* possui significância ligeiramente maior que o *height* (conforme ANOVA (Tab. 4.30)).

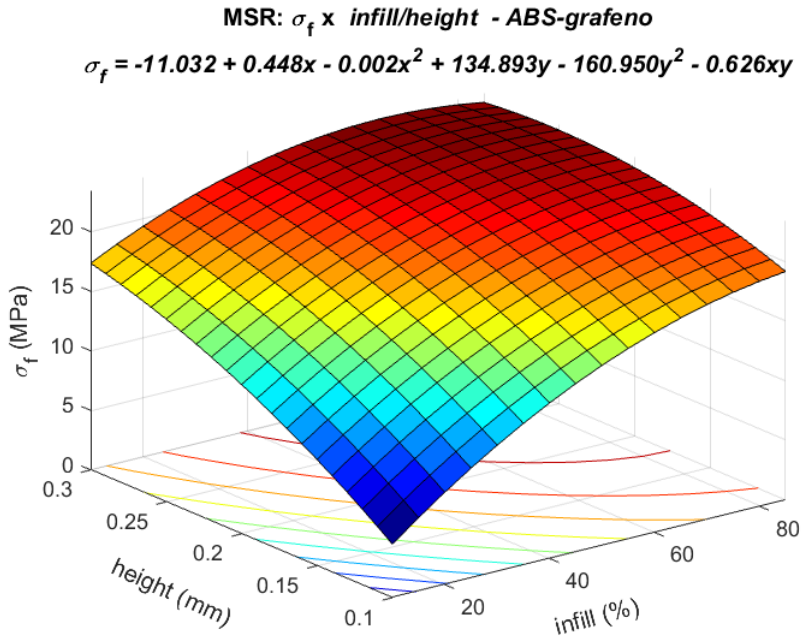


Figura 4.27 – MSR: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS-grafeno

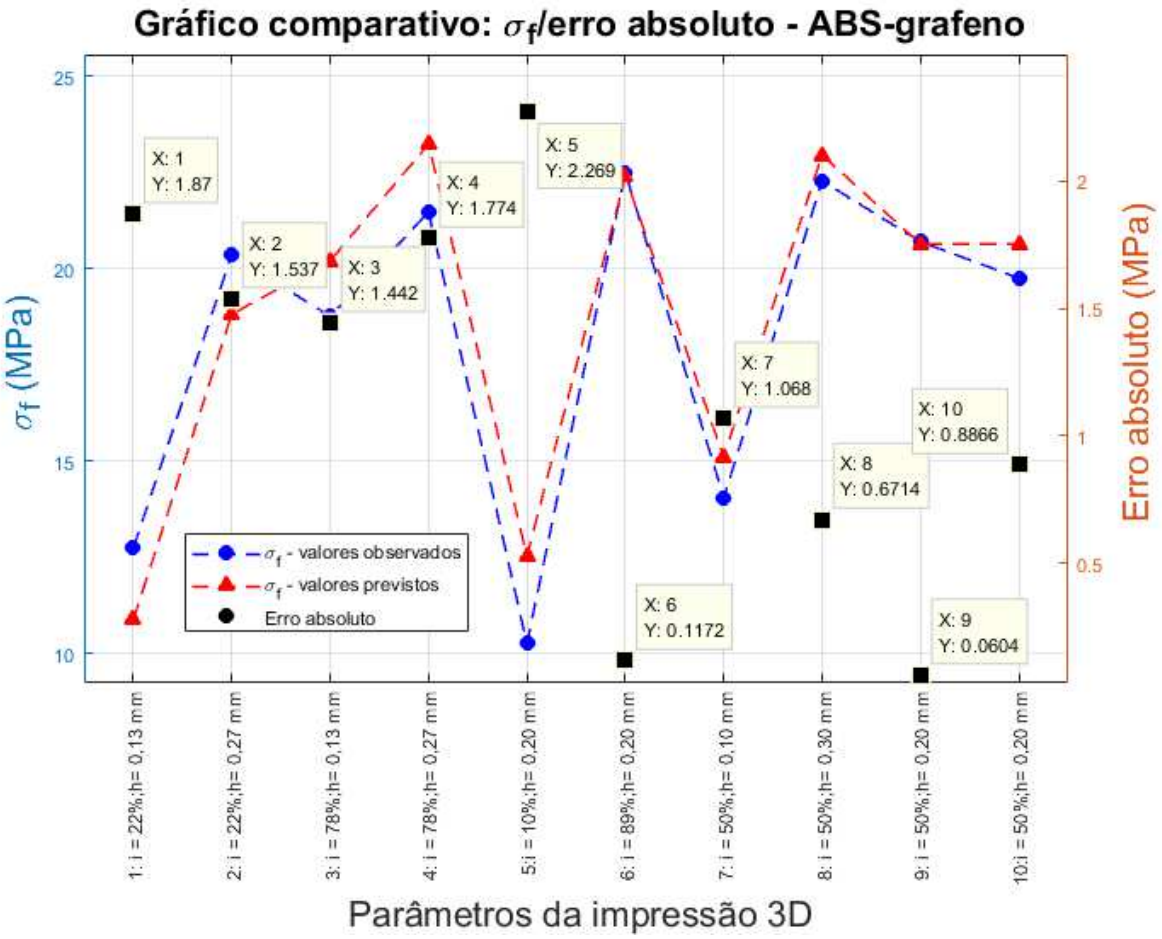
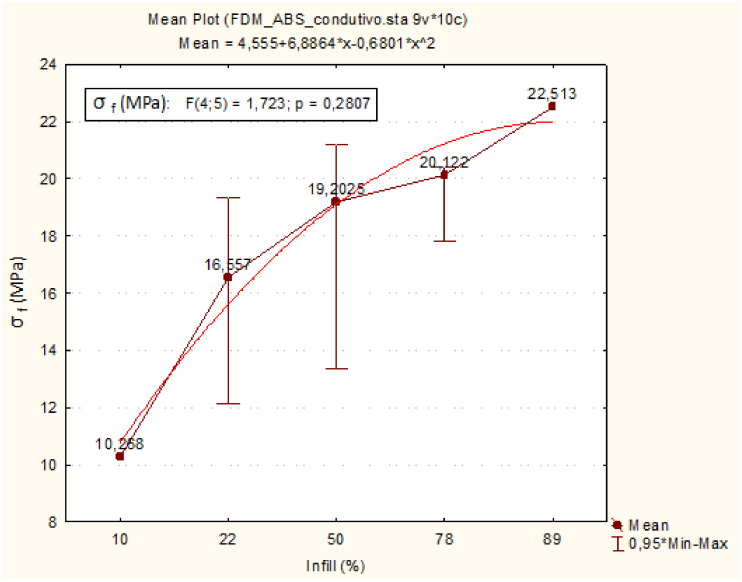
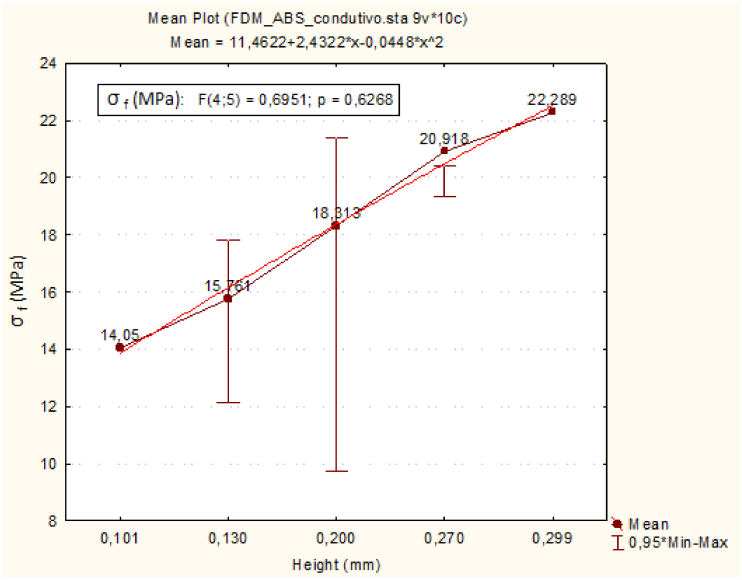


Figura 4.28 – Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_f - matéria-prima: ABS-grafeno



(a) Gráfico: σ_f x *infill*



(b) Gráfico: σ_f x *height*

Figura 4.29 – Gráficos: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS-grafeno

4.2.5 Ensaio de flexão-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS

Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima ABS, foram transcritos na Tab. 4.33.

A partir dos dados da Tab. 4.33, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para as respostas: tensão de escoamento à flexão-σ_f, em MPa, módulo de elasticidade à flexão-E_f, em GPa e deformação- ε_f, em mm/mm. Os resultados foram compilados nas Tabelas 4.34, 4.35 e 4.36.

Tabela 4.33 – Valores experimentais obtidos no ensaio de flexão com ABS (FDM)

Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)	σ_f (MPa)	E_f (GPa)	ε_f (mm/mm)
1	22	0,13	21,446	0,863	0,032
2	22	0,27	36,120	1,425	0,037
3	78	0,13	35,122	1,263	0,038
4	78	0,27	39,654	1,500	0,037
5	10	0,20	24,841	1,034	0,031
6	89	0,20	41,652	1,553	0,041
7	50	0,10	37,269	1,511	0,043
8	50	0,30	50,530	1,910	0,044
9(C)	50	0,20	32,604	1,249	0,038
10(C)	50	0,20	36,762	1,495	0,038

Tabela 4.34 – ANOVA: Ensaio de flexão - tensão de escoamento (ABS)

ANOVA: Var.: σ_f (MPa); R^2=0,87672; Adj: 0,72262; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=18,6664					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	205,6558	1	205,6558	11,01743	0,029399
infill(%)(Q)	20,0288	1	20,0288	1,07299	0,358784
(2)*height*(mm)(L)	180,1191	1	180,1191	9,64938	0,035999
height(mm)(Q)	47,2126	1	47,2126	2,52929	0,186958
1L by 2L	25,7150	1	25,7150	1,37761	0,305624
Error	74,6656	4	18,6664		
Total SS	605,6690	9			

Tabela 4.35 – ANOVA: Ensaio de flexão - módulo de elasticidade (ABS)

ANOVA: Var.: E_f (GPa); R^2=0,79364; Adj: 0,53568; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=0,0400084					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	0,176904	1	0,176904	4,421674	0,103329
infill(%)(Q)	0,045318	1	0,045318	1,132712	0,347179
(2)*height*(mm)(L)	0,232314	1	0,232314	5,806621	0,073579
height(mm)(Q)	0,053966	1	0,053966	1,348868	0,310058
1L by 2L	0,026406	1	0,026406	0,660018	0,462137
Error	0,160034	4	0,040008		
Total SS	0,775494	9			

Pelos resultados apresentados, conclui-se que a ANOVA referente a tensão de escoamento à flexão teve R^2 mais significativo dentre as três respostas (R^2 = 0,87672 para a tensão de escoamento (Tab. 4.34), R^2 = 0,79364 para o módulo de elasticidade (Tab. 4.35) e R^2 =

Tabela 4.36 – ANOVA: Ensaio de flexão - deformação (ABS)

ANOVA: Var.: ε_f (mm/mm); R^2=0,7646; Adj: 0,47036; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=0,0000092					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	0,000049	1	0,000049	5,294465	0,082851
infill(%)(Q)	0,000018	1	0,000018	1,902486	0,239898
(2)*height*(mm)(L)	0,000004	1	0,000004	0,396843	0,562917
height(mm)(Q)	0,000015	1	0,000015	1,592786	0,275501
1L by 2L	0,000009	1	0,000009	0,974722	0,379397
Error	0,000037	4	0,000009		
Total SS	0,000157	9			

0,7646 para a deformação (Tab. 4.36)).

O gráfico de Pareto (Fig.4.30), para a tensão de escoamento à flexão, mostra que os fatores *infill* (L) e *height* (L) foram os mais significativos ao contrário dos fatores quadráticos (Q) e a interação linear entre ambos.

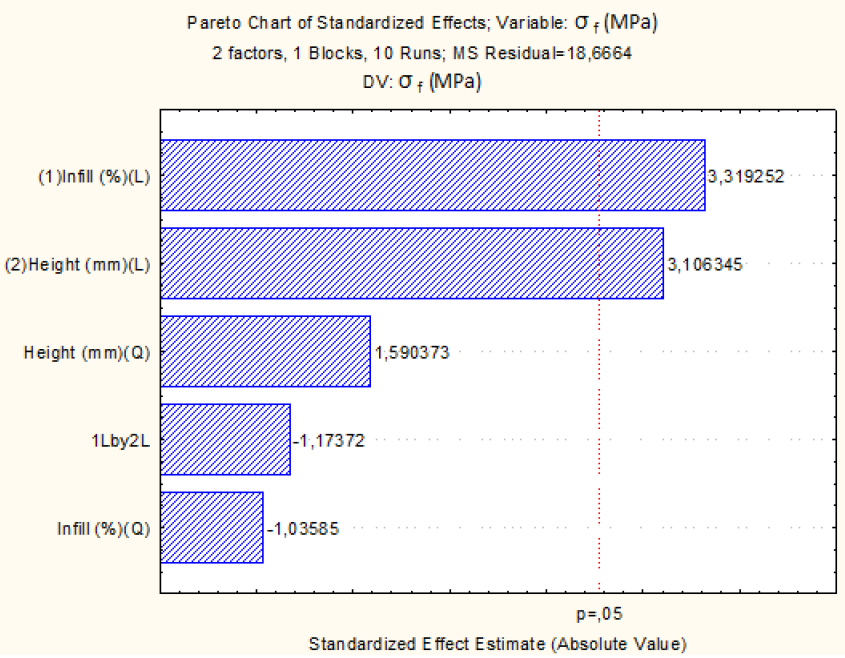


Figura 4.30 – Gráfico de Pareto: σ_f - matéria-prima: ABS

Devido a significância, pode-se determinar o modelo da tensão de escoamento à flexão (σ_f) em função dos parâmetros *height* (mm) e *infill* (%) como mostrado na Fig. 4.31 e na Eq. 4.8.

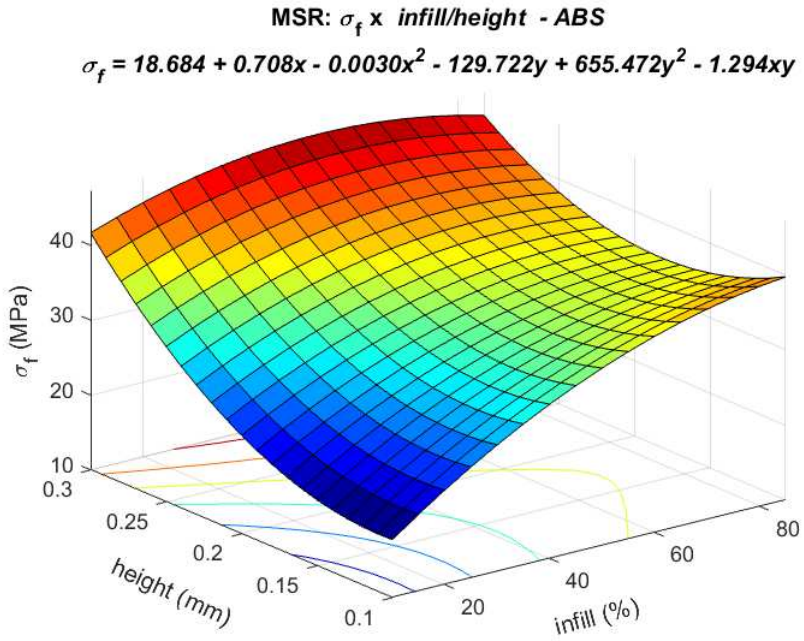


Figura 4.31 – MSR: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS

$$\sigma_f = 18,684 + 0,708x - 0,003x^2 - 129,722y + 655,472y^2 - 1,294xy \tag{4.8}$$

Onde: $x =$ *infill* e $y =$ *height*.

O gráfico da Fig.4.32, faz um comparativo entre o modelo proposto, valores observados e os erros absolutos entre ambos. Verifica-se que a tensão de escoamento à flexão (σ_f) é maior quanto maiores forem o *infill* e *height*. O RMSE dos resíduos foi igual a 2,9949.

Pelos gráficos da Fig.4.33a e 4.33b, verifica-se que a tensão de escoamento à flexão aumenta em função do aumento do *infill*, porém diminui até aproximadamente 0,16 do parâmetro *height* aumentando em seguida até o limite de 0,3mm (valor máximo do intervalo do planejamento dos experimentos). O parâmetro *infill* possui significância ligeiramente maior que o *height* (conforme ANOVA (Tab. 4.34)).

4.2.6 Ensaio de flexão-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima ABS-granulado

Os valores experimentais (média de 5 amostras), dos CPs produzidos pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima ABS-granulado, foram transcritos na Tab. 4.37.

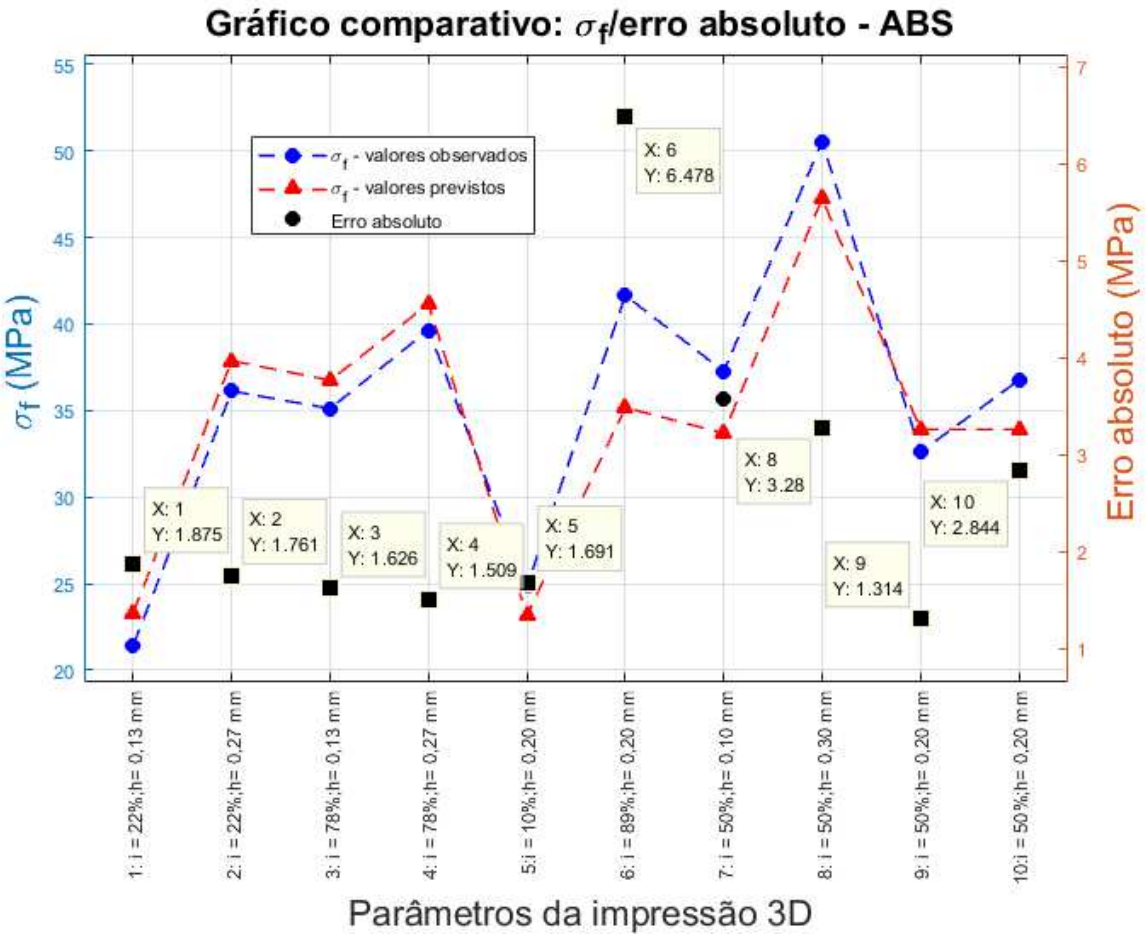


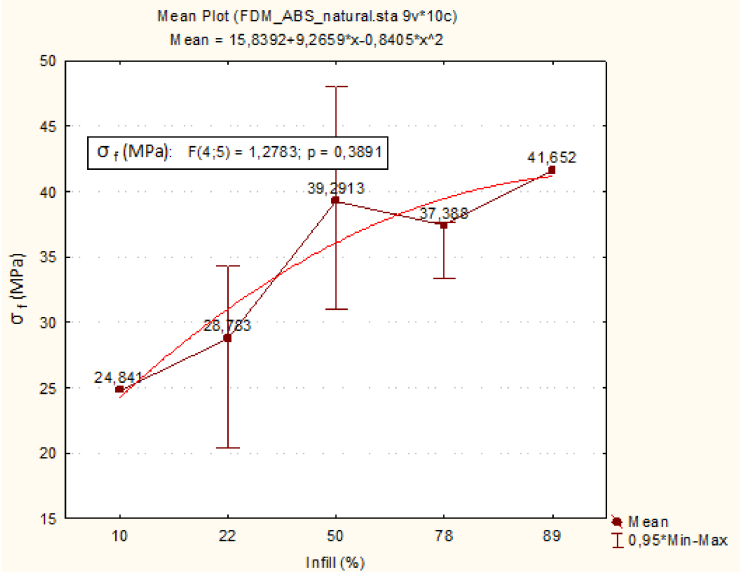
Figura 4.32 – Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: σ_f - matéria-prima: ABS

Tabela 4.37 – Valores experimentais do ensaio de flexão com ABS-granulado (moldagem por injeção)

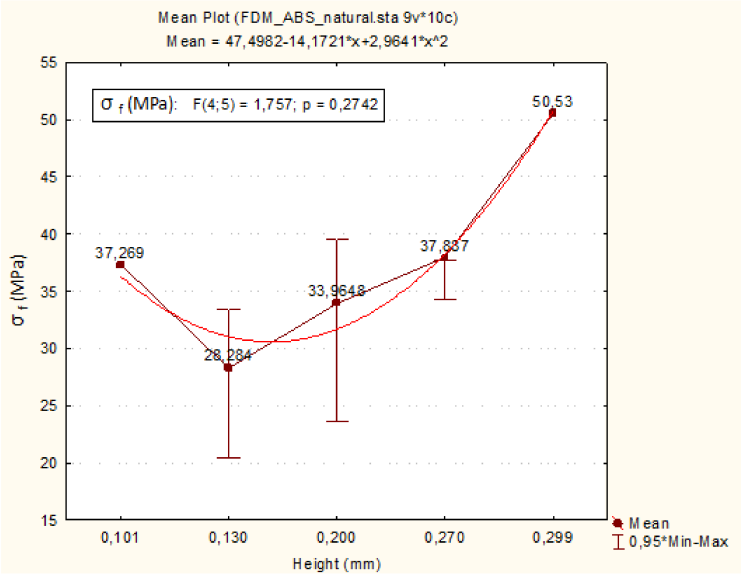
Matéria-prima	σ_t (MPa)	E_t (MPa)	ε_f (mm/mm)
ABS-granulado	88,556	2,825	0,042

4.2.7 Ensaio de flexão-Discussão dos resultados

O gráfico da Fig.4.34, mostra que há diferença na tensão de escoamento à flexão entre CPs manufaturados pelo processo FDM e moldagem por injeção e quando se utiliza as matérias-primas PLA e ABS, com e sem a adição de grafeno. A tensão de escoamento à flexão dos CPs manufaturados por moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-incolor, foi 11,9% maior que a verificada nos CPs produzidos pelo mesmo processo, com a matéria-prima PLA-branco. Este comportamento ocorreu porque a coloração branca é obtida pela adição de titânio,



(a) Gráfico: σ_f x *infill*



(b) Gráfico: σ_f x *height*

Figura 4.33 – Gráficos: σ_f x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS

e por ter maior dureza, este fragiliza o CP. A mesma tensão de escoamento à flexão, de CPs fabricados por moldagem por injeção e que utilizaram a matéria-prima PLA-incolor, foi 5,6% maior, que as obtida nos CPs manufaturados pelo mesmo processo e que utilizaram o ABS como matéria-prima.A tensão de escoamento à flexão obtida através nos CPs produzidos através do processo de moldagem por injeção com a matéria-prima ABS, foram 6% superior a obtida nos CPs manufaturados pelo mesmo processo e que utilizaram o PLA-branco, como matéria-prima. A tensão de escoamento à flexão dos CPs manufaturados através do processo de moldagem por injeção e que utilizaram a matéria-prima PLA foi 91,1% maior, se comparadas aos CPs

que foram manufaturados pelo processo FDM e que utilizaram a matéria-prima PLA-grafeno e 124,1% maior que a tensão de escoamento obtidas nos CPs manufaturados pelo processo FDM e que utilizaram a matéria-prima PLA. Os CPs manufaturados pelo processo de moldagem por injeção e que utilizaram a matéria-prima ABS tiveram a tensão de escoamento à tração 384,2% maior que a tensão de escoamento verificada nos CPs manufaturados pelo processo FDM e que utilizaram a matéria-prima ABS-grafeno. Esta mesma tensão foi 148,8% superior entre os CPs manufaturados pelo processo de moldagem por injeção, que utilizaram a matéria-prima ABS e os CPs manufaturados pelo processo FDM e que utilizaram a matéria-prima ABS.

Assim como na resistência a tração, segundo (DAWOUD; TAHA; EBEID, 2016), este comportamento da tensão de escoamento à flexão era esperado, porque os CPs manufaturados pelo processo de moldagem por injeção, apresentam estrutura bem compactada pois a matéria-prima inserida no molde sob pressão, permite a formação de cristais os quais melhoram as propriedades mecânicas em contraste com o processo FDM onde os filamentos fundidos são depositados em camadas em uma mesa (mantida a 60^{o}C para a matéria-prima PLA e 110^{o}C para a matéria-prima ABS) e posteriormente resfriados lentamente ao ar, condição que favorece a estrutura amorfa e menos resistente.

Dentro do processo FDM, os CPs manufaturados com o PLA-grafeno tiveram, em média, tensão de escoamento à flexão 17,2% maior que os CPs que utilizaram o PLA, no mesmo processo FDM. Os CPs manufaturados pelo mesmo processo FDM e utilizaram a matéria-prima ABS tiveram, em média, limite de escoamento à flexão 94,5% maior que os CPs que utilizaram o ABS-grafeno. Assim como ocorreu nos ensaios de tração, a adição do grafeno aumentou o limite de escoamento para o PLA-grafeno e diminui para o ABS-grafeno. Pelos resultados conclui-se que a adição de grafeno altera os valores do limite de escoamento à tração porém é proporcional a porcentagem adicionada e a reatividade que esta matéria-prima tem com os outros componentes químicos do polímero.

Na comparação entre as duas matérias-primas PLA e ABS, o limite de escoamento à flexão (σ_f) dos CPs manufaturados pelo processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA-grafeno é, em média, 153,4% superior aos CPs que utilizam o ABS-grafeno e manufaturados pelo mesmo processo. Este limite de escoamento à flexão, quando se utiliza a matéria-prima PLA em relação ao ABS foi 11,0% superior. Neste caso específico a adição do grafeno aumentou o limite de

escoamento para o PLA-grafeno e diminui para o ABS-grafeno. Pelos resultados conclui-se que a adição de grafeno altera os valores do limite de escoamento à tração porém é proporcional a porcentagem adicionada e a reatividade que esta matéria-prima tem com os outros componentes químicos do polímero.

A influência dos parâmetros de impressão em relação a resposta tensão de escoamento à flexão e especificamente em relação aos parâmetros: porcentagem de preenchimento (*infill*) e espessura de camada (quanto *height*) são, segundo diversos estudos, bastante significativos. Quanto menor a porcentagem de preenchimento menor a quantidade de material e maior o *gap* entre os *raster*. Esta distância entre os *raster*, fragiliza a peça e consequentemente diminui a tensão de escoamento à flexão. Com relação a espessura de camada, quanto maior seu valor maior a tensão de escoamento, entretanto, este comportamento tem significativa dependência da orientação de construção e do *raster*.

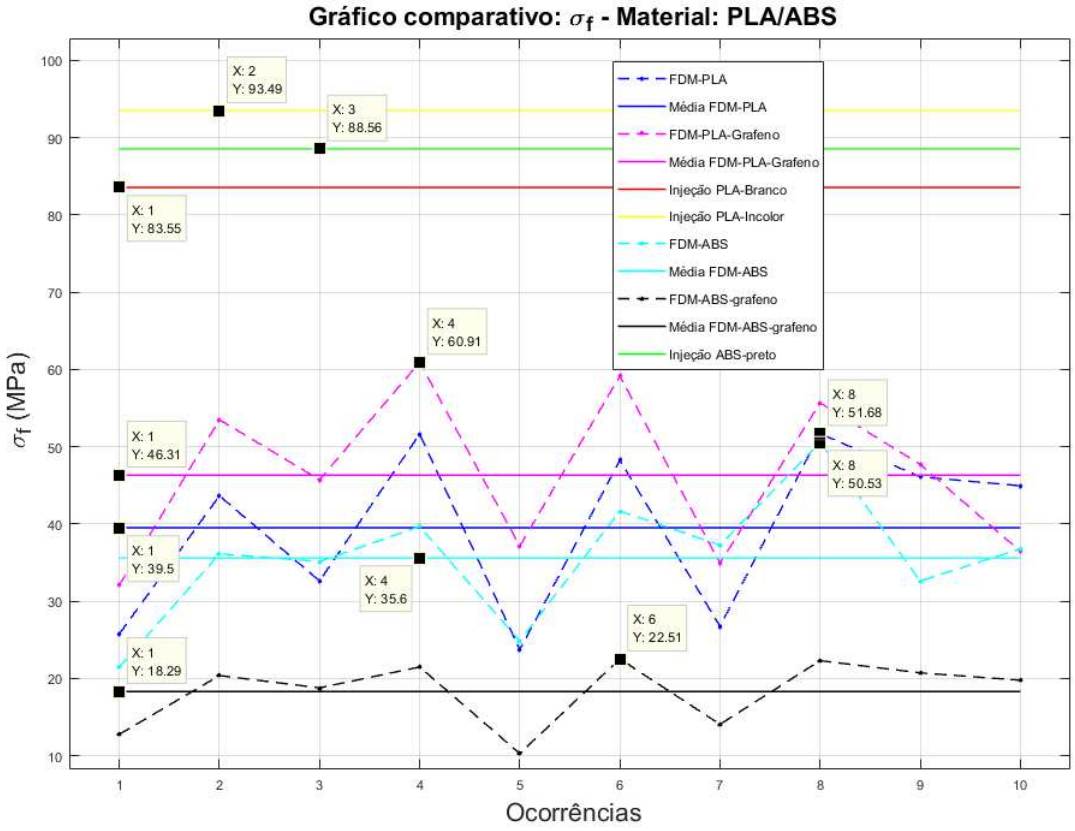


Figura 4.34 – Gráfico comparativo geral: σ_f - matéria-prima: PLA/ABS

Através das equações dos modelos (Eq. 4.5 para a matéria-prima PLA-grafeno, Eq. 4.6 para a matéria-prima PLA, Eq. 4.7 para a matéria-prima ABS-grafeno e Eq. 4.8 para a

matéria-prima ABS), foi possível determinar os valores ótimos da tensão de escoamento à flexão (σ_f). Os valores foram transcritos na Tab. 4.38. Verifica-se que o valor de $\sigma_{fmax.}$, foi 192,3% superior para o PLA-grafeno em relação ao ABS-grafeno.

Tabela 4.38 – Valores (ótimos) obtidos na equação de simulação do modelo para (σ_f): processo FDM

Matéria-prima	$\sigma_{fmax.}$ (MPa)	*infill* (%)	*height* (mm)
PLA-grafeno	68,4	85	0,3
PLA	54,1	70	0,3
ABS-grafeno	23,4	65	0,3
ABS-	47,3	55	0,3

4.3 Resultados dos ensaios de impacto

4.3.1 Ensaio de impacto-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno

Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA-grafeno, foram transcritos na Tab. 4.39.

Tabela 4.39 – Valores experimentais obtidos no ensaio de impacto com PLA-grafeno (FDM)

Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)	E_i (J/m)
1	22	0,13	37,8
2	22	0,27	57,2
3	78	0,13	68,7
4	78	0,27	69,1
5	10	0,20	61,2
6	89	0,20	67,1
7	50	0,10	66,0
8	50	0,30	70,9
9(C)	50	0,20	54,1
10(C)	50	0,20	37,1

A partir dos dados da Tab. 4.39, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para a resposta energia de impacto (E_i), em J/m. O resultado foi compilado na Tab. 4.40.

Pelo resultado apresentado, conclui-se que a ANOVA referente a energia de impacto não tem significância estatística (R^2=0,68981 - Tab. 4.40), porém, por ser o único parâmetro

Tabela 4.40 – ANOVA: Ensaio de impacto - energia de impacto (PLA-grafeno)

ANOVA: Var.: E_i (J/m); R^2=0,68981; Adj: 0,30207; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=109,6055					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	339,056	1	339,056	3,093424	0,153429
infill(%)(Q)	250,842	1	250,842	2,288592	0,204876
(2)*height*(mm)(L)	89,309	1	89,309	0,814825	0,417741
height(mm)(Q)	406,545	1	406,545	3,709166	0,126407
1L by 2L	90,250	1	90,250	0,823408	0,415509
Error	438,422	4	109,6055		
Total SS	1413,396	9			

testado neste tipo de ensaio, o mesmo foi analisado para efeito de comparação com a resposta dos outros materiais.

O gráfico de Pareto (Fig.4.35), para a energia de impacto (ensaio de impacto) mostra que dentre os fatores estudados, o mais significativo é *height* (Q), porem abaixo do nível de significância de 95%.

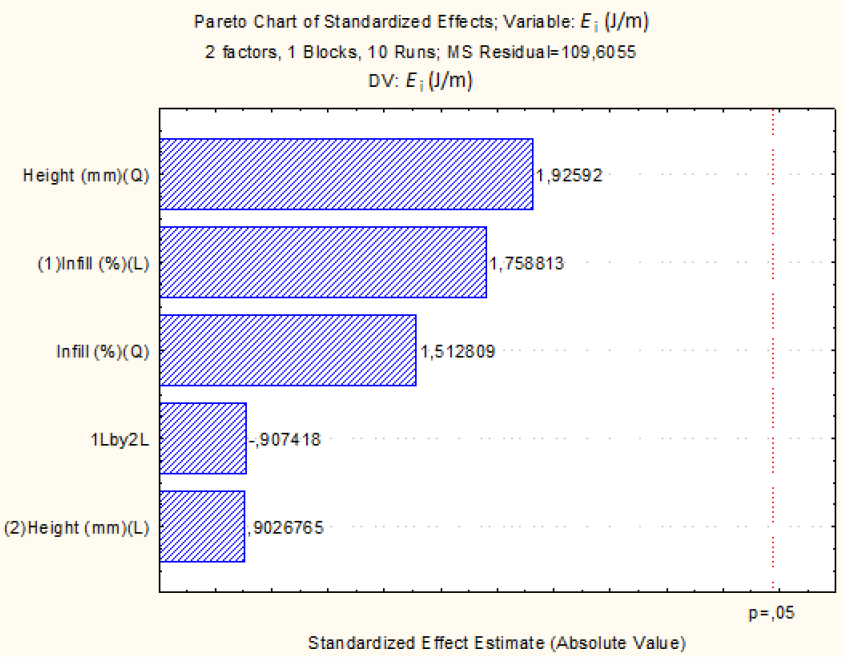


Figura 4.35 – Gráfico de Pareto: E_i - matéria-prima: PLA-grafeno

Mesmo não sendo significativo, foi determinado o modelo da resposta energia de impacto (E_i) em função dos parâmetros *infill* (%) e *height* (mm) como mostrado na Fig.4.36 e Eq. 4.9.

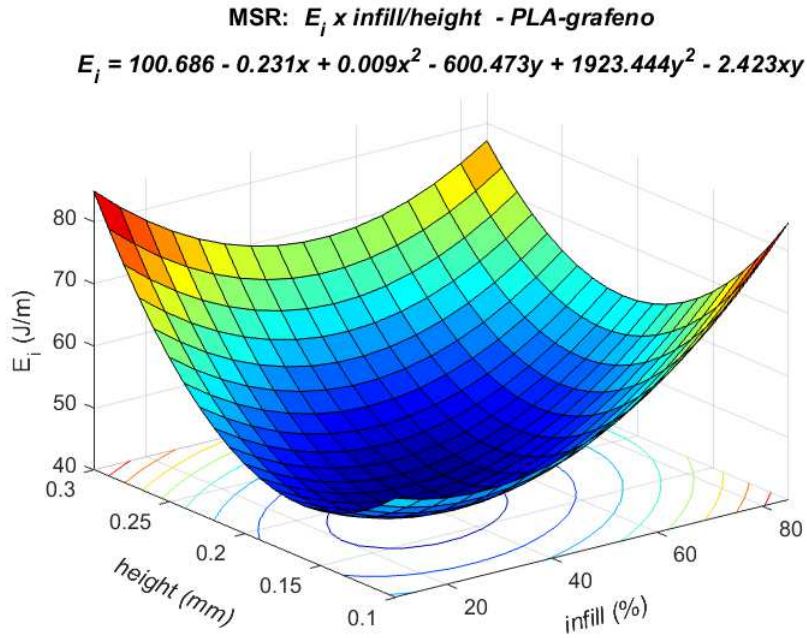


Figura 4.36 – MSR: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA-grafeno

$$E_i = 100,686 - 0,231x + 0,009x^2 - 600,473y + 1923,444y^2 - 2,423xy \qquad (4.9)$$

Onde: x = *infill* e y = *height*.

O gráfico da Fig.4.37, faz um comparativo entre o modelo proposto, valores observados e os erros absolutos entre ambos. Verifica-se que a energia de impacto (E_i) é maior quanto maiores forem o *infill* e *height*. O RMSE dos resíduos foi igual a 6,8504.

Pelos gráficos das Figuras 4.38a e 4.38b, verifica-se que a energia de impacto (E_i) decresce com o aumento de *infill*-22% e *height*-0,20mm. Após estes valores, a energia de impacto aumenta até os limites máximos, porém nenhum dos fatores teve significância para análise ANOVA (Tab. 4.40).

4.3.2 Ensaio de impacto-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA

Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA, foram transcritos na Tab. 4.41.

A partir dos dados da Tab. 4.41, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para a resposta energia de impacto (E_i), em J/m. O resultado foi compilado na Tab. 4.42.

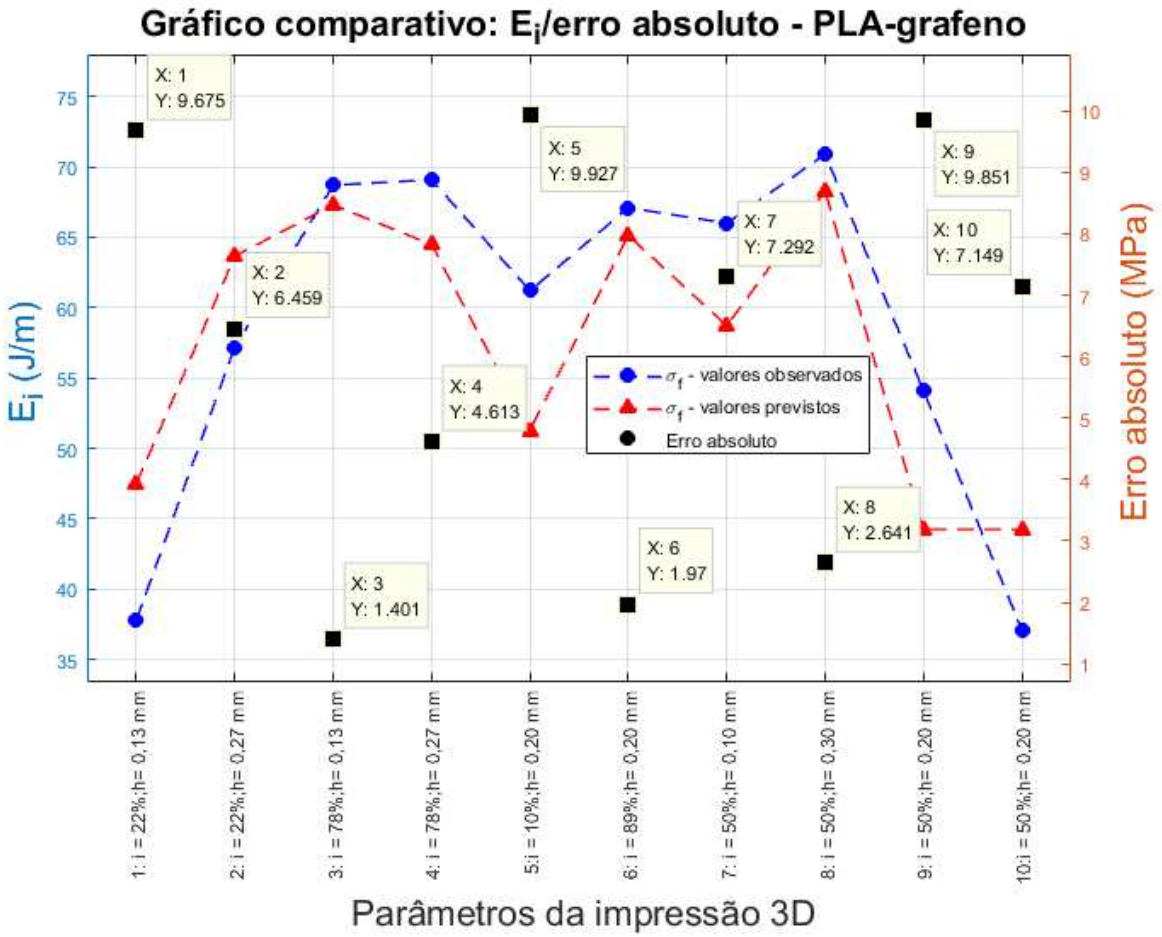


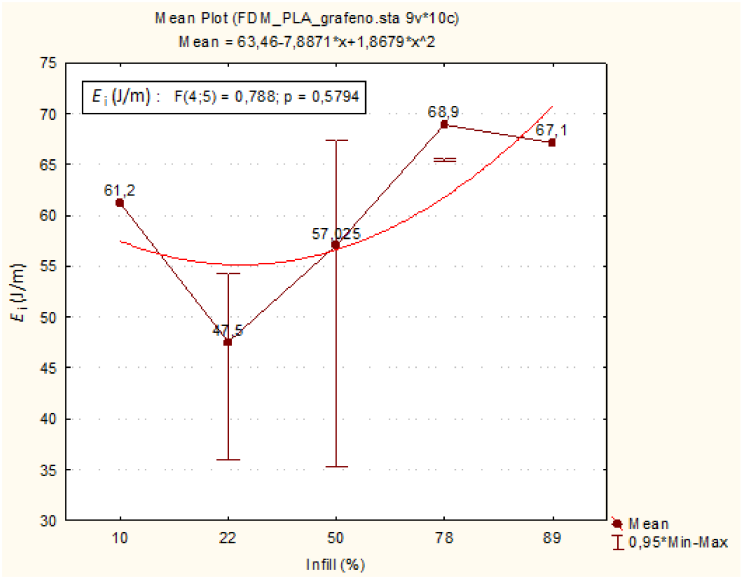
Figura 4.37 – Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: E_i - matéria-prima: PLA-grafeno

Tabela 4.41 – Valores experimentais obtidos no ensaio de impacto com PLA (FDM)

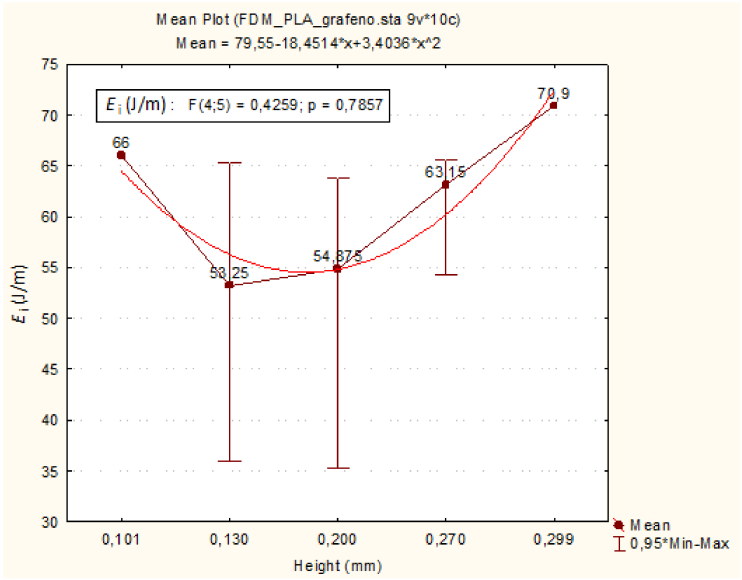
Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)	E_i (J/m)
1	22	0,13	28,9
2	22	0,27	67,0
3	78	0,13	49,3
4	78	0,27	60,4
5	10	0,20	50,2
6	89	0,20	59,2
7	50	0,10	37,2
8	50	0,30	50,4
9(C)	50	0,20	51,1
10(C)	50	0,20	55,2

Pelo resultado apresentado, conclui-se que a ANOVA referente a energia de impacto tem significância estatística (R^2=0,87952 - Tab. 4.42).

O gráfico de Pareto (Fig.4.39), para a energia de impacto (ensaio de impacto), mostra



(a) Gráfico: E_i x *infill*



(b) Gráfico: E_i x *height*

Figura 4.38 – Gráficos: E_i x (*infill*/*height*)

que dentre os fatores estudados, o mais significativo é *height* (L) ao contrário do fator *infill* (L) e (Q), *height* (Q) e a interação linear entre ambos.

Devido a significância, pode-se determinar o modelo da resposta energia de impacto (E_i) em função dos parâmetros *infill* (%) e *height* (mm) como mostrado na Fig.4.40 e Eq. 4.10.

$$E_i = -41,041 + 0,636x + 0,002x^2 + 631,606y - 845,551y^2 - 3,444xy \qquad (4.10)$$

Tabela 4.42 – ANOVA: Ensaio de impacto - energia de impacto (PLA)

ANOVA: Var.: E_i (J/m); R^2=0,87952; Adj: 0,72892; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual= 33,48962					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	89,437	1	87,437	2,67058	0,177558
infill(%)(Q)	8,246	1	8,246	0,24622	0,645781
(2)*height*(mm)(L)	575,752	1	575,752	17,19195	0,014303
height(mm)(Q)	78,565	1	78,565	2,34595	0,200368
1L by 2L	182,250	1	182,2500	5,44199	0,080006
Error	133,958	4	33,4896		
Total SS	1111,869	9			

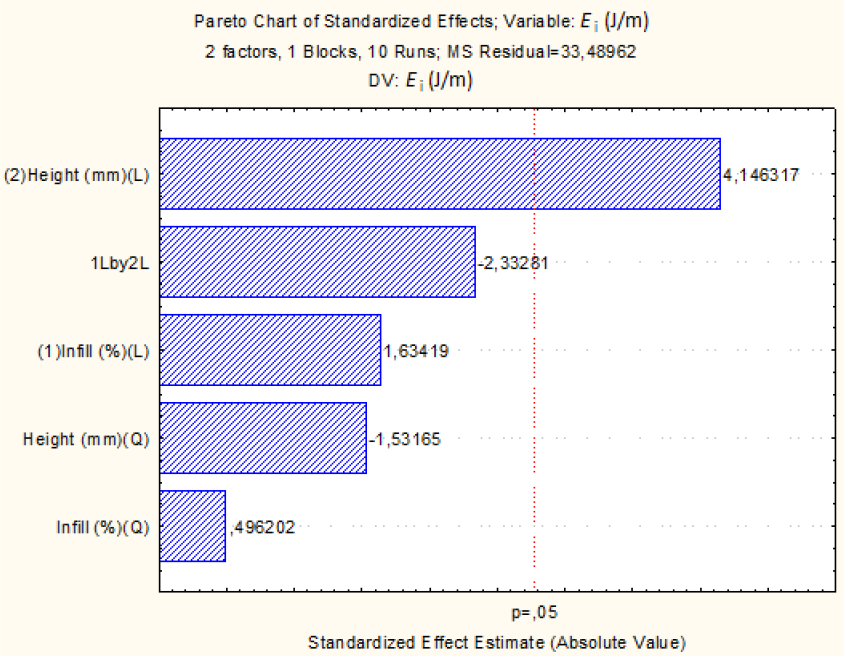


Figura 4.39 – Gráfico de Pareto: E_i - matéria-prima: PLA

Onde: x = *infill* e y = *height*.

O gráfico da Fig.4.41, faz um comparativo entre o modelo proposto, valores observados e os erros absolutos entre ambos. O RMSE dos resíduos foi igual a 3,8432.

Pelos gráficos das Figuras 4.42a e 4.42b, verifica-se que a energia de impacto decresce com o aumento do fator *infill* até o termo médio e aumenta, do termo médio ao extremo máximo. A energia de impacto cresce com o aumento do fator *height* e tem ligeira redução quando se aproxima dos valores máximos. A Tab. 4.42 mostra que somente o fator *height* tem significância.

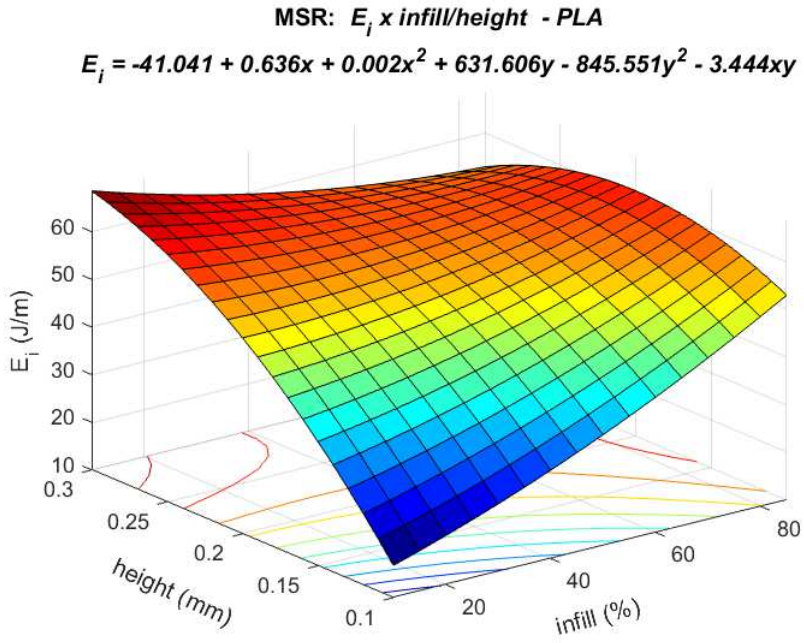


Figura 4.40 – MSR: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA

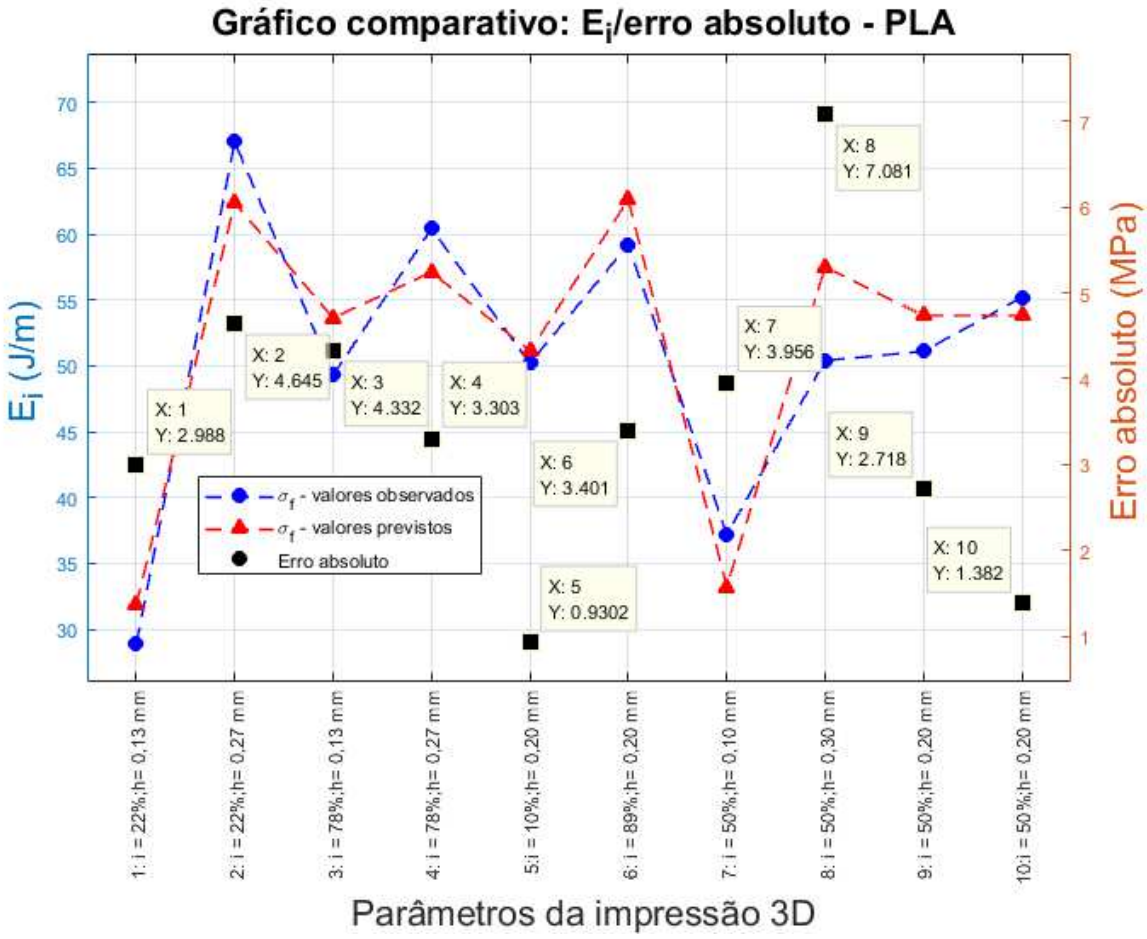
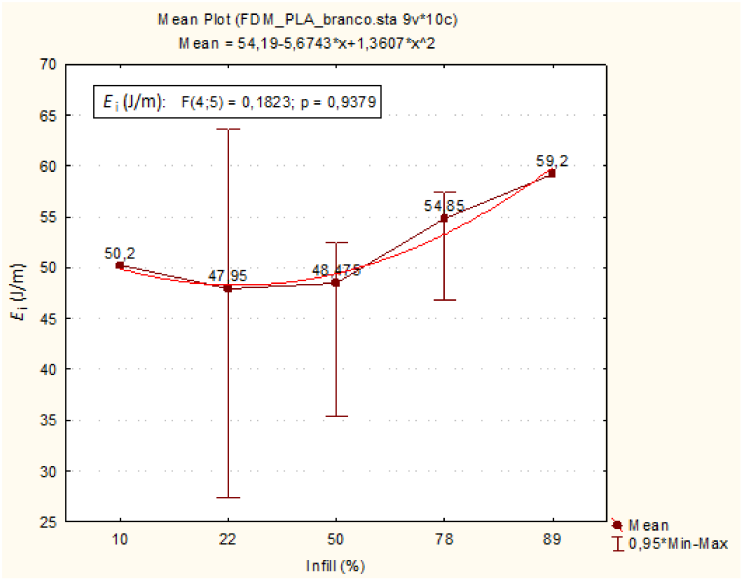
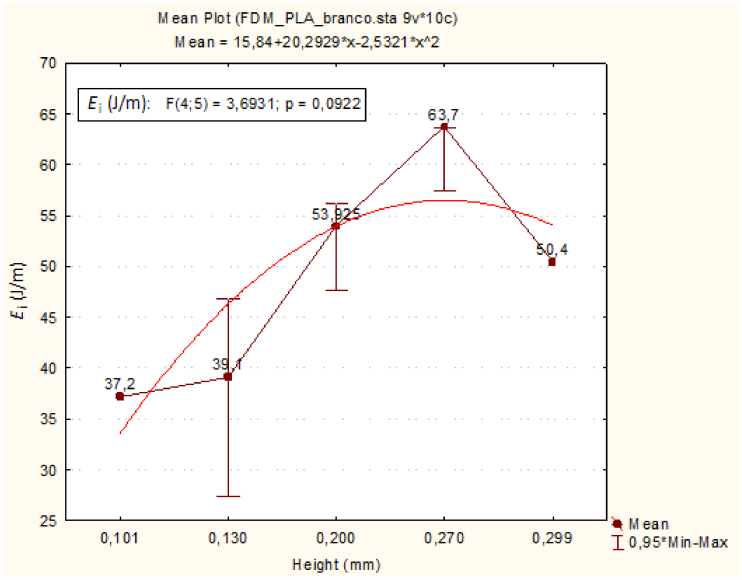


Figura 4.41 – Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: E_i - matéria-prima: PLA



(a) Gráfico: E_i x *infill*



(b) Gráfico: E_i x *height*

Figura 4.42 – Gráficos: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: PLA

4.3.3 Ensaio de impacto-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado

Os valores experimentais (média de 5 amostras), dos CPs produzidos pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado (branco e incolor), foram transcritos na Tab. 4.43.

Tabela 4.43 – Valores experimentais do ensaio de impacto com a matéria-prima: PLA-granulado (moldagem por injeção)

Matéria-prima	E_i (J/m)
PLA-granulado (branco)	64,60
PLA-granulado (incolor)	39,90

4.3.4 Ensaio de impacto-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno

Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima ABS-grafeno, foram transcritos na Tab. 4.44.

Tabela 4.44 – Valores experimentais obtidos no ensaio de impacto com a matéria-prima: ABS-grafeno (FDM)

Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)	E_i (J/m)
1	22	0,13	58,20
2	22	0,27	86,50
3	78	0,13	75,00
4	78	0,27	107,60
5	10	0,20	48,20
6	89	0,20	71,20
7	50	0,10	68,70
8	50	0,30	94,40
9(C)	50	0,20	82,10
10(C)	50	0,20	88,70

A partir dos dados da Tab. 4.44, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para a resposta energia de impacto (E_i), em J/m. O resultado foi compilado na Tab. 4.45.

Pelo resultado apresentado, conclui-se que a ANOVA referente a energia de impacto tem significância estatística (R^2=0,87282 - Tab. 4.45).

O gráfico de Pareto (Fig.4.43), para a energia de impacto (ensaio de impacto) , mostra que o fator *height* (L) foi o mais significativo ao contrário dos fatores *infill* (L), quadráticos (Q) e a interação linear entre ambos.

Devido a significância, pode-se determinar o modelo da resposta energia de impacto (E_i) em função dos parâmetros *infill* (%) e *height* (mm) como mostrado na Fig.4.44 e Eq. 4.11.

Tabela 4.45 – ANOVA: Ensaio de impacto - energia de impacto (ABS-grafeno)

ANOVA: Var.: E_i (J/m); R^2=0,87282; Adj: 0,71384; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=88,0863					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	598,371	1	598,371	6,79300	0,059649
infill(%)(Q)	451,946	1	451,946	5,13072	0,086192
(2)*height*(mm)(L)	1182,081	1	1182,081	13,41958	0,021518
height(mm)(Q)	406,545	1	406,545	3,709166	0,126407
1L by 2L	3,619	1	3,619	0,04109	0,849265
Error	352,345	4	88,086		
Total SS	2770,444	9			

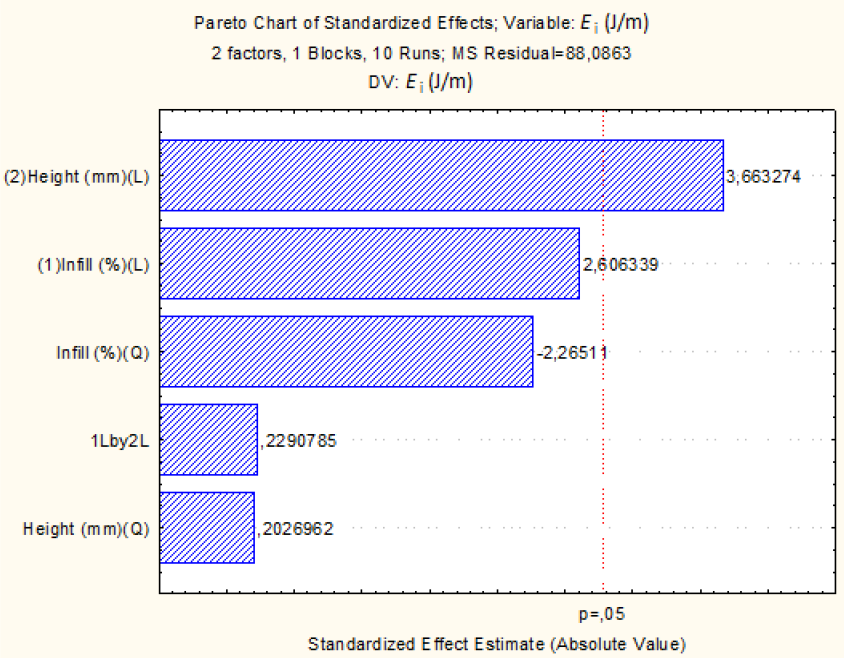


Figura 4.43 – Gráfico de Pareto: E_i - matéria-prima: ABS-grafeno

$$E_i = 16,0715 + 1,4723x - 0,0127x^2 + 73,6374y + 181,4785y^2 + 0,5485xy \qquad (4.11)$$

Onde: x = *infill* e y = *height*.

O gráfico da Fig.4.45, faz um comparativo entre o modelo proposto, valores observados e os erros absolutos entre ambos. Verifica-se que a energia de impacto (E_i) é maior quanto maiores forem o *infill* e *height*. O RMSE dos resíduos foi igual a 5,9697.

Pelos gráficos das Figuras 4.46a e 4.46b, verifica-se que a energia de impacto aumenta

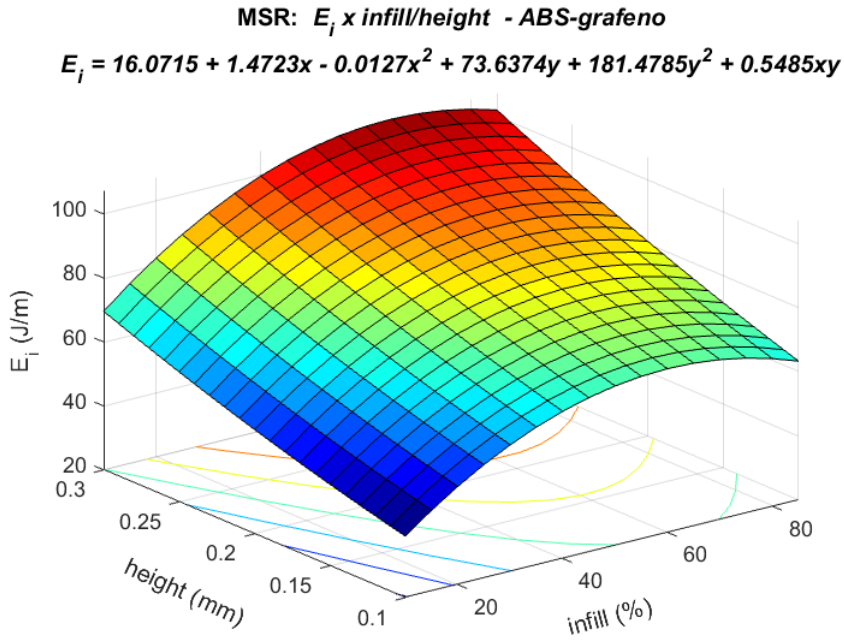


Figura 4.44 – MSR: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS-grafeno

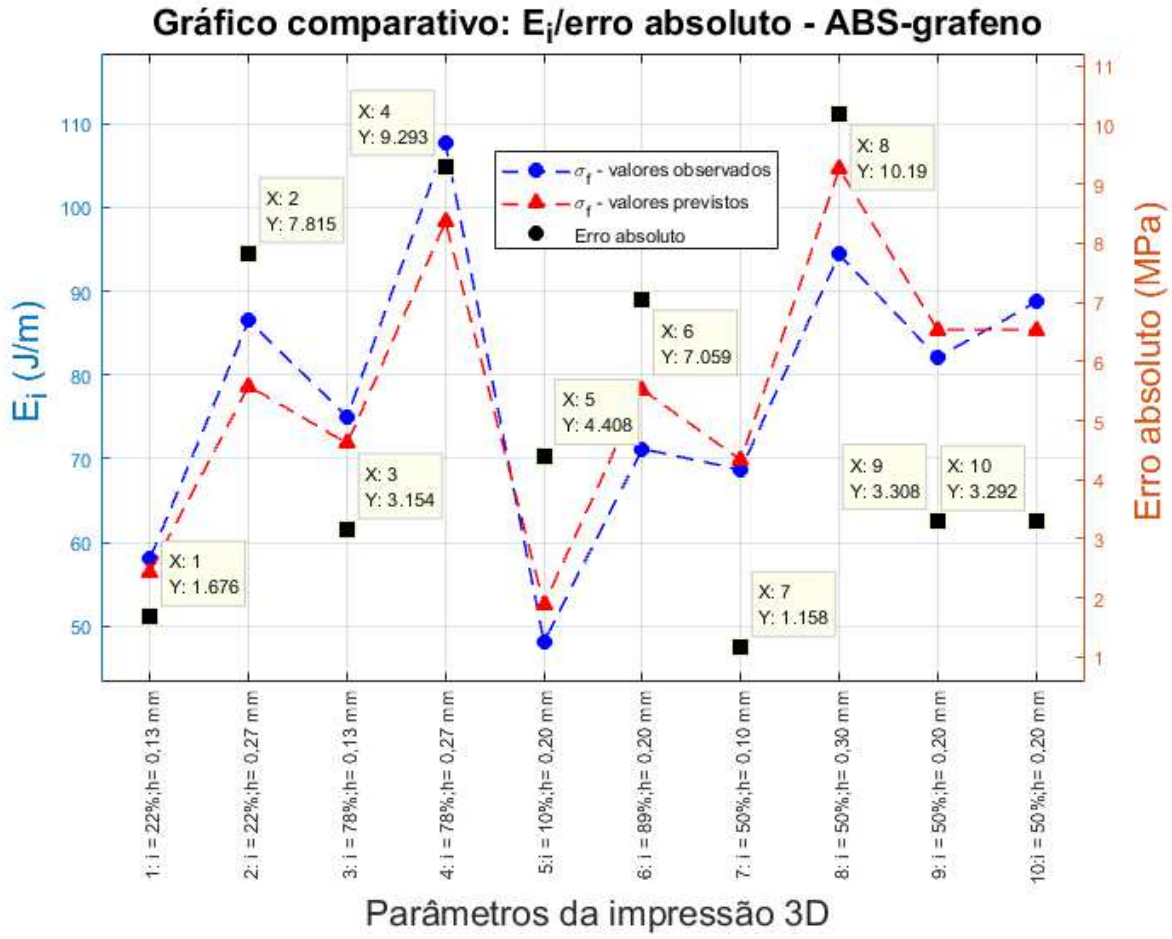
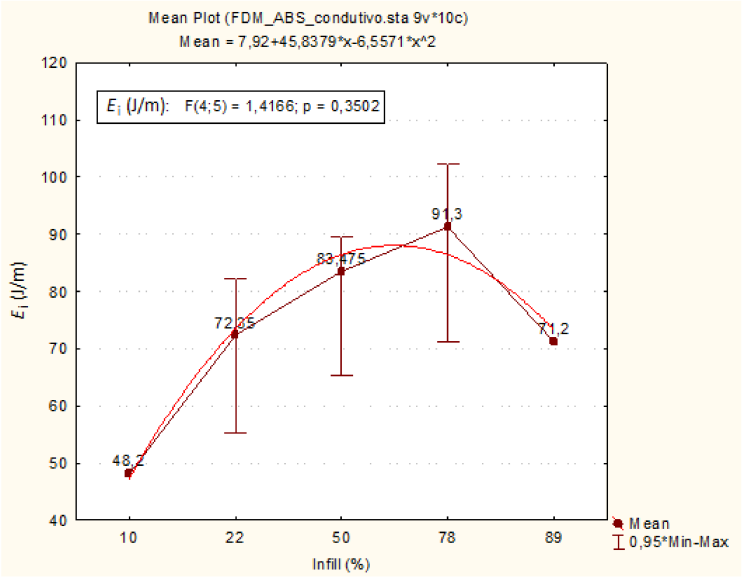
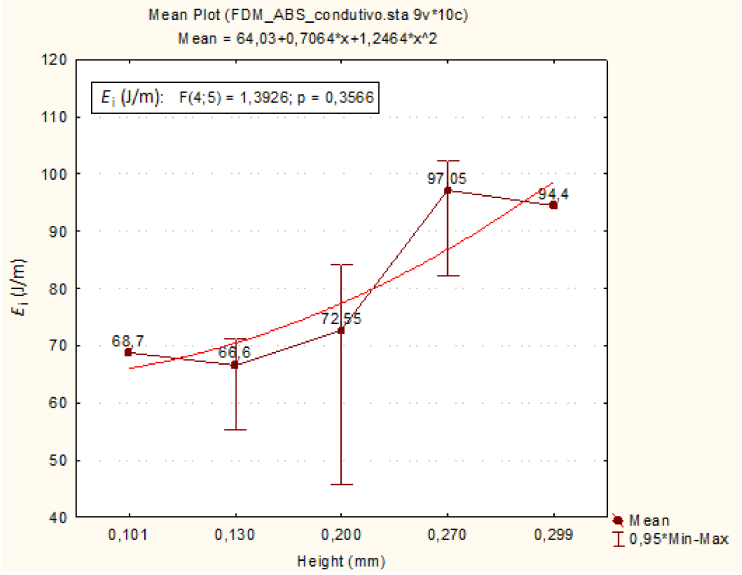


Figura 4.45 – Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: E_i - matéria-prima: ABS-grafeno

em função do aumento do parâmetro *height*. O comportamento da energia de impacto em função do parâmetro *infill* aumenta até aproximadamente 64% quando começa a diminuir até atingir o limite (89%). Com relação ao parâmetro *height* a energia de impacto diminui ligeiramente até 0,13 mm e depois aumenta até atingir 0,3 mm. Somente o fator *height* (L) teve significância estatística para análise ANOVA (Tab. 4.45).



(a) Gráfico: E_i x *infill*



(b) Gráfico: E_i x *height*

Figura 4.46 – Gráficos: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS-grafeno

4.3.5 Ensaio de impacto-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS

Os resultados dos ensaios experimentais, obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima ABS, foram transcritos na Tab. 4.46.

Tabela 4.46 – Valores experimentais obtidos no ensaio de impacto com ABS (FDM)

Ensaio	*infill* (%)	*height* (mm)	E_i (J/m)
1	22	0,13	127,9
2	22	0,27	149,2
3	78	0,13	123,8
4	78	0,27	155,1
5	10	0,20	99,3
6	89	0,20	127,9
7	50	0,10	86,7
8	50	0,30	128,7
9(C)	50	0,20	110,5
10(C)	50	0,20	127,3

A partir dos dados da Tab. 4.46, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para a resposta energia de impacto (E_i), em J/m. O resultado foi compilado na Tab. 4.47.

Tabela 4.47 – ANOVA: Ensaio de impacto - energia de impacto (ABS)

ANOVA: Var.: E_i (J/m); R^2=0,49669; Adj: 0,; 2 fatores, 1 bloco, 10 corridas; MS Residual=33,48962					
Fator	SS	df	MS	F	p
(1)*infill*(%)(L)	234,459	1	234,459	0,484101	0,524878
infill(%)(Q)	87,522	1	87,522	0,180712	0,692633
(2)*height*(mm)(L)	1571,877	1	1571,877	3,245545	0,894778
height(mm)(Q)	9,612	1	9,612	0,019846	0,894778
1L by 2L	25,000	1	25,000	0,051619	0,831409
Error	1937,274	4	484,319		
Total SS	3849,045	9			

Pelo resultado apresentado, conclui-se que a ANOVA referente a energia de impacto não tem significância estatística (R^2=0,49669 - Tab. 4.47) porém por ser o único parâmetro testado neste tipo de ensaio, o mesmo foi analisado para efeito de comparação com a resposta dos outros materiais.

O gráfico de Pareto (Fig.4.47), para a energia de impacto (ensaio de impacto) mostra

que dentre os fatores estudados o mais significativo é *height* (L), porem abaixo do nível de significância de 95%.

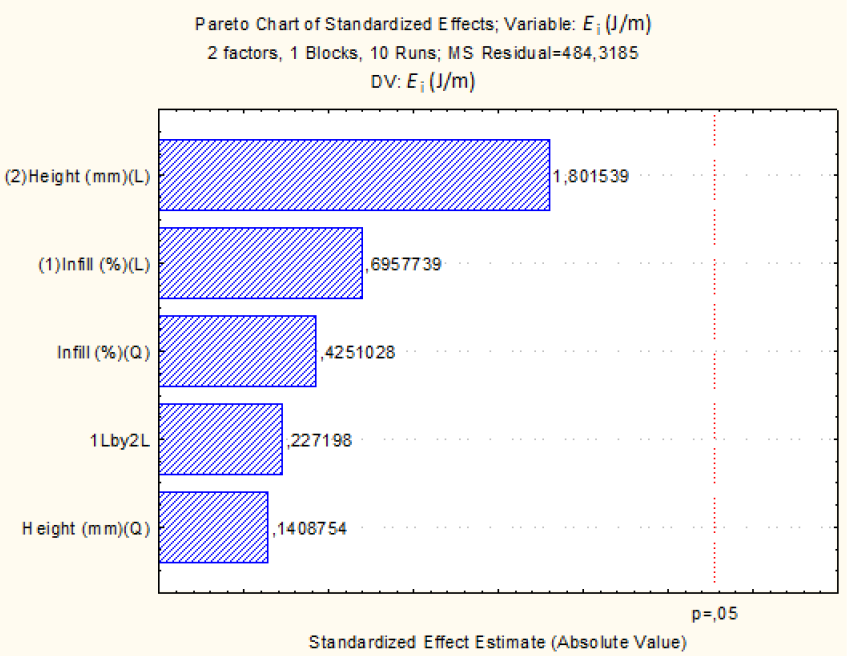


Figura 4.47 – Gráfico de Pareto: E_i - matéria-prima: ABS

Mesmo não sendo significativo, foi determinado o modelo da resposta energia de impacto (E_i) em função dos parâmetros *infill* (%) e *height* (mm) como mostrado na Fig.4.48 e Eq. 4.12.

Embora não significativo foi determinado o modelo da resposta energia de impacto (E_i) em função dos parâmetros *infill* (%) e *height* (mm) como mostrado na Fig.4.48 e Eq. 4.12.

$$E_i = 107,8585 - 0,6215 + 0,0056x^2 + 18,1713y + 295,7508y^2 + 1,2755xy \qquad (4.12)$$

Onde: x = *infill* e y = *height*.

O gráfico da Fig.4.49, faz um comparativo entre o modelo proposto, valores observados e os erros absolutos entre ambos. Verifica-se que a energia de impacto (E_i) é maior quanto maiores forem o *infill* e *height*. O RMSE dos resíduos foi igual a 13,9274.

Pelos gráficos das Figuras 4.50a e 4.50b, verifica-se que o comportamento da energia de impacto, referente ao parâmetro *infill*, aumenta até aproximadamente 78% quando começa a diminuir até atingir 89%. O comportamento da energia de impacto, referente ao parâmetro *height*,

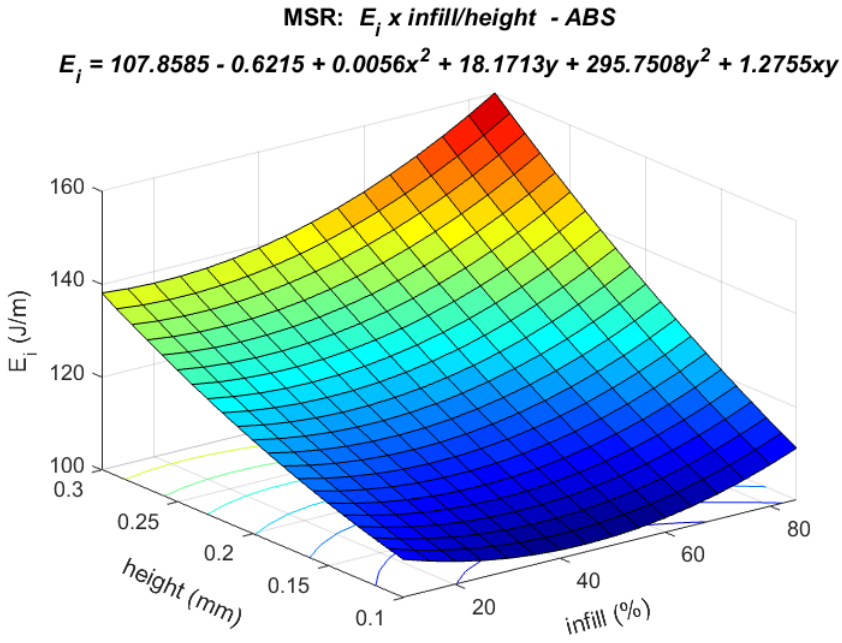


Figura 4.48 – MSR: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS

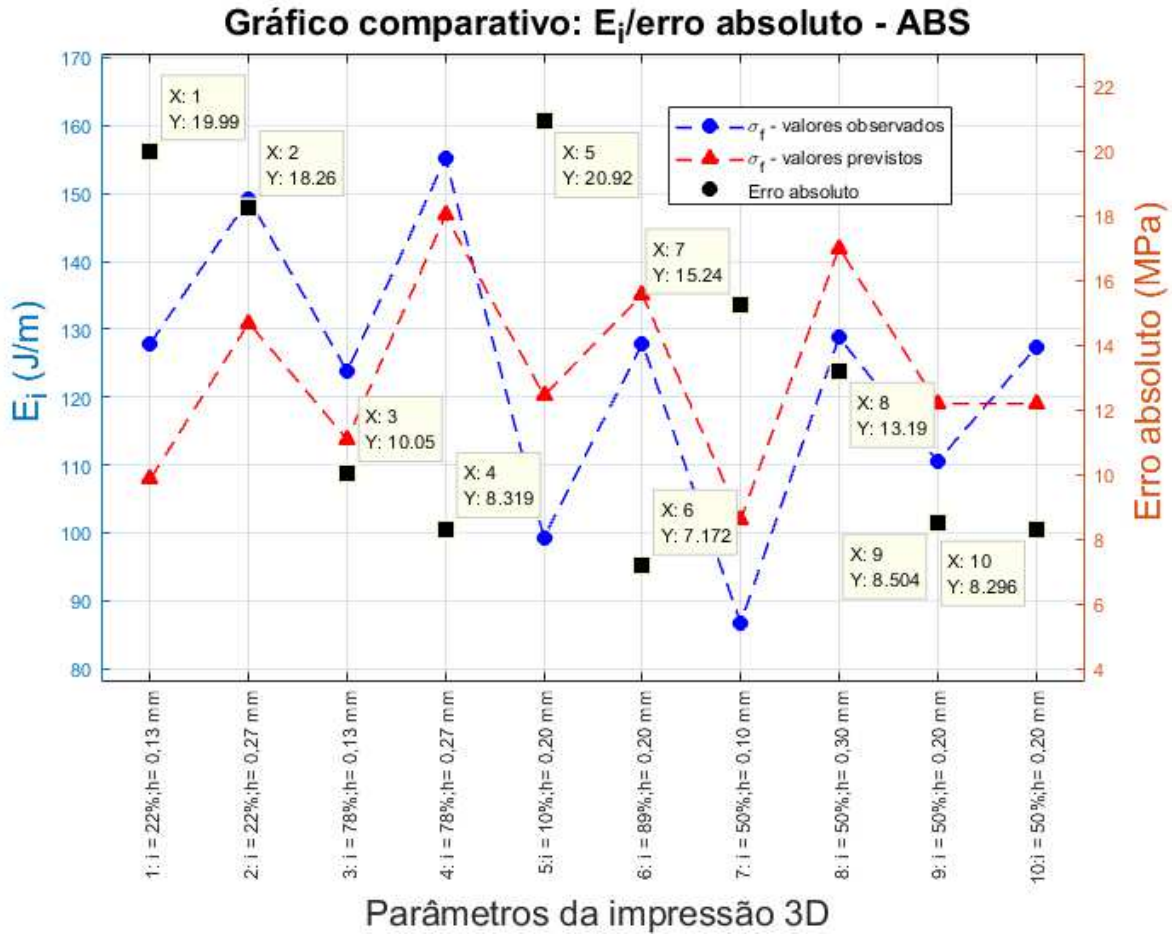
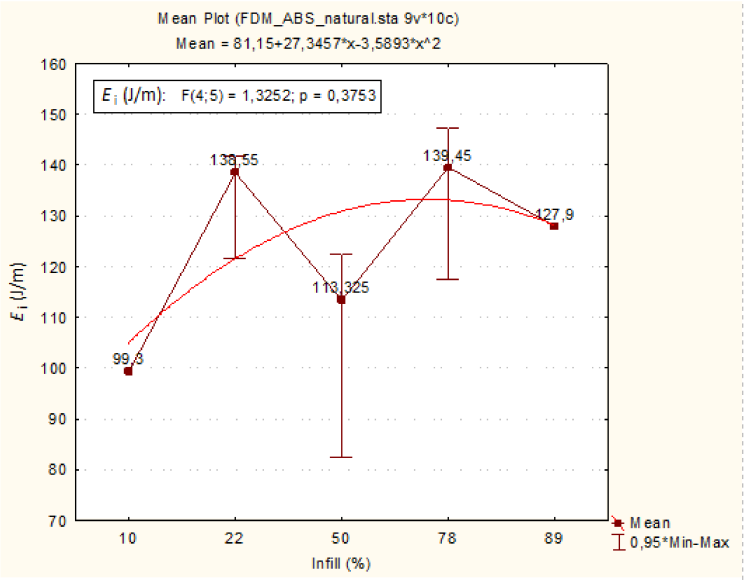
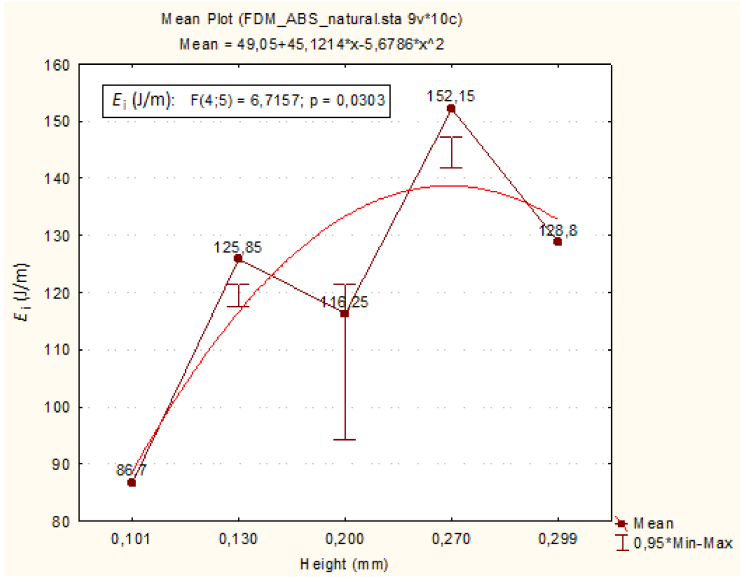


Figura 4.49 – Gráfico comparativo entre o modelo proposto x observado e erro absoluto: E_i - matéria-prima: ABS

aumenta até aproximadamente 0,27mm quando começa a diminuir até atingir o limite (0,30mm). Nenhum dos fatores avaliados tiveram significância estatística conforme análise ANOVA (Tab. 4.47).



(a) Gráfico: E_i x *infill*



(b) Gráfico: E_i x *height*

Figura 4.50 – Gráficos: E_i x (*infill*/*height*) - matéria-prima: ABS

4.3.6 Ensaio de impacto-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria prima ABS-granulado

Os valores experimentais (média de 5 amostras), dos CPs produzidos pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima ABS-granulado, foram transcrito na Tab. 4.48.

Tabela 4.48 – Valor experimental do ensaio de impacto com a matéria-prima ABS-granulado (moldagem por injeção)

Matéria-prima	E_i (J/m)
ABS-granulado	221,2

4.3.7 Ensaio de impacto-Discussão dos resultados

O gráfico da Fig.4.51, mostra os resultados dos ensaios de impacto feitos nas amostras manufaturadas pelo processo FDM e moldagem por injeção. Dentro do processo FDM, os CPs manufaturados com o PLA-grafeno tiveram, em média, energia de impacto 15,8% maior que os CPs que utilizaram o PLA. Já os CPs manufaturados pelo processo de moldagem por injeção, tiveram a mesma energia de impacto 61,9% maior variando-se somente a cor da matéria-prima utilizada (PLA-incolor e PLA-branco). Não houve um comportamento bem definido para os processos FDM/moldagem por injeção pois a energia de impacto média obtida no ensaio de PLA-grafeno (58,92 J/m) foi ligeiramente inferior a obtida nos CPs manufaturados com a matéria-prima PLA de coloração branca no processo de moldagem por injeção (64,6 J/m). Neste caso houve uma redução de 9,64%. Os CPs manufaturados pelo processo FDM e que utilizaram a matéria-prima ABS-grafeno tiveram, em média, energia de impacto 63,1% menor que as peças que utilizaram o ABS. Já os CPs manufaturados pelo processo de moldagem por injeção e que utilizaram a matéria-prima ABS-granulado tiveram a mesma energia de impacto 78,7% maior que o ABS e 183,4% maior que o ABS-grafeno.

A Fig.4.52, apresenta as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do PLA-grafeno em diferentes ampliações. É possível observar uma morfologia de fratura mais áspera, característica de um material dúctil, conforme já observado no ensaio de impacto. Essa morfologia mais áspera é decorrente do empacotamento das camadas grafíticas na matriz, que estão distribuídas em diferentes orientações (LIU; YAO; LIU, 2012) e (LIU; YAO; ZHOU, 2016). Além disso, vale salientar que não foi observada nenhum tipo de aglomerado, recorrente em maiores concentrações de grafeno. O aumento em massa do óxido de grafeno (OG) induz a formação de aglomerados na estrutura da matriz polimérica, resultando em uma redução da resistência ao impacto, devido a formação de pontos de tensões, gerando assim uma maior

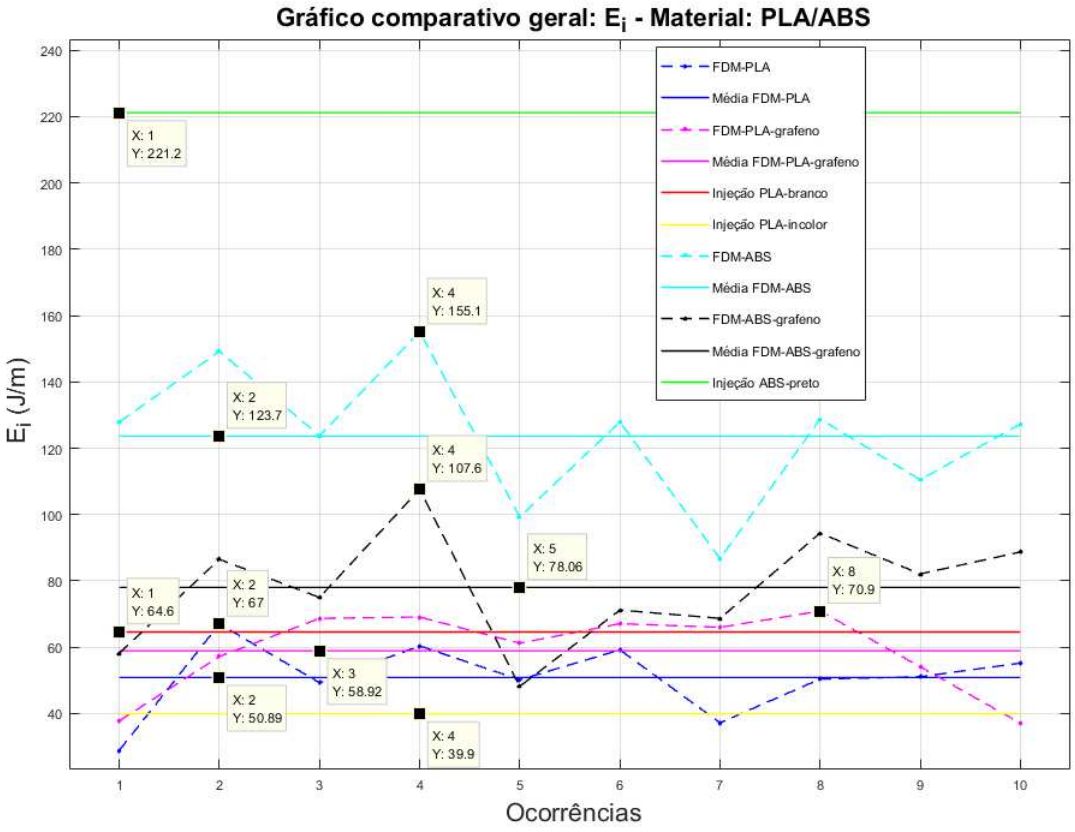
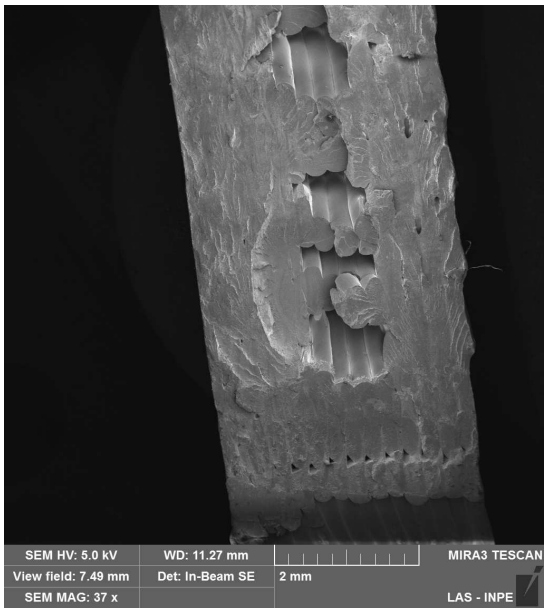


Figura 4.51 – Gráfico comparativo geral: E_i - matéria-prima: PLA/ABS

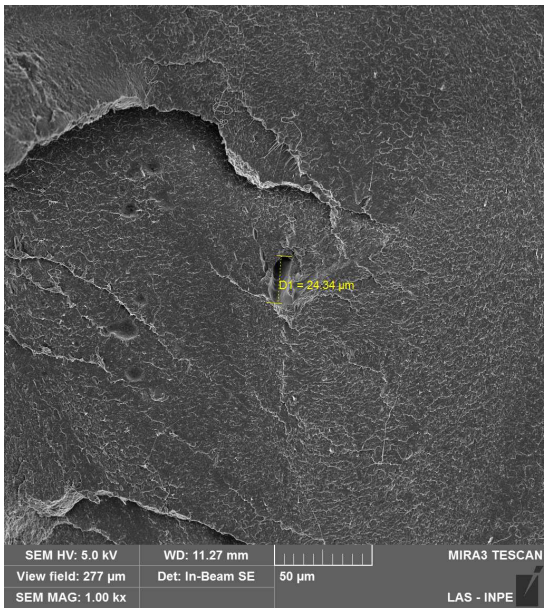
fragilidade da matéria-prima e prejudicando as propriedades mecânicas. As imagens MEV revelam que houve uma boa dispersão do carbono na matriz polimérica.

Os resultados dos ensaios impactos do PLA-grafeno podem ser explicados pelas características estruturais do grafeno presente neste polímero. De acordo com (KANG; RHEE; PARK, 2016) o aumento da resistência nos compósitos reforçados com OG se deve a forte ligação de hidrogênio entre os grupos funcionais do OG e do polímero. Os grupos funcionais presentes no óxido, que se ligam no polímero, geram uma maior compatibilidade na matriz polimérica, proporcionando melhorias na matéria-prima reforçada, onde com o aumento da carga, ocorreu um aumento da interação entre o polímero e reforço (grafeno).

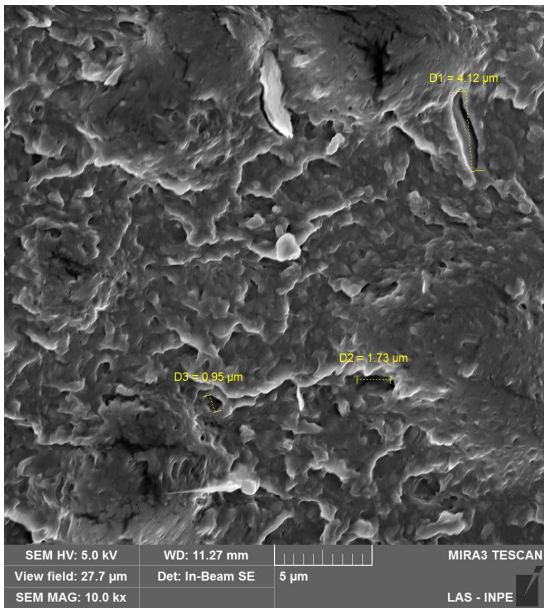
Nos ensaios de impacto realizados nos CPs manufaturados com a matéria-prima ABS, houve um comportamento superior ao PLA porque a porção butadieno (borracha) do ABS é responsável por melhorar a resistência ao impacto, tenacidade e flexibilidade. O comportamento do ABS-grafeno pode ser explicado pelas características estruturais (inserção de carga de grafite) o qual fragilizou a estrutura molecular da matéria-prima e causou menor influência do butadieno



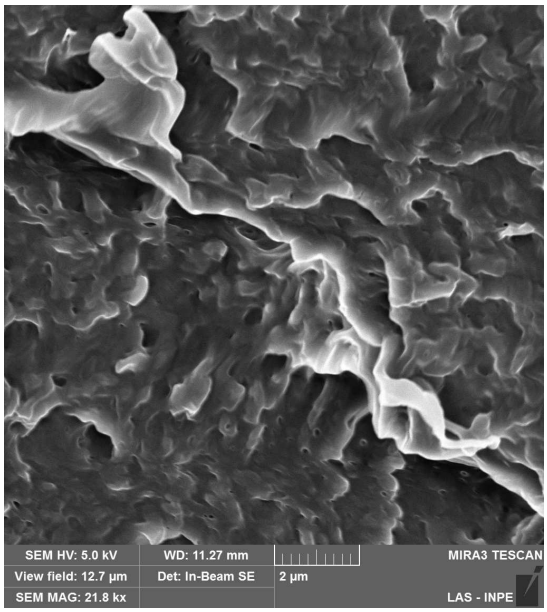
(a) MEV - Ampliação 37x



(b) MEV - Ampliação 1kx



(c) MEV - Ampliação 10kx



(d) MEV - Ampliação 21kx

Figura 4.52 – MEV do CP após ensaio de impacto com diferentes ampliações manufaturados com a matéria-prima PLA-grafeno

nos CPs. O fornecedor não especifica a quantidade de grafeno adicionado entretanto foi feita uma estimativa através do ensaio EDS realizado com o filamento do ABS-grafeno fornecido (Fig.4.54). Os resultados deste ensaio, foram compilados na Fig.4.54, e consta que a quantidade de C em 100% o que explica este comportamento neste ensaio.

A Fig.4.53 apresenta as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do ABS-grafeno em diferentes ampliações. É possível observar uma morfologia de fratura mais

áspera característica de um material dúctil, conforme já observado no ensaio de impacto. Essa morfologia mais áspera é decorrente do empacotamento das camadas grafíticas na matriz, que estão distribuídas em diferentes orientações (LIU; YAO; LIU, 2012) e (LIU; YAO; ZHOU, 2016). Além disso, vale salientar que não foi observada nenhum tipo de aglomerado, recorrente em maiores concentrações de grafeno. O aumento em massa do óxido de grafeno (OG) induz a formação de aglomerados na estrutura da matriz polimérica, resultando em uma redução da resistência ao impacto, devido a formação de pontos de tensões, gerando assim uma maior fragilidade do material e prejudicando as propriedades mecânicas. As imagens MEV revelam que houve uma boa dispersão do carbono na matriz polimérica porém neste caso específico do ABS-grafeno (elevada quantidade de C com percentual 100%), a presença do grafeno fragilizou os CPs e os valores do ensaio de impacto foram menores do que os valores obtidos nas amostras com o ABS.

4.4 Resultados dos ensaios resistividade e condutividade elétrica

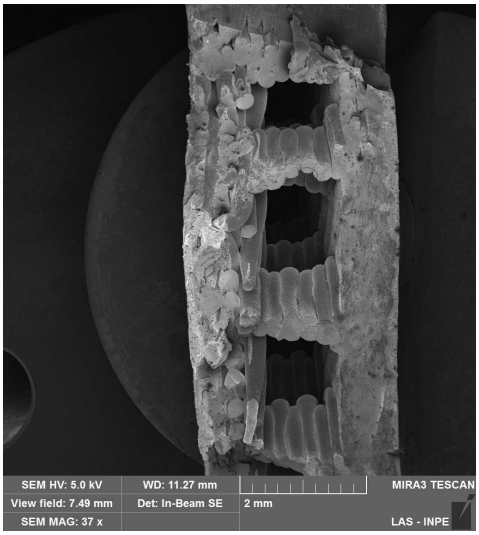
4.4.1 Ensaio de resistividade e condutividade elétrica-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno

Os resultados do ensaios resistividade/condutividade, realizados nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno ficaram muito próximos do infinito para a resistividade e próxima de zero para a condutividade. Isto significa que estes CPs que utilizaram esta matéria-prima na manufatura, embora possuindo na sua composição grafeno, não teve nenhuma condutividade e pode-se classificá-lo como não condutivo.

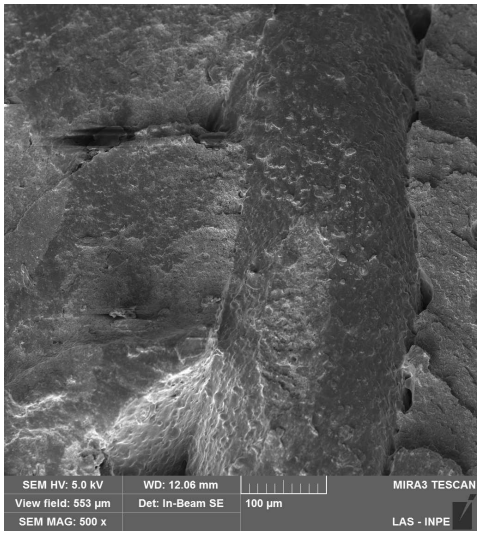
4.4.2 Ensaio de resistividade e condutividade elétrica-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria prima ABS-grafeno

Os resultados do ensaios resistividade/condutividade, realizados nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno, foram transcritos na Tab. 4.49.

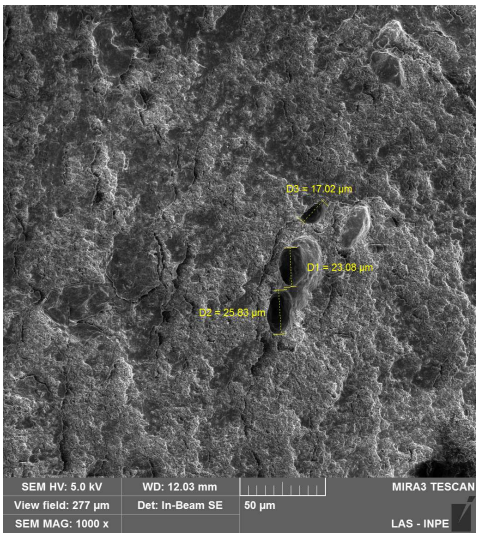
Segundo (SMITH WILLIAM F.; HASHEMI, 2012), os bons condutores elétricos, como prata, cobre e ouro, possuem condutividade-σ, na ordem de 10^7 $(\Omega.m)^{-1}$. No outro extremo, estão os materiais que são classificados como não condutores (condutividade-σ, na ordem de 10^{-14}



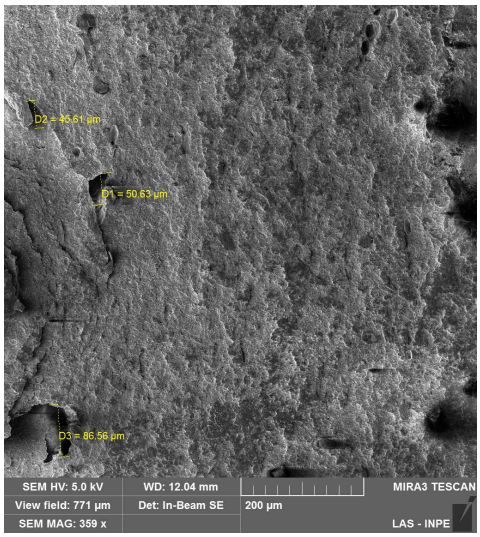
(a) MEV - Ampliação 37x



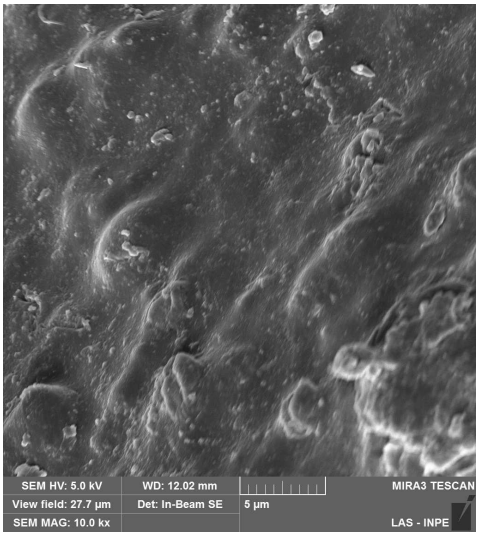
(b) MEV - Ampliação 0,5Kx



(c) MEV - Ampliação 1kx



(d) MEV - Ampliação 5kx



(e) MEV - Ampliação 10kx

Figura 4.53 – MEV do CP após ensaio de impacto com diferentes ampliações manufaturados com a matéria-prima ABS-grafeno

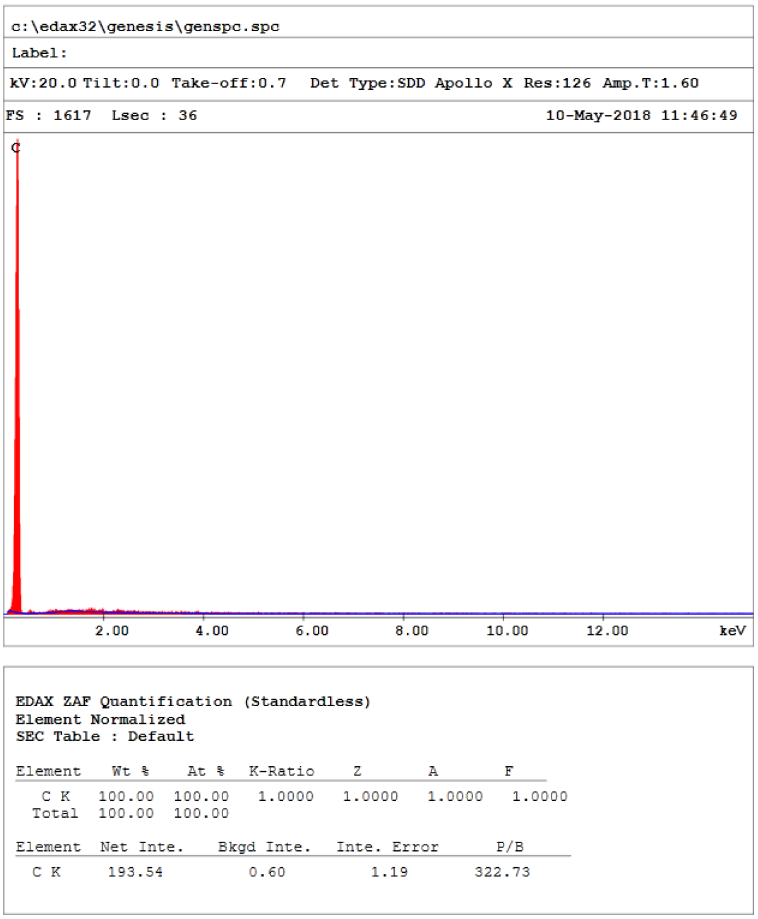


Figura 4.54 – EDS do CP após ensaio de impacto com a matéria-prima ABS-grafeno

Tabela 4.49 – Tab. dos valores de resistividade/condutividade elétrica: matéria-prima ABS-grafeno

Processo FDM - impressora 3D								
	Dimensões			Valores experimentais		Resistência	Resistividade	Condutividade
CPs	l	w	t	V	i	R	ρ	σ
	(mm)	(mm)	(mm)	(Volts)	(mA)	(Ω)	($\Omega.m$)	$(\Omega.m)^{-1}$
ABS-01	30,34	25,08	4,10	0,485	0,465	1043	3,53	2,83E-01
ABS-01	30,34	25,08	4,10	1,594	1,204	1324	4,49	2,23E-01
ABS-02	30,20	25,06	4,10	0,928	0,832	1115	3,79	2,64E-01
ABS-02	30,20	25,06	4,10	2,460	1,781	1381	4,70	2,13E-01

$(\Omega.m)^{-1}$). Na faixa intermediária estão os materiais classificados como semi-condutores, os quais possuem condutividade-σ, na faixa de 10^{1} a 10^{-4} $(\Omega.m)^{-1}$). O valor médio de condutividade, obtidos nos ensaios dos CPs manufaturados pelo processo FDM e que utilizaram a matéria-prima ABS-grafeno, foi 2,46.10^{-1} $(\Omega.m)^{-1}$ e pode ser classificado como um semi-condutor.

A melhora da condutividade nos polímeros está relacionada a adição de bons metais condutores como prata, cobre etc. O responsável pela condutividade do ABS-grafeno é o

grafeno. O ensaio EDS, realizado na amostra ensaiada, revela que a quantidade de C foi de 100% (Fig.4.54), entretanto, não foi possível nos ensaios realizados, estabelecer relação entre a quantidade de grafeno e a condutividade elétrica, porém pode-se concluir que quanto maior a quantidade de grafeno melhor a condutividade elétrica.

4.5 Resultados dos ensaios tribológicos

4.5.1 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno

Os resultados dos ensaios experimentais, para determinação do CoF (coeficiente de atrito), obtidos nas amostras produzidas através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA-grafeno, foram transcritos na Tab. 4.50 e no gráfico da Fig.4.55.

Tabela 4.50 – Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-grafeno

	Carga normal		
Amostras	10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,0502	0,0225	0,0231
Amostra 02	0,0590	0,0425	0,0249
Amostra 03	0,0551	0,0437	0,0466
Média	0,0548	0,0363	0,0316

Os valores do coeficiente de atrito (CoF) em função do tempo, obtidos nos ensaios realizados no tribômetro, foram plotados nos gráficos das Figuras 4.56, 4.57 e 4.58.

Os resultados dos ensaios experimentais, para determinação do desgaste obtido nos ensaios tribológicos (*reciprocating*), realizados nos CPS produzidos através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA-grafeno, foram transcritos na Tab. 4.51 e no gráfico da Fig.4.59.

O gráfico da Fig.4.60, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno, para o carregamento de 10N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 10N foi 0,1473 mm (Tab. 4.51) e nota-se, que aproximadamente 40% do desgaste médio total

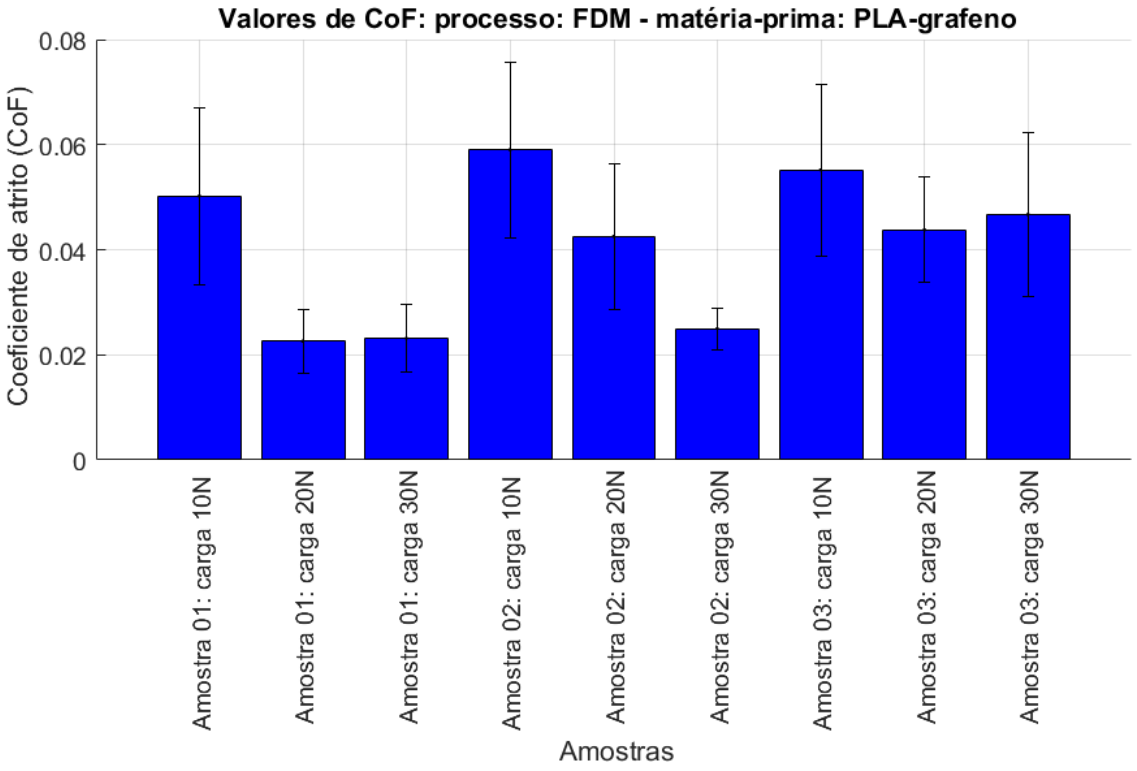


Figura 4.55 – Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima - PLA-grafeno

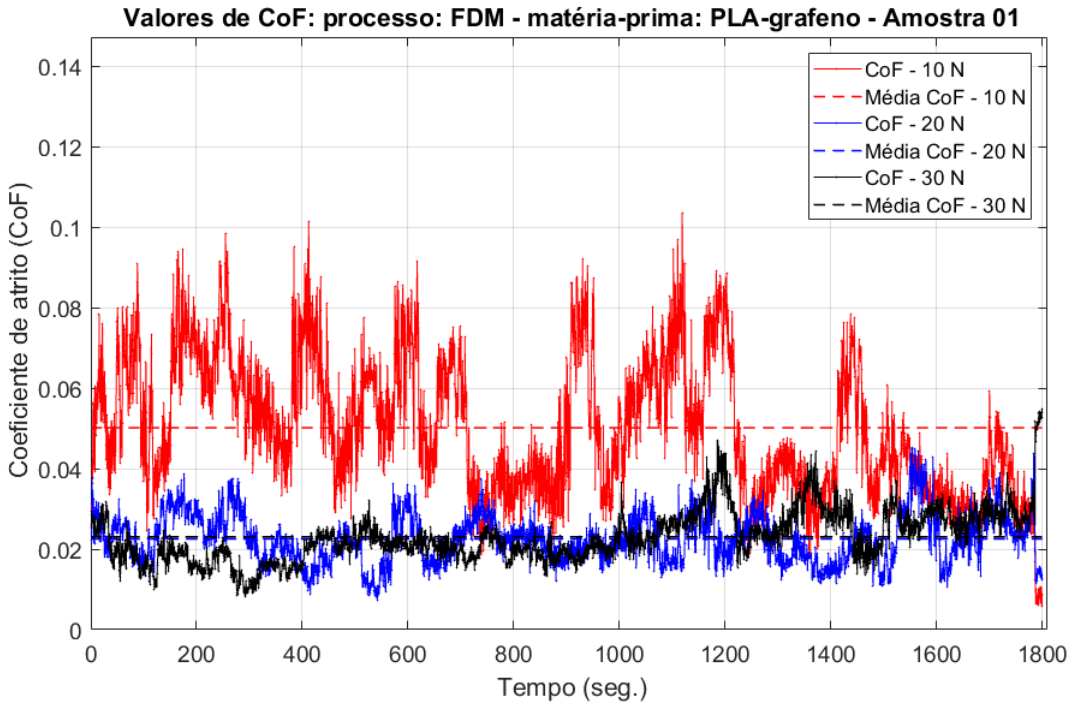


Figura 4.56 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 01

ocorre nos primeiros 40 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.61).

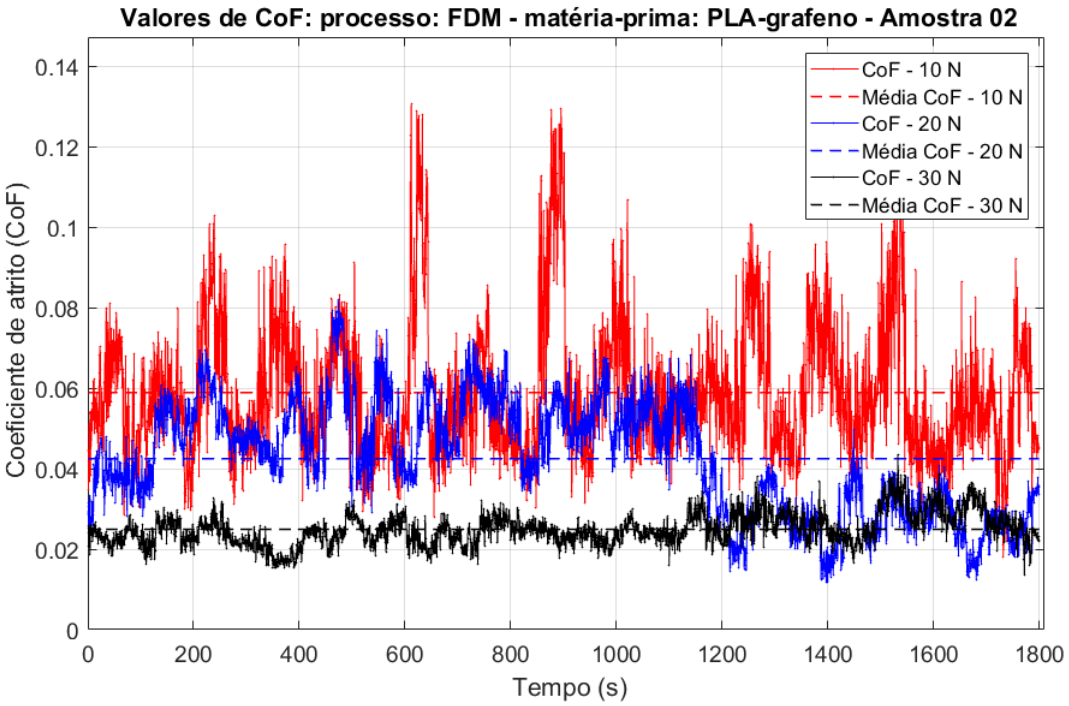


Figura 4.57 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 02

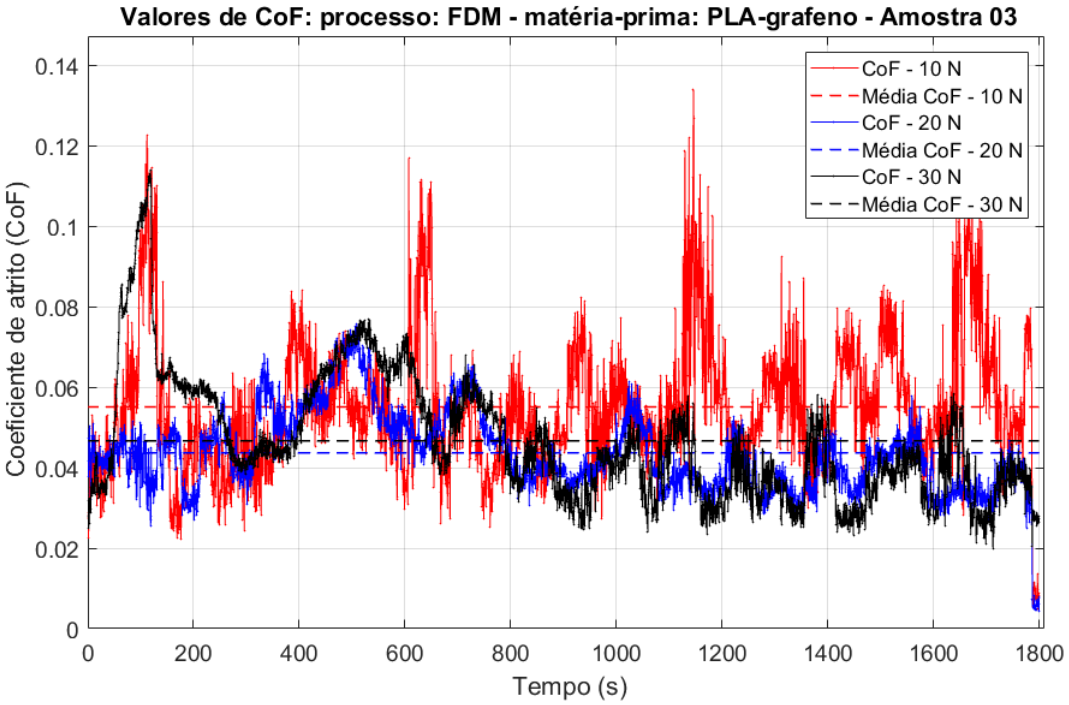


Figura 4.58 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 03

O gráfico da Fig.4.62, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno, para o carregamento de 20N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio

Tabela 4.51 – Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-grafeno

Amostras	Carga normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,1949	0,3087	0,4658
Amostra 02	0,1186	0,3007	0,4027
Amostra 03	0,1285	0,2752	0,5440
Média	0,1473	0,2948	0,4708

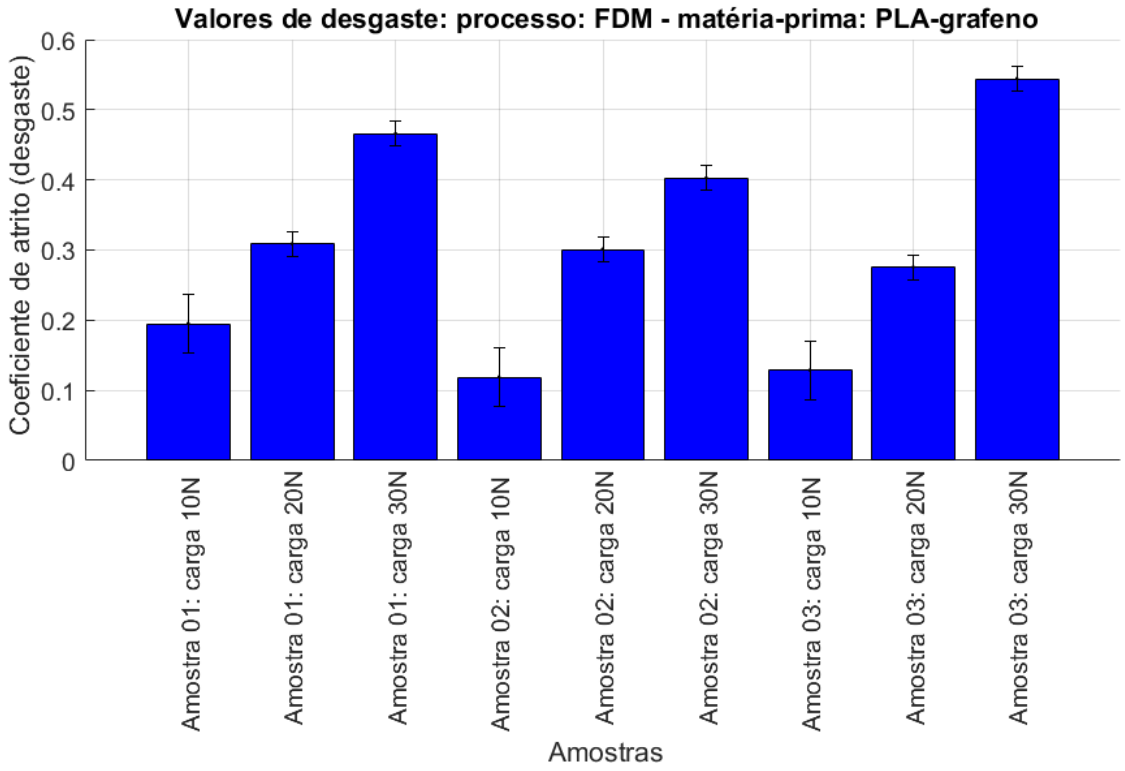


Figura 4.59 – Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-grafeno

foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 20N foi 0,2948 mm (Tab. 4.51) e nota-se, que aproximadamente 44% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 53 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.63).

O gráfico da Fig.4.64, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno, para o carregamento de 30N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a

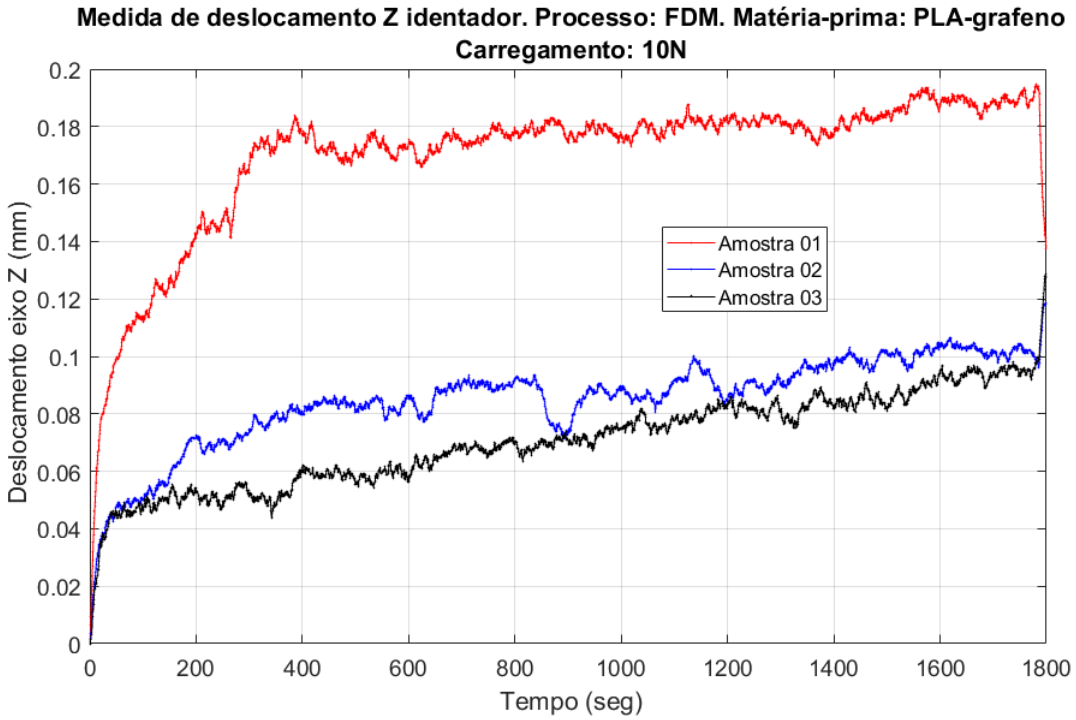


Figura 4.60 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: PLA-grafeno

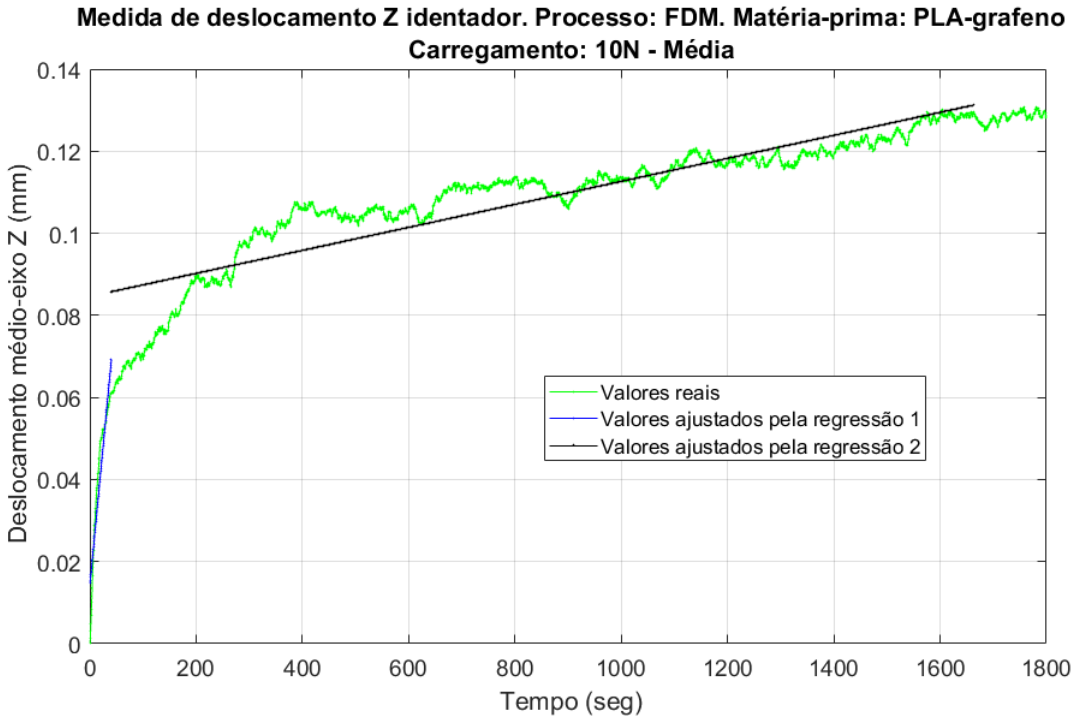


Figura 4.61 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: PLA-grafeno

30N foi 0,4708 mm (Tab. 4.51) e nota-se, que aproximadamente 57% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 138 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da

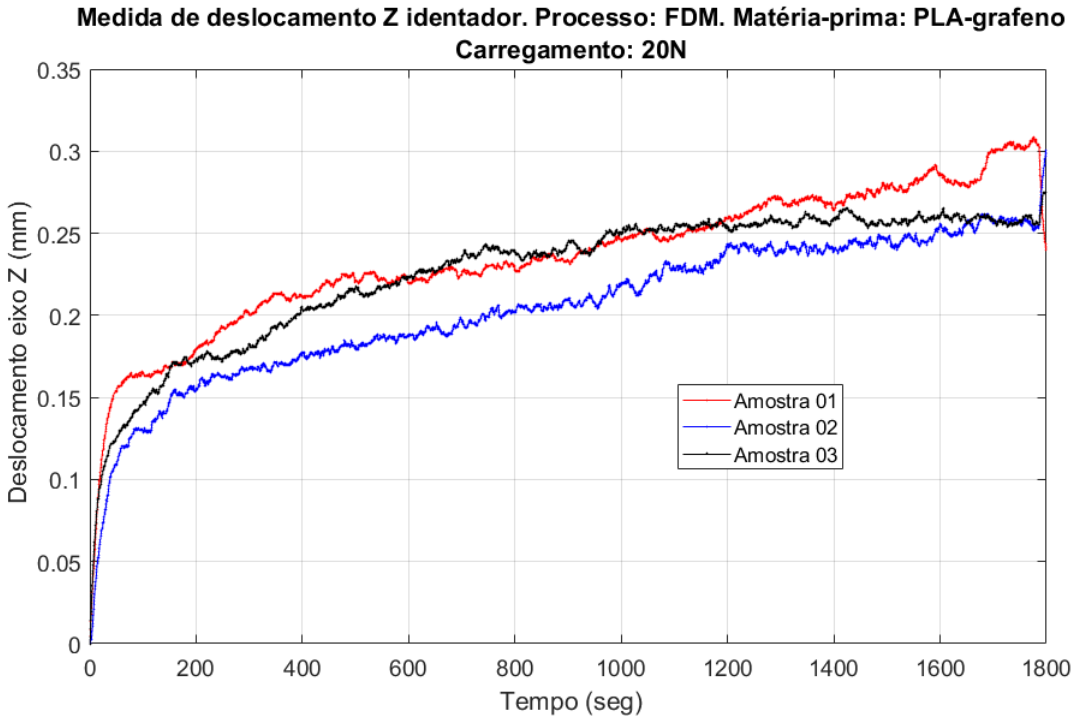


Figura 4.62 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: PLA-grafeno

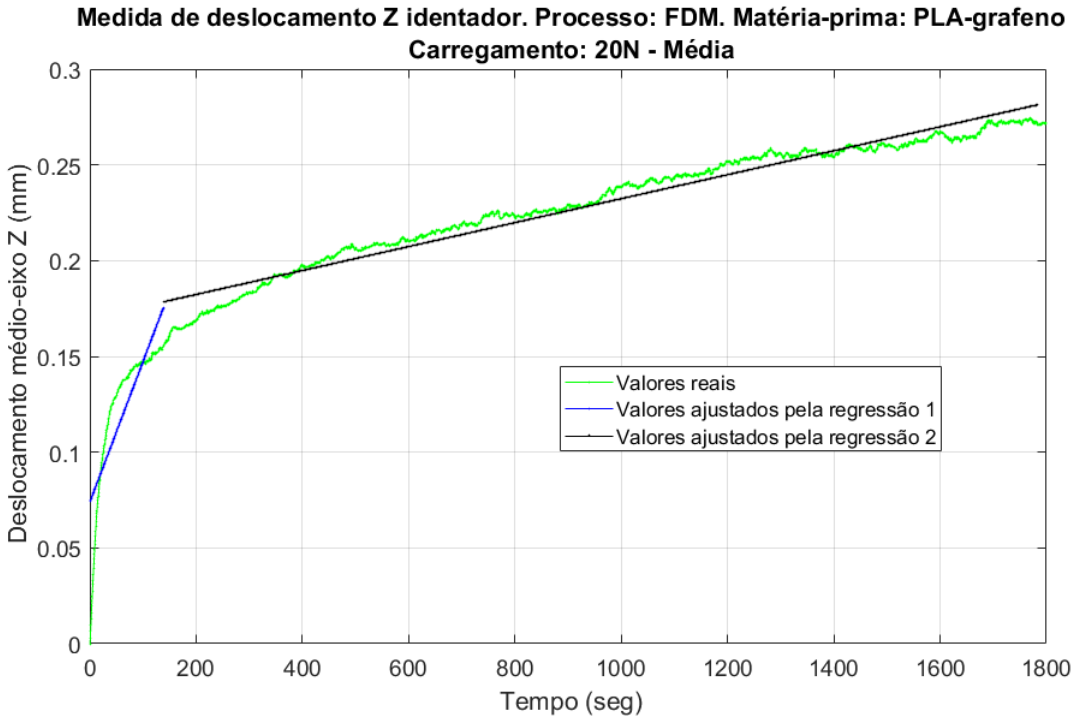


Figura 4.63 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: PLA-grafeno

Fig.4.65).

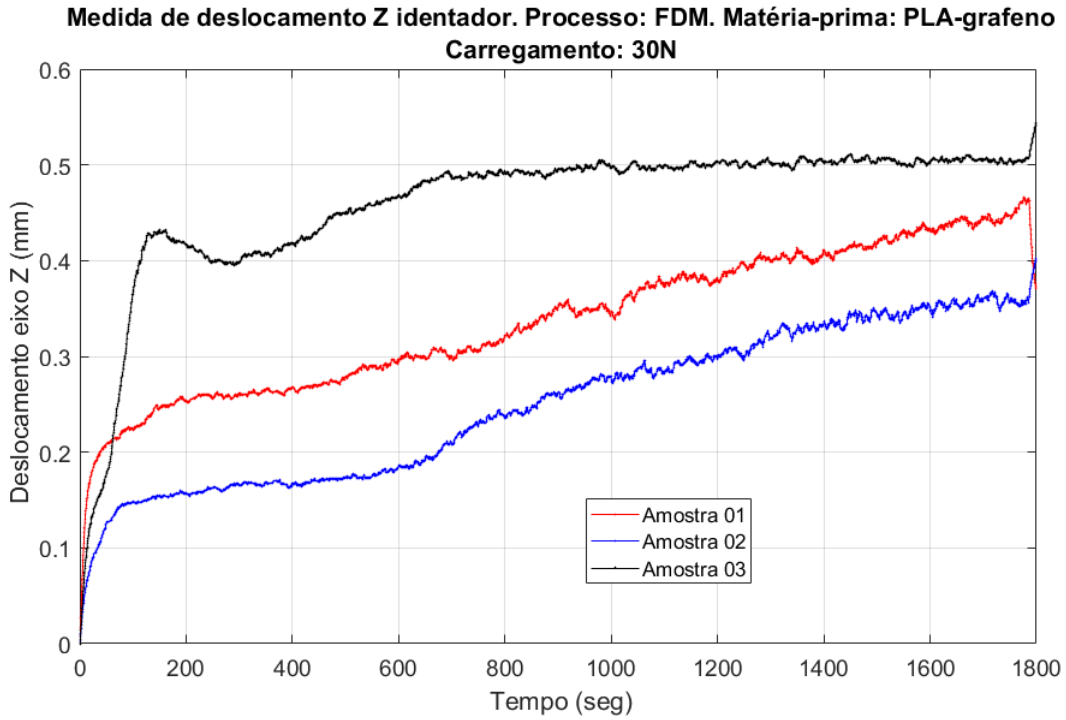


Figura 4.64 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: PLA-grafeno

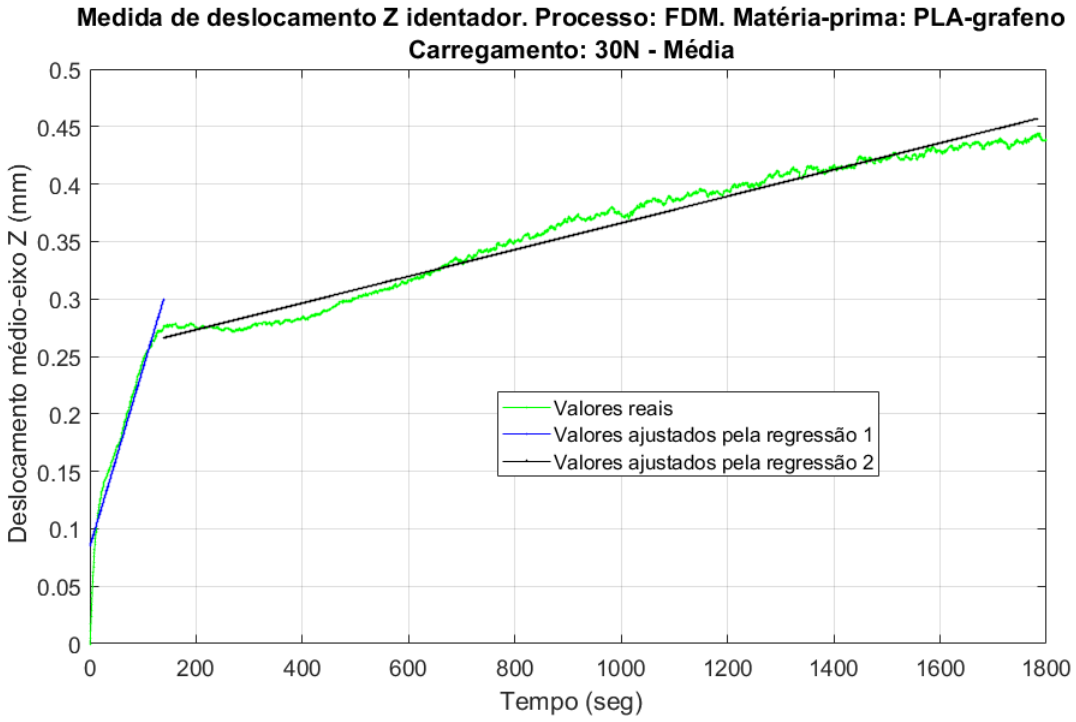


Figura 4.65 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: PLA-grafeno

4.5.2 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA

Os resultados dos ensaios experimentais para determinação do CoF (coeficiente de atrito), obtidos nas amostras produzidas através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA, foram transcritos na Tab. 4.52 e no gráfico da Fig..

Tabela 4.52 – Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA

Amostras	Carga Normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,0537	0,0241	0,0189
Amostra 02	0,0654	0,0235	0,0189
Amostra 03	0,0285	0,0211	0,0181
Média	0,0492	0,0229	0,0186

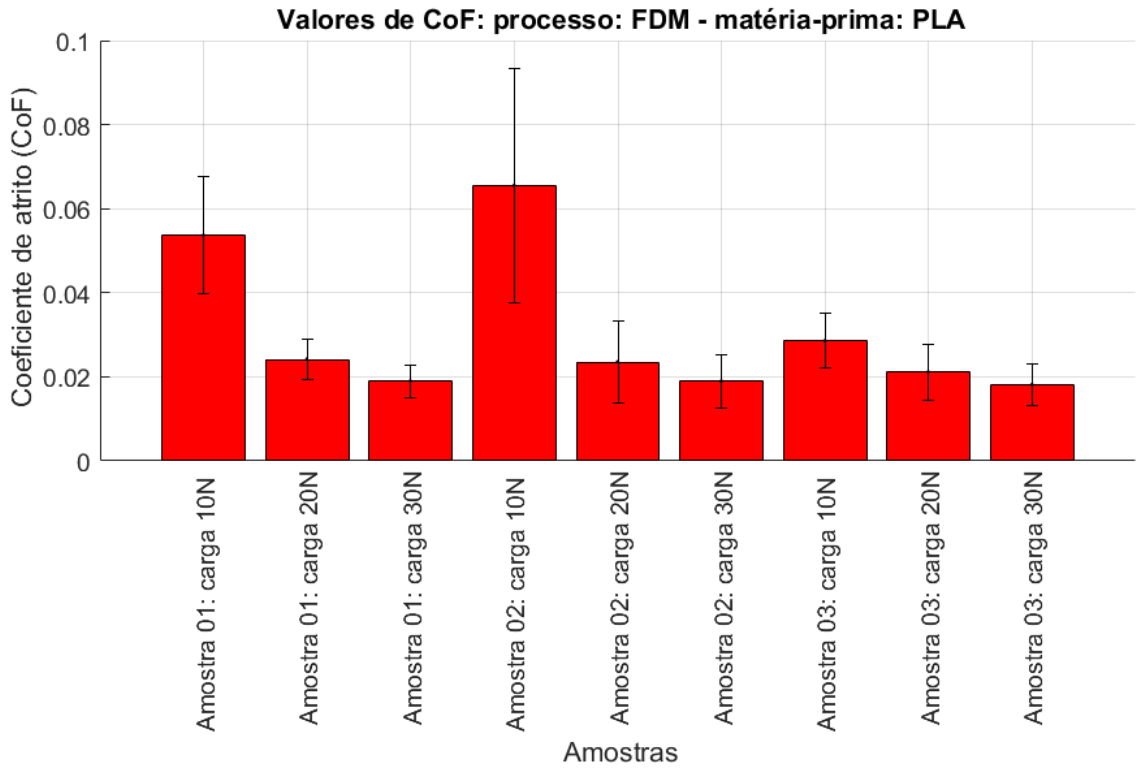


Figura 4.66 – Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima: PLA

Os valores do coeficiente de atrito (CoF) em função do tempo, obtidos nos ensaios realizados no tribômetro, foram plotados nos gráficos das Figuras 4.67, 4.68 e 4.69.

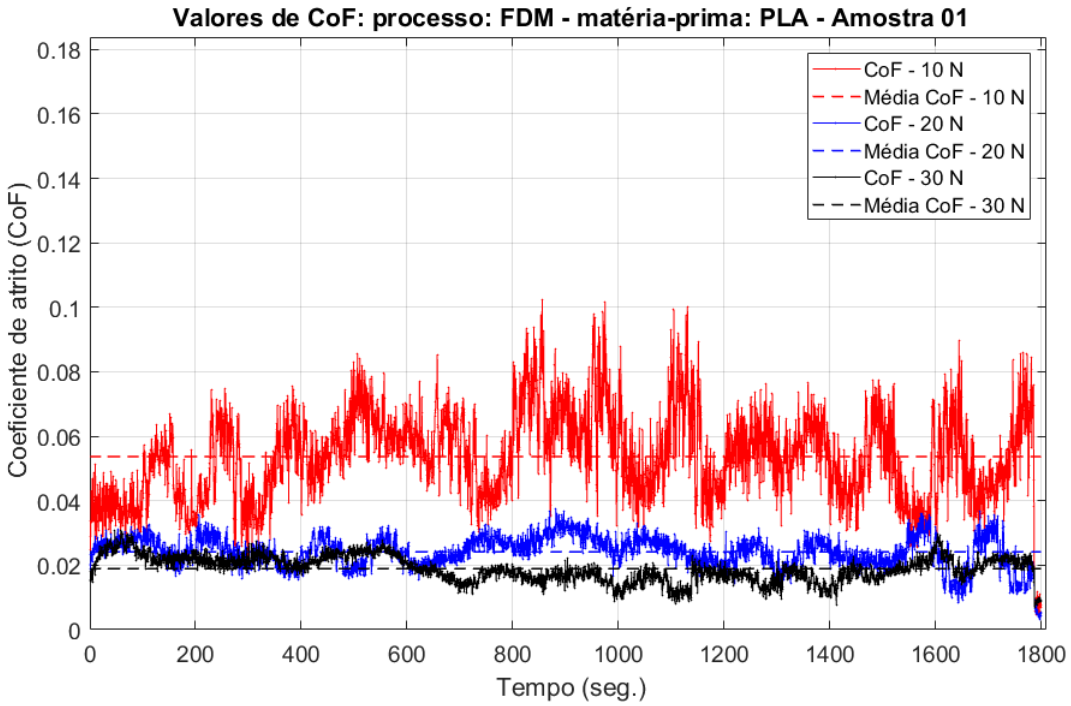


Figura 4.67 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 01

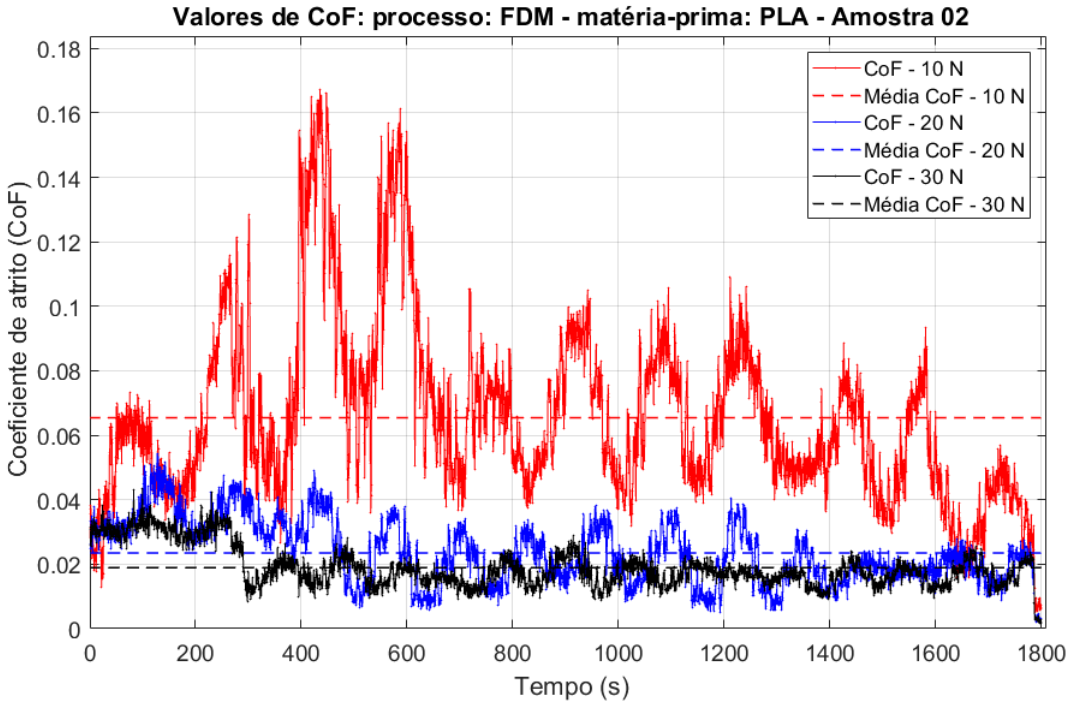


Figura 4.68 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 02

Os resultados dos ensaios experimentais, para determinação do desgaste obtido nos ensaios tribológicos (*reciprocating*), realizados nos CPs produzidos através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA, foram transcritos na Tab. 4.53 e no gráfico da Fig.4.70.

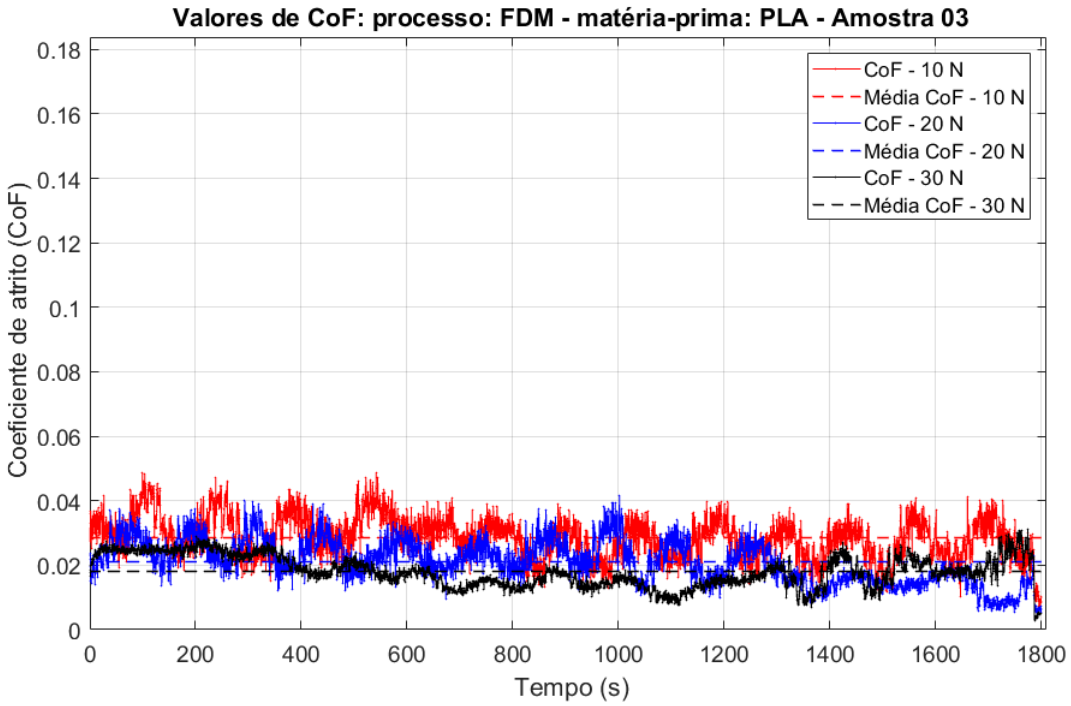


Figura 4.69 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 03

Tabela 4.53 – Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA

Amostras	Carga normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,0862	0,1143	0,1175
Amostra 02	0,1149	0,1260	0,1199
Amostra 03	0,0575	0,1117	0,0700
Média	0,0862	0,1173	0,1025

O gráfico da Fig.4.71, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno, para o carregamento de 10N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 10N foi 0,0862 mm (Tab. 4.53) e nota-se, que aproximadamente 42% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 49 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.72).

O gráfico da Fig.4.73, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-

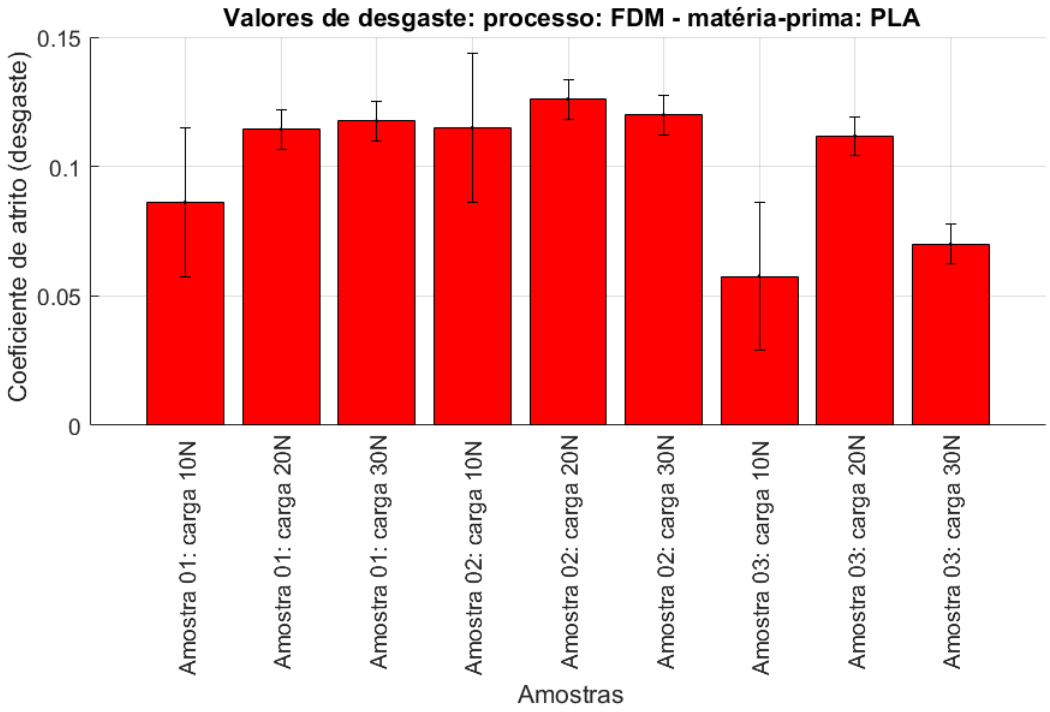


Figura 4.70 – Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA

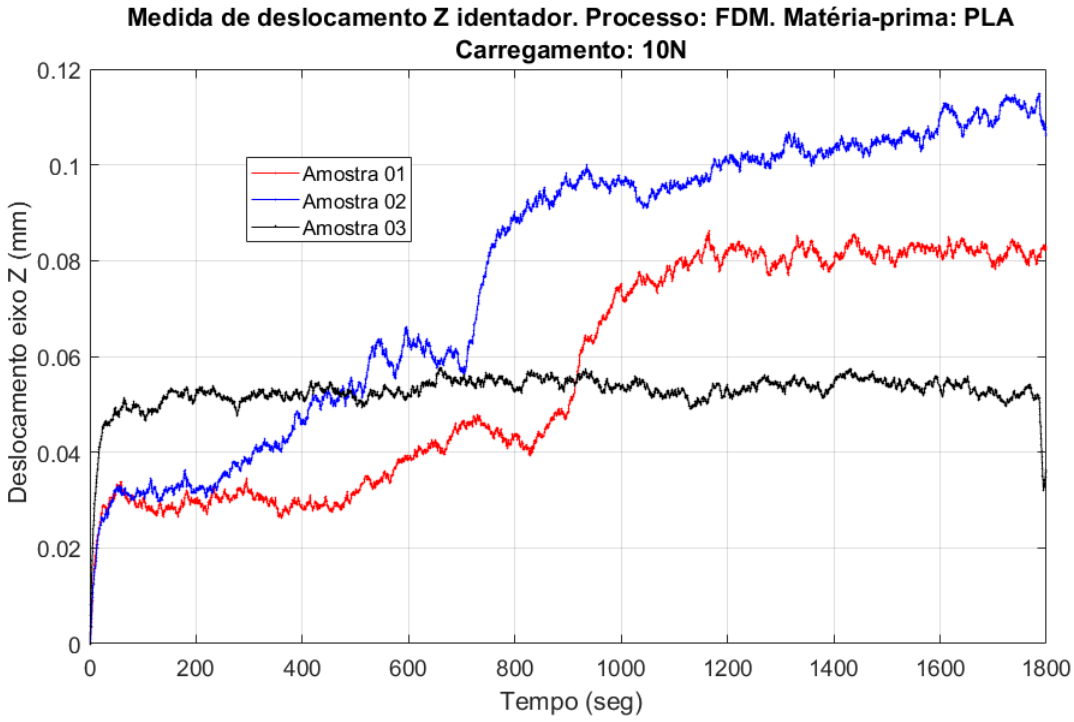


Figura 4.71 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: PLA

prima PLA-grafeno, para o carregamento de 20N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a

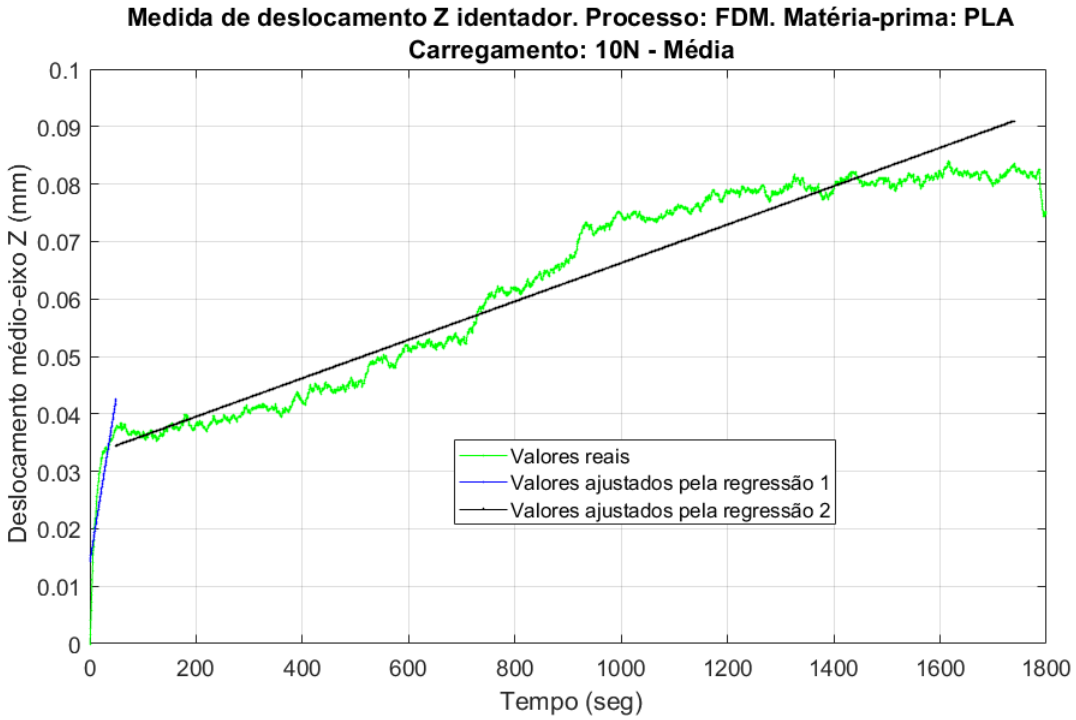


Figura 4.72 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: PLA

20N foi 0,1173 mm (Tab. 4.53) e nota-se, que aproximadamente 63% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 40 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.74). Pode-se observar que o desgaste da amostra 01, no tempo de aproximadamente 700 seg., teve um aumento brusco e em curto espaço de tempo. Foi verificado o CP referente a este ensaio, e a causa mais provável desta ocorrência foi a pequena movimentação do CP provocada provavelmente pela má fixação na mesa do tribômetro. Como os resultados foram analisados após a realização dos ensaios, não foi possível fabricar outro CP e refazer o ensaio para confirmar os resultados, uma vez que o comportamento do desgaste observado nos CPs 02 e 03 foram totalmente diferentes, entretanto, o desgaste total observado na amostra 01 foi igual a 0,1143 (0,003 mm de diferença em relação a média). Em função desta inexpressiva diferença o valor foi computado no cálculo da média geral referente ao carregamento de 20N.

O gráfico da Fig.4.75, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno, para o carregamento de 30N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 30N foi 0,1025 mm (Tab. 4.53) e nota-se, que aproximadamente 54% do desgaste médio total

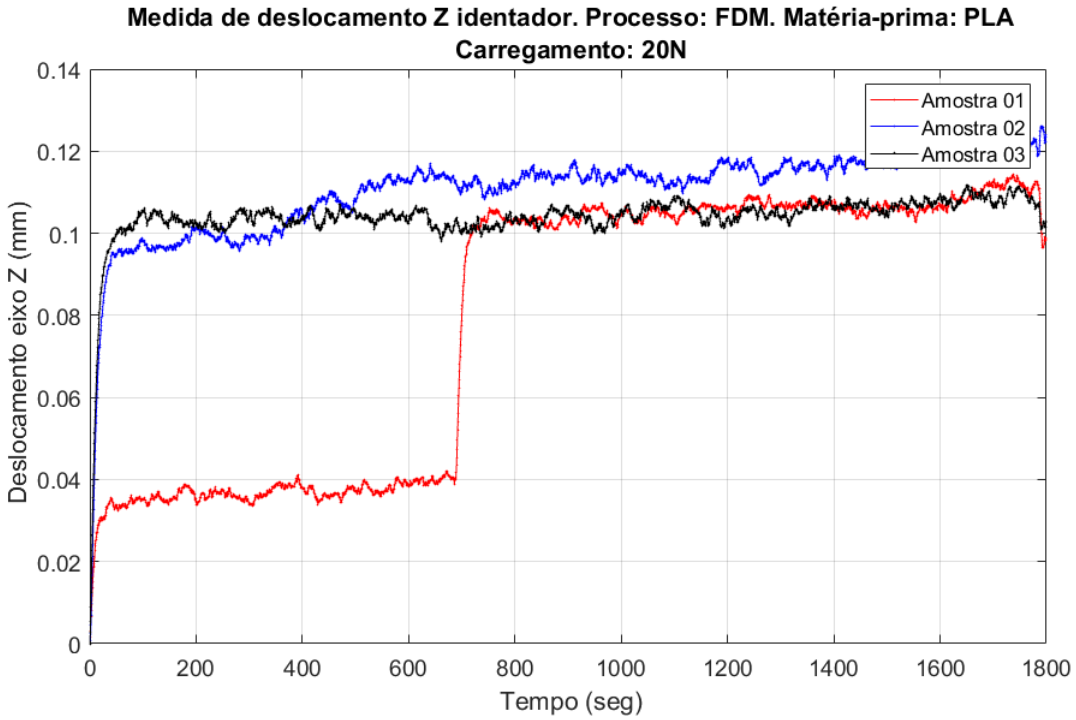


Figura 4.73 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: PLA

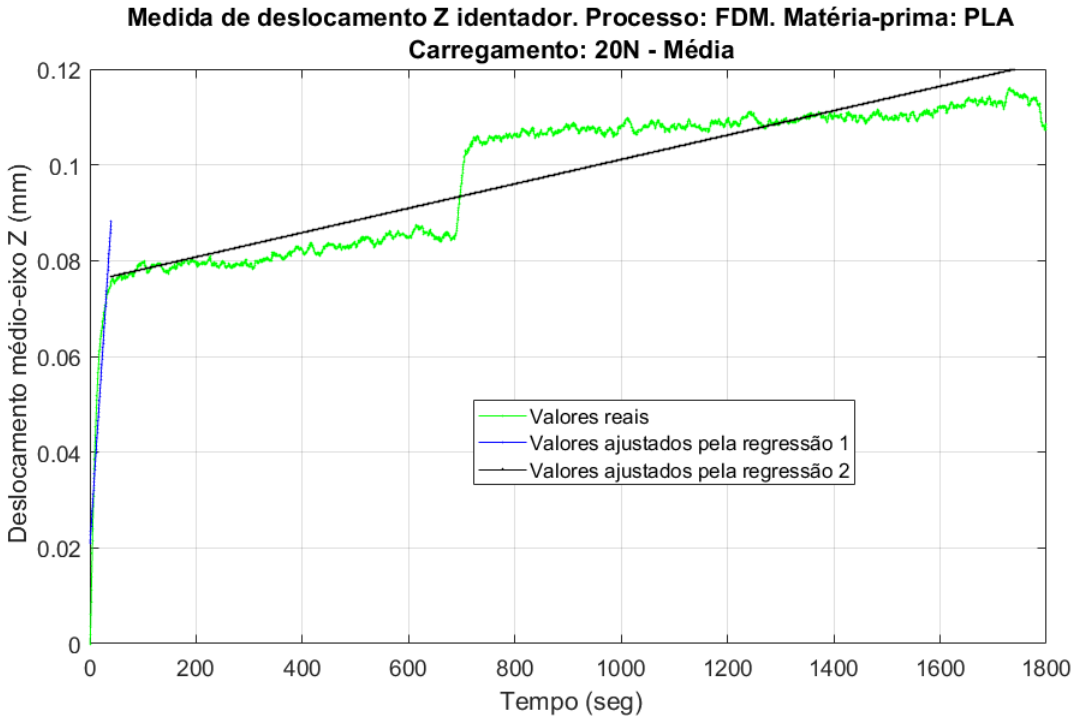


Figura 4.74 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: PLA

ocorre nos primeiros 34 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.76).

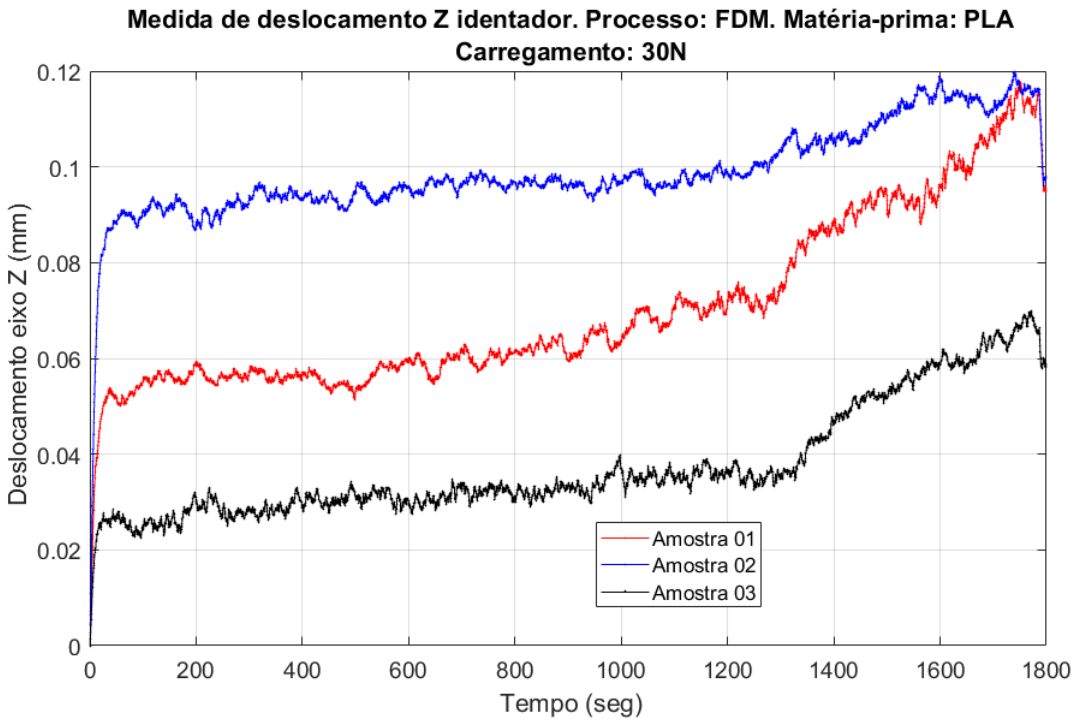


Figura 4.75 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: PLA

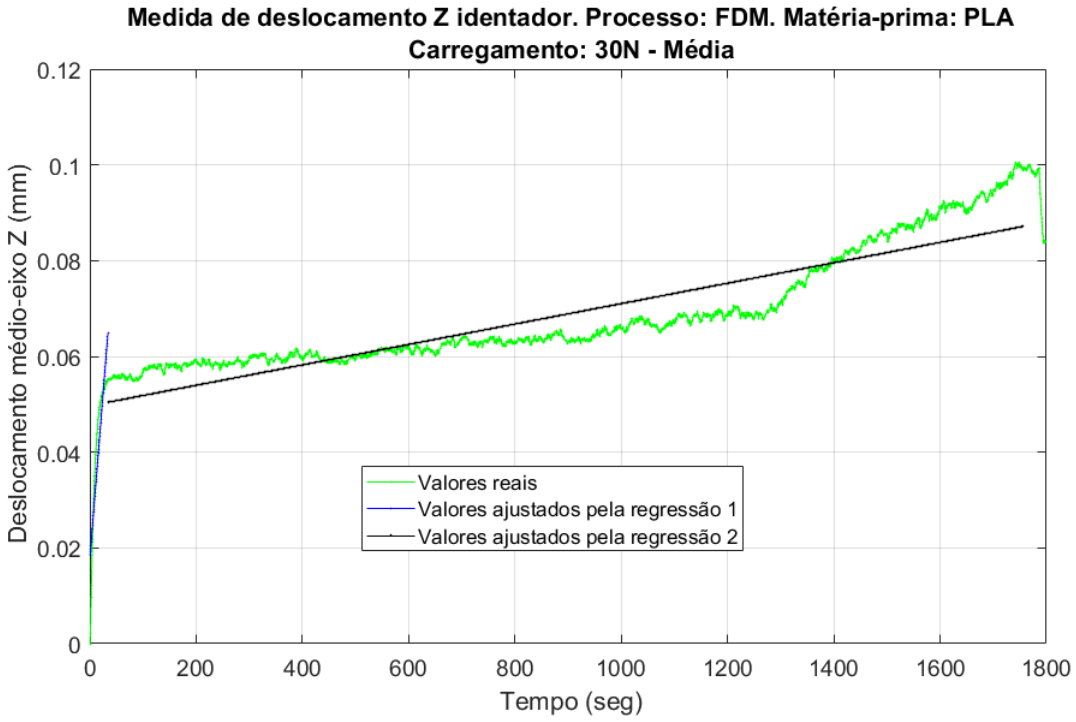


Figura 4.76 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: PLA

4.5.3 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo de moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado branco

Os resultados dos ensaios experimentais para determinação do CoF (coeficiente de atrito), obtidos nas amostras produzidas através do processo de moldagem por injeção e utilizando a matéria-prima PLA-granulado branco, foram transcritos na Tab. 4.54 e no gráfico da Fig.4.77.

Tabela 4.54 – Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-granulado branco

Amostras	Carga normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,1168	0,0588	0,0187
Amostra 02	0,1006	0,0357	0,0164
Amostra 03	0,0975	0,0426	0,0180
Média	0,1049	0,0457	0,0177

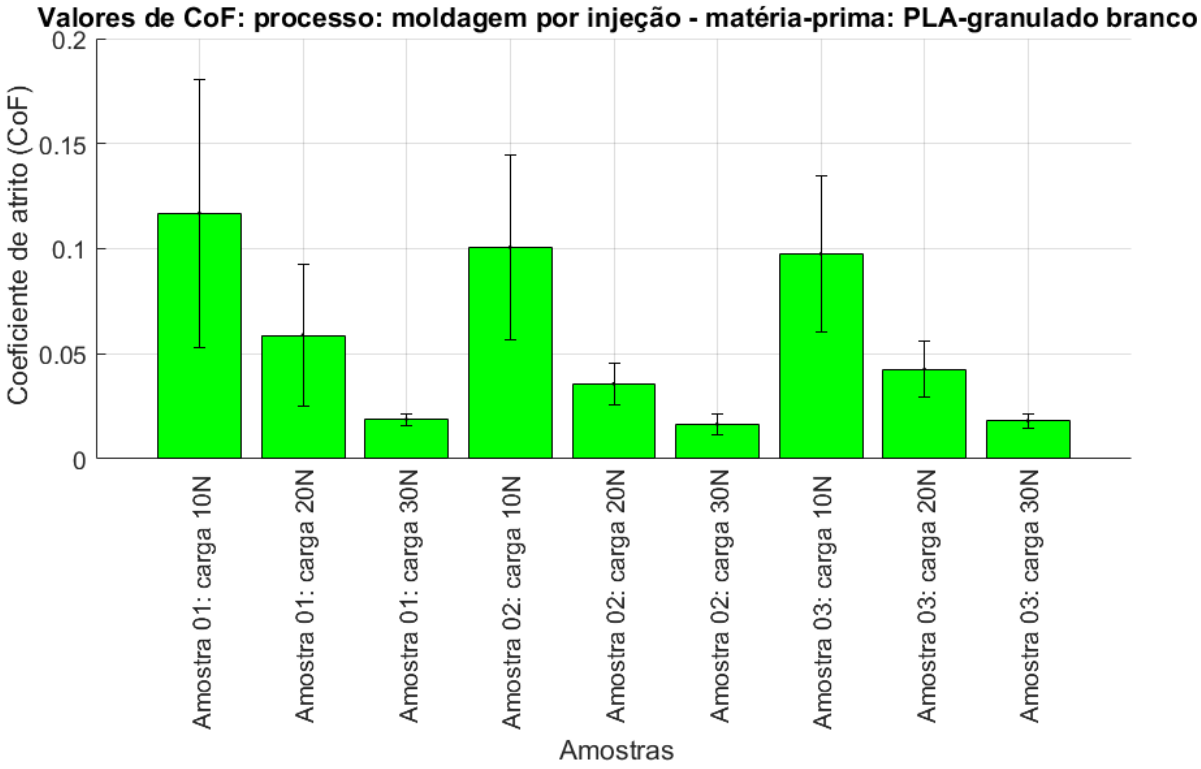


Figura 4.77 – Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima: PLA-granulado branco

Os valores do coeficiente de atrito (CoF) em função do tempo, obtidos nos ensaios realizados no tribômetro, foram plotados nos gráficos das Figuras 4.78, 4.79 e 4.80.

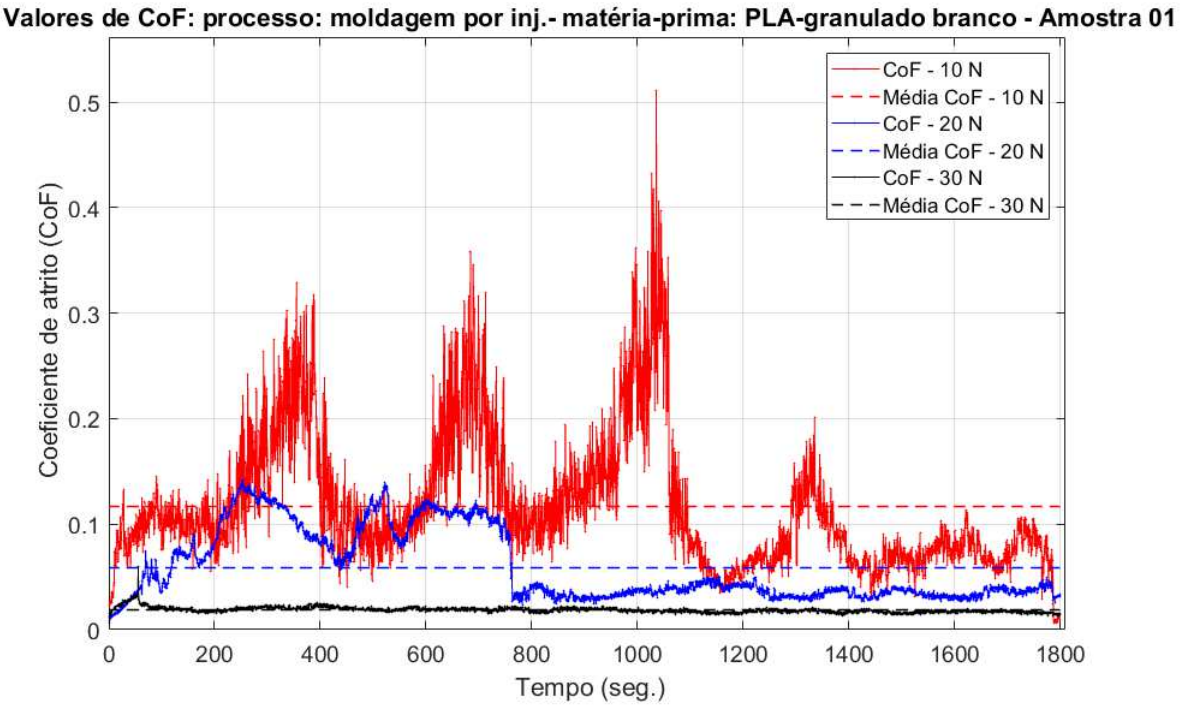


Figura 4.78 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 01

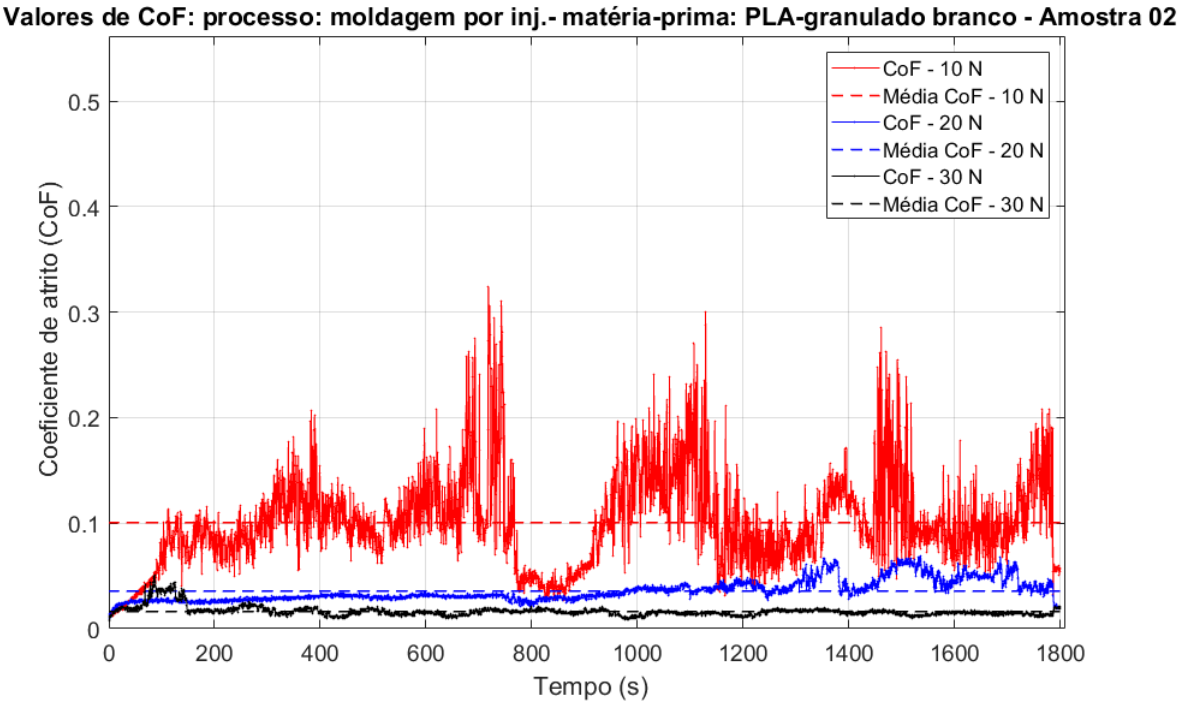


Figura 4.79 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 02

Os resultados dos ensaios experimentais, para determinação do desgaste obtido nos ensaios tribológicos (*reciprocating*), realizados nos CPs produzidos através do processo moldagem por injeção e utilizando a matéria-prima PLA-granulado branco, foram transcritos na Tab. 4.55

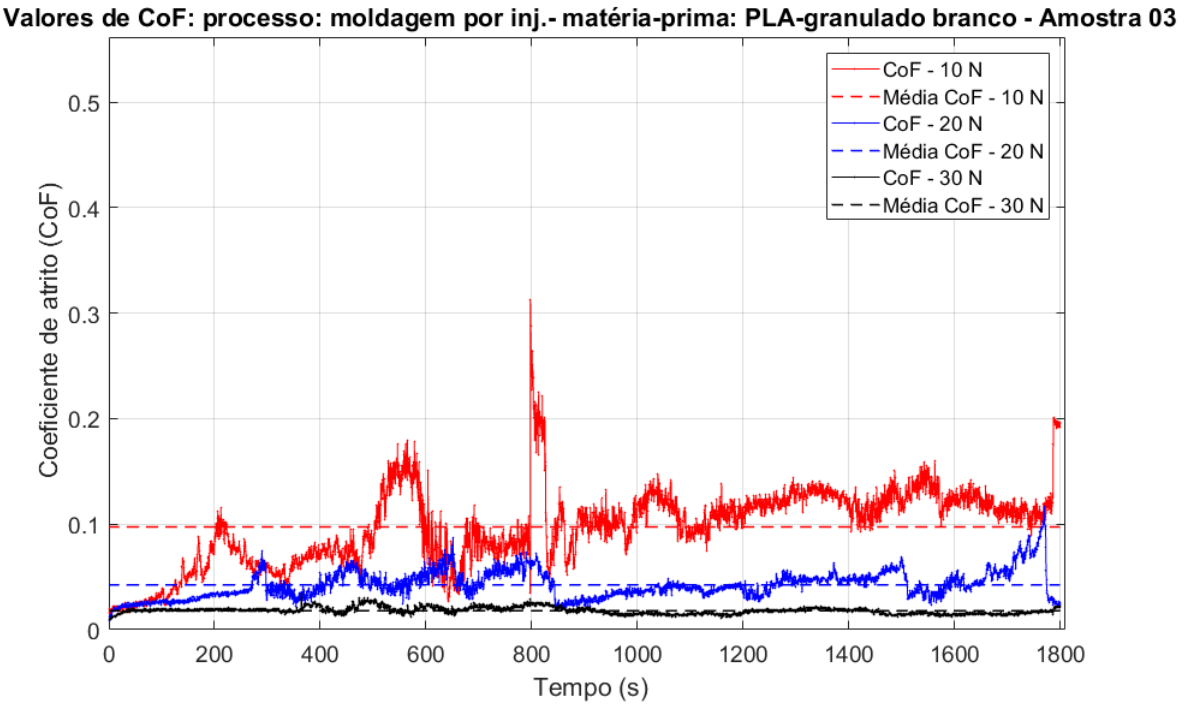


Figura 4.80 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 03

e no gráfico da Fig.4.81.

Tabela 4.55 – Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-granulado branco

Amostras	Carga normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,2609	0,2498	0,1579
Amostra 02	0,2882	0,0544	0,0909
Amostra 03	0,1119	0,0966	0,4206
Média	0,2203	0,1336	0,2232

O gráfico da Fig.4.82, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado branco, para o carregamento de 10N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 10N foi 0,2203 mm (Tab. 4.53) e nota-se, que aproximadamente 31% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 161 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.83).

O gráfico da Fig.4.84, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z,

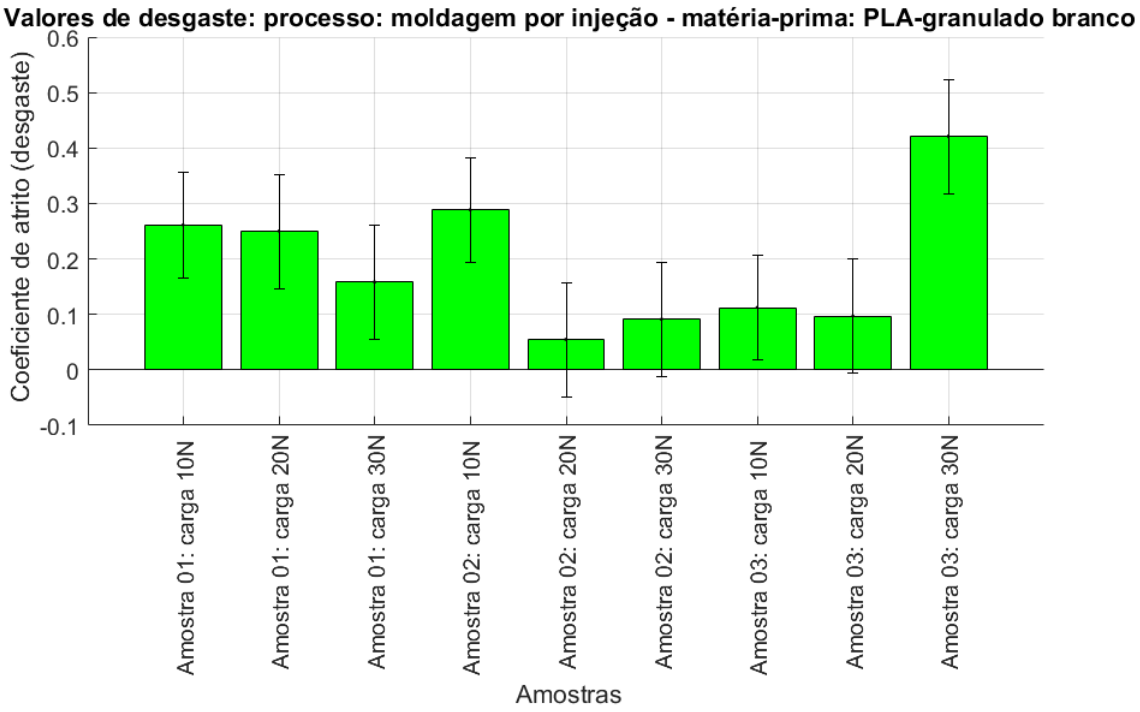


Figura 4.81 – Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-granulado branco

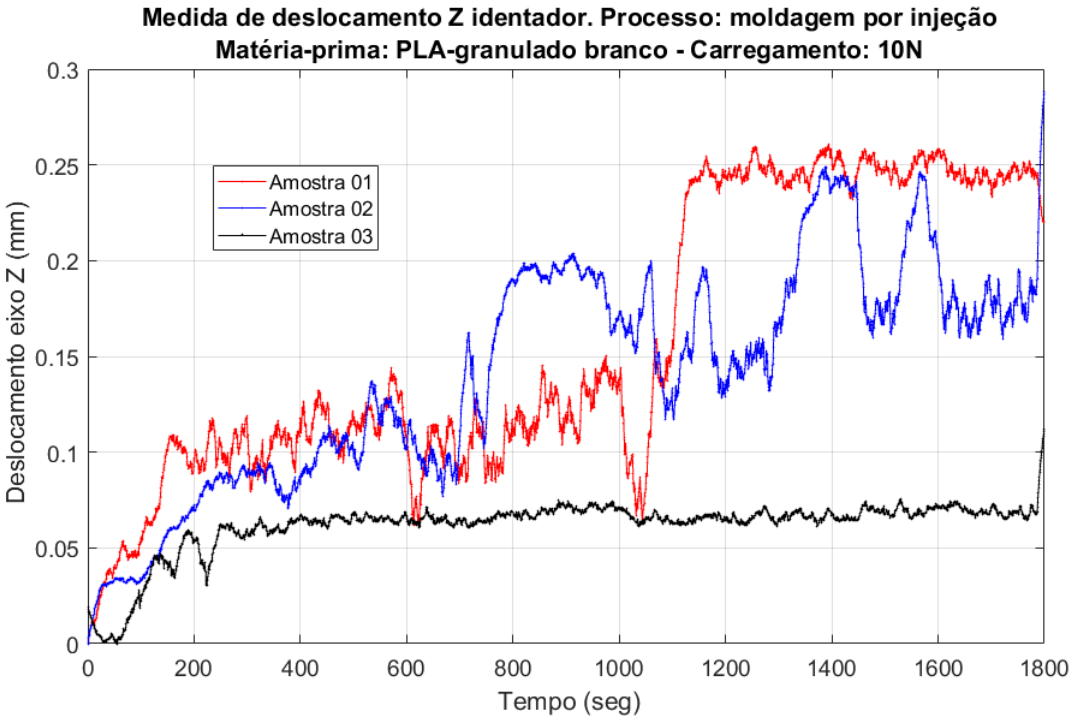


Figura 4.82 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado branco

obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-grafeno, para o carregamento de 20N. Os procedimentos e parâmetros

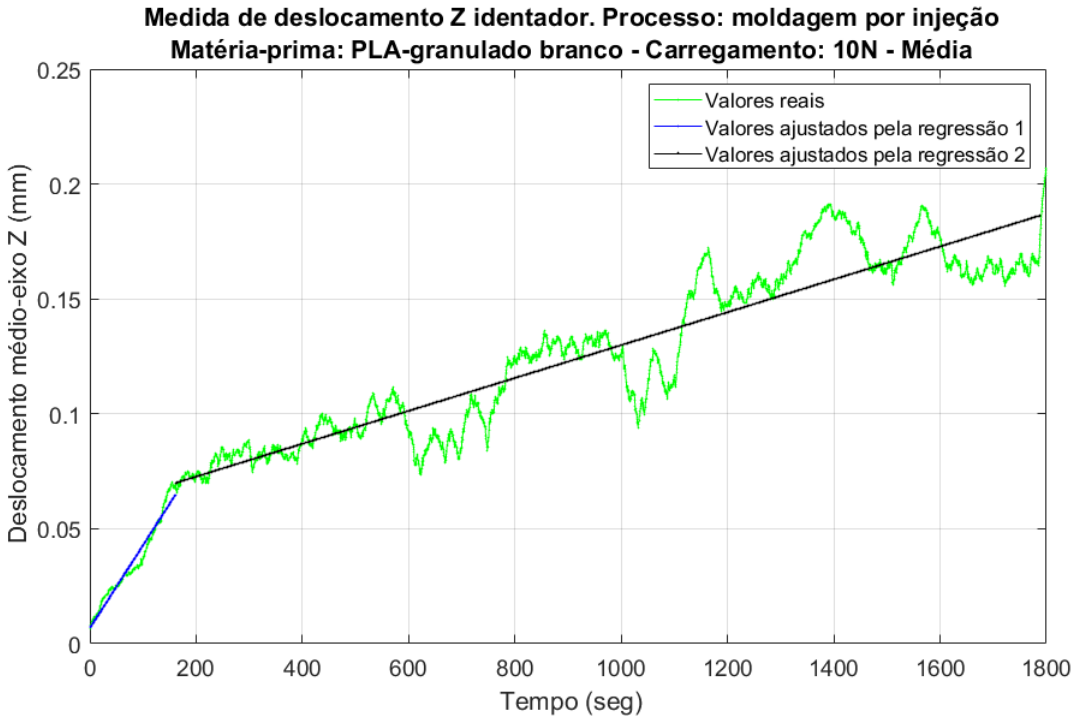


Figura 4.83 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado branco

do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 20N foi 0,1336 mm (Tab. 4.53) e nota-se, que aproximadamente 47% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 280 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.85).

O gráfico da Fig.4.86, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado branco, para o carregamento de 30N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 30N foi 0,2232 mm (Tab. 4.53) e nota-se, que aproximadamente 72% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 99 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.87).

4.5.4 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado incolor

Os resultados dos ensaios experimentais para determinação do CoF (coeficiente de atrito), obtidos nas amostras produzidas através do processo de moldagem por injeção e utilizando

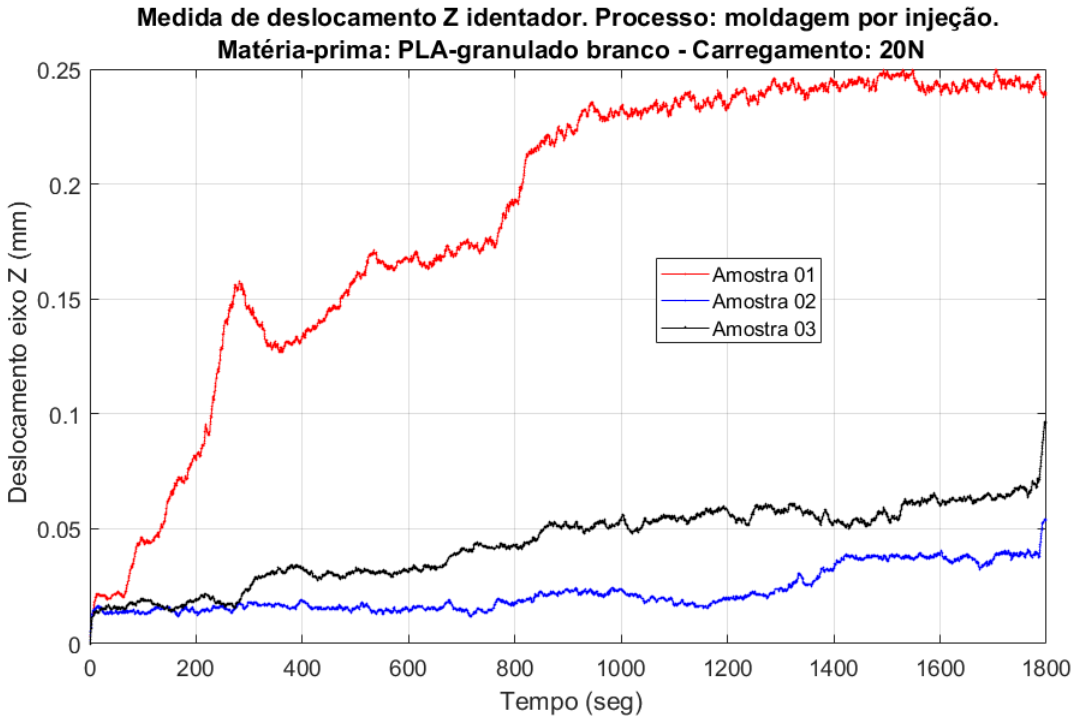


Figura 4.84 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado branco

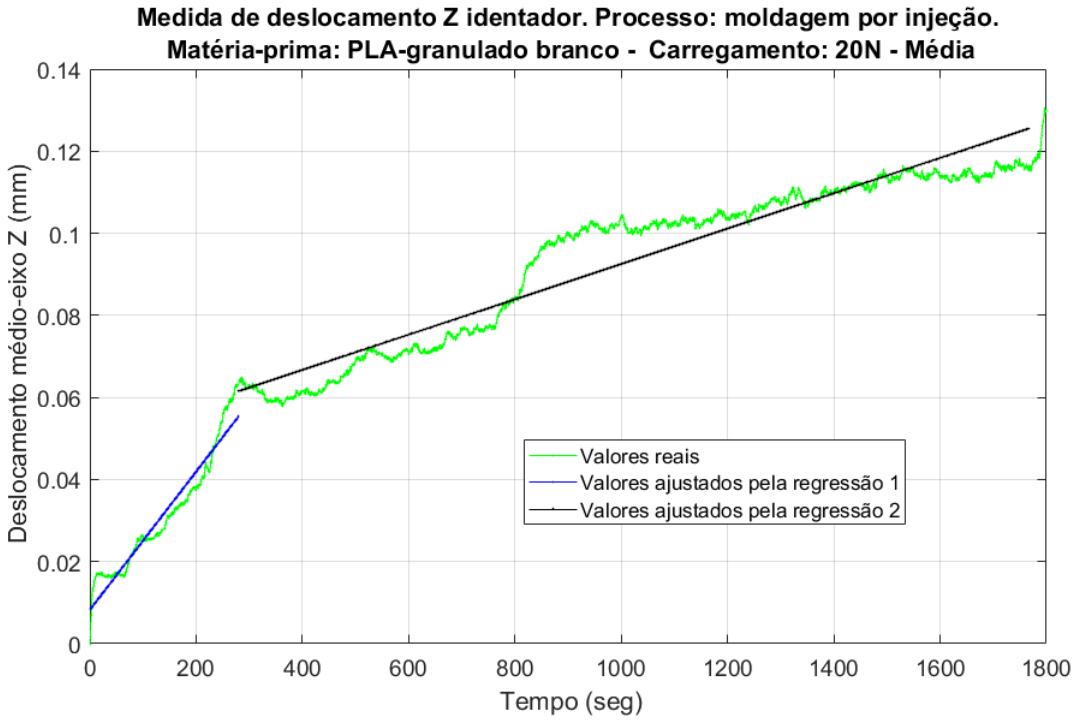


Figura 4.85 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado branco

a matéria-prima PLA-granulado incolor, foram transcritos na Tab. 4.56 e no gráfico da Fig.4.88.

Os valores do coeficiente de atrito (CoF) em função do tempo, obtidos nos ensaios

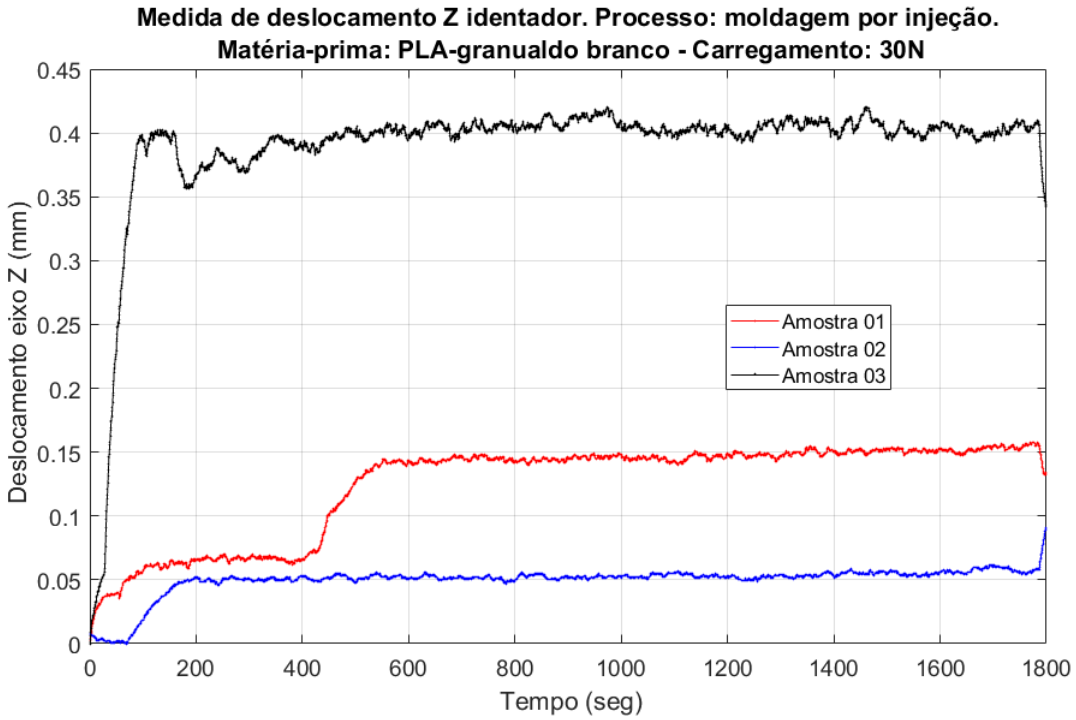


Figura 4.86 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado branco

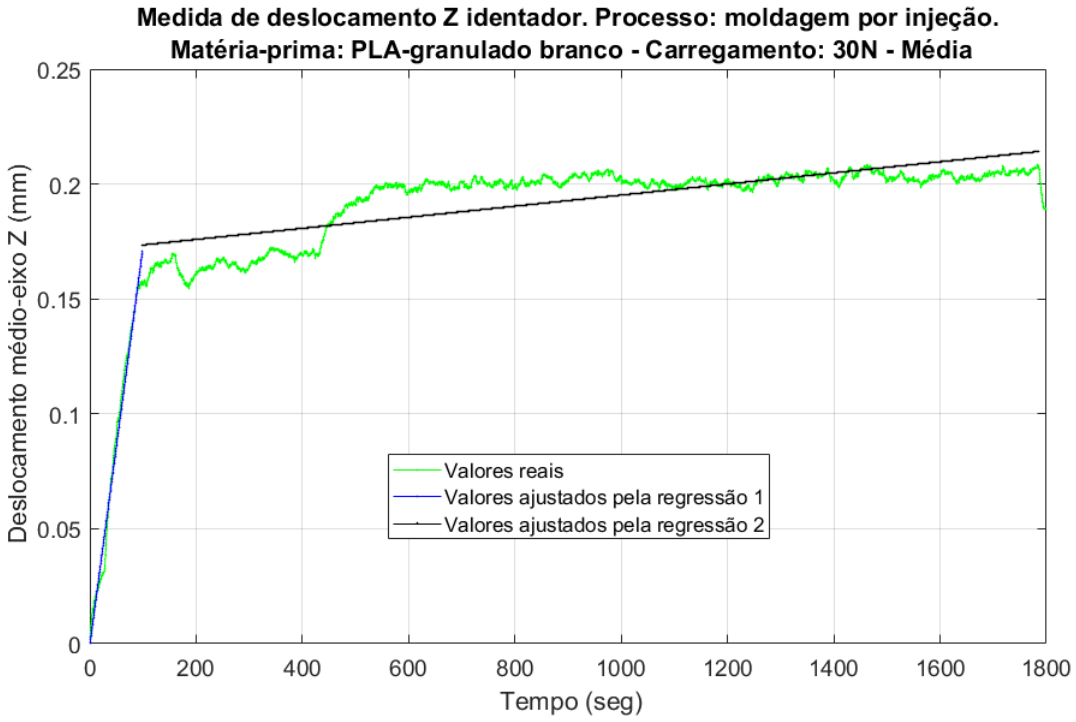


Figura 4.87 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado branco

realizados no tribômetro, foram plotados nos gráficos das Figuras 4.89, 4.90 e 4.91.

Os resultados dos ensaios experimentais para determinação do desgaste, obtidos nos

Tabela 4.56 – Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-granulado incolor

Amostras	Carga normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,0257	0,0689	0,0937
Amostra 02	0,0239	0,0456	0,0935
Amostra 03	0,0324	0,0542	0,0940
Média	0,0273	0,0562	0,0938

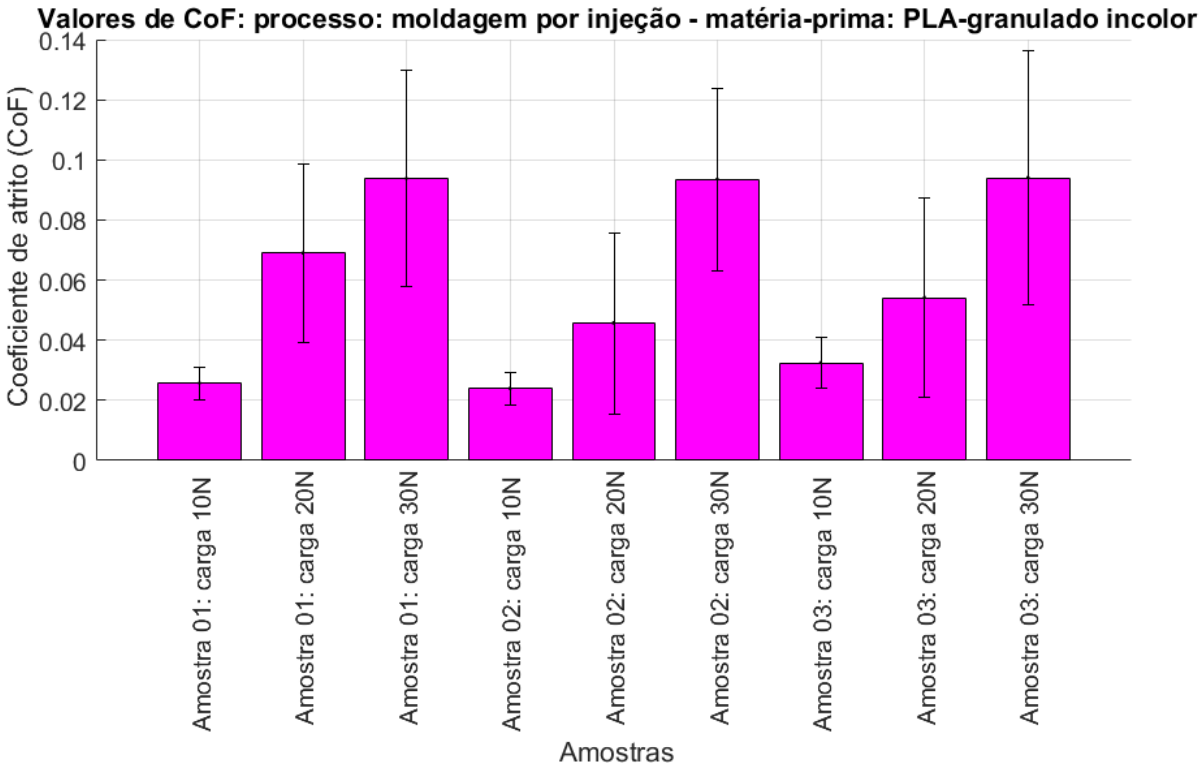


Figura 4.88 – Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima: PLA-granulado incolor

ensaios tribológicos (*reciprocating*), realizados nos CPs produzidos através do processo moldagem por injeção e utilizando a matéria-prima PLA-granulado incolor foram transcritos na Tab. 4.57 e no gráfico da Fig.4.92.

O gráfico da Fig.4.93, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado incolor, para o carregamento de 10N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 10N foi 0,1866 mm (Tab. 4.53) e nota-se, que aproximadamente 64%

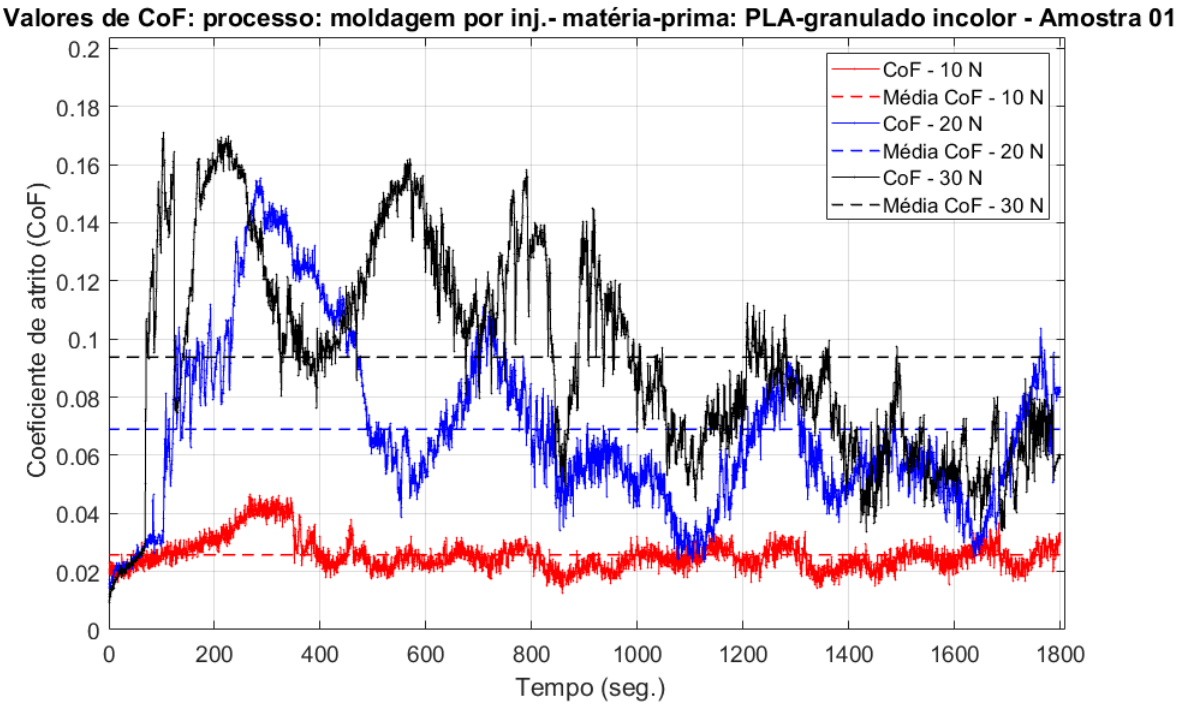


Figura 4.89 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 01

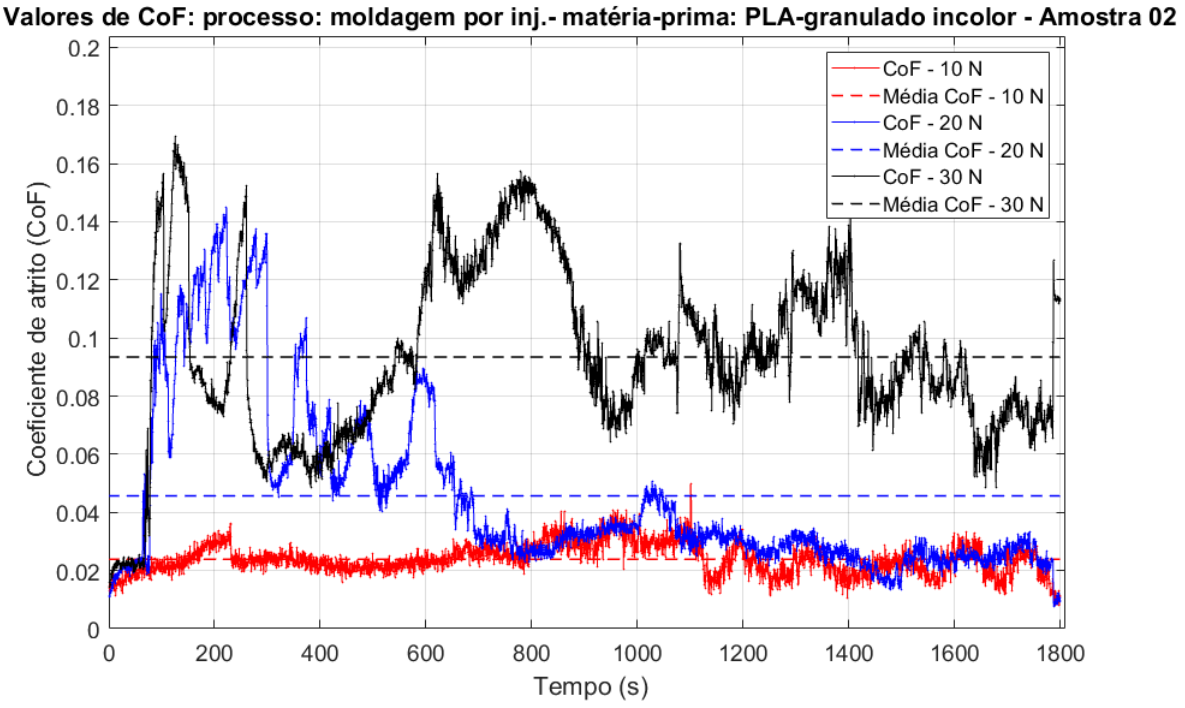


Figura 4.90 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 02

do desgaste médio total ocorre nos primeiros 44 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.94).

O gráfico da Fig.4.95, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z,

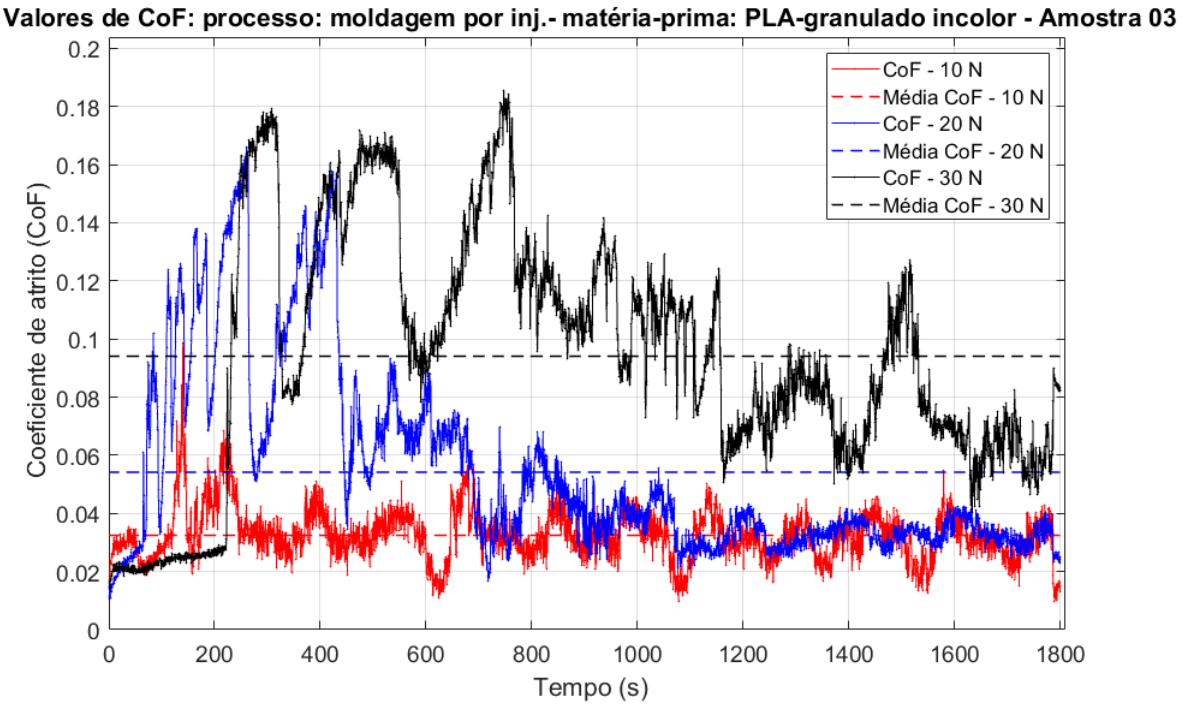


Figura 4.91 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 03

Tabela 4.57 – Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-granulado incolor

Amostras	Carga normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,2764	0,4392	0,5695
Amostra 02	0,0419	0,1568	0,6121
Amostra 03	0,2416	0,2216	0,7089
Média	0,1866	0,2726	0,6302

obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado incolor, para o carregamento de 20N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 20N foi 0,2726 mm (Tab. 4.53) e nota-se, que aproximadamente 77% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 400 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.96).

O gráfico da Fig.4.97, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo moldagem por injeção com a matéria-prima PLA-granulado incolor, para o carregamento de 30N. Os procedimentos e

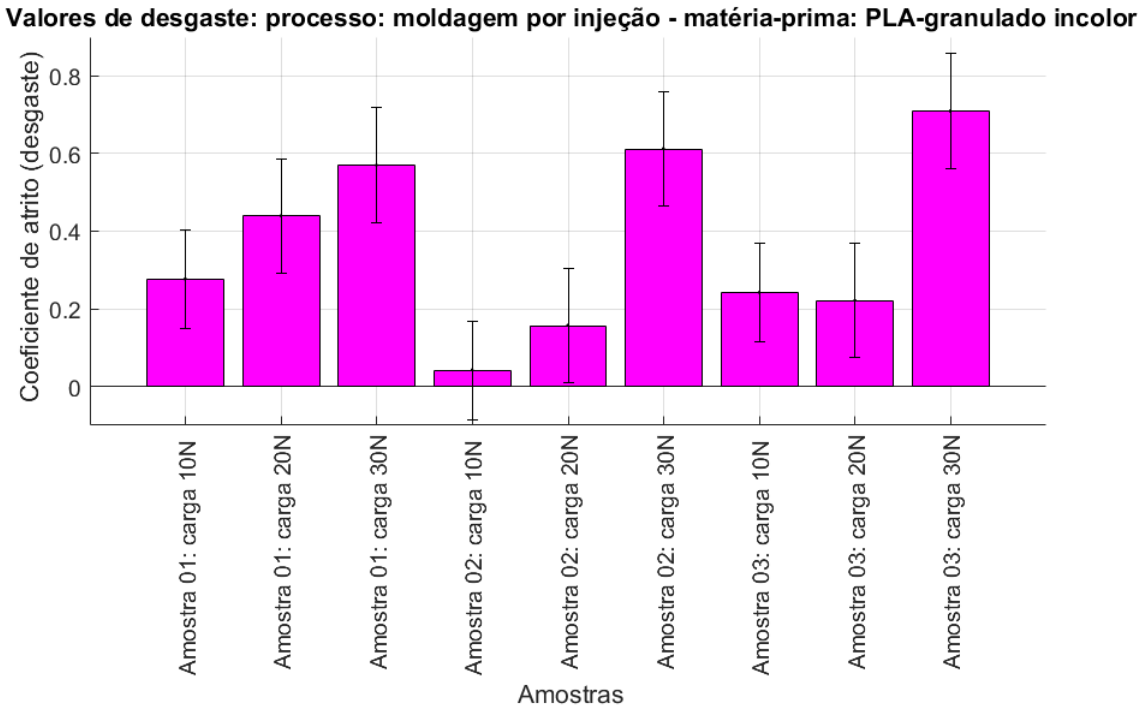


Figura 4.92 – Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: PLA-granulado incolor

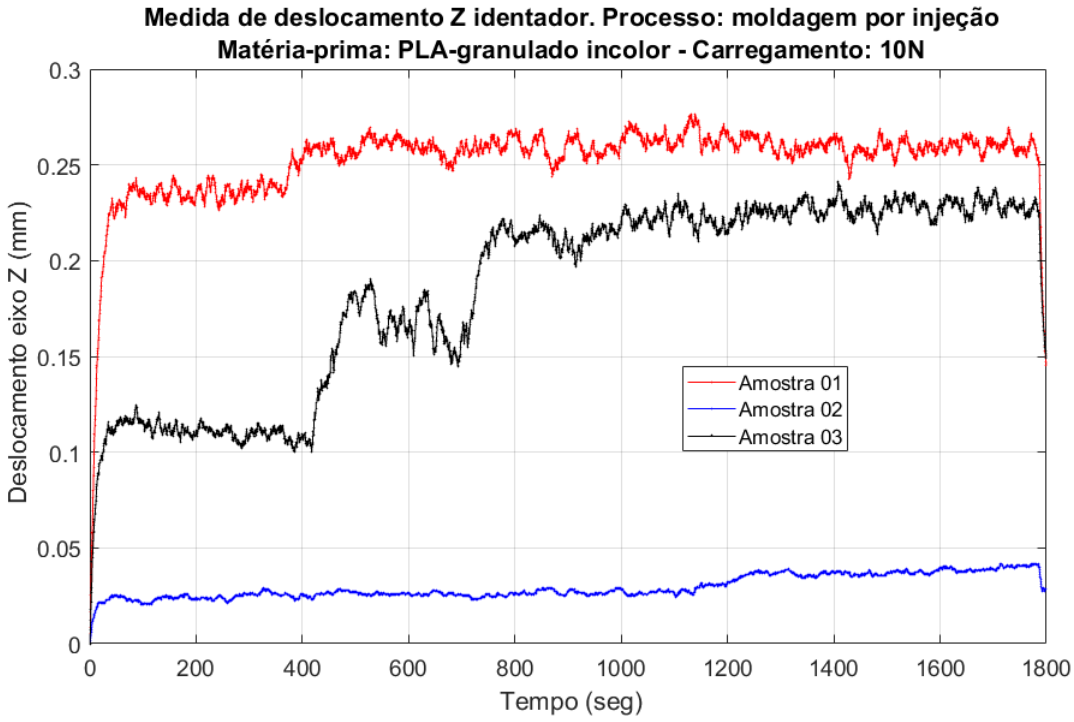


Figura 4.93 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado incolor

parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 30N foi 0,6302 mm (Tab. 4.53) e nota-se, que aproximadamente 64%

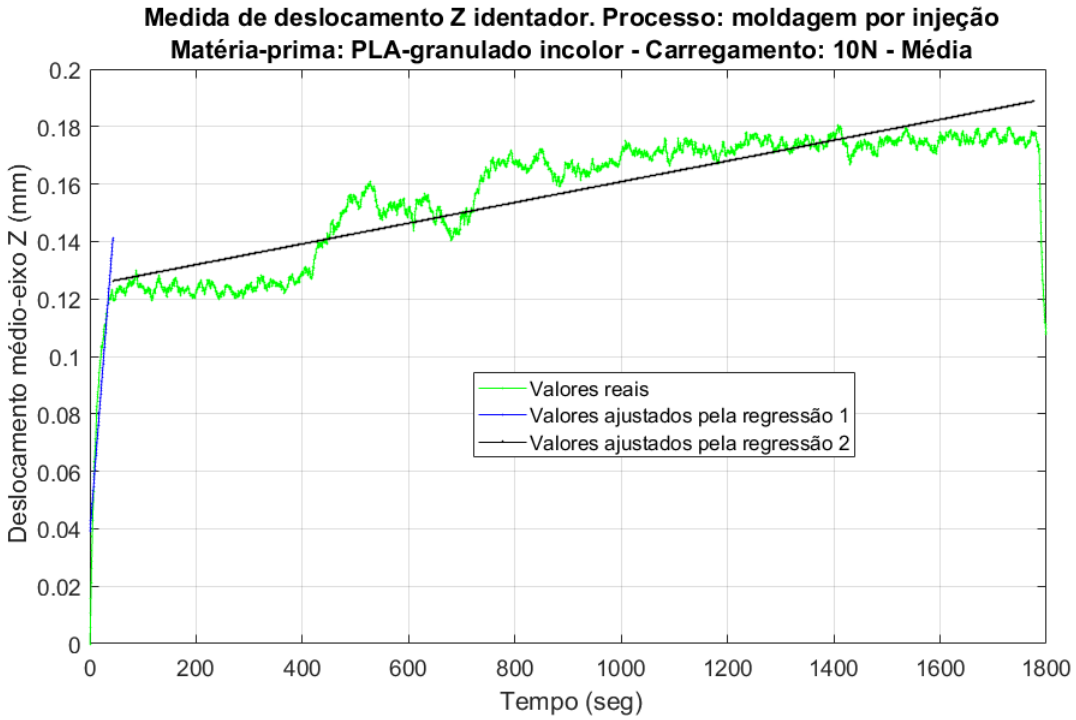


Figura 4.94 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado incolor

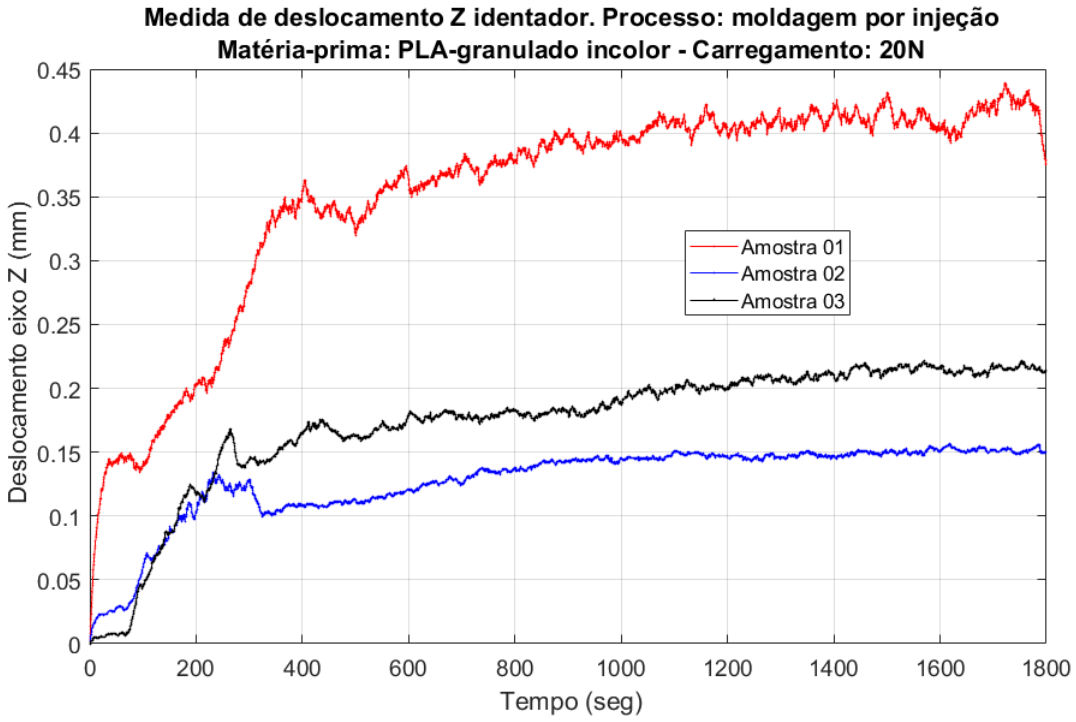


Figura 4.95 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado incolor

do desgaste médio total ocorre nos primeiros 296 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.98).

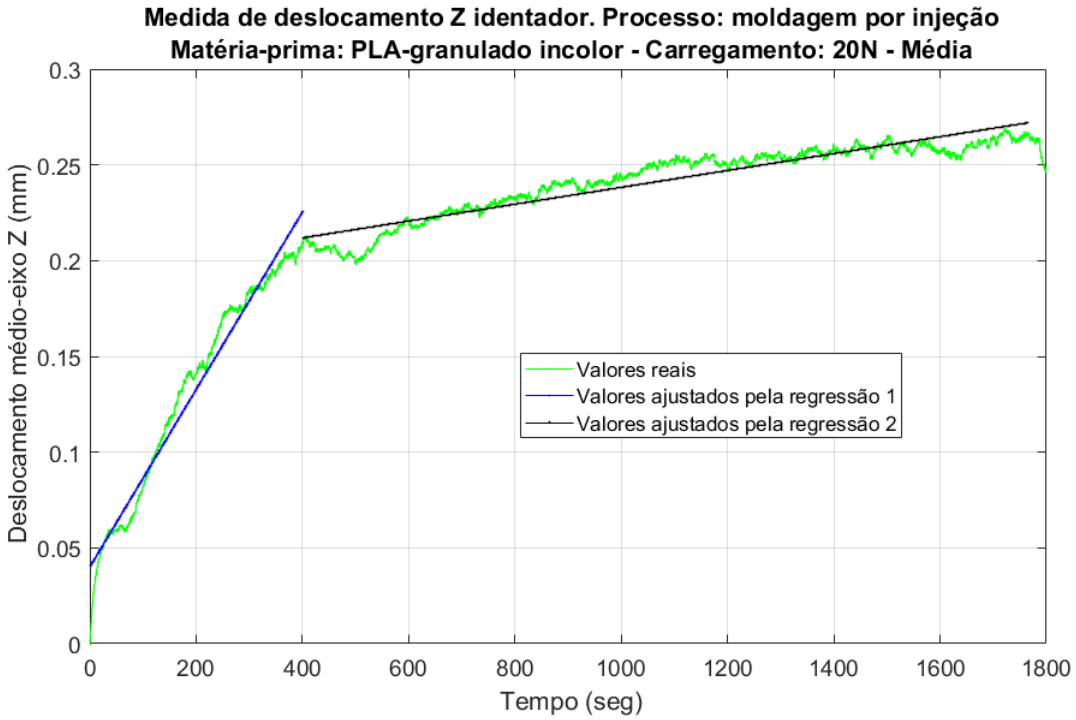


Figura 4.96 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado incolor

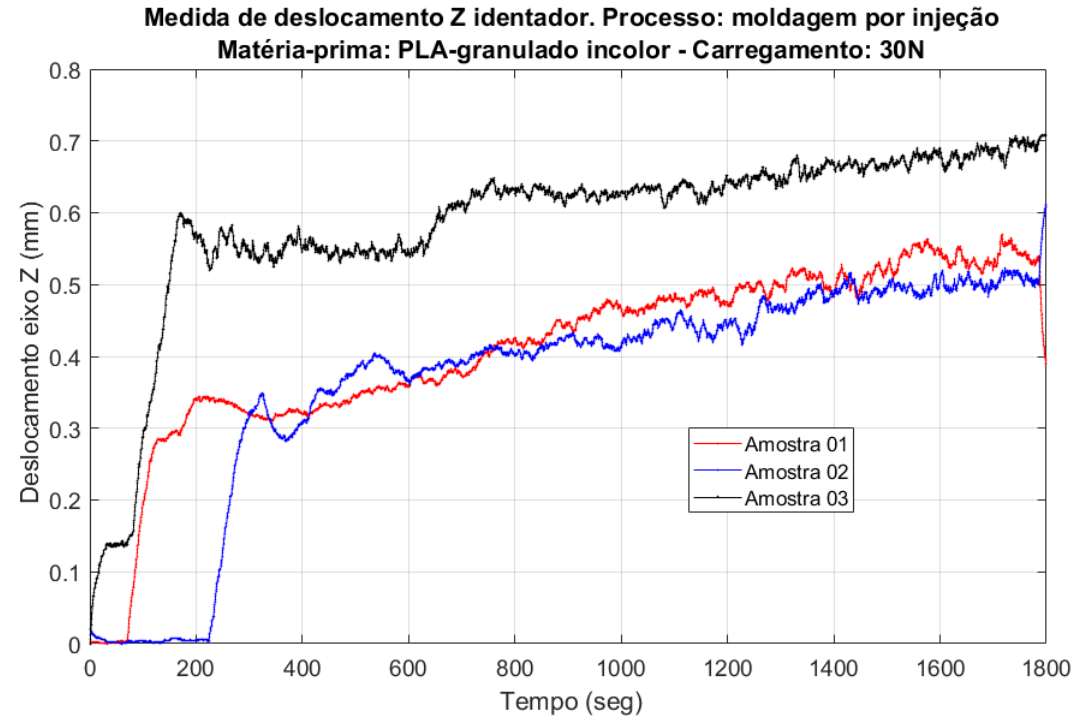


Figura 4.97 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado incolor

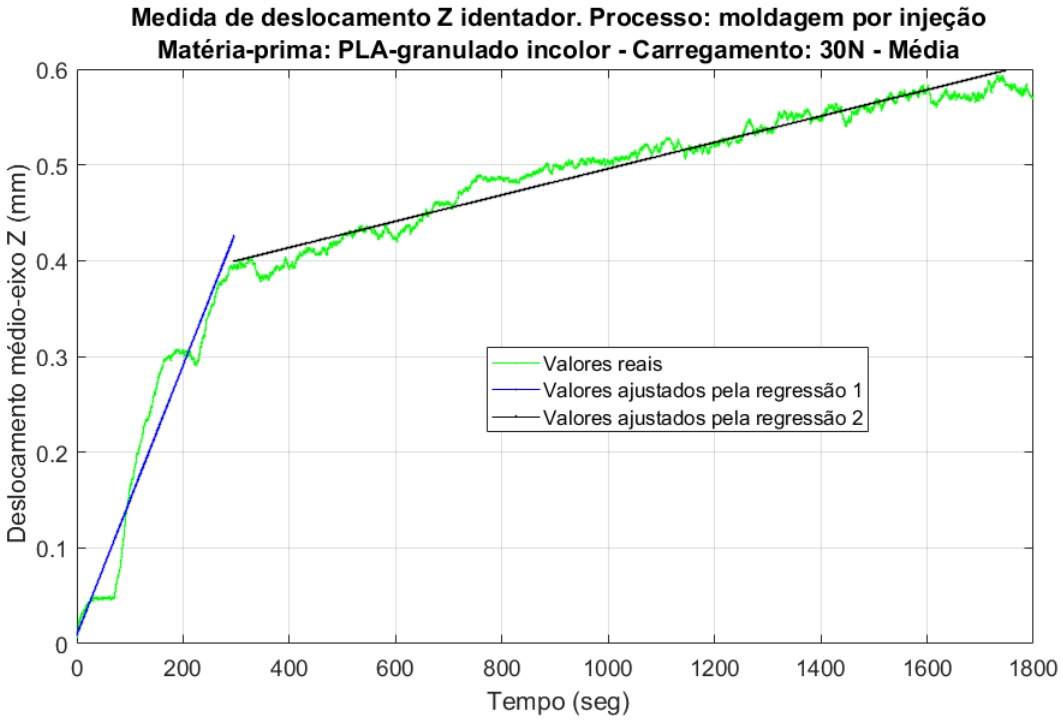


Figura 4.98 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: PLA-granulado incolor

4.5.5 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno

Os resultados dos ensaios experimentais para determinação do CoF (coeficiente de atrito), obtidos nas amostras produzidas através do processo FDM e utilizando a matéria-prima ABS-grafeno, foram transcritos na Tab. 4.58 e no gráfico da Fig.4.99.

Tabela 4.58 – Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS-grafeno

Amostras	Carga normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,1009	0,0763	0,0754
Amostra 02	0,1046	0,0794	0,0771
Amostra 03	0,0972	0,0793	0,0781
Média	0,1009	0,0783	0,0769

Os valores do coeficiente de atrito (CoF) em função do tempo, obtidos nos ensaios realizados no tribômetro, foram plotados nos gráficos das Figuras 4.100, 4.101 e 4.102.

Os resultados dos ensaios experimentais para determinação do desgaste, obtidos nos

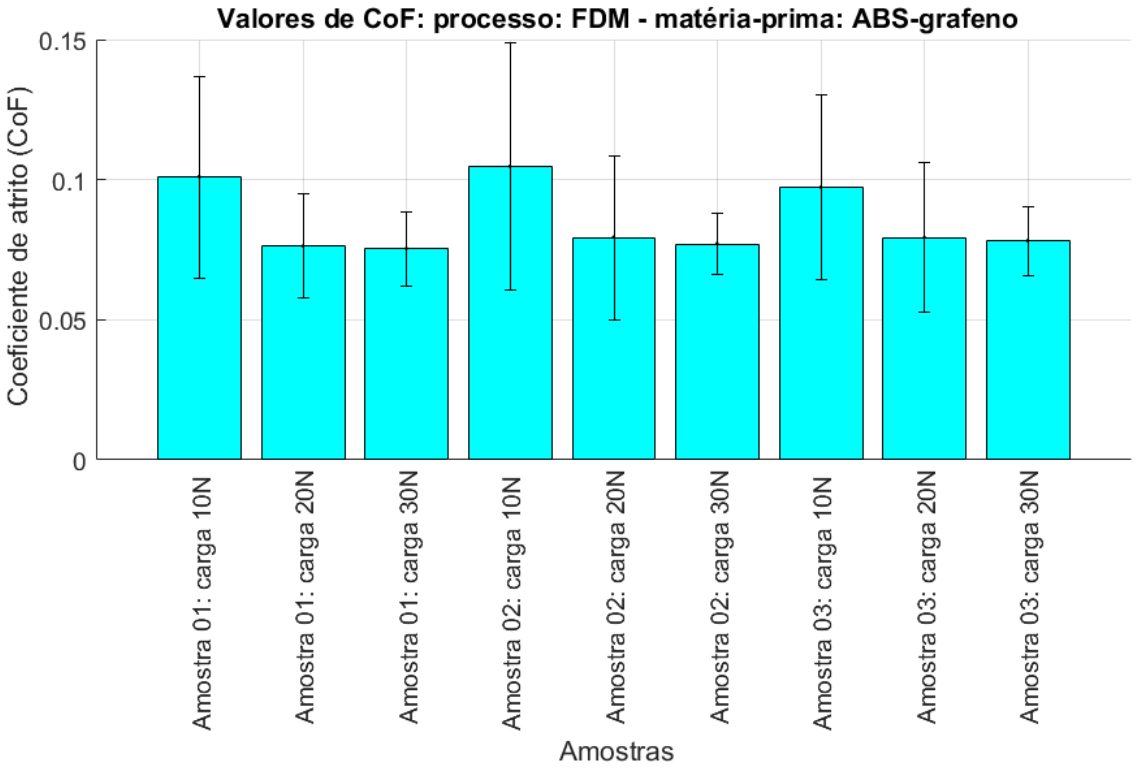


Figura 4.99 – Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima: ABS-grafeno

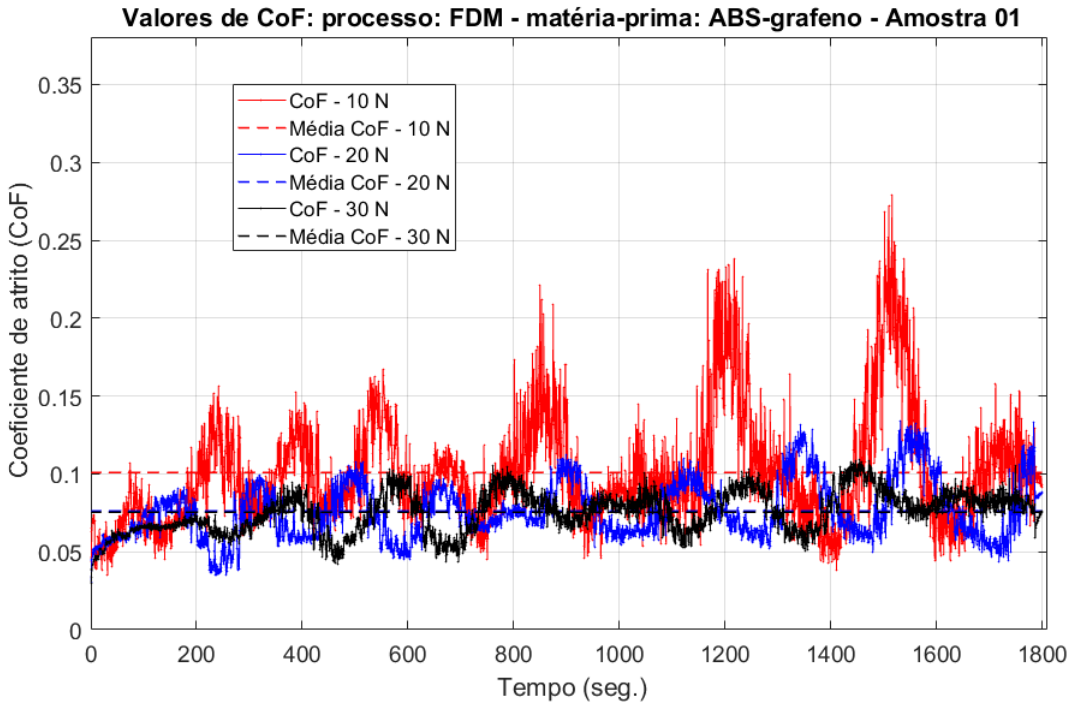


Figura 4.100 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 01

ensaios tribológicos (*reciprocating*), realizados nos CPS produzidos através do processo FDM e utilizando a matéria-prima ABS-grafeno foram transcritos na Tab. 4.59 e no gráfico da Fig.4.103.

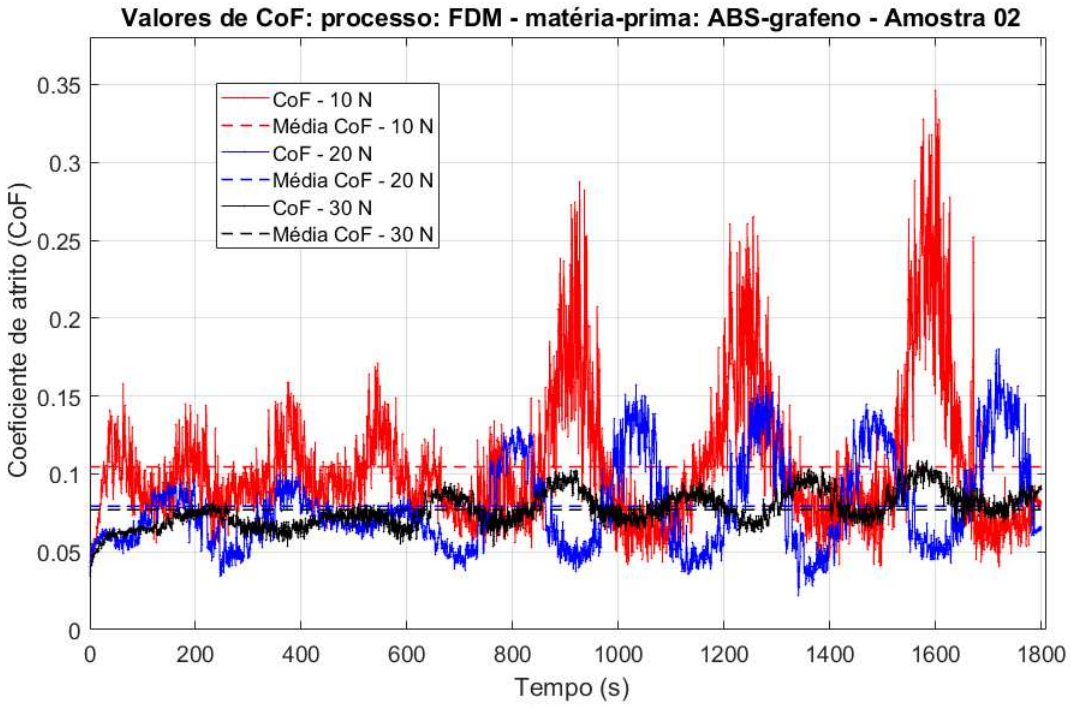


Figura 4.101 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 02

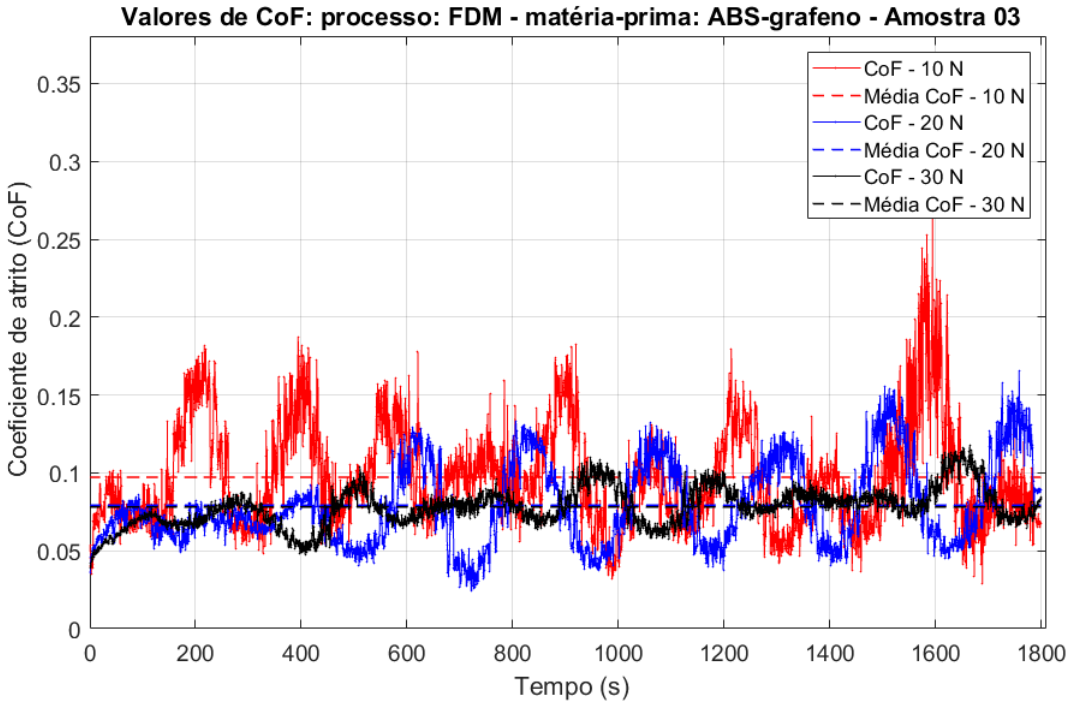


Figura 4.102 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 03

O gráfico da Fig.4.104, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno, para o carregamento de 10N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio

Tabela 4.59 – Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS-grafeno

Amostras	Carga normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,0805	0,3351	0,6821
Amostra 02	0,1150	0,4215	0,6441
Amostra 03	0,1351	0,4419	0,6869
Média	0,1102	0,3995	0,6710

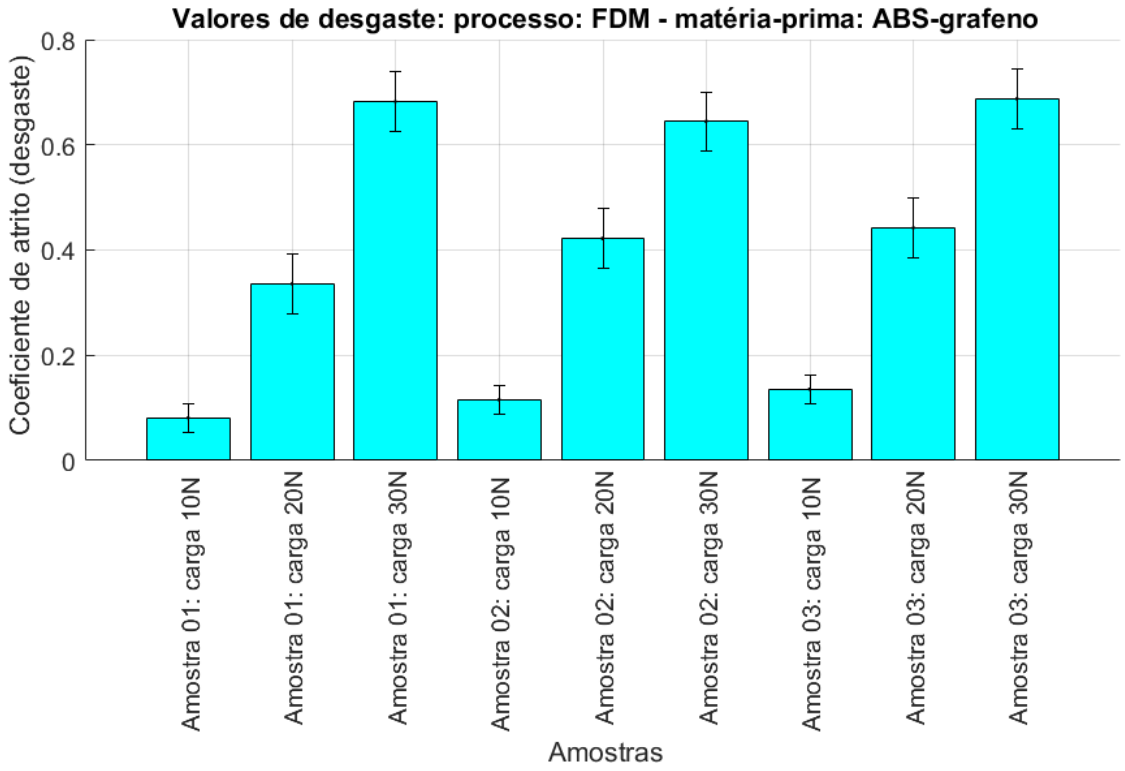


Figura 4.103 – Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS-grafeno

foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 10N foi 0,1102 mm (Tab. 4.59) e nota-se, que aproximadamente 11% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 91 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.105).

O gráfico da Fig.4.106, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno, para o carregamento de 20N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a

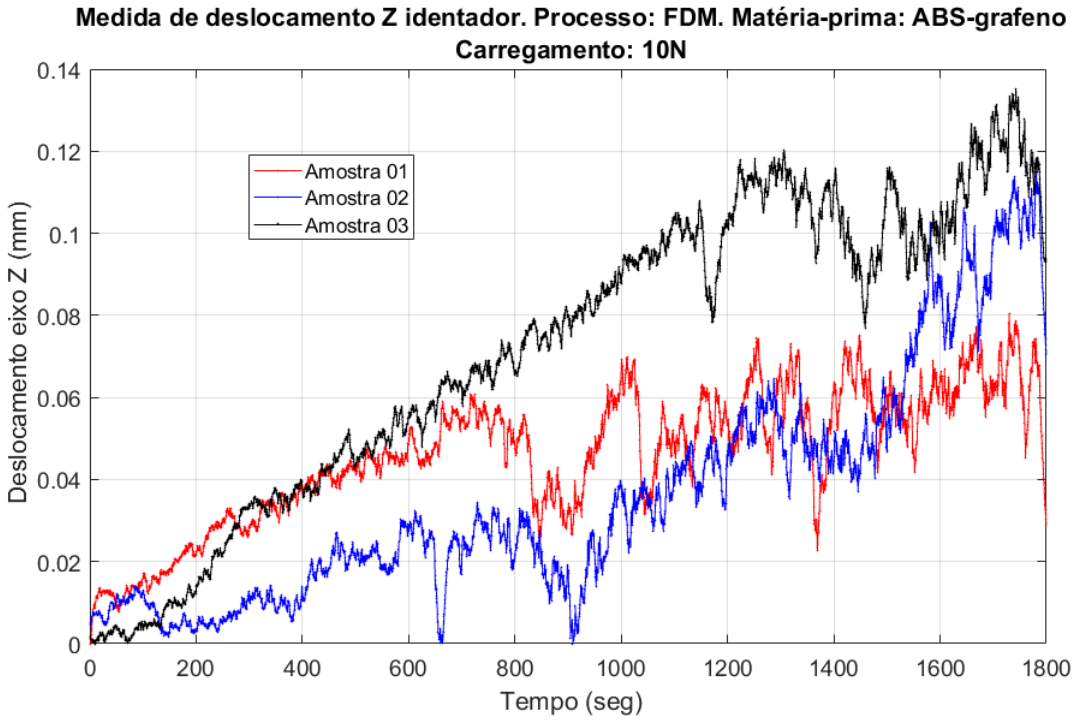


Figura 4.104 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: ABS-grafeno

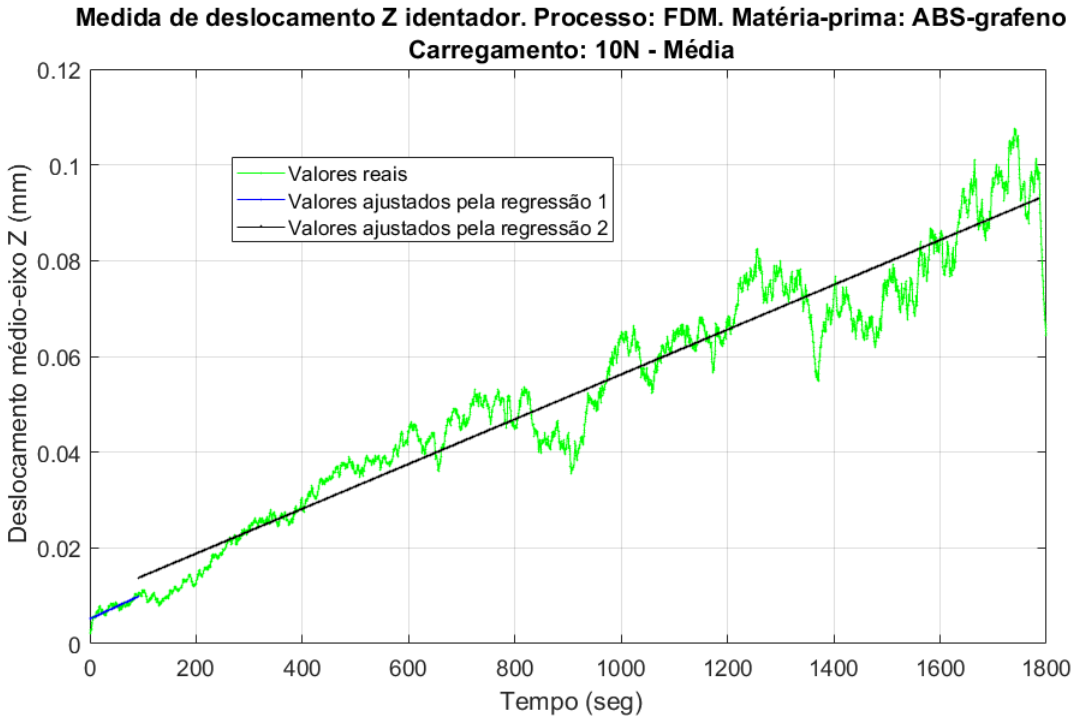


Figura 4.105 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: ABS-grafeno

20N foi 0,3995 mm (Tab. 4.59) e nota-se, que aproximadamente 22% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 322 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da

Fig.4.107).

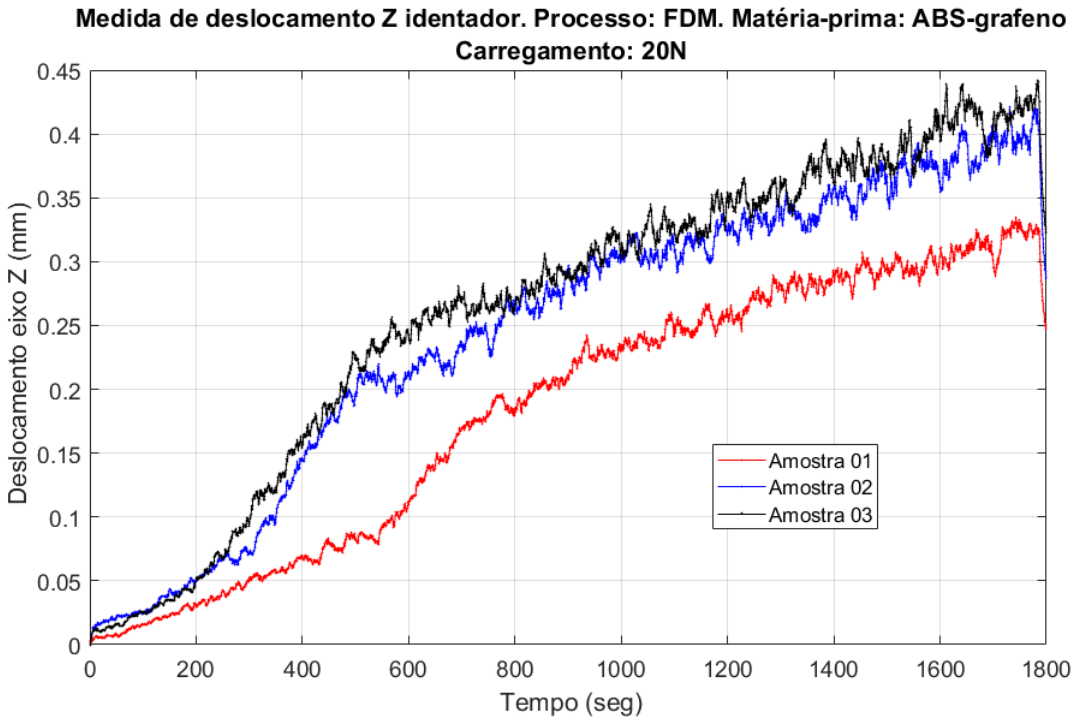


Figura 4.106 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: ABS-grafeno

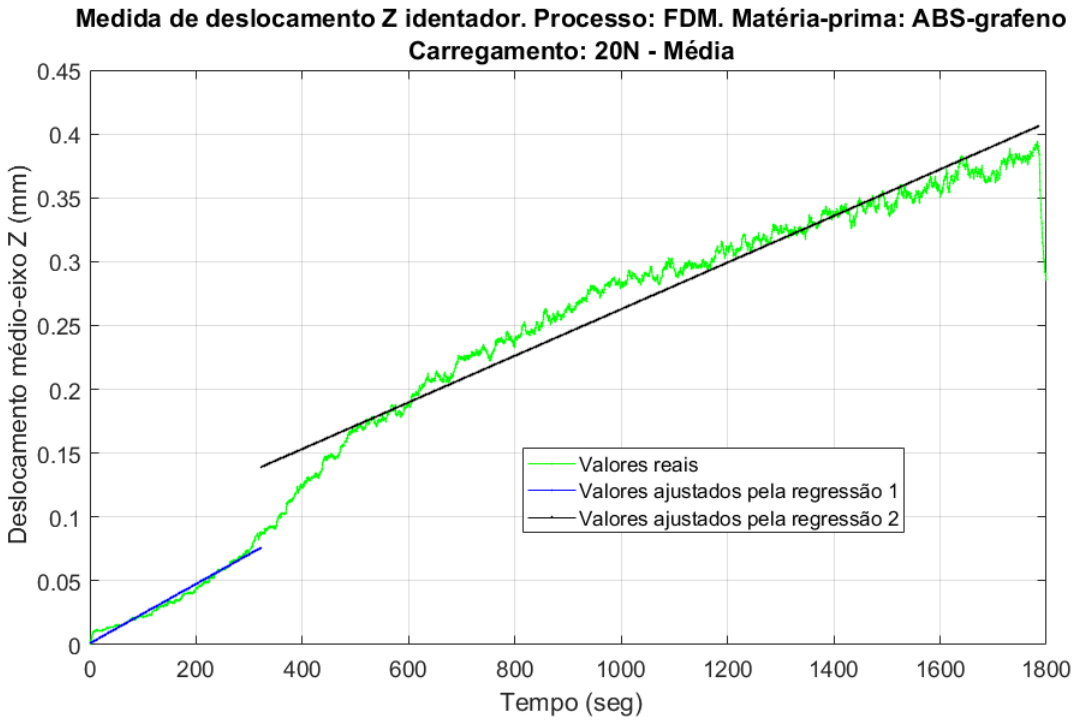


Figura 4.107 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: ABS-grafeno

O gráfico da Fig.4.108, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z,

obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno, para o carregamento de 30N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 30N foi 0,6710 mm (Tab. 4.59) e nota-se, que aproximadamente 37% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 183 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.109).

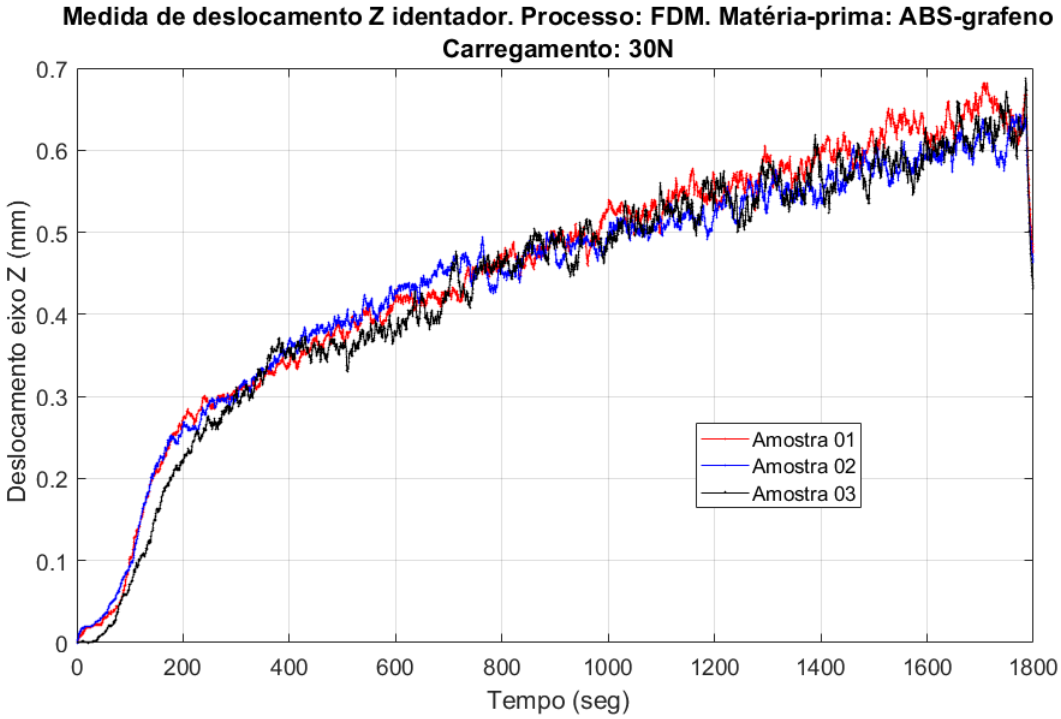


Figura 4.108 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: ABS-grafeno

4.5.6 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS

Os resultados dos ensaios experimentais para determinação do CoF (coeficiente de atrito), obtidos nas amostras produzidas através do processo FDM e utilizando a matéria-prima ABS, foram transcritos na Tab. 4.60 e no gráfico da Fig.4.110.

Os valores do coeficiente de atrito (CoF) em função do tempo, obtidos nos ensaios realizados no tribômetro, foram plotados nos gráficos das Figuras 4.111, 4.112 e 4.113.

Os resultados dos ensaios experimentais, para determinação do desgaste obtidos nos ensaios tribológicos (*reciprocating*), realizados nos CPS produzidos através do processo FDM e

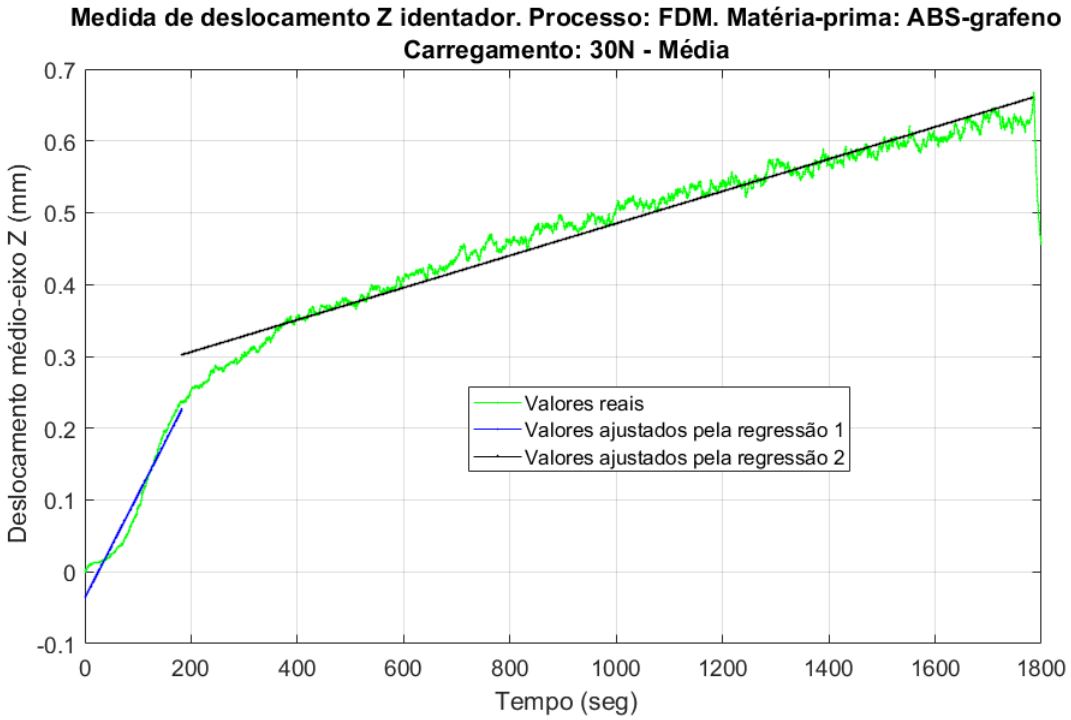


Figura 4.109 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: ABS-grafeno

Tabela 4.60 – Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS

Amostras	Carga normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,0636	0,0450	0,0502
Amostra 02	0,0625	0,0448	0,0486
Amostra 03	0,0620	0,0444	0,0478
Média	0,0627	0,0447	0,0489

utilizando a matéria-prima ABS foram transcritos na Tab. 4.61 e no gráfico da Fig.4.114.

Tabela 4.61 – Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS

Amostras	Carga normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,1092	0,2995	0,5971
Amostra 02	0,1032	0,2897	0,6188
Amostra 03	0,0839	0,2711	0,5974
Média	0,0987	0,2868	0,6045

O gráfico da Fig.4.115, mostra o comportamento do deslocamento do indentador

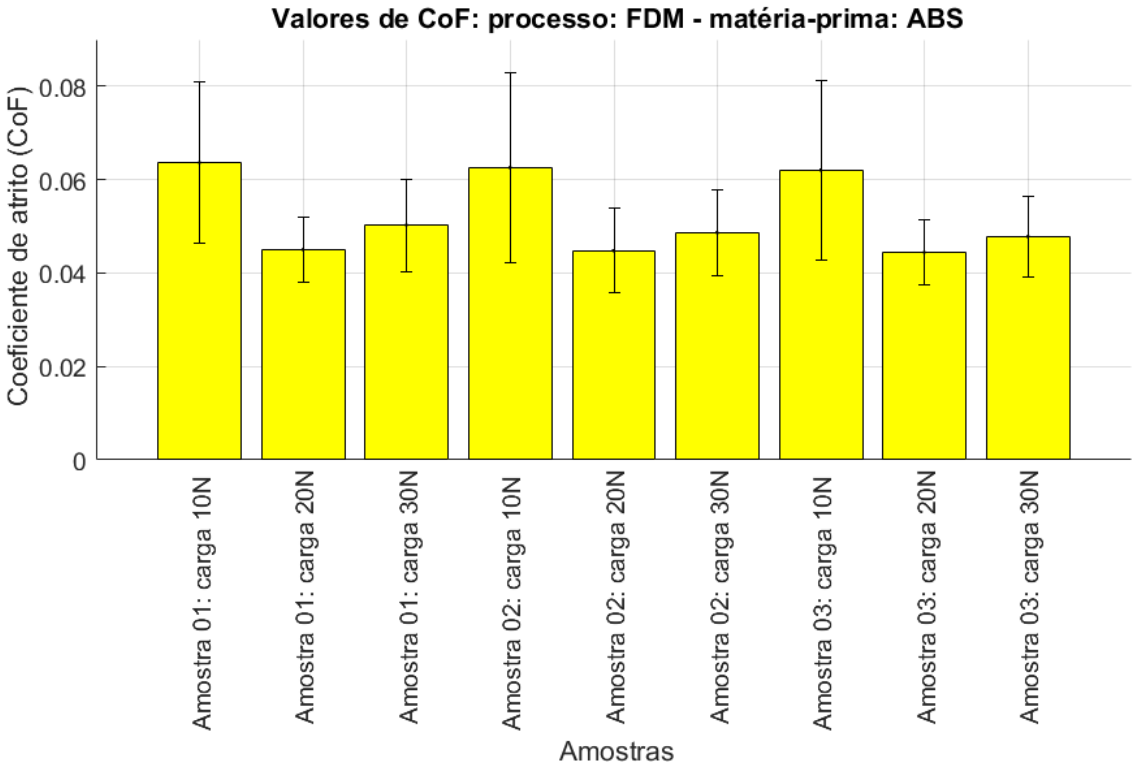


Figura 4.110 – Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima: ABS

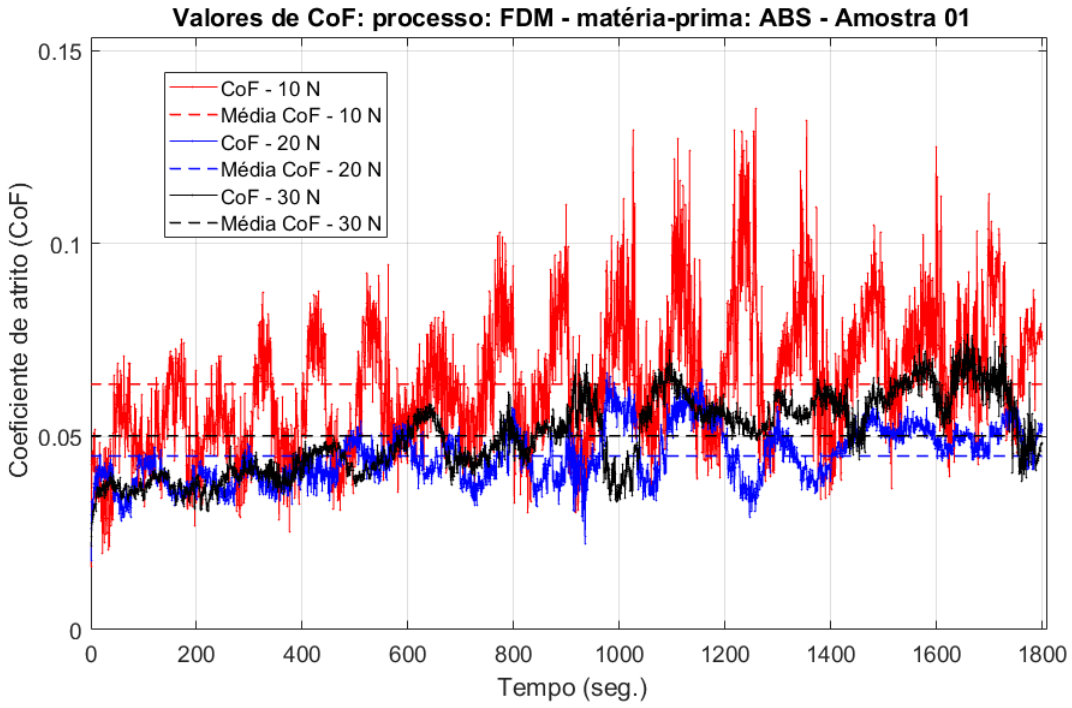


Figura 4.111 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 01

em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS, para o carregamento de 10N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio

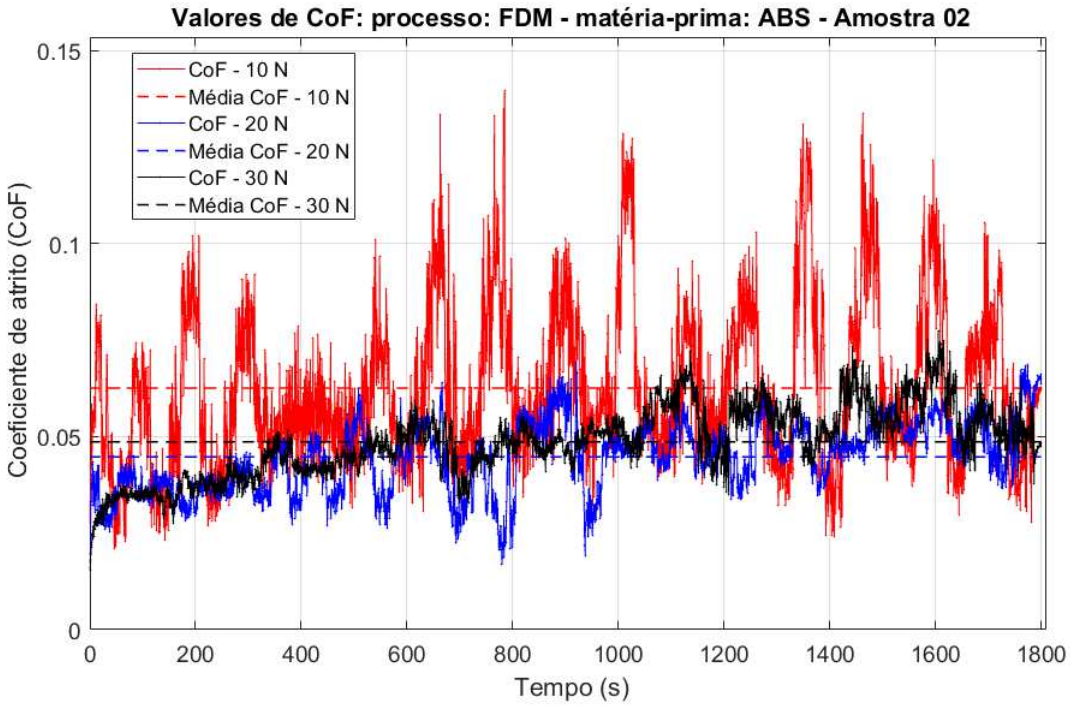


Figura 4.112 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 02

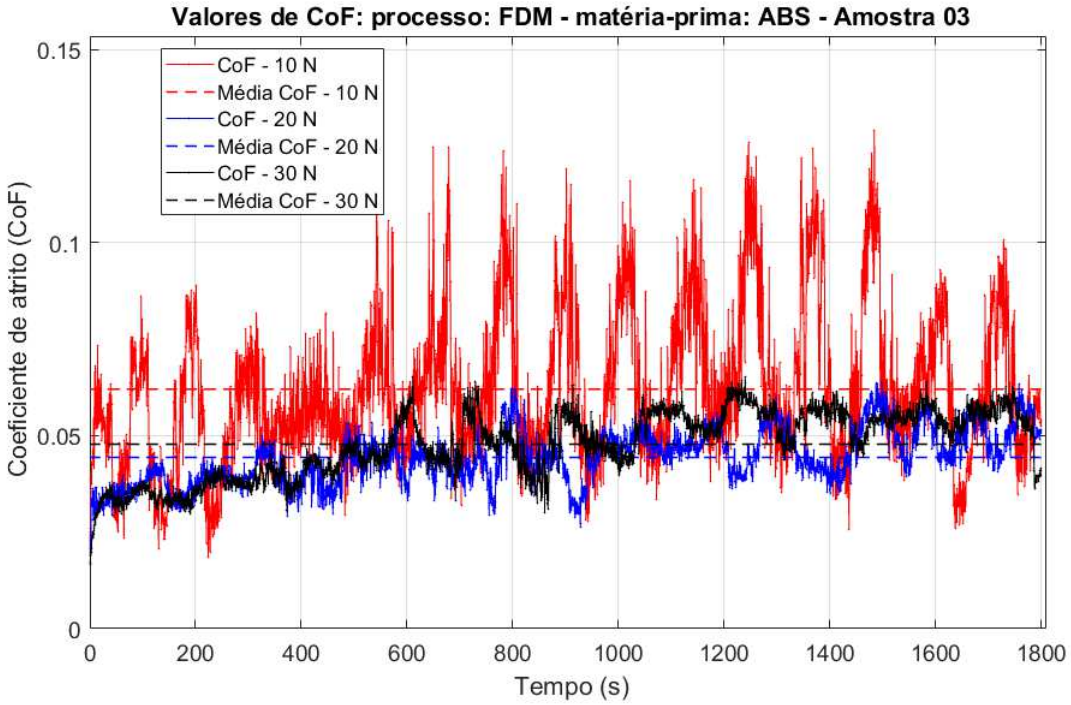


Figura 4.113 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 03

foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 10N foi 0,0987 mm (Tab. 4.61) e nota-se, que aproximadamente 41% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 43 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da

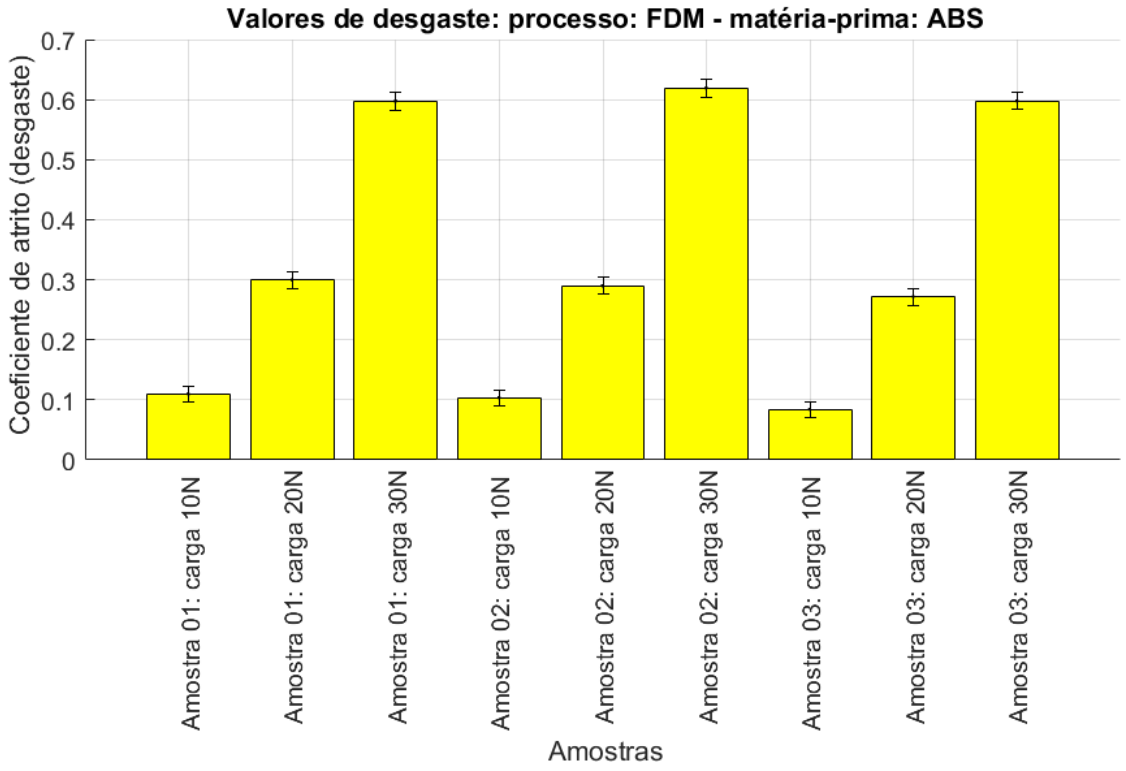


Figura 4.114 – Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS

Fig.4.116).

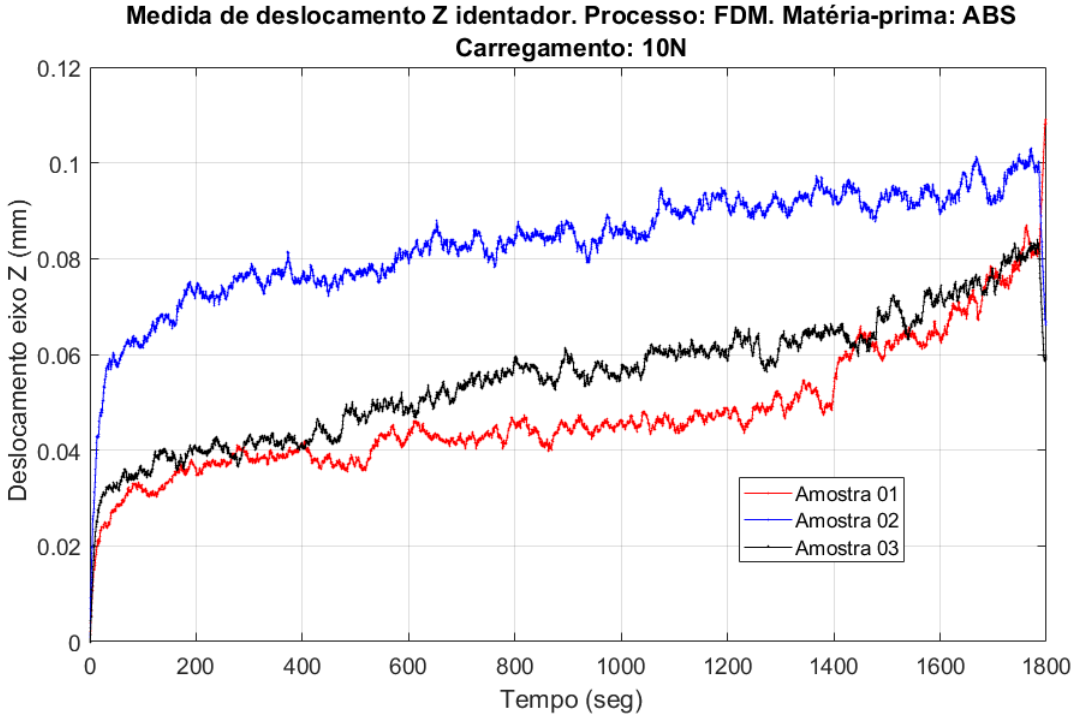


Figura 4.115 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: ABS

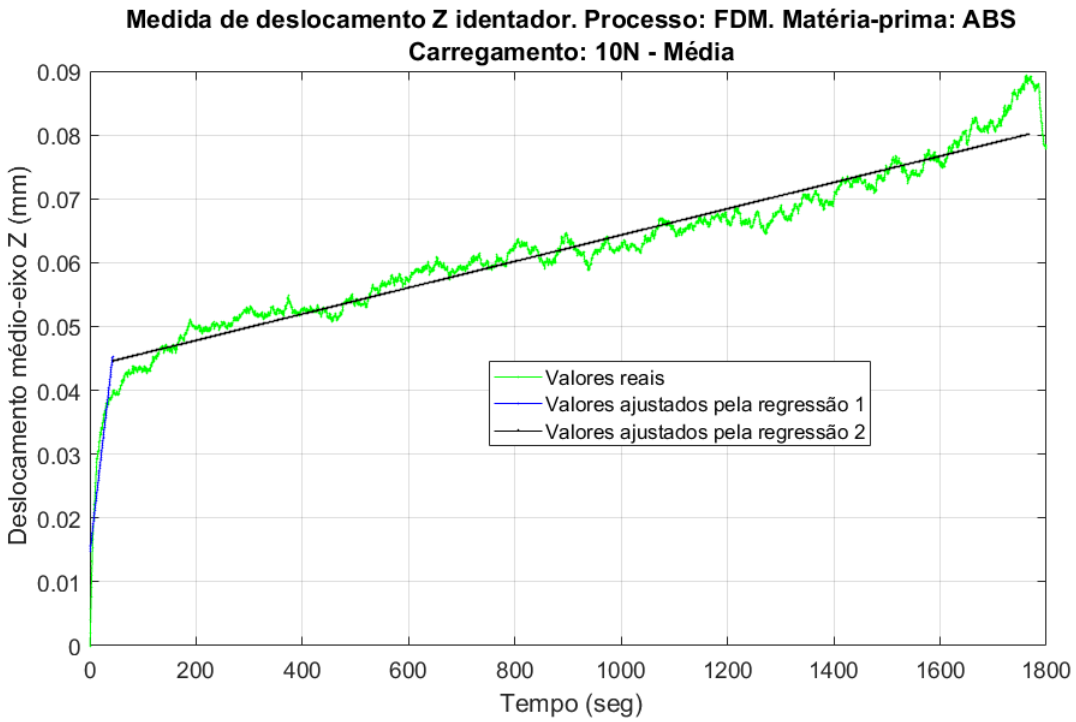


Figura 4.116 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: FDM - matéria-prima: ABS

O gráfico da Fig.4.117, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS, para o carregamento de 20N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 20N foi 0,2868 mm (Tab. 4.61) e nota-se, que aproximadamente 77% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 878 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.118).

O gráfico da Fig.4.119, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS, para o carregamento de 30N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 30N foi 0,6045 mm (Tab. 4.61) e nota-se, que aproximadamente 41% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 288 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.120).

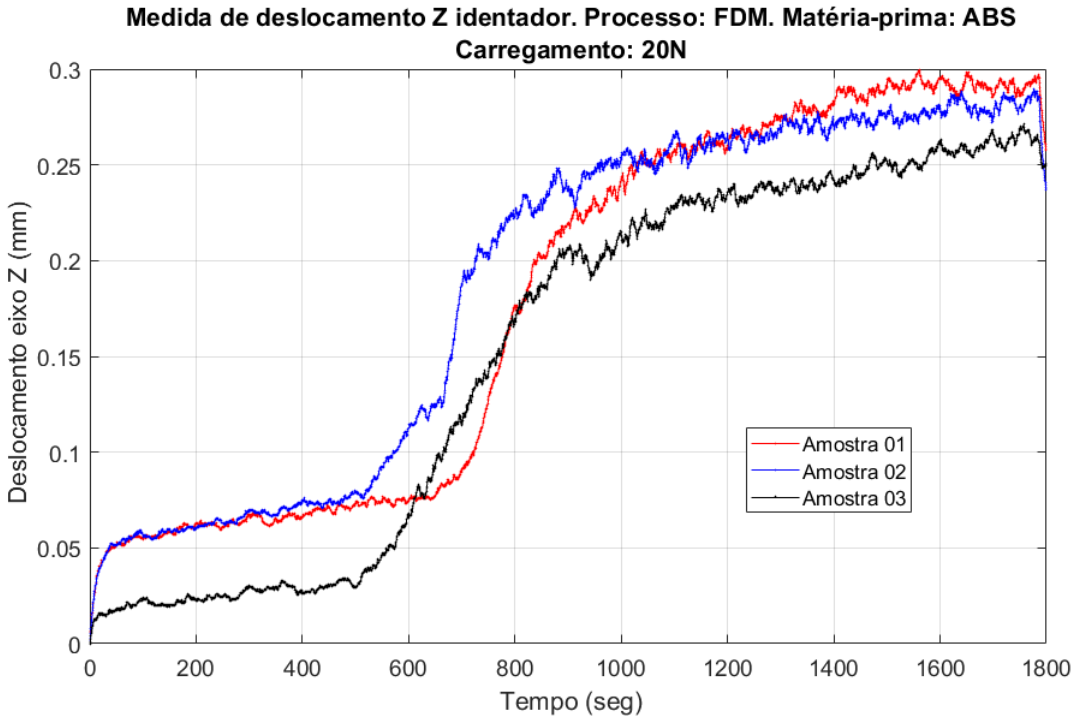


Figura 4.117 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: ABS

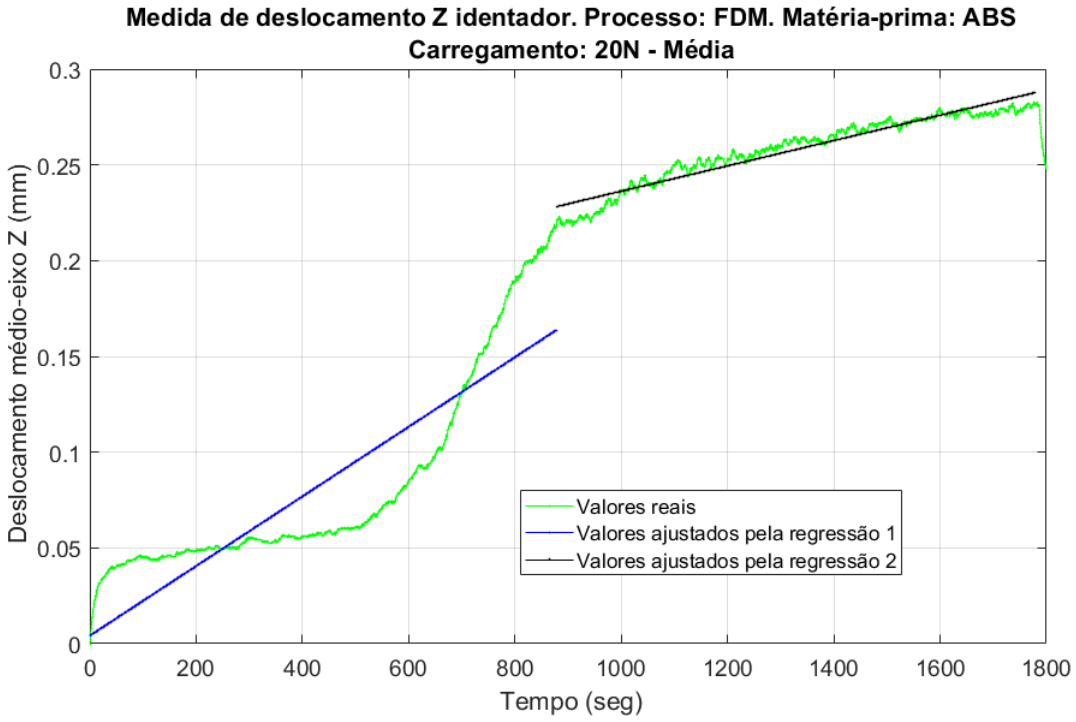


Figura 4.118 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: FDM - matéria-prima: ABS

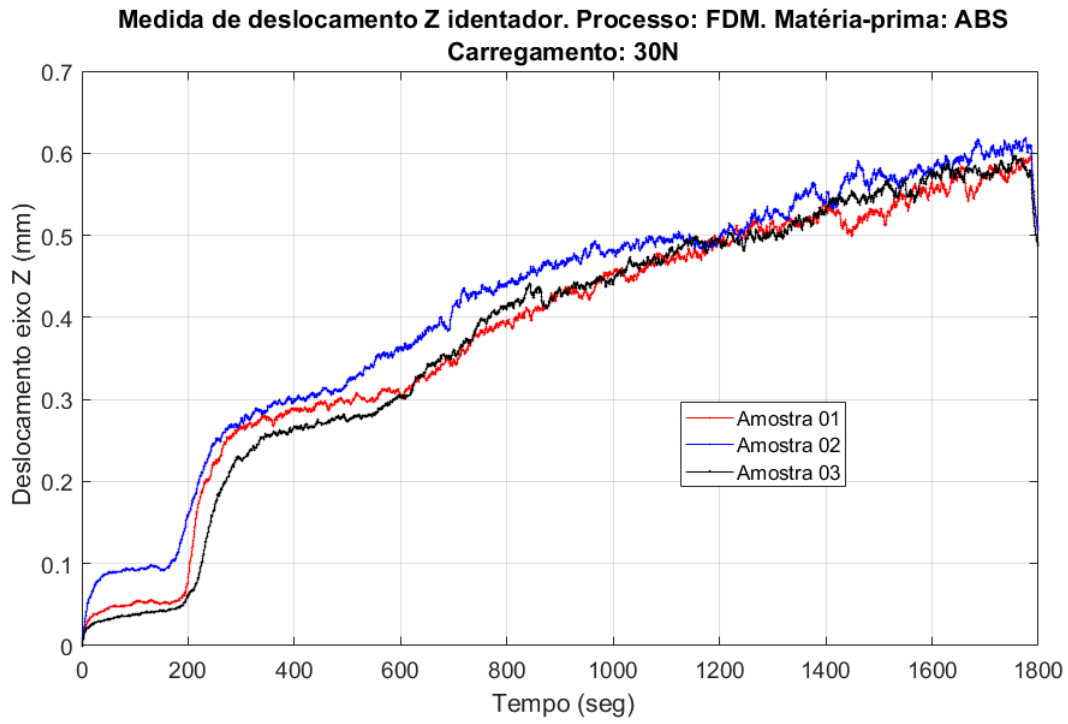


Figura 4.119 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: ABS

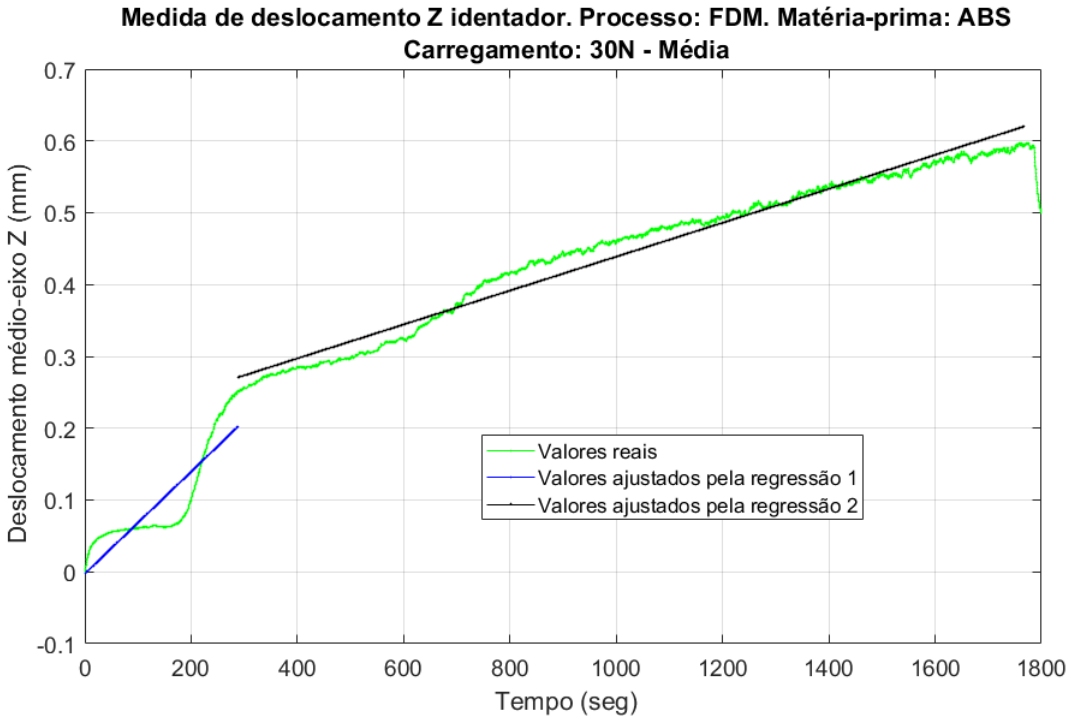


Figura 4.120 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: FDM - matéria-prima: ABS

4.5.7 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-CPs fabricados pelo processo moldagem por injeção com a matéria-prima ABS-granulado

Os resultados dos ensaios experimentais para determinação do CoF (coeficiente de atrito), obtidos nas amostras produzidas através do processo FDM e utilizando a matéria-prima

ABS-granulado, foram transcritos na Tab. 4.62 e no gráfico da Fig.4.121.

Tabela 4.62 – Valores do CoF (médios) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS-granulado

Amostras	Carga normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,0895	0,0565	0,0558
Amostra 02	0,0808	0,0575	0,0565
Amostra 03	0,0779	0,0626	0,0491
Média	0,0827	0,0589	0,0538

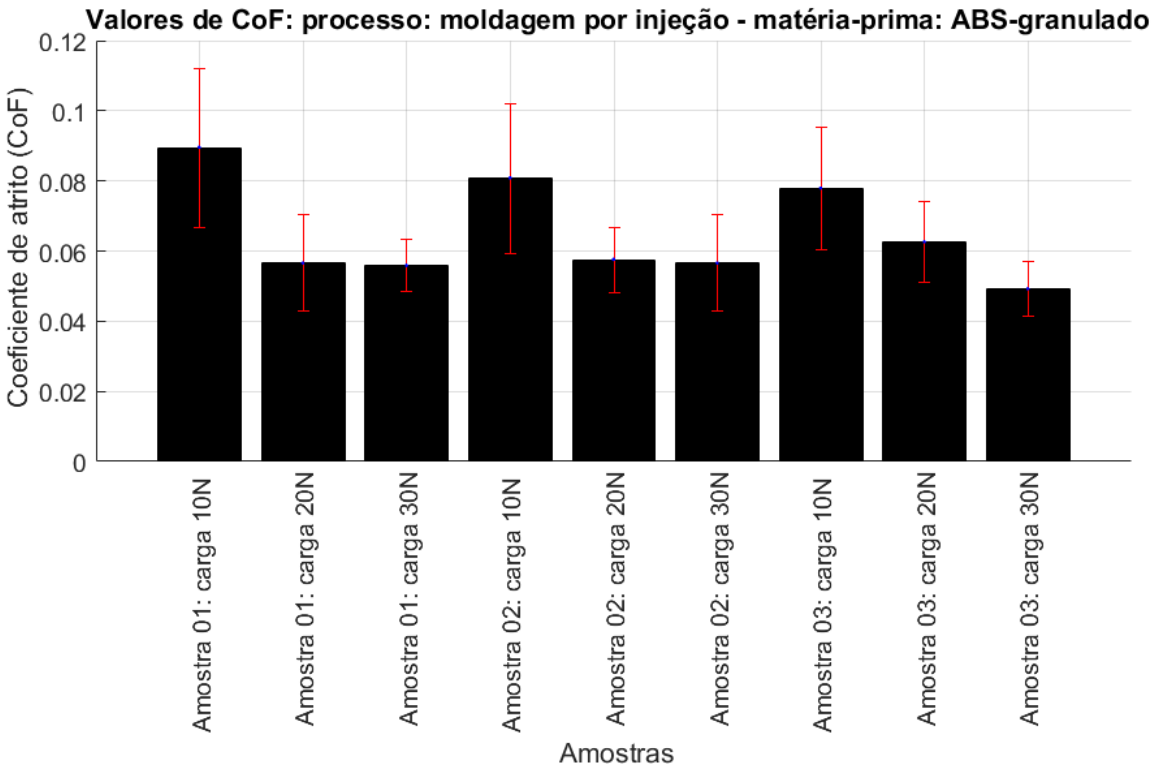


Figura 4.121 – Valores (médios) do CoF e desvio padrão obtidos no ensaio experimental - matéria-prima: ABS-granulado

Os valores do coeficiente de atrito (CoF) em função do tempo, obtidos nos ensaios realizados no tribômetro, foram plotados nos gráficos das Figuras 4.122, 4.123 e 4.124.

Os resultados dos ensaios experimentais, para determinação do desgaste obtido nos ensaios tribológicos (*reciprocating*), realizados nos CPs produzidos através do processo moldagem por injeção e utilizando a matéria-prima ABS-granulado, foram transcritos na Tab. 4.63 e no gráfico da Fig.4.125.

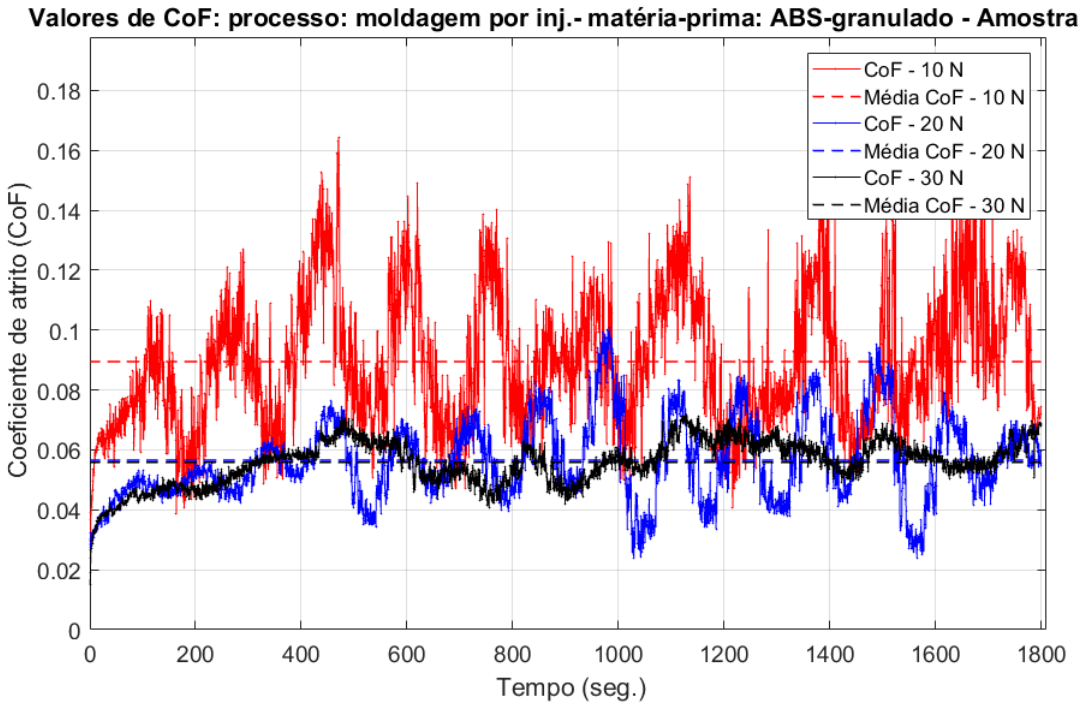


Figura 4.122 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 01

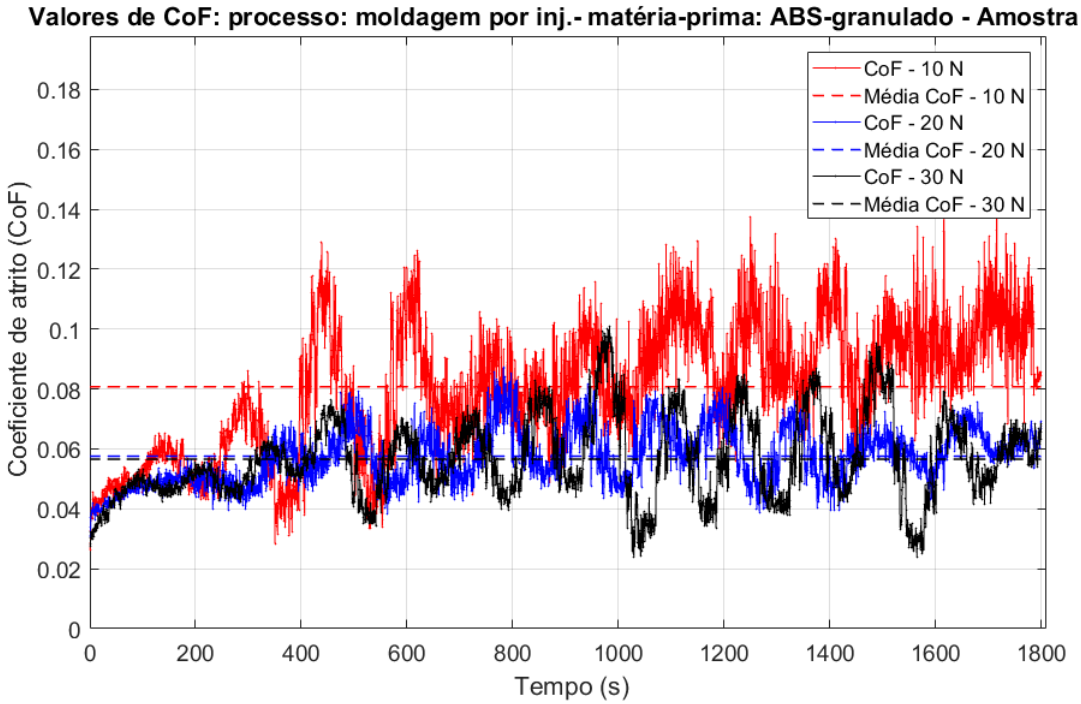


Figura 4.123 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 02

O gráfico da Fig.4.126, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo moldagem por injeção com a matéria-prima ABS-granulado , para o carregamento de 10N. Os procedimentos

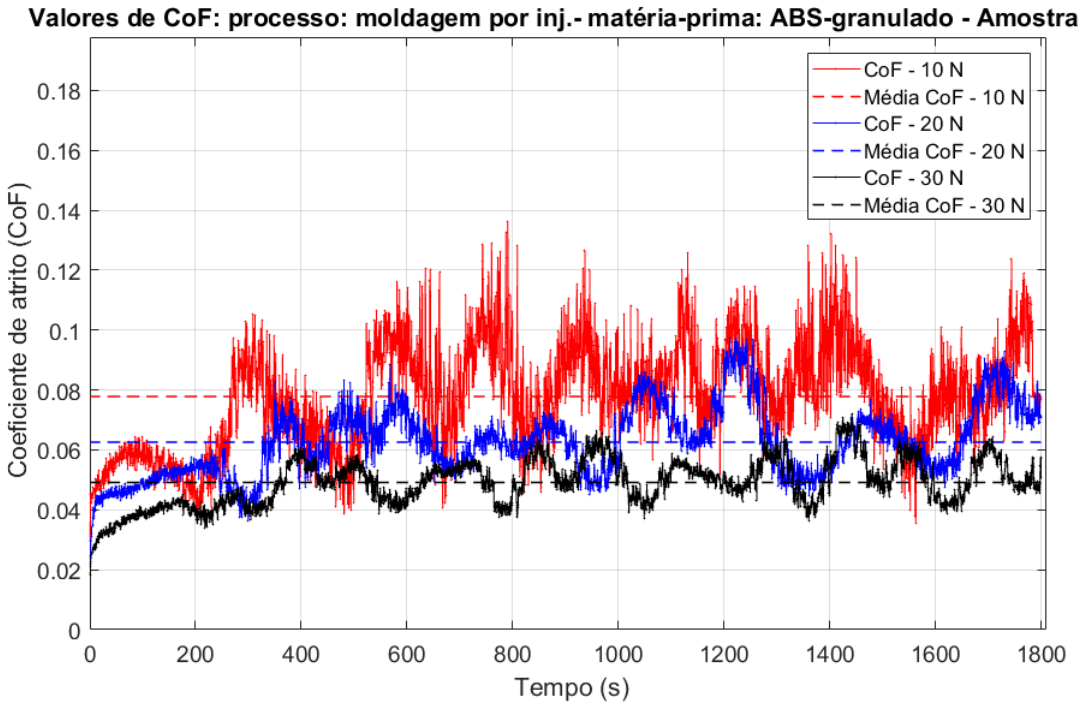


Figura 4.124 – Gráfico: CoF x tempo - amostra 03

Tabela 4.63 – Valores de desgaste (em mm) obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS-granulado

Amostras	Carga normal 10 (N)	20 (N)	30 (N)
Amostra 01	0,1153	0,2463	0,3838
Amostra 02	0,0458	0,1265	0,2326
Amostra 03	0,1701	0,1489	0,3001
Média	0,1103	0,1703	0,3055

e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 10N foi 0,1103 mm (Tab. 4.53) e nota-se, que aproximadamente 4% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 40 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.127).

O gráfico da Fig.4.128, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo moldagem por injeção com a matéria-prima ABS-granulado , para o carregamento de 20N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 20N foi 0,1703 mm (Tab. 4.53) e nota-se, que aproximadamente 12%

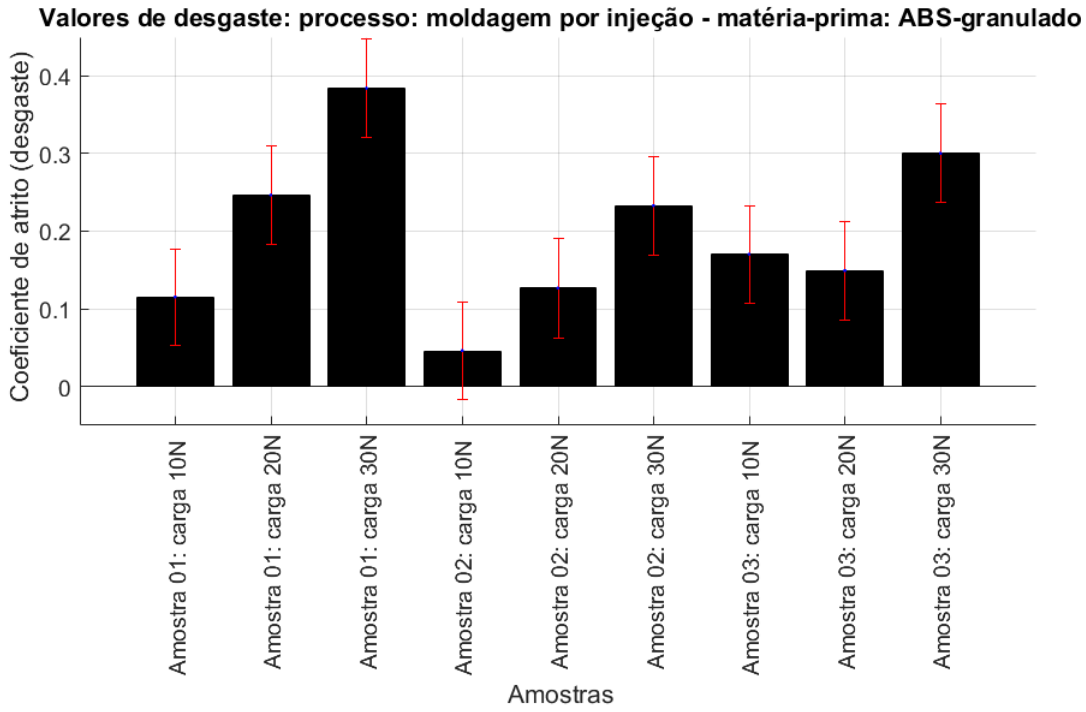


Figura 4.125 – Valores de desgaste (em mm) e desvio padrão obtidos nos ensaios experimentais - matéria-prima: ABS-granulado

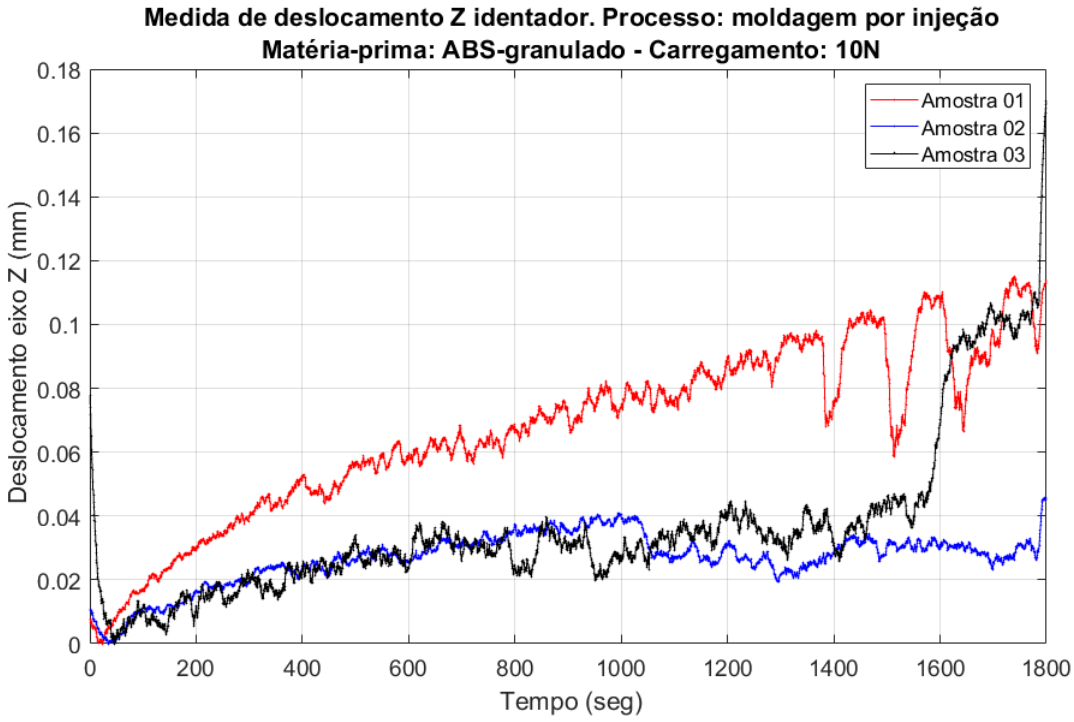


Figura 4.126 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 10N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: ABS-granulado

do desgaste médio total ocorre nos primeiros 162 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.129).

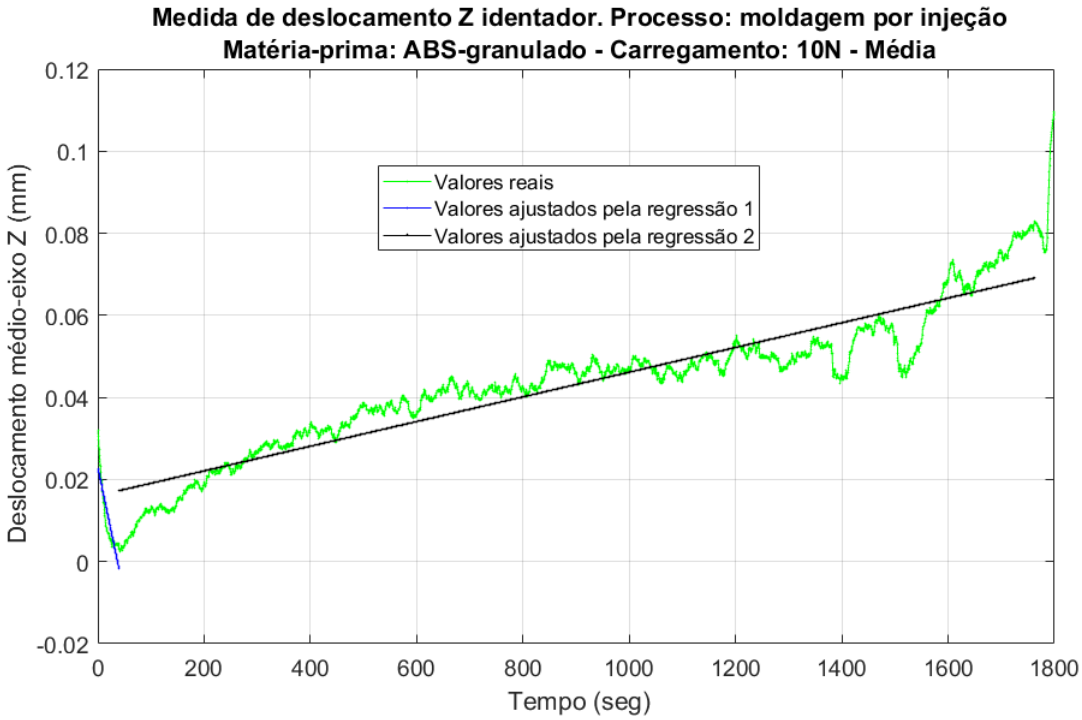


Figura 4.127 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 10N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: ABS-granulado

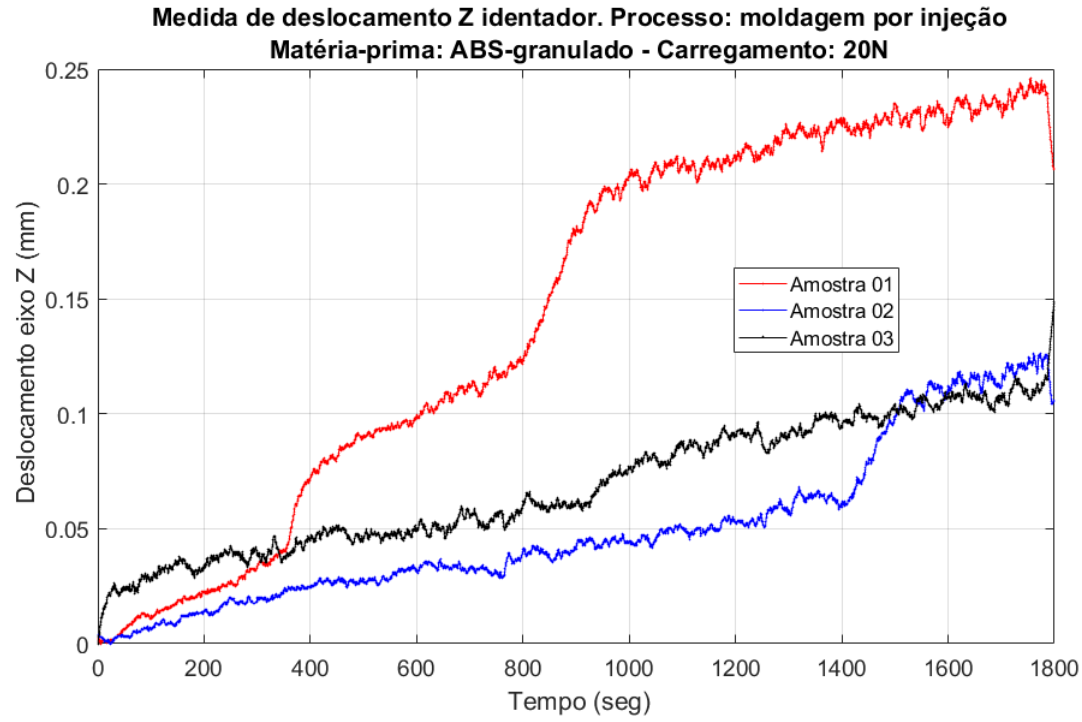


Figura 4.128 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 20N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: ABS-granulado

O gráfico da Fig.4.130, mostra o comportamento do deslocamento do indentador em Z, obtido através do ensaio tribológico nos CPs manufaturados pelo processo moldagem por

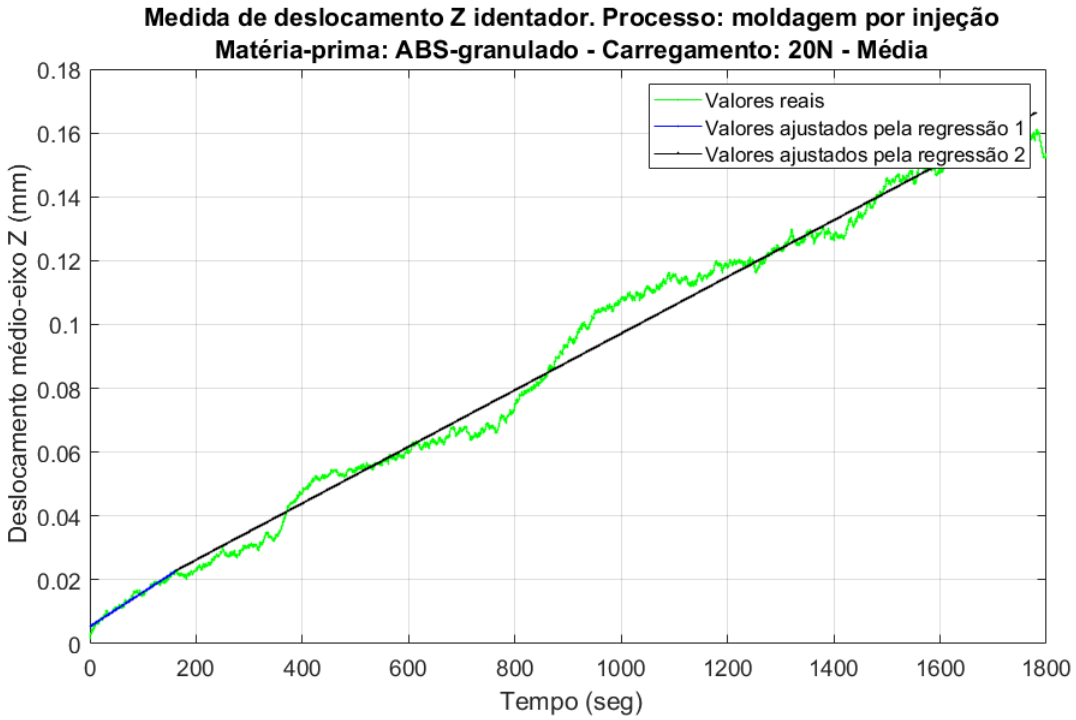


Figura 4.129 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 20N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: ABS-granulado

injeção com a matéria-prima ABS-granulado , para o carregamento de 30N. Os procedimentos e parâmetros do ensaio foram estabelecidos na Seção 3.3.3. O valor médio total do desgaste com carregamento igual a 30N foi 0,3055 mm (Tab. 4.53) e nota-se, que aproximadamente 33% do desgaste médio total ocorre nos primeiros 404 seg. (representado pela grande inclinação da regressão 1 do gráfico da Fig.4.131).

4.5.8 Ensaio para determinação do CoF e desgaste-Discussão dos resultados

Os resultados dos ensaios experimentais para determinação do CoF (coeficiente de atrito), desgaste e rugosidade obtidos nas amostras produzidas através do processo FDM utilizando as matérias-primas: PLA-grafeno, PLA, ABS-grafeno e ABS e através do processo moldagem por injeção utilizando as matérias-primas: PLA-granulado branco e incolor e ABS-granulado foram transcritos na Tab. 4.64.

Segundo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017), o comportamento do CoF, para polímero com superfície moderadamente rugosa e com baixas cargas normais, tende a diminuir com o aumento da carga normal (Fig.2.25). Pode ser explicado pela atuação conjunta das características dos materiais empregados, da diferença de rugosidade e da função lubrificante. Em função da

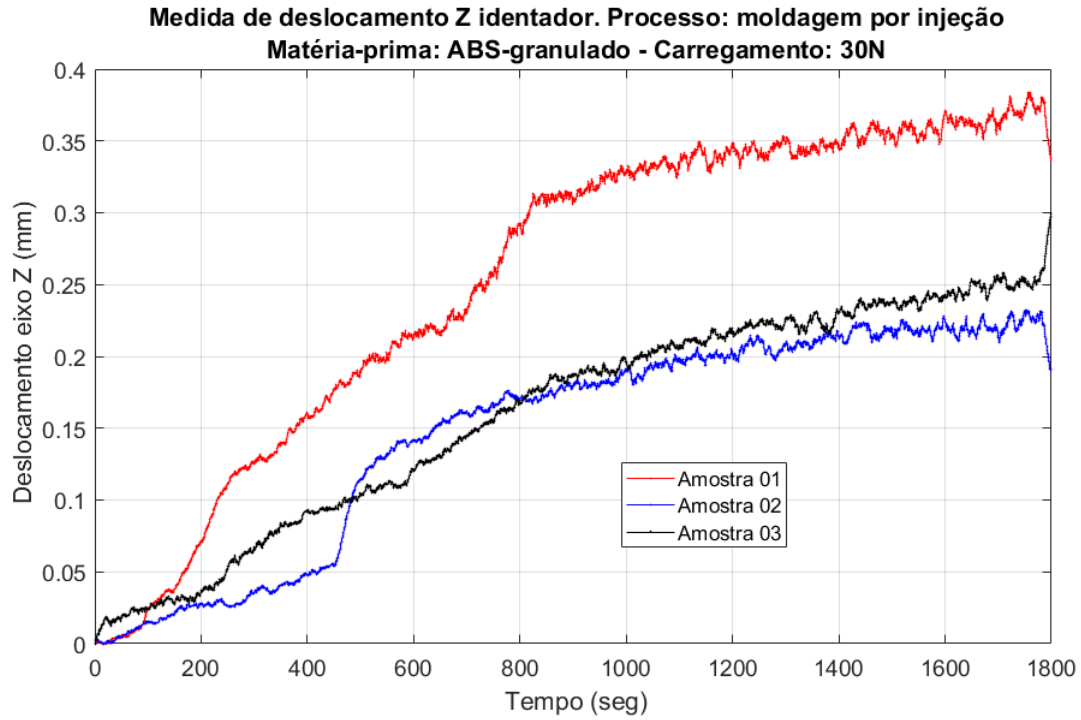


Figura 4.130 – Gráfico: desgaste x tempo - carregamento: 30N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: ABS-granulado

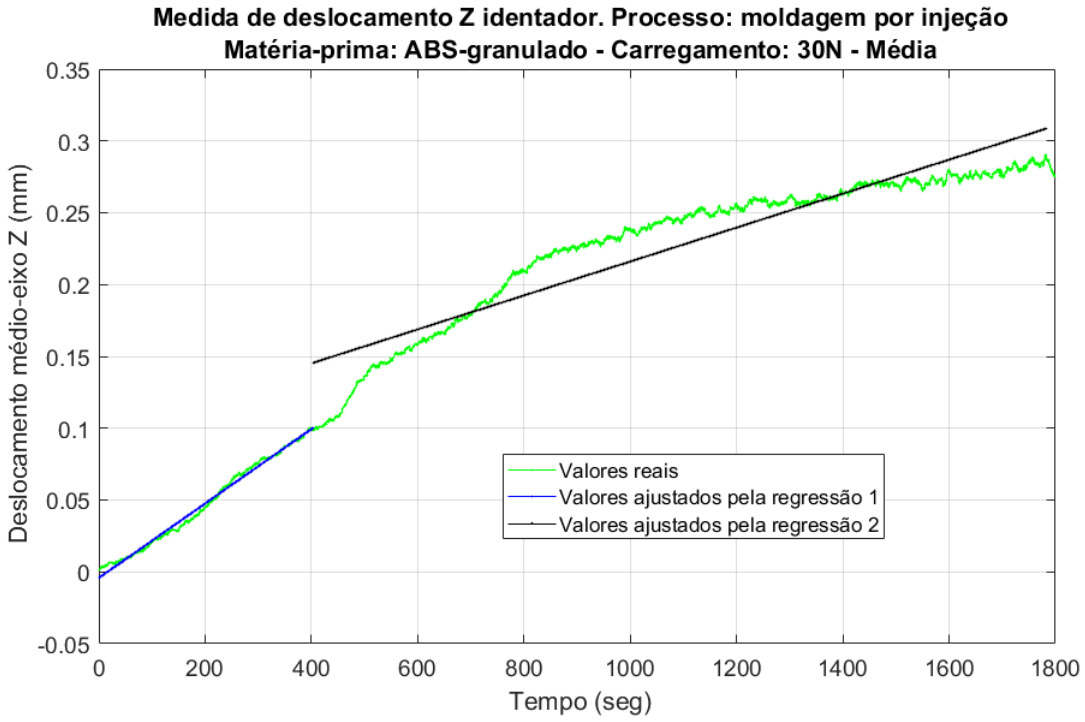


Figura 4.131 – Gráfico: ajustes/regressão do desgaste médio x tempo - carregamento: 30N - processo: moldagem por injeção - matéria-prima: ABS-granulado

disponibilidade de resultados, a análise do comportamento do CoF foi co-relacionado com as matérias-primas utilizadas na fabricação dos CPs, com os processos de manufatura (processo

Tabela 4.64 – Valores do CoF e desgaste (mm) médios, obtidos nos ensaios experimentais

Matéria-prima	Processo de manufatura	CoF			Desgaste			Rugosidade	
		Carga normal			Carga normal				
		10N	20N	30N	10N	20N	30N	R_a (μm)	R_z (μm)
PLA-grafeno	FDM	0,0548	0,0363	0,0316	0,1473	0,2948	0,4708	33,71	95,33
PLA	FDM	0,0492	0,0229	0,0186	0,0862	0,1173	0,1025	9,81	27,75
PLA-granulado branco	moldagem por injeção	0,1049	0,0457	0,0177	0,2203	0,1336	0,2232	0,58	1,65
PLA-granulado incolor	moldagem por injeção	0,0273	0,0562	0,0938	0,1866	0,2726	0,6302	0,15	0,41
ABS-grafeno	FDM	0,1009	0,0783	0,0769	0,1102	0,3995	0,6710	5,24	14,82
ABS	FDM	0,0627	0,0447	0,0489	0,0987	0,2868	0,6045	10,25	28,99
ABS-granulado	moldagem por injeção	0,0827	0,0589	0,0538	0,1103	0,1703	0,3055	1,27	3.58

FDM e moldagem por injeção) e com a rugosidade.

Foram ensaiados CPs produzidos por dois processos de manufatura: FDM e moldagem por injeção. Os CPs manufaturados através do processo de moldagem por injeção, são normalmente mais duros porque a matéria-prima é injetada em um molde sob pressão e a estrutura final será compactada. Pode-se verificar também, que os maiores valores de CoF são para as cargas menores e para os CPs manufaturados pelo processo de moldagem por injeção (4.132) e diminuíram com o aumento da carga normal. Este comportamento era esperado porque os CPs apresentam maior dureza e superfícies menos rugosas e quando submetidos à pequenas cargas normais, estas não são suficientes para aumentar a área de contato entre o indentador e o CP. Existe portanto, uma resistência maior ao "arrancamento" de material e por consequência, um valor maior de CoF. A única exceção ocorreu com o ensaio de determinação do CoF nos CPs manufaturados através do processo de moldagem por injeção e que utilizaram a matéria-prima PLA-granulado incolor, uma vez que o CoF aumentou com o aumento da carga normal. Este comportamento pode ser explicado pela composição da matéria-prima e da compactação do CP injetado. Estas características foram determinantes para impedir o "arrancamento" de material, o qual é realizado através do processo de adesão durante a fase inicial dos testes e impediu o aparecimento da função lubrificante na fase estacionária do ensaio. Como o CoF é proporcional a força de atrito e a carga normal durante o ensaio permanece constante, sem a função lubrificante,

esta força continuou aumentando, razão pela qual o CoF aumentou.

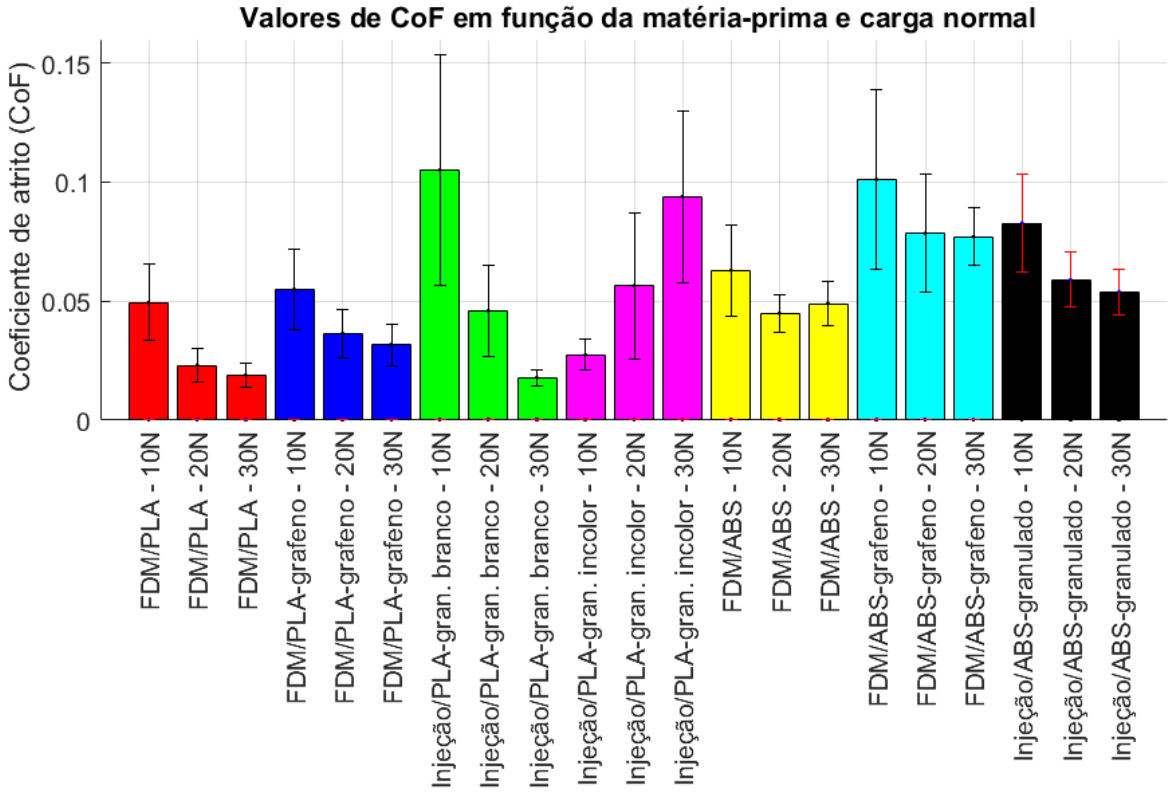


Figura 4.132 – Valores do CoF (médios) em função das matérias-primas, processos de manufatura e carga normal

Os valores de CoF para as matérias-primas PLA e PLA-grafeno foram estudados por (BUSTILLOS et al., 2017). Neste estudo, o comportamento da deformação induzida por fluência em micro escala de PLA e PLA-grafeno é altamente dependente de sua estrutura molecular. Devido à sua estrutura não cristalina com longas cadeias entrelaçadas e ligações covalentes, a mobilidade da cadeia superior é experimentada no PLA sob a aplicação de uma carga. Uma significativa rotação e translação de cadeias são observadas durante o esforço de uma carga constante, como aquela experimentada durante um teste para medição do CoF, para o qual a deformação apresenta um comportamento visco-elástico. Nota-se que um maior deslocamento de fluência foi adquirido pelo PLA durante a sua região transitória, em comparação com o PLA-grafeno. Durante a fluência primária, a taxa de deformação tende a diminuir com o tempo. Este é o motivo pelo qual o PLA-grafeno possui valores de CoF e desgaste maiores comparados ao PLA, o qual possui estrutura livre para rotações enquanto que no PLA-grafeno a movimentação destas camada poliméricas é impedida.

Outra característica bastante influente nos resultados é a rugosidade. Segundo (HUT-

CHINGS; SHIPWAY, 2017), (MILAK et al., 2015), (HURTADO, 2015), quanto maior a rugosidade, maiores são as interferências entre os materiais em contato. Estas interferências provocam resistência ao deslizamento entre o pino e a matéria-prima. A força exercida para romper esta interferência gera calor com consequente aumento de temperatura na interface de contato entre os materiais. Na superfície, o calor facilmente se dissipa e a temperatura cai rapidamente. No entanto, na camada da superfície desgastada, a dissipação de calor é mais difícil porque os polímeros não são bons condutores de calor. Nesta região a temperatura apresenta-se mais elevada o que reduz a energia de coesão da matéria-prima. Em função da ação repetitiva de várias partículas abrasiva, as trincas formadas se estendem e se interceptam, e este fenômeno conduz a formação de desgaste. Estes fenômenos acontecem no primeiro estágio do ensaio. Na fase estacionária, o material retirado por "arrancamento", através do processo de adesão, acumula-se no indentador e passa exercer a função lubrificante e minimiza a força necessária para fazer o deslizamento e consequentemente diminui tanto o Cof quanto o desgaste. Conforme explicado na Seção 2.6.3, foram reproduzidos diversos valores de rugosidade em um polímero vítreo. A conclusão foi inserida no gráfico da Fig.2.25. Nos ensaios conduzidos nesta pesquisa, não foi possível reproduzir vários valores de rugosidade em um mesmo CP, razão pela qual não foi feita uma co-relação isolada do desgaste em função da rugosidade. Para os experimentos realizados, podemos certamente concluir que tanto o CoF quanto o desgaste são funções da atuação conjunta dos fatores: matéria-prima, processo de fabricação e cargas normais.

Os valores médios de rugosidade medidos nestes CPs, para cada matéria-prima utilizada na manufatura, estão contidos na Tab. 4.64. Nota-se claramente que as rugosidades (R_a e R_z), obtidas nos CPs produzidos através do processo FDM e que utilizaram a matéria-prima PLA-grafeno, são 243,5 % maiores que as rugosidades médias do PLA. Se comparadas às rugosidade dos CPs produzidos através do processo moldagem por injeção que utilizaram a matéria-prima PLA-granulado branco este percentual sobe para 5.516,7%. Importante observar a rugosidade dos CPs manufaturados através do processo de moldagem por injeção, a qual possui dependência direta com a rugosidade do molde e portanto as comparações aqui realizadas servem apenas para este estudo e não pode ser extrapolado para outros. Os CPs produzidos pelo processo FDM e que utilizaram a matéria-prima ABS, são 98,1 % maiores que as rugosidades médias obtidas nos CPs produzidos através do processo FDM e que utilizaram a matéria-prima ABS-grafeno.

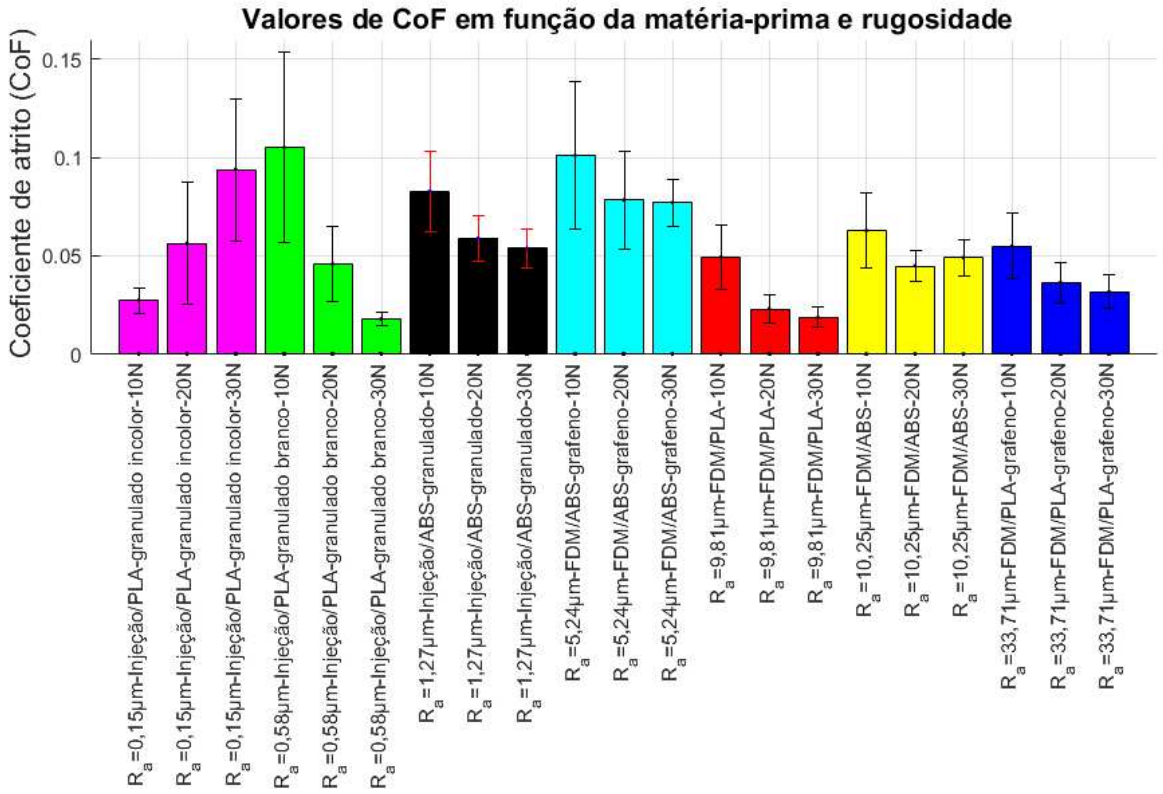


Figura 4.133 – Valores CoF (médios) em função das matérias-primas, processos de manufatura, rugosidade R_a e carga normal

Se comparadas às rugosidade obtidas nos CPs produzidos através do processo de moldagem por injeção e que utilizaram a matéria-prima ABS-granulado este percentual sobe para 692,3%.

Segundo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017), o desgaste, pode ser correlacionado com o módulo de elasticidade, com a rugosidade, com a dureza e com a relação Ratner-Lancaster $(1/\sigma_u\varepsilon_u)$ e tem forte correlação com a carga normal aplicada, e que no caso dos polímeros, aumenta com o aumento desta carga normal. Em função da disponibilidade de resultados, a análise do comportamento do desgaste nesta pesquisa, foi co-relacionada com as matérias-primas utilizadas na fabricação dos CPs, com os processos de manufatura (processo FDM e moldagem por injeção) e com a rugosidade porém foi analisada através da atuação conjunta destes parâmetros e não isoladamente.

Os valores desgaste (representado pela cota Z do indentador), foram transcritos na (Tab. 4.64 e Fig.4.134). Verifica-se que o desgaste aumenta com o aumento da carga normal. Os valores de desgaste observados nos CPs, que utilizaram matéria-prima com adição do grafeno, foram maiores do que nos CPs que utilizaram matéria-prima sem grafeno. O processo de manufatura também interfere nos resultados e mais uma vez o desgaste, neste estudo, é função

da atuação conjunta entre a carga normal, matéria-prima utilizada e processo de manufatura.

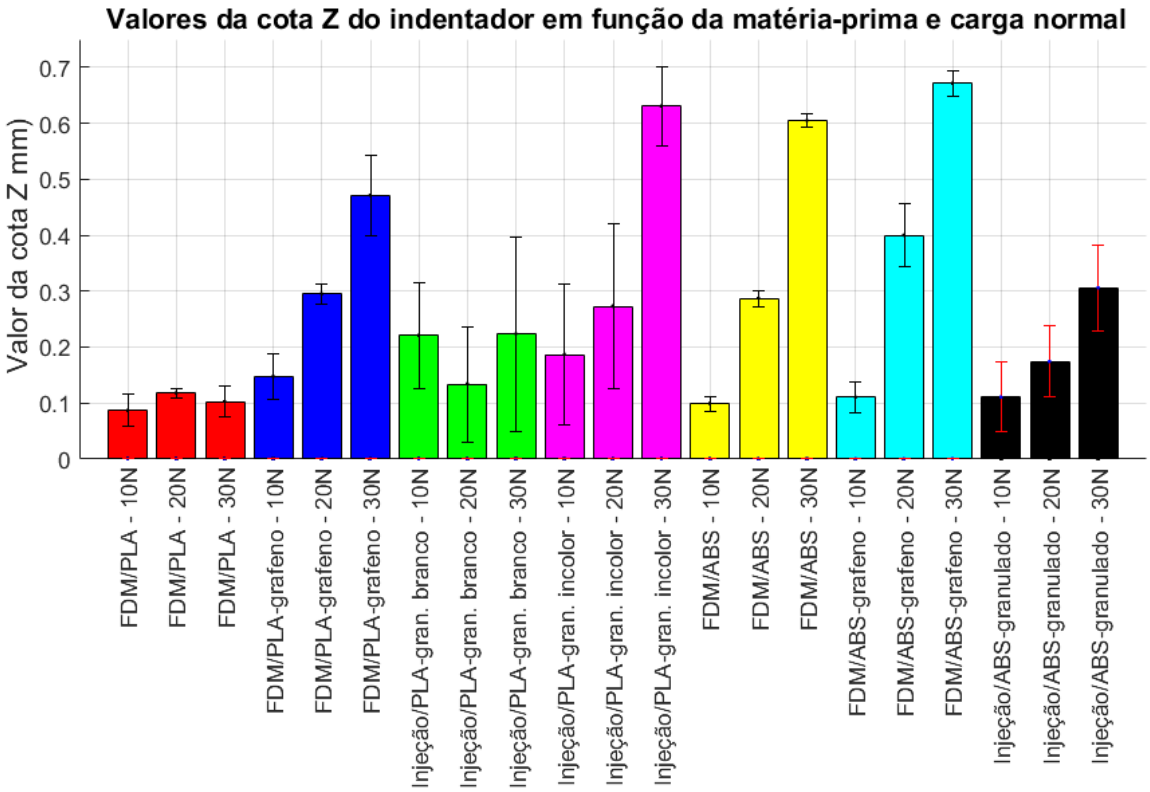


Figura 4.134 – Valores de desgaste (representado pela cota Z do indentador) médio (mm) em função das matérias-primas, processos de manufatura e carga normal

O mecanismo de desgaste mais importante neste processo é o de adesão. Segundo (BUCKLEY, 1981) e (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017), quando existe um deslizamento entre um polímero e um metal, o cisalhamento ocorre no polímero (devido as ligações menos resistentes) e uma película deste polímero é deixada na superfície sólida (Fig.4.135). Em outras palavras, a ligação interfacial formada entre o polímero e o substrato sólido (vidro ou metal) é mais resistente do que a ligação no polímero ou seja, devido ao desgaste por adesão existe um processo de "arrancamento" da matéria-prima que a faz acumular no pino do tribômetro.

Segundo (BUSTILLOS et al., 2017), para se entender o comportamento do desgaste de peças manufaturadas através do processo FDM, as quais utilizam matéria-prima composta de polímeros, entre elas o PLA, é necessário estudar as imagens produzidas pelo MEV na região do ensaio. As imagens das Figuras 4.136a e b, mostram regiões de delaminação de grande porte características do desgaste adesivo por cisalhamento. As características poliméricas degradadas são atribuídas ao calor devido ao atrito gerado durante o processo de cisalhamento da superfície. Durante este período, ocorre um amolecimento induzido por cisalhamento do polímero, origi-

nando o desprendimento de partículas poliméricas, resultando na transferência de aglomerados de detritos por toda a faixa de desgaste, responsável pelo maior COF consequentemente maior desgaste. Este desprendimento de aglomerados, gera detritos de tamanho reduzido os quais são atribuídos à fácil separação dos flocos de grafeno da matriz do polímero auxiliado pela baixa cristalinidade do PLA-grafeno e pela fraca ligação interfacial entre o PLA e o grafeno. As imagens da Figuras 4.137a e b, mostram a formação de um tribofilme liso composto de flocos de compósitos o qual atua como um lubrificante durante o ensaio. Este filme composto pela matéria-prima desprendida, atua como lubrificante no processo e impede que haja uma aumento de temperatura na interface entre o indentador e o CP, ambiente que não favorece o aparecimento do processo de adesão. O aparecimento do filme lubrificante explica porque o desgaste é acelerado no inicio do processo e depois diminui. As características das matérias-primas, das funções lubrificantes, dos processos de manufatura e da aplicação da carga normal podem explicar os resultados obtidos para o desgaste.

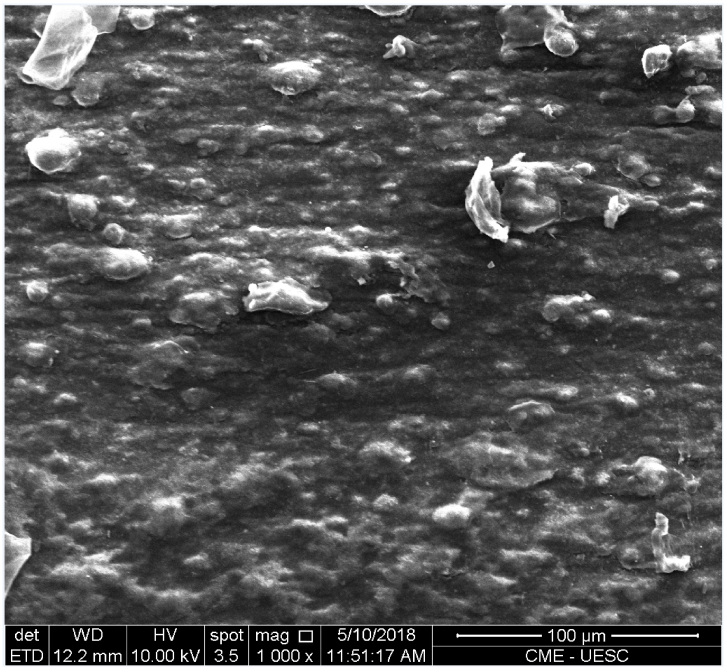
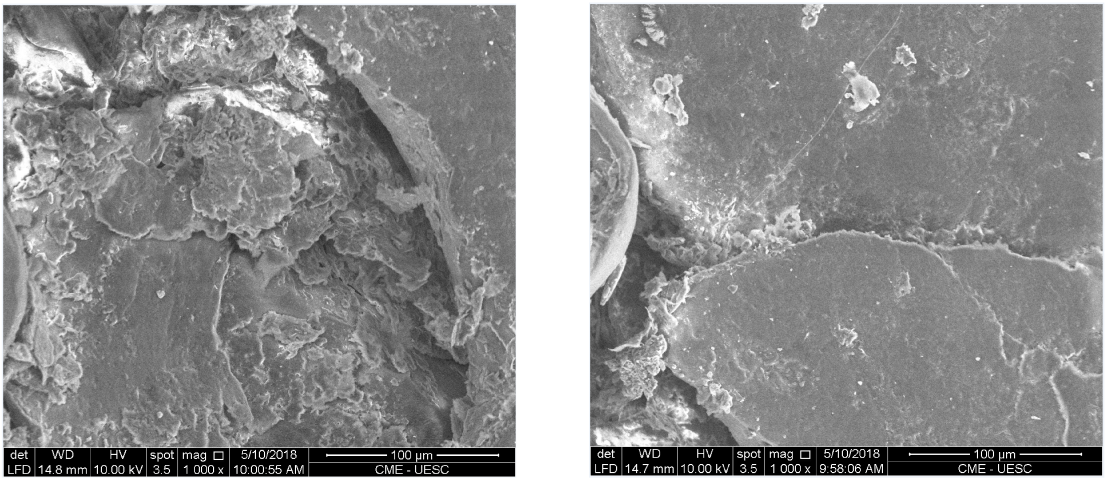


Figura 4.135 – Imagens MEV: comportamento do desgaste do ABS-grafeno com a predominância do desgaste adesivo (caracterizado pela presença de detritos de grande tamanho) e processo de delaminação característica de cisalhamento

Os ensaios no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) e EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva) realizados nod CPs produzidos através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA-grafeno foram reproduzidos na Fig.4.138. A Fig.4.139 identifica a região do



(a) (b)

Figura 4.136 – Imagens MEV: comportamento do desgaste do PLA-grafeno - (a) predominância do desgaste adesivo (caracterizado pela presença de detritos de grande tamanho), (b) processo de delaminação característica de cisalhamento - adaptado de (BUSTILLOS et al., 2017).

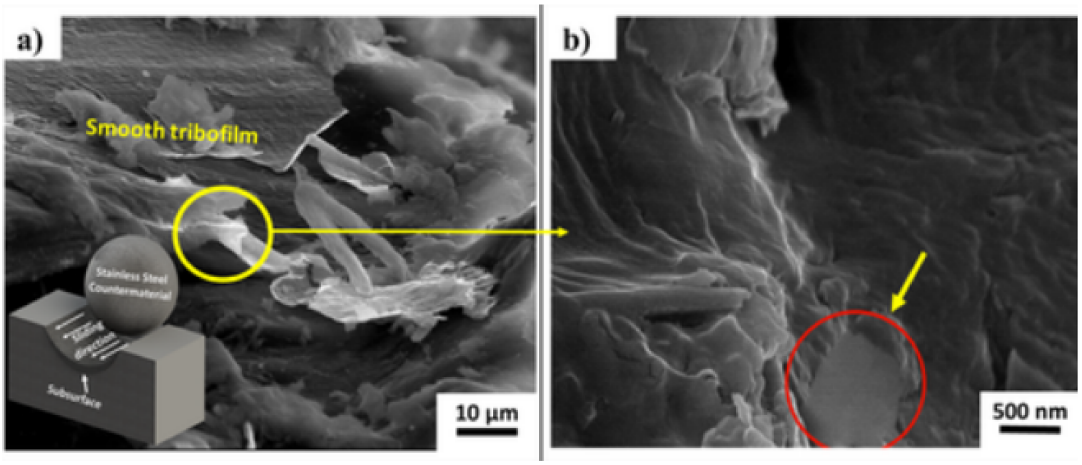
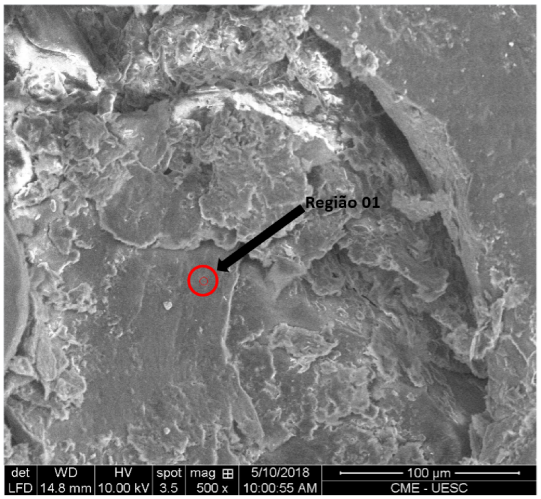


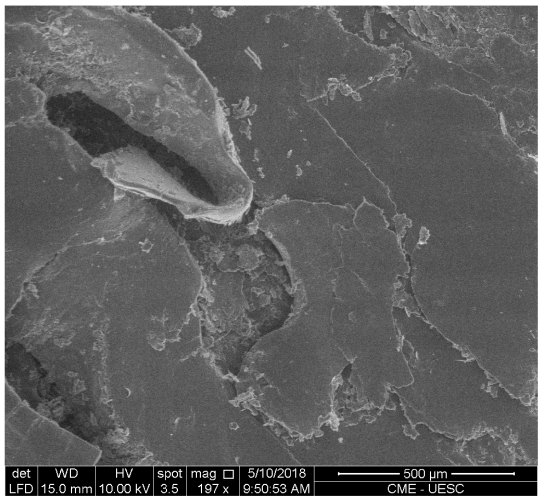
Figura 4.137 – (a) Amostra PLA-grafeno com *tribofilm*, (b) presença de flocos de compósitos na trilha de desgaste - imagens extraídas de (BUSTILLOS et al., 2017).

ensaio e dos locais onde foram feitos os ensaios MEV e EDS. A região identificada como 01 (Figuras 4.138a e 4.138b) e correspondem ao local de ensaio no tribômetro e nota-se claramente a aparência de desgaste adesivo em contraste com a imagem da Fig.4.140b o qual corresponde a imagem ampliada da região da região 02. A região identificada como 02 (Figuras 4.140a e 4.140b) correspondem a parte do CP que não houve ensaio. As Figuras 4.138c e 4.140c mostram que a composição do PLA-grafeno possui C e O na proporção de 64% e 36% respectivamente.

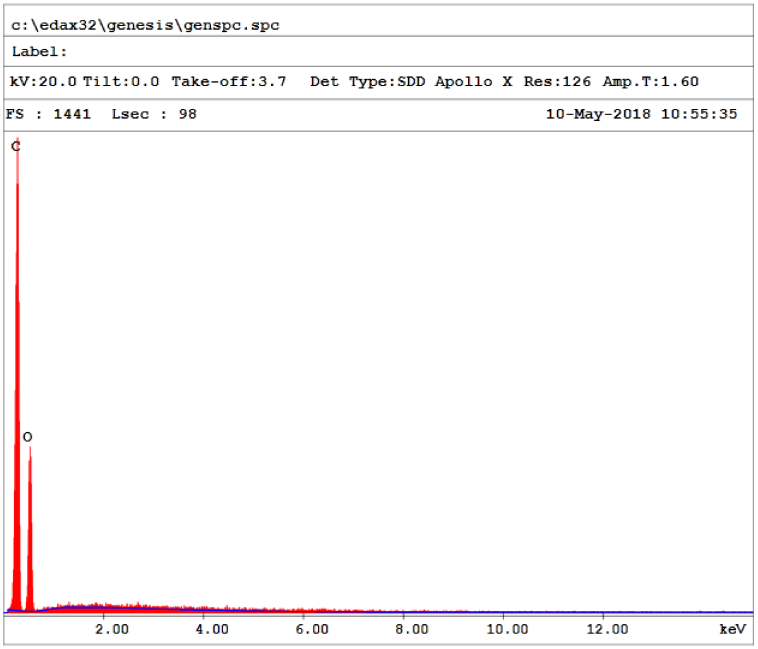
Para efeito de comparação, também foram realizados os mesmos ensaios no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) e EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva), nos CPs



(a) MEV - detalhe região 01



(b) MEV - detalhe região 01 ampliada



EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	62.84	69.25	0.3789	1.0062	0.5991	1.0002
O K	37.16	30.75	0.0565	0.9895	0.1536	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	61.44	0.30	1.29	201.53
O K	24.88	0.24	2.04	102.00

(c) EDS - matéria-prima: PLA-grafeno - Quantitativo na região 01

Figura 4.138 – MEV e EDS em CP utilizado no ensaio de determinação do CoF (detalhe da região 01 ensaiada - Fig.4.139) - matéria-prima: PLA-grafeno

produzidos através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA os quais foram reproduzidos na Fig.4.141. A Fig.4.142 identifica a região do ensaio e dos locais onde foram feitos os



Figura 4.139 – Identificação dos locais de ensaio para determinação do CoF em CP produzido pelo processo FDM com matéria-prima: PLA-grafeno

ensaios MEV e EDS. A região identificada como 01 (Figuras 4.141a e 4.141b), correspondem ao local de ensaio no tribômetro e nota-se claramente a aparência de desgaste adesivo em contraste com a imagem da Fig.4.143b o qual corresponde a imagem ampliada da região da região 02. A região identificada como 02 (Figuras 4.143a e 4.143b), correspondem a parte do CP que não houve ensaio. As Figuras 4.141c e 4.143c, mostram que a composição do PLA possui C e O na proporção de 70% e 30% respectivamente.

Conclui-se que tanto os valores do CoF quanto o de desgaste, são fortemente dependentes da atuação conjunta entre matéria-prima, processo de fabricação e rugosidade. Nesta pesquisa não foi possível, em função dos resultados existentes, estabelecer uma relação isolada entre as duas respostas e os fatores estudados.

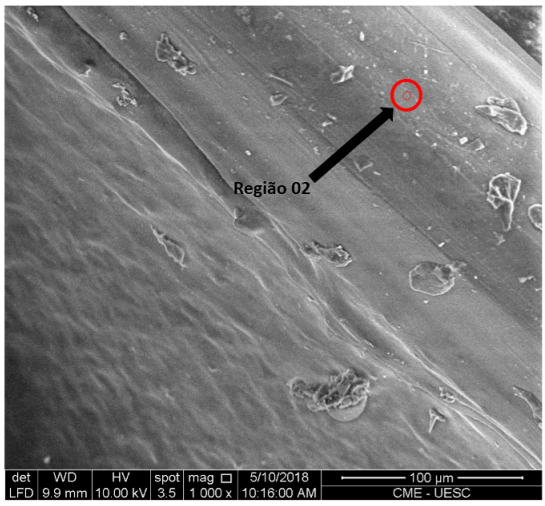
4.6 Resultados dos ensaios de qualidade

4.6.1 Ensaios de qualidade dimensional-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno

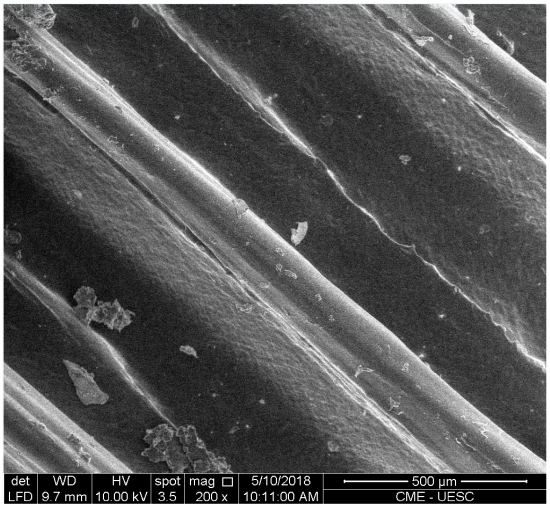
Os resultados dos ensaios experimentais de qualidade dimensional dos CPs produzidos com a matéria-prima PLA-grafeno, foram plotados nos gráficos das Figuras 4.144, 4.145, 4.146 e 4.147.

4.6.2 Ensaios de qualidade dimensional-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA

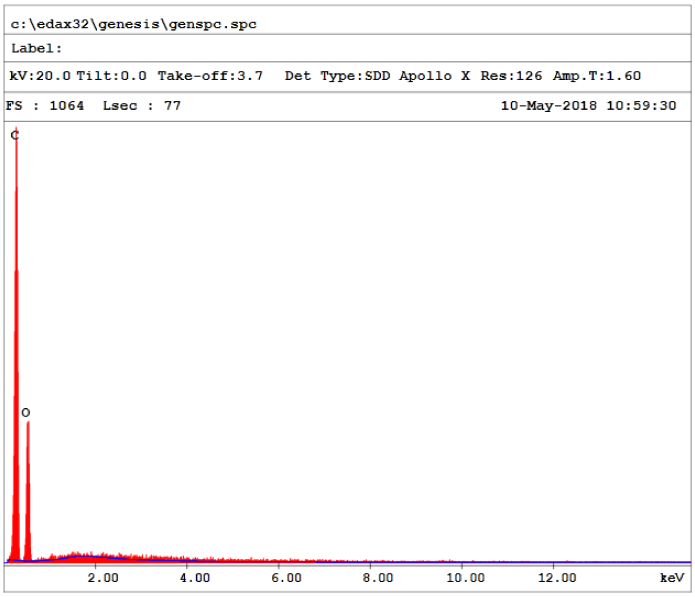
Os resultados dos ensaios experimentais de qualidade dimensional dos CPs produzidos com a matéria-prima PLA, foram plotados nos gráficos das Figuras 4.148, 4.149, 4.150 e 4.151.



(a) MEV - detalhe região 02



(b) MEV - detalhe região 02 ampliada



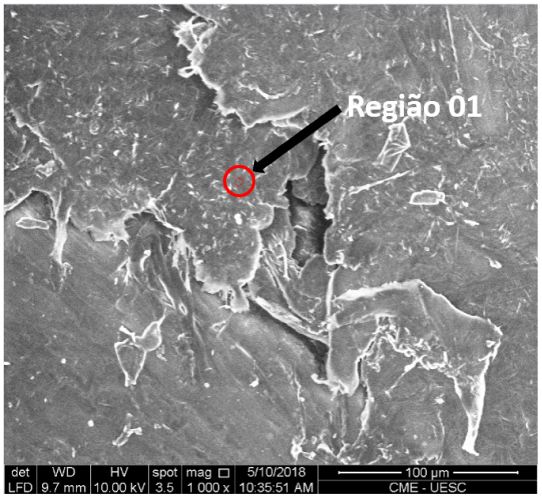
EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	64.09	70.39	0.3916	1.0060	0.6073	1.0002
O K	35.91	29.61	0.0537	0.9893	0.1511	1.0000
Total	100.00	100.00				

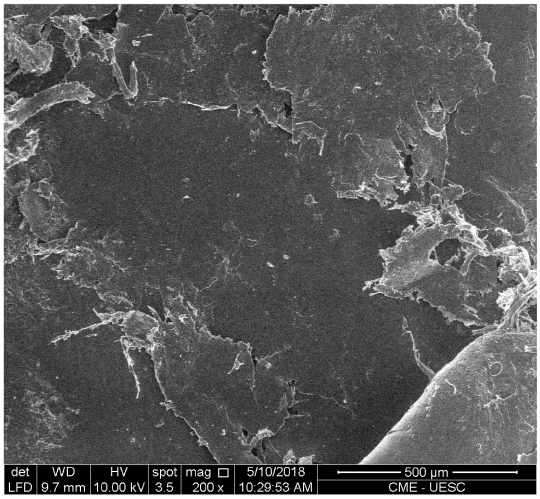
Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	59.44	0.39	1.48	153.53
O K	22.12	0.31	2.45	71.42

(c) EDS - matéria-prima: PLA-grafeno - Quantitativo na região 02

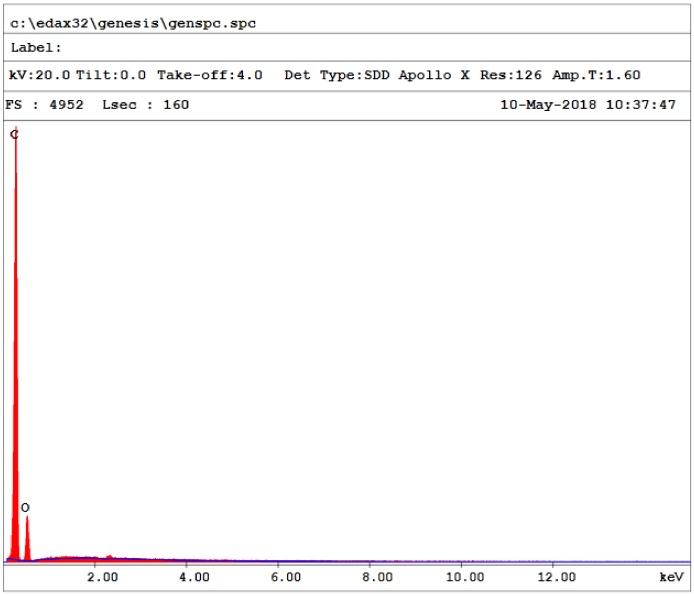
Figura 4.140 – MEV e EDS em CP utilizado no ensaio de determinação do CoF (detalhe da região 02 fora da região de ensaio - Fig.4.139) - matéria-prima: PLA-grafeno



(a) MEV - detalhe região 01



(b) MEV - detalhe região 01 ampliada



EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	79.95	84.15	0.5894	1.0033	0.7348	1.0001
O K	20.05	15.85	0.0247	0.9867	0.1249	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	134.68	0.67	0.68	200.06
O K	15.40	0.43	2.07	35.81

(c) EDS - matéria-prima: PLA-grafeno - Quantitativo na região 01

Figura 4.141 – MEV e EDS em CP utilizado no ensaio de determinação do CoF (detalhe da região 01 ensaiada - Fig.4.142) - matéria-prima: PLA

4.6.3 Ensaios de qualidade dimensional-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno

Os resultados dos ensaios experimentais de qualidade dimensional dos CPs produzidos com a matéria prima ABS-grafeno, foram plotados nos gráficos das Figuras 4.152, 4.153, 4.154

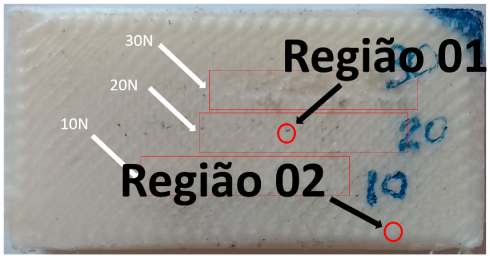


Figura 4.142 – Identificação dos locais de ensaio para determinação do CoF em CP produzido pelo processo FDM com matéria-prima: PLA

e 4.155.

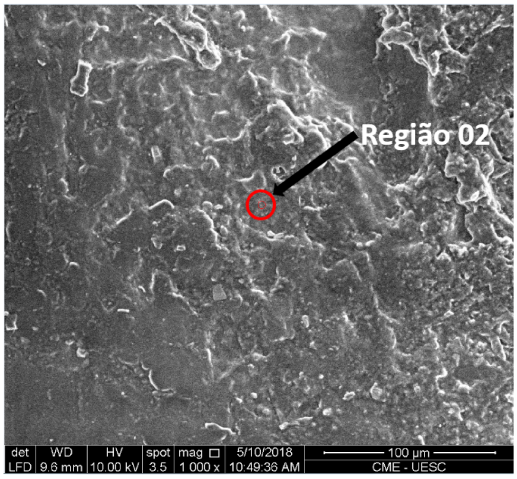
4.6.4 Ensaios de qualidade dimensional-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS

Os resultados dos ensaios experimentais de qualidade dimensional dos CPs produzidos com a matéria-prima ABS, foram plotados nos gráficos das Figuras 4.156, 4.157, 4.158 e 4.159.

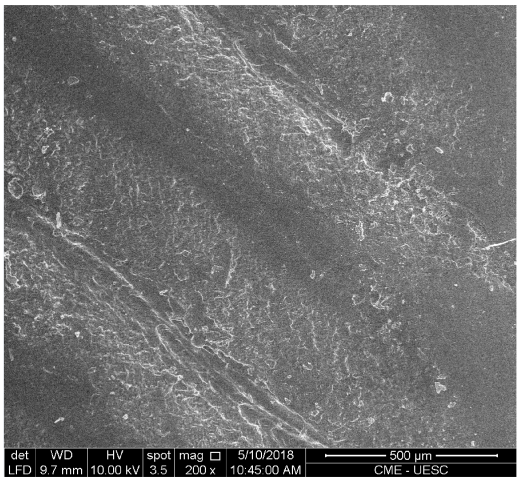
4.6.5 Ensaios de qualidade dimensional-Discussão dos resultados

Os resultados dos ensaios experimentais de qualidade dimensional dos CPs produzidos pelo processo FDM e que utilizaram as matérias-primas PLA-grafeno, PLA, ABS-grafeno e ABS foram transcritos na Tab. 4.65.

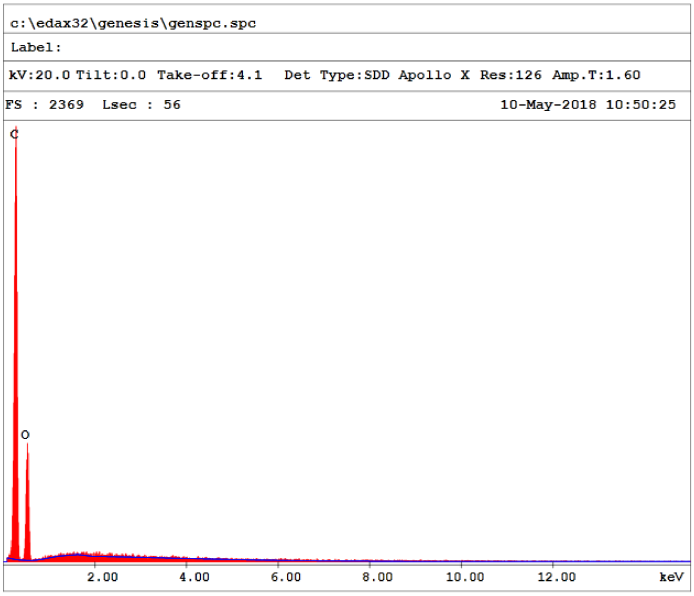
Pela metodologia aplicada, concluiu-se que o índice de qualidade IT dos CPs, manufaturados pelo processo FDM, variou entre 12 e 13, nos CPs que utilizaram a matéria-prima PLA-grafeno, entre 13 e 14, para o os CPs que utilizaram a matéria-prima PLA e entre 12 e 14, para os CPs que utilizaram as matérias-primas ABS-grafeno e ABS. Os desvios padrões obtidos nos ensaios realizados nos CPs que utilizaram a matéria-prima PLA-grafeno, foram ligeiramente inferiores aos medidos nos CPs que utilizaram a matéria-prima PLA. Também foram ligeiramente inferiores, nos ensaios realizados nos CPs que utilizaram a matéria-prima ABS-grafeno em comparação a matéria-prima ABS. O índice de qualidade IT variou entre os mesmos valores para ambas as matérias-primas, e não teve influência significativa nos resultados.



(a) MEV - detalhe região 02



(b) MEV - detalhe região 02 ampliada



EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	67.03	73.04	0.4230	1.0055	0.6275	1.0002
O K	32.97	26.96	0.0474	0.9888	0.1454	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	175.34	1.06	1.01	166.18
O K	53.70	0.74	1.83	72.71

(c) EDS - matéria-prima: PLA - Quantitativo na região 02

Figura 4.143 – MEV e EDS em CP utilizado no ensaio de determinação do CoF (detalhe da região 02 ensaiada - Fig.4.142) - matéria-prima: PLA

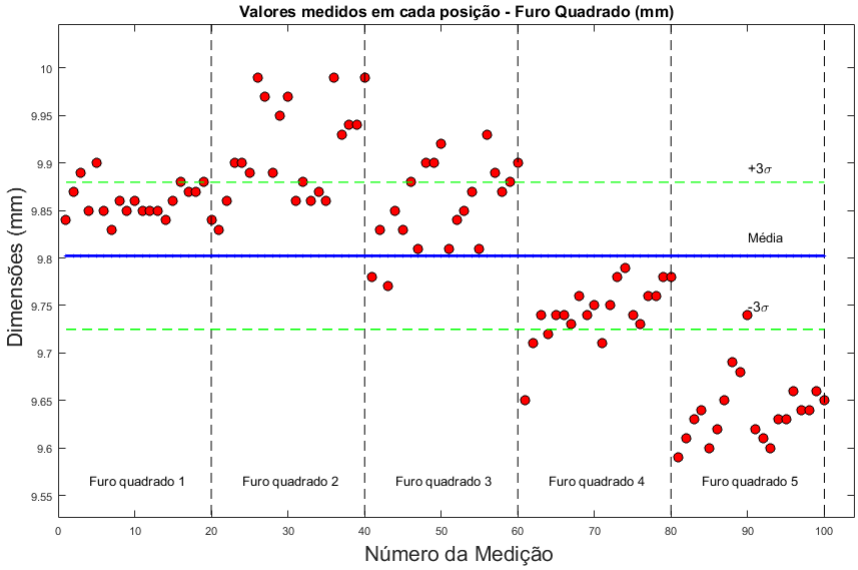


Figura 4.144 – Gráfico: valores medidos em cada posição - furo quadrado - PLA-grafeno

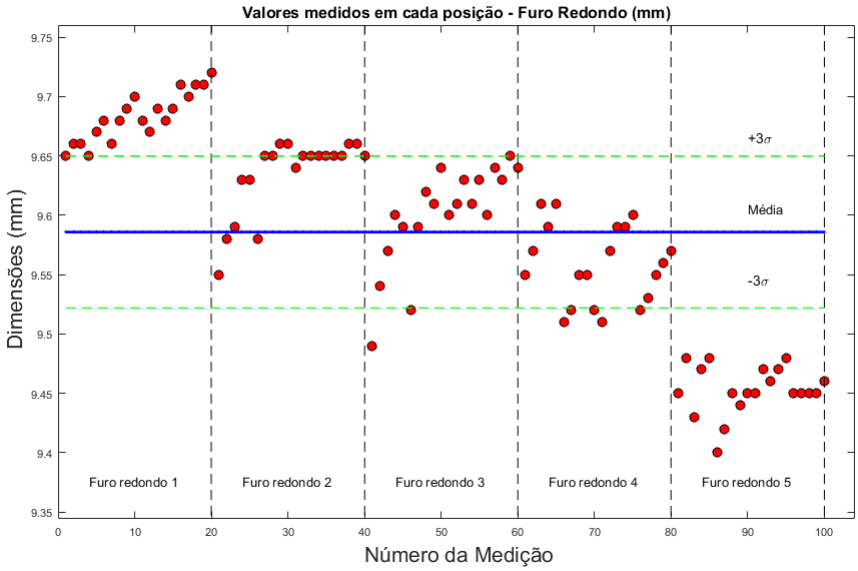


Figura 4.145 – Gráfico: valores medidos em cada posição - furo redondo - PLA-grafeno

4.7 Resultados dos ensaios de rugosidade superficial

4.7.1 Ensaio de rugosidade superficial-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno

Os resultados dos ensaios experimentais de rugosidade superficial (R_a e R_z), realizados nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA-grafeno, foram transcritos na Tab. 4.66 e plotados no gráfico das Figuras 4.160 e 4.161.

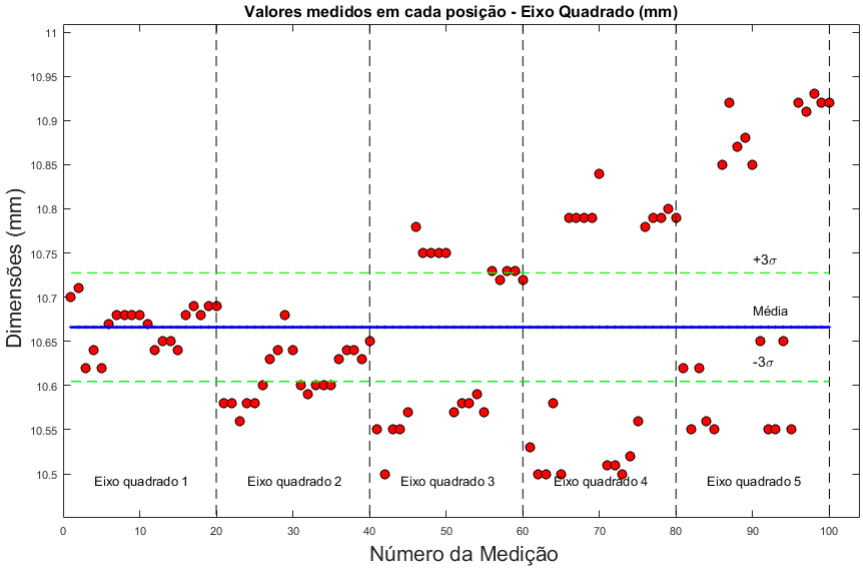


Figura 4.146 – Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo quadrado - PLA-grafeno

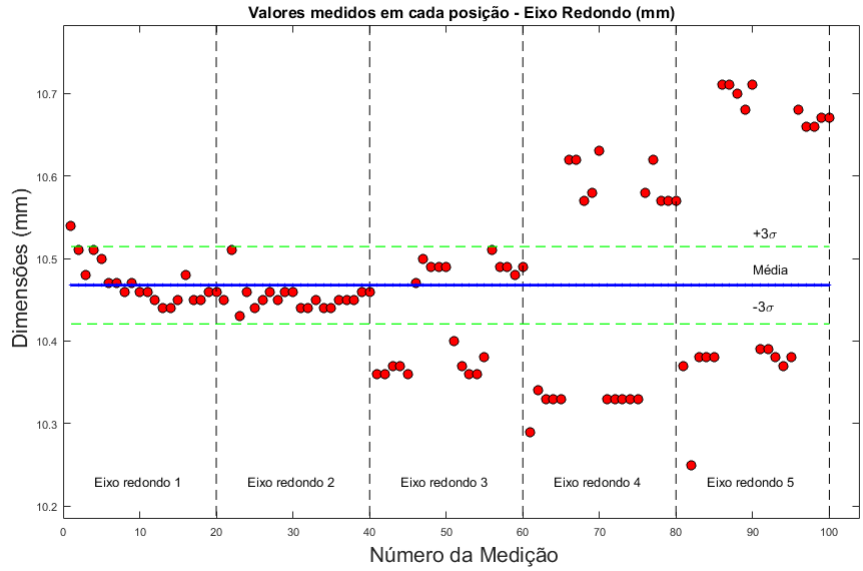


Figura 4.147 – Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo redondo - PLA-grafeno

4.7.2 Ensaio de rugosidade superficial-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima PLA

Os resultados dos ensaios experimentais de rugosidade superficial (R_a e R_z), realizados nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima PLA, foram transcritos na Tab. 4.67 e plotados no gráfico das Figuras 4.162 e 4.163.

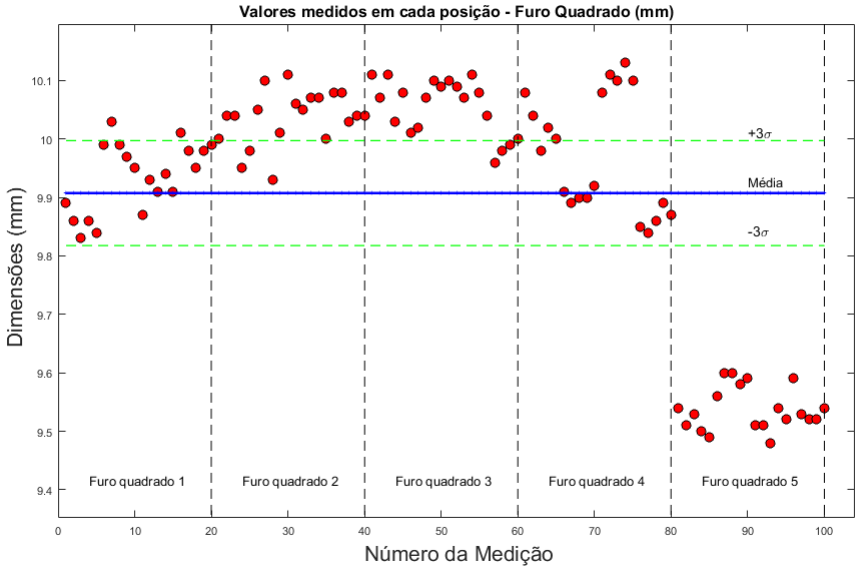


Figura 4.148 – Gráfico: valores medidos em cada posição - furo quadrado - PLA

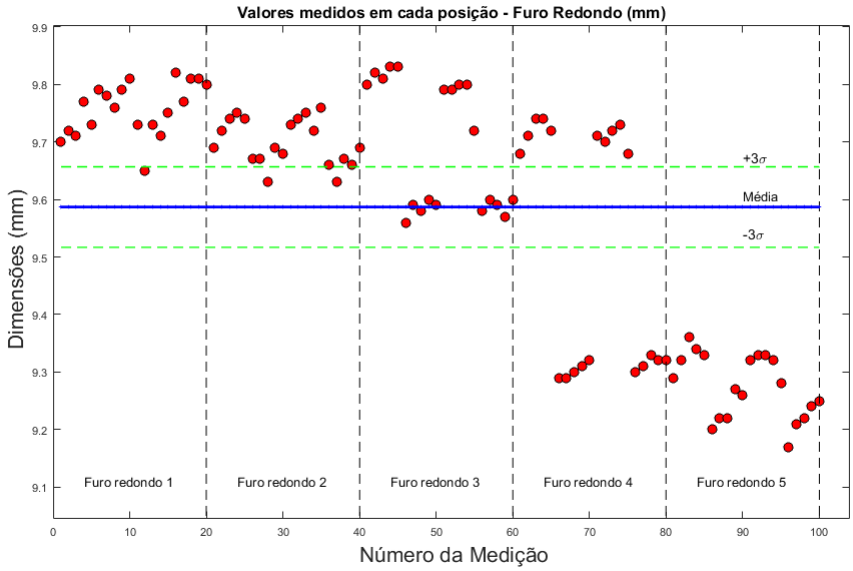


Figura 4.149 – Gráfico: valores medidos em cada posição - furo redondo - PLA

4.7.3 Ensaio de rugosidade superficial-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS-grafeno

Os resultados dos ensaios experimentais de rugosidade superficial (R_a e R_z), realizados nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima ABS-grafeno, foram transcritos nas Tabelas 4.68 e plotados no gráfico das Figuras 4.164 e 4.165.

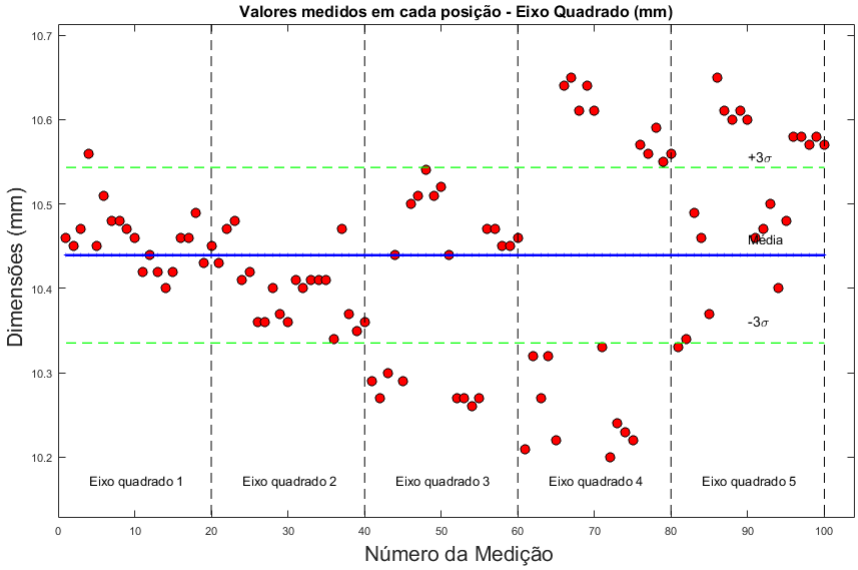


Figura 4.150 – Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo quadrado - PLA

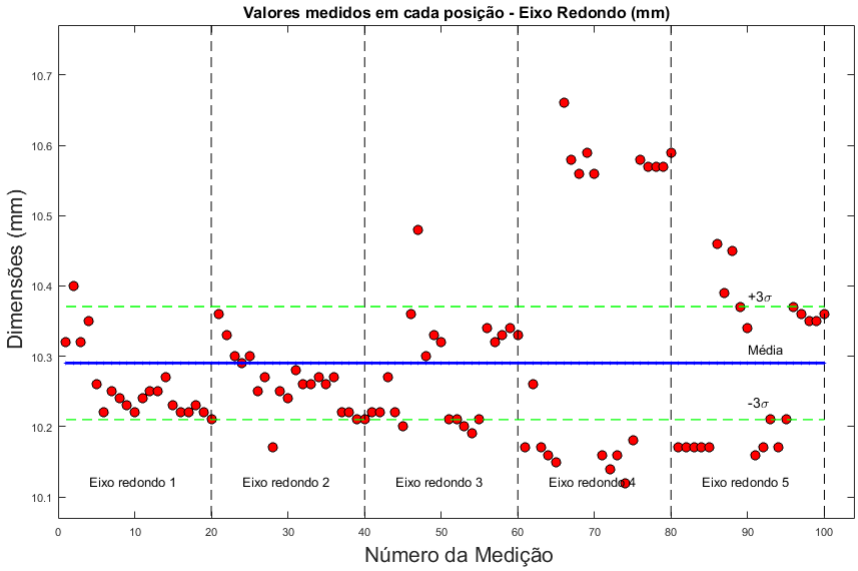


Figura 4.151 – Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo redondo - PLA

4.7.4 Ensaio de rugosidade superficial-CPs fabricados pelo processo FDM com a matéria-prima ABS

Os resultados dos ensaios experimentais de rugosidade superficial (R_a e R_z), realizados nos CPs manufaturados através do processo FDM e utilizando a matéria-prima ABS, foram transcritos nas Tabelas 4.69 e plotados no gráfico das Figuras 4.166 e 4.167.

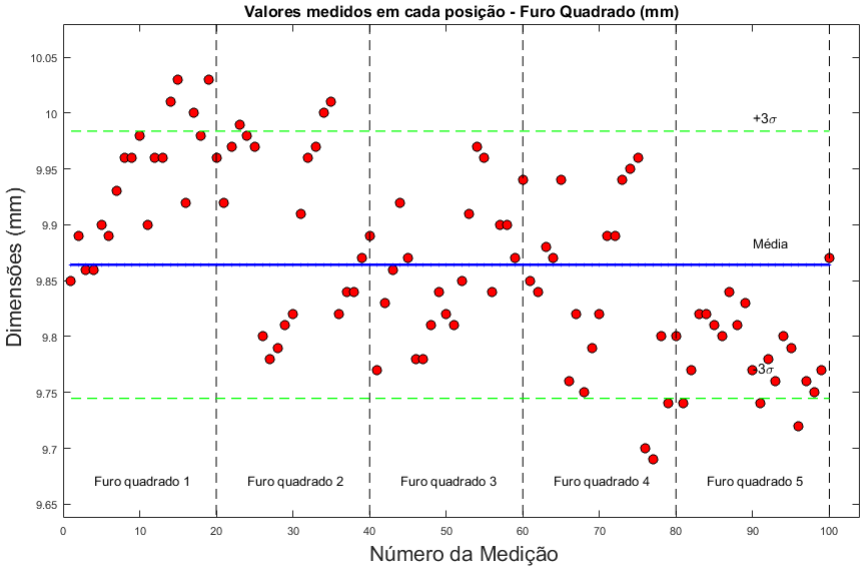


Figura 4.152 – Gráfico: valores medidos em cada posição - furo quadrado - ABS-grafeno

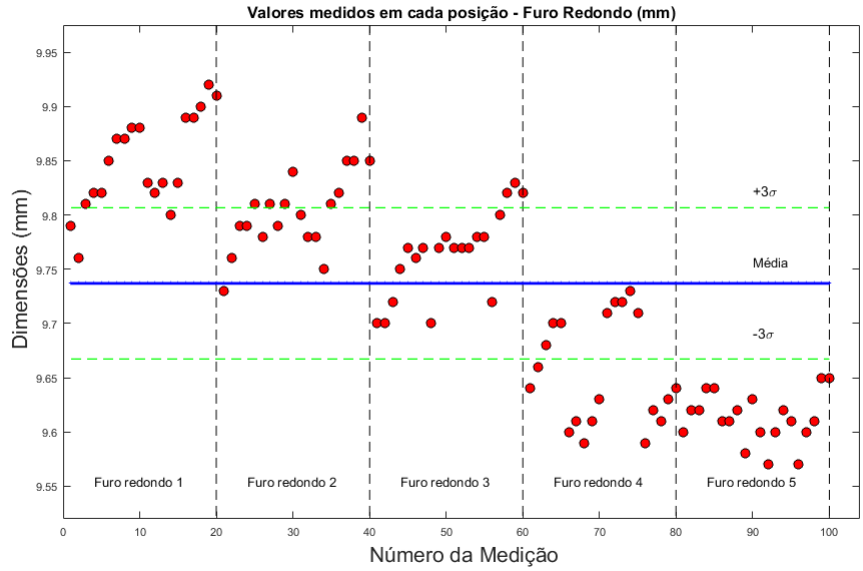


Figura 4.153 – Gráfico: valores medidos em cada posição - furo redondo - ABS-grafeno

4.7.5 Ensaio de rugosidade superficial-Discussão dos resultados

No presente estudo, foram comparadas as rugosidades (R_a e R_z), obtidas pelas medições realizadas nos CPs produzidos através do processos FDM e moldagem por injeção. Para ambos os processos de manufatura, os parâmetros foram mantidos constantes, inclusive *height* e *infill*.

Conforme Tab. 4.70, observa-se que a rugosidade média (R_a) medida nos CPs manufaturados através do processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno é, em média, 4,2% maior

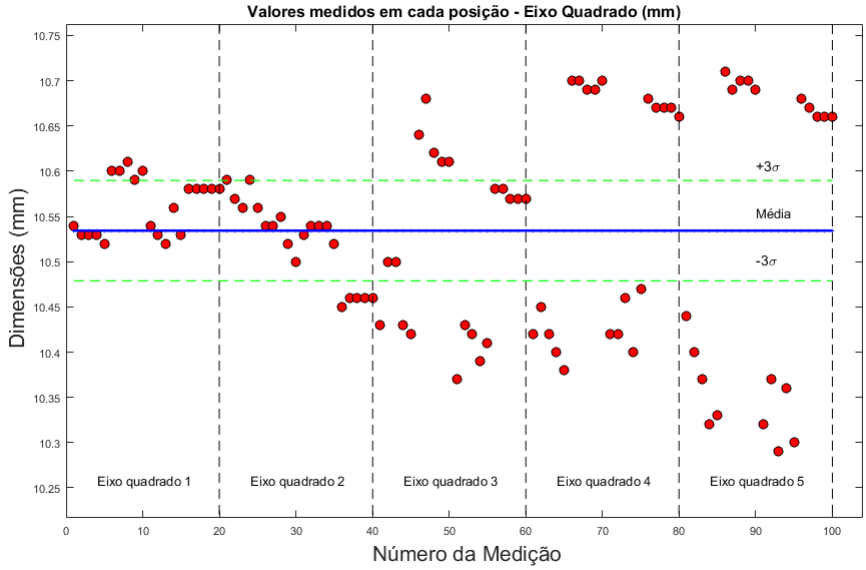


Figura 4.154 – Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo quadrado - ABS-grafeno

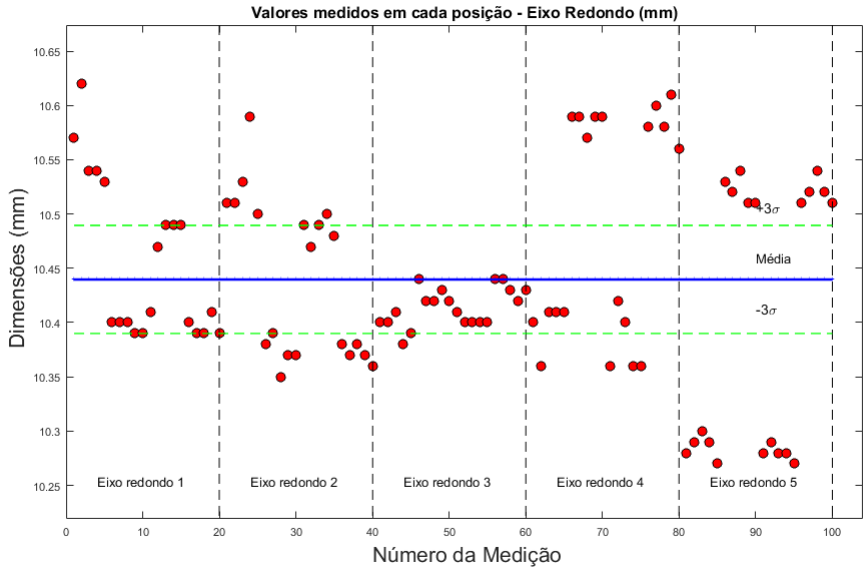


Figura 4.155 – Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo redondo - ABS-grafeno

do que os CPs que utilizaram PLA e (R_z) 2,8% menor, entretanto, verifica-se que a distribuição de rugosidade, obtidas pela medição nos CPs que utilizaram a matéria-prima PLA-grafeno (Figuras 4.160 e 4.161) e que utilizaram a matéria-prima PLA (Figuras 4.162 4.163) é bastante dispersa. Esta mesma rugosidade média (R_a) medida nos CPs manufaturados através do processo FDM, com a matéria-prima ABS-grafeno é, em média, 34,7% menor do que os CPs que utilizaram a matéria-prima ABS e (R_z) 34,6% menor, entretanto, verifica-se que a distribuição de rugosidade, obtidas pela medição nos CPs que utilizaram a matéria-prima ABS-grafeno (Figuras

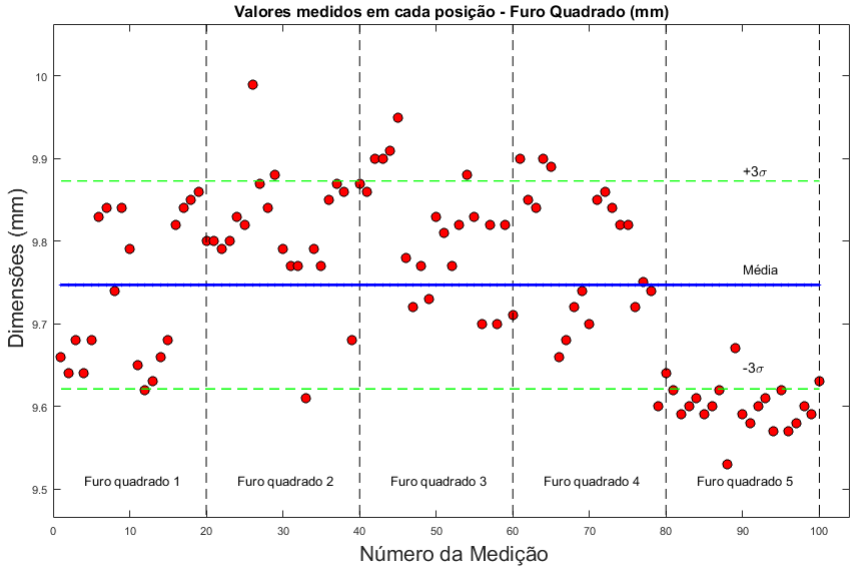


Figura 4.156 – Gráfico: valores medidos em cada posição - furo quadrado - ABS

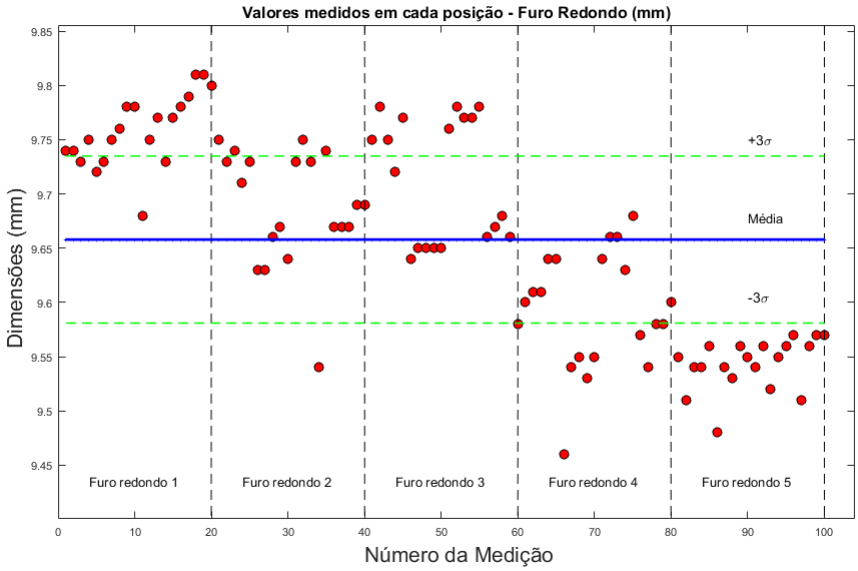


Figura 4.157 – Gráfico: valores medidos em cada posição - furo redondo - ABS

4.164 e 4.165) e que utilizaram a matéria-prima ABS (Figuras 4.166 4.167) é bastante dispersa. Em função desta dispersividade, não é possível estabelecer um modelo que indique uma relação entre a rugosidade e os parâmetros estabelecidos para ambos os processos.

Pode-se afirmar que o acabamento das superfícies produzidas pela tecnologia modelagem por fusão e deposição, varia de uma região para outra da peça. Isso ocorre em função da orientação de cada superfície e da sua posição em relação ao plano de construção, implicando em uma anisotropia de acabamento ao longo da peça. Isto, no entanto, não é uma peculiaridade

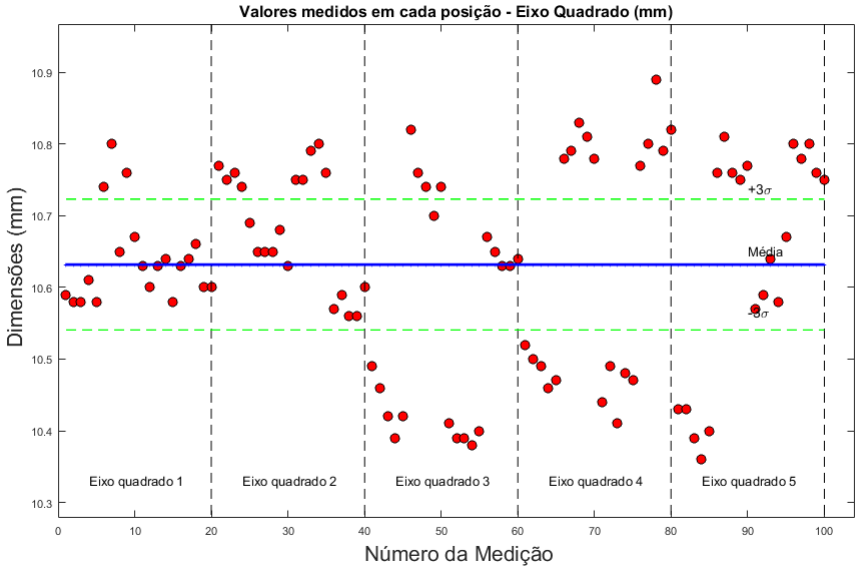


Figura 4.158 – Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo quadrado - ABS

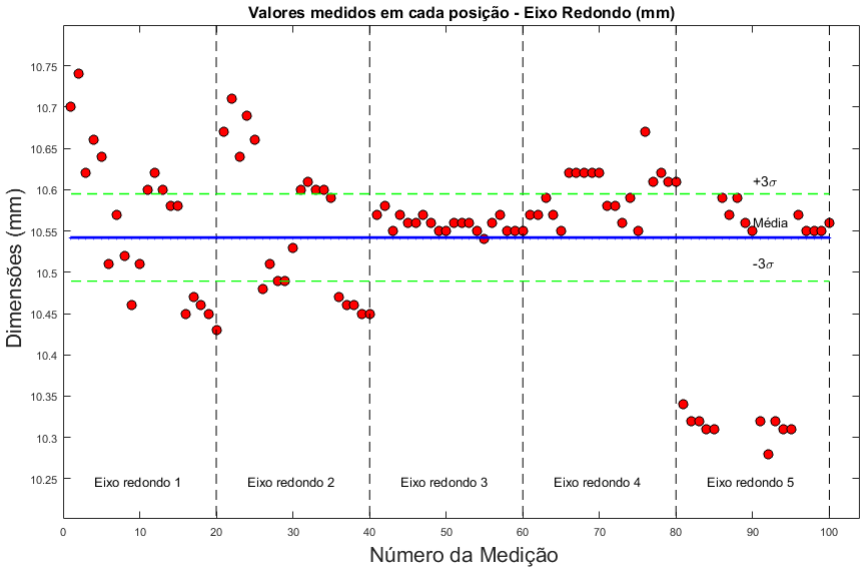


Figura 4.159 – Gráfico: valores medidos em cada posição - eixo redondo - ABS

somente da manufatura de modelagem por fusão e deposição, mas praticamente de todas as tecnologias de adição de camadas planas.

Ainda conforme Tab. 4.70, observa-se rugosidade média (R_a) medida nos CPs manufaturados através do processo FDM com a matéria-prima PLA-grafeno é, em média, 30,7% maior do que os CPs que utilizaram o ABS-grafeno. Já as rugosidades médias, medidas nos CPs manufaturados através do processo de moldagem por injeção e que utilizaram a matéria-prima PLA-granulado branco ($R_a = 0{,}58\ \mu$m e $R_z = 1{,}65\ \mu$m) e a matéria-prima PLA-granulado incolor

Tabela 4.65 – Tabela comparativa das Tolerâncias Fundamentais (IT) - dimensional furos/eixos

Processo FDM - Impressora 3D						
Tipo do Matéria-prima	Eixo/Furo	Tipo da geometria	Valor médio (mm)	Dimensão projeto (mm)	Contração dilatação (mm)	Tolerância IT
PLA-grafeno	Furo	quadrado	9,8023	□ 10,1	-0,30	**13**
PLA-grafeno	Furo	redondo	9,5859	⌀ 10,1	-0,51	**13**
PLA-grafeno	Eixo	quadrado	10,6661	□ 10,0	+0,67	**12**
PLA-grafeno	Eixo	redondo	10,4677	⌀ 10,0	+0,47	**12**
PLA	Furo	quadrado	9,9075	□ 10,1	-0,19	**14**
PLA	Furo	redondo	9,5868	⌀ 10,1	-0,51	**13**
PLA	Eixo	quadrado	10,4394	□ 10,0	+0,44	**13**
PLA	Eixo	redondo	10,2904	⌀ 10,0	+0,29	**13**
ABS-grafeno	Furo	quadrado	9,8643	□ 10,1	-0,24	**14**
ABS-grafeno	Furo	redondo	9,7369	⌀ 10,1	-0,36	**13**
ABS-grafeno	Eixo	quadrado	10,5343	□ 10,0	+0,53	**12**
ABS-grafeno	Eixo	redondo	10,4397	⌀ 10,0	+0,44	**12**
ABS	Furo	quadrado	9,7470	□ 10,1	-0,35	**14**
ABS	Furo	redondo	9,6580	⌀ 10,1	-0,44	**13**
ABS	Eixo	quadrado	10,6319	□ 10,0	+0,63	**13**
ABS	Eixo	redondo	10,5421	⌀ 10,0	+0,54	**12**

Tabela 4.66 – Rugosidade superficial: média e desvio padrão. CPs manufaturados com a matéria-prima: PLA-grafeno

Matéria-prima: Valores	PLA-grafeno (R_a)	PLA-grafeno (R_z)	unidade
Média .....=	14,0798	37,1762	(μm)
Desvio padrão amostral ...=	4,7135	10,7339	(μm)
6σ .....=	28,2812	64,4271	(μm)
Valor mínimo .....=	3,8570	10,9000	(μm)
Valor máximo .....=	49,8800	141,0000	(μm)

Tabela 4.67 – Rugosidade superficial: média e desvio padrão. CPs manufaturados com a matéria-prima: PLA

Matéria-prima: Valores	PLA (R_a)	PLA (R_z)	unidade
Média .....=	13,5137	38,2280	(μm)
Desvio padrão amostral ...=	2,5199	7,1210	(μm)
6σ .....=	15,1196	42,7259	(μm)
Valor mínimo .....=	5,3410	15,1000	(μm)
Valor máximo .....=	26,3800	74,6000	(μm)

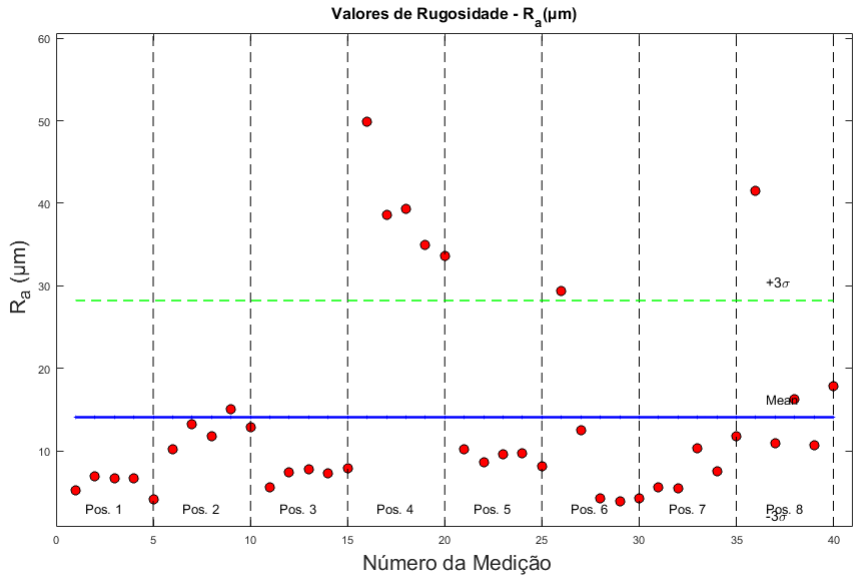


Figura 4.160 – Gráfico: valores de rugosidade - R_a (μm) - matéria-prima: PLA-grafeno

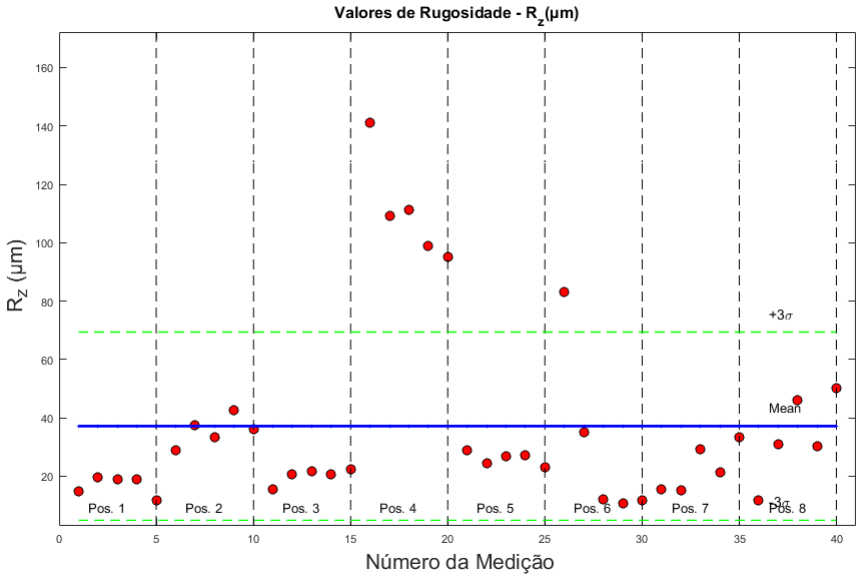


Figura 4.161 – Gráfico: valores de rugosidade - R_z (μm) - matéria-prima: PLA-grafeno

Tabela 4.68 – Cálculo dos valores: média, desvio padrão e rugosidade superficial

Matéria-prima: ABS-grafeno			
Valores	(R_a)	(R_z)	unidade
Média .....=	10,7722	30,4898	(μm)
Desvio padrão amostral ...=	1,2445	3,5015	(μm)
6σ .....=	7,4672	21,0088	(μm)
Valor mínimo .....=	2,5960	7,3420	(μm)
Valor máximo .....=	26,9800	76,3000	(μm)

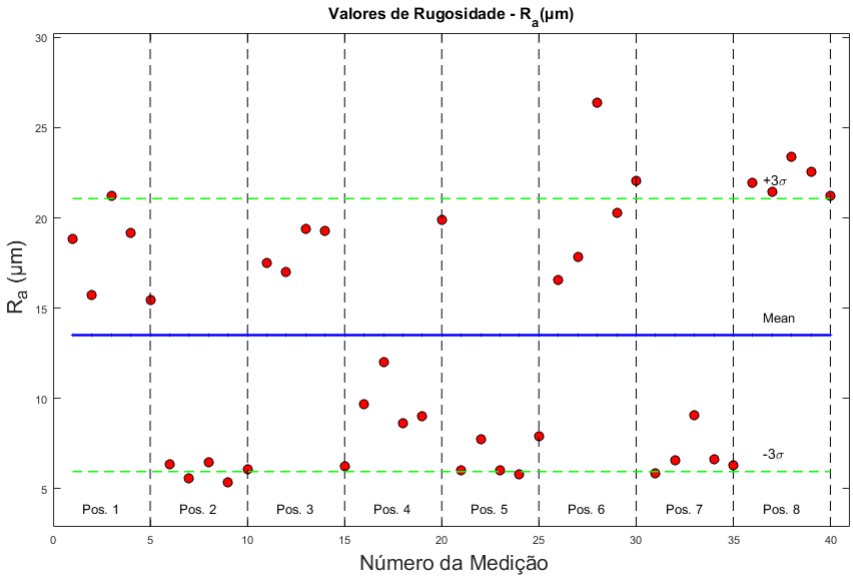


Figura 4.162 – Gráfico: valores de rugosidade - R_a (μm) - matéria-prima: PLA

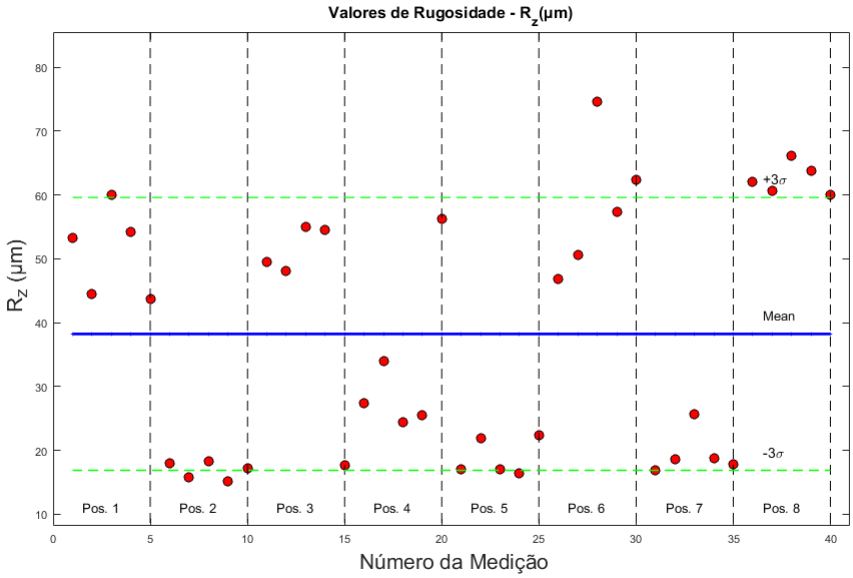


Figura 4.163 – Gráfico: valores de rugosidade - R_z (μm) - matéria-prima: PLA

Tabela 4.69 – Cálculo dos valores: média, desvio padrão e rugosidade superficial

Matéria-prima:	ABS		unidade
Valores	(R_a)	(R_z)	
Média .....=	14,5124	41,0472	(μm)
Desvio padrão amostral ...=	1,6592	4,6975	(μm)
6σ .....=	9,9554	28,1851	(μm)
Valor mínimo .....=	5,2560	14,8600	(μm)
Valor máximo .....=	24,5800	69,5100	(μm)

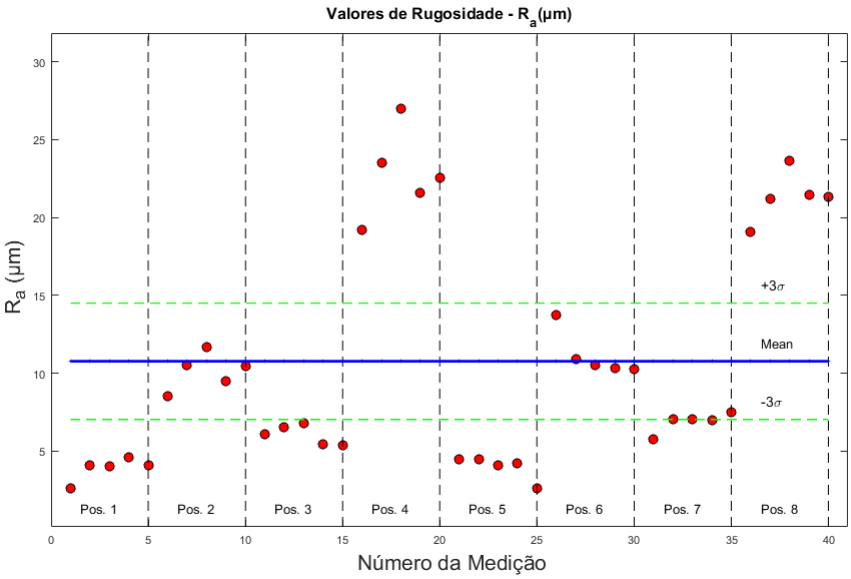


Figura 4.164 – Gráfico: valores de rugosidade - R_a (μm) - matéria-prima: ABS-grafeno

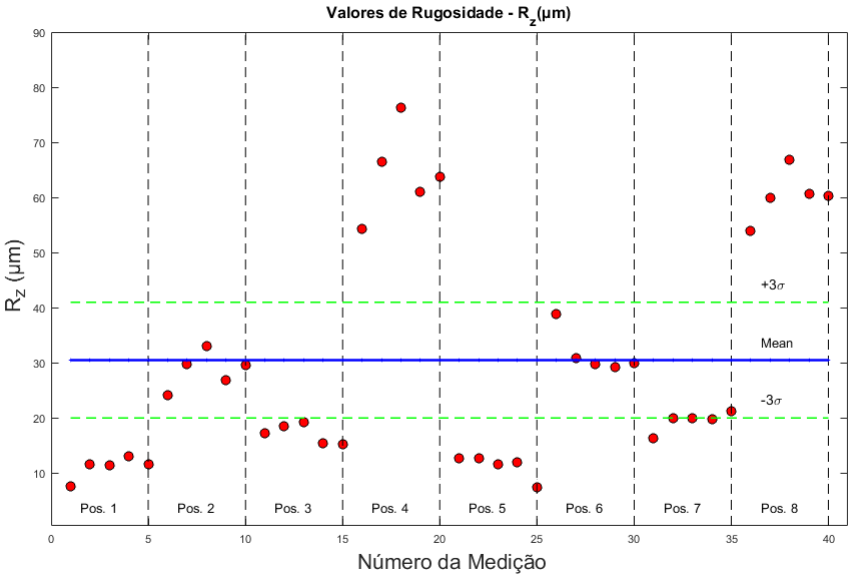


Figura 4.165 – Gráfico: valores de rugosidade - R_z (μm) - matéria-prima: ABS-grafeno

($R_a = 0{,}15$ μm e $R_z = 0{,}41$ μm) foram muito inferiores as rugosidades medidas no CPs produzidos através do processo FDM. Assim como no processo FDM a rugosidade dos CPs manufaturados pelo processo de moldagem por injeção dependem muito dos parâmetros de processo, do material injetado, porém o acabamento do molde é determinante para o valor final de rugosidade. Em função desta característica não é viável estabelecer comparações de rugosidade de CPs manufaturados por ambos os processos devido a forte interferência que o molde pode ter no resultado final.

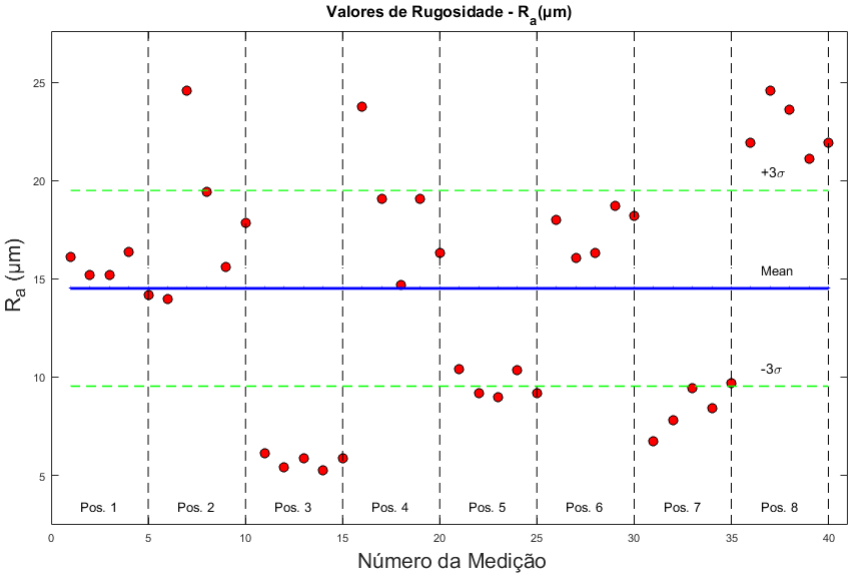


Figura 4.166 – Gráfico: valores de rugosidade - R_a (μm) - matéria-prima: ABS

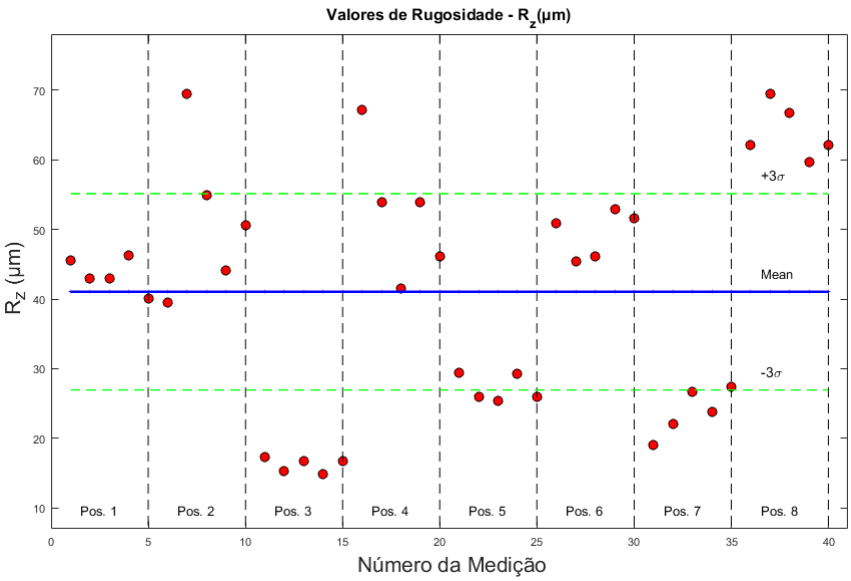


Figura 4.167 – Gráfico: valores de rugosidade - R_z (μm) - matéria-prima: ABS

Tabela 4.70 – Tabela de rugosidade superficial medidos nos CPs manufaturados pelos processos FDM/moldagem por injeção com as matérias-primas: PLA/ABS

Matéria-prima	Rugosidade superficial R_a (μm)	R_z (μm)
PLA-grafeno (FDM)	14,08	37,18
PLA (FDM)	13,51	38,23
PLA-granulado branco (moldagem por injeção)	0,58	1,65
PLA-granulado incolor (moldagem por injeção)	0,15	0,41
ABS-grafeno (FDM)	10,77	30,49
ABS (FDM)	14,51	41,05
ABS-granulado (moldagem por injeção)	1,27	3,58

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados experimentais realizados nos CPs manufaturados através do processo FDM e com a utilização das matérias-primas PLA-grafeno e ABS-grafeno, as seguinte conclusões podem ser obtidas:

CONCLUSÕES

- As propriedades mecânicas (limite de escoamento à tração e a flexão) melhoraram com a adição de grafeno à matéria-prima PLA porém diminuíram para o ABS. Em ambas as matérias-primas, a adição de grafeno melhorou estas propriedades em relação as matérias-primas PLA e ABS sem grafeno;

- A energia de impacto melhorou com a adição de grafeno à matéria-prima PLA, porém piorou para o ABS em relação ao PLA e ABS sem grafeno, respectivamente;

- A condutividade elétrica do PLA-grafeno foi zero (matéria-prima não condutiva) e para o ABS-grafeno foi 0,24 $(\Omega.m)^{-1}$;

- Os valores do coeficiente de atrito e desgaste obtidos nos ensaios realizados nos CPs, que foram produzidos através do processo de manufatura FDM , aumentaram com a adição de grafeno tanto à matéria-prima PLA quanto no ABS;

- O índice de qualidade IT obtidos nos CPs manufaturados através do processo FDM e que utilizaram as matérias-primas PLA-grafeno e ABS-grafeno, ficou entre 12 e 14;

- Os valores médios de rugosidade R_a, obtidos nos ensaios realizados nos CPs manufaturados através do processo FDM e que utilizaram a matéria-prima PLA-grafeno, foi igual a 14,1 μm e 10,8 μm para o ABS-grafeno. A rugosidade R_z foi na média igual a 37,2 μm para os CPs que utilizaram a matéria-prima PLA-grafeno e 30,5 μm para o ABS-grafeno.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTURO

- Investigar as alterações das propriedades mecânicas dos CPs manufaturados através do processo FDM, que utilizam os materiais polímeros e biopolímeros, com adição de metais;

- Investigar novas matérias-primas as quais podem ser utilizadas no processo de manufatura FDM, e que tenham aplicação na área da bio-engenharia;

- Avaliar as propriedades térmicas (condutividade) dos CPs manufaturados através do processo FDM e que utilizem as matérias-primas PLA/ABS e os modificados;

- Avaliar e determinar as propriedades elétricas em função do componente adicionado;

- Avaliar as propriedades mecânicas em função do padrão de preenchimento;

- Investigar a rugosidade superficial variando-se a espessura de camada (*height*);

- Investigar a alteração dimensional dos CPs manufaturados através do processo FDM, variando-se os parâmetros de processo: espessura de camada (*height*), ângulo de filamento e número de contornos;

- Investigar as propriedades dos CPs manufaturados através do processo SLS, utilizando a matéria-prima PA e compará-las com as propriedades do CPs manufaturados através do processo FDM e que utilizam as matérias-primas PLA-grafeno e ABS-grafeno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.BANDYOPADHYAY; BOSE, S. *Additive manufacturing*. [S.l.]: Boca Raton CRC Press, 2016. 414 p. ISBN 978-1-4822-2360-6.

AFROSE, M. F. et al. Effects of part build orientations on fatigue behaviour of fdm-processed pla material. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 1, n. 1, p. 21–28, Jun 2016. ISSN 2363-9520. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40964-015-0002-3>.

AGARWALA, M. K. et al. Structural quality of parts processed by fused deposition. *Rapid Prototyping Journal*, v. 2, n. 4, p. 4–19, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/13552549610732034>.

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>.

American Society for Testing and Materials. *ASTM D256-10e1, Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*. West Conshohocken, PA, 2010.

American Society for Testing and Materials. *ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. West Conshohocken, PA,, 2012.

American Society for Testing and Materials. *ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken, PA, 2014.

American Society for Testing and Materials. *ASTM G133-05, Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear*. West Conshohocken, PA, 2016.

American Society for Testing and Materials. *ASTM D790-17, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. West Conshohocken, PA, 2017.

ANITHA, R.; ARUNACHALAM, S.; RADHAKRISHNAN, P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 118, n. 1, p. 385 – 388, 2001. ISSN 0924-0136. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00980-3>.

ASHBY, H. S. M.; CEBON, D. *Materiais: Engenharia, Ciencia, Processamento e Projeto*. [S.l.]: Elsevier, 2012. ISBN 978-85-352-4203-4.

BAICH, L.; MANOGHARAN, G.; MARIE, H. Study of infill print design on production cost-time of 3d printed ABS parts. *International Journal of Rapid Manufacturing*, v. 5, n. 3-4, p. 308–319, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2015.074809>.

BARNER, S. Mechanical properties of additive manufactured honeycomb structures, Master of Science in Mechanical Engeneering. *Clenson University*, p. 110, 2015.

BELL, C. *3D Printing with Delta Printers*. Apress, 2015. ISBN 978-1-4842-1173-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-1173-1_1>.

BUCKLEY, D. H. *Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication*. [S.l.]: Elsevier, 1981. (Tribology series 5). ISBN 0-444-41966-7.

BUSTILLOS, J. et al. Integration of graphene in poly(lactic) acid by 3D printing to develop creep and wear-resistant hierarchical nanocomposites. *Polymer Composites*, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pc.24422>.

BUTTON, S. T. Apostila de metodologia para planejamento experimental e analise de resultados. Programa de Pos-Graduação em Engenharia Mecânica. *UNICAMP-Campinas*, p. 88, 2005.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*. [S.l.]: Wiley, 2015. 809 p. ISBN 978-85-216-2124-9.

CANEVAROLO, J. S. V. *Ciencia dos Polimeros*. 2. ed. [S.l.]: Artiliber Editora Ltda, 2010. ISBN 8588098105.

CANTRELL, J. et al. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts. *The Society for Experimental Mechanics*, p. 89 – 105, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-41600-7_11>.

CASAVOLA, C. et al. Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory. *Materials and Design*, v. 90, p. 453–458, 2016. ISSN 0264-1275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.009>.

CHACON, J. et al. Additive manufacturing of pla structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials and Design*, v. 124, p. 143 – 157, 2017. ISSN 0264-1275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>.

CHUA, C.; LEONG, K.; LIM, C. *Rapid prototyping: principles and aplications*. 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224, 2003. 447 p. ISBN 981-238-117-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1142/5064>.

COOPER, K. G. *Rapid Prototyping Technology: Selection and Application*. Marecel Dekker, Inc., 2001. 246 p. ISBN 0-8247-0261-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780203910795>.

CUNICO, M. W. M. Desenvolvimento de nova tecnologia de manufatura aditiva baseado em formação seletiva de composito, Doutor em Engenharia Mecânica. *USP-São Carlos*, p. 329, 2013.

DAWOUD, M.; TAHA, I.; EBEID, S. J. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 21, p. 39 – 45, 2016. ISSN 1526-6125. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.11.002>.

DIZON, J. R. C. et al. Mechanical characterization of 3d printed polymers. *Additive Manufacturing*, v. 20, p. 44 – 67, 2018. ISSN 2214-8604. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.

DOMINGO-ESPIN, M. et al. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling polycarbonate parts. *Materials and Design*, v. 83, p. 670 – 677, 2015. ISSN 0264-1275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074>.

DOWCHEMICAL. *Processo de Moldagem por Injeção-Dow Chemical Inc.* 2018. Disponível em: <https://www.dow.com/polyethylene/la/pt/fab/molding/improcess.htm>. Acesso em: 28 jun. 2018.

DURGUN, I.; ERTAN, R. Experimental investigation of fdm process for improvement of mechanical properties and production cost. *Rapid Prototyping Journal*, v. 20, n. 3, p. 228–235, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2012-0091>.

ENDRES, H. J. et al. Ate que ponto os bioplasticos são convenientes do ponto de vista ecologico. *Plastico Industrial*, n. 222, p. 18–27, 2017. Disponível em: <http://www.arandanet.com.br/revista/pi/materia>.

EQUBAL, A.; SOOD, A. K. Investigations on metallization in FDM build ABS part using electroless deposition method. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 19, p. ,22 – 31, 2015. ISSN 1526-6125. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.03.002>.

ESMAEILIAN, B.; BEHDAD, S.; WANG, B. The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 39, p. ,79 – 100, 2016. ISSN 0278-6125. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001>.

FERNANDEZ-VICENTE, M. et al. Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3d printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, v. 3, n. 3, p. 183–192, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0036>.

FORUZANMEHR, M. et al. Physical and mechanical properties of PLA composites reinforced by TiO2 grafted flax fibers. *Materials and Design*, v. 106, p. 295 – 304, 2016. ISSN 0264-1275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.103>.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*. Springer, 2015. 510 p. ISBN 978-1-4939-2113-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.

GOKCEK, M. *Mechanical Engineering*. [S.l.]: In Tech, 2012. 681 p. ISBN 978-953-51-0505-3.

GOMEZ-GRAS, G. et al. Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. *Materials and Design*, v. 140, p. 278 – 285, 2018. ISSN 0264-1275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.072>.

HARISH, T.; RAJEEV, V. Effect of variation in stroke length on dry reciprocating wear of aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 1, Part 1, p. 1341 – 1347, 2018. ISSN 2214-7853. International Conference on Processing of Materials, Minerals and Energy (July 29th to 30th) 2016, Ongole, Andhra Pradesh, India. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.220>.

HOSSAIN, M. et al. Improving tensile mechanical properties of fdm-manufactured specimens via modifying build parameters. *Solid Freeform Fabrication Proceeding*, p. 380 – 392, 2013. ISSN 1053-2153.

HURTADO, D. K. Avaliação da contração e do empenamento de PLA e PA66 injetados em molde de fabricação rapida (VRE) e em molde metalico. Mestre em Engenharia Mecânica. *UFSC-Florianopolis*, p. 110, 2015.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials*. 2nd edition. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 978-0-08-100910-9.

International Organization for Standardization. *ISO 286-1:2010/Cor 1:2013, Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits*. [S.l.], 2010.

JADHAV, V. S.; WANKHADE, S. R. A review: fused depositon modeling a rapid prototyping process. *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 04, p. 523 – 527, 2017. ISSN 2395-0056.

JIMENEZ MERCEDES PELTZER, R. R. A. *Poly(lactic Acid) Science and Technology: Processing, Properties, Additives and Applications*. Royal Society of Chemistry, 2014. (Rsc Polymer Chemistry). ISBN 978-1-84973-879-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/9781782624806>.

JOSSO, B.; BURTON, D. R.; LALOR, M. J. Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation. *Wear*, v. 252, n. 5, p. 491 – 500, 2002. ISSN 0043-1648. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00006-6>.

KAMRANI, A.; NASR, E. *Engineering design and Rapid prototyping*. Editora Springer, 2010. 458 p. ISBN 978-0-387-95863. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-95863-7>.

KANG, W.-S.; RHEE, K. Y.; PARK, S.-J. Thermal, impact and toughness behaviors of expanded graphite/graphite oxide-filled epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, v. 94, p. 238 – 244, 2016. ISSN 1359-8368. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.052>.

KING, F. L.; KUMAR, A. A. J.; VIJAYARAGAHAVAN, S. Mechanical characterization of polylactic acid reinforced bagasse/basalt hybrid fiber composites. *Journal of Composite Materials*, p. 0021998318780208, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0021998318780208>.

KOMARNICKI, P. A review of fused deposition modeling process models. In: RUSIŃSKI, E.; PIETRUSIAK, D. (Ed.). *Proceedings of the 13th International Scientific Conference*. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 241–247. ISBN 978-3-319-50938-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50938-9_25>.

LAM, A. E. Analise da resistencia mecânica de componentes fabricados pelo processo de modelagem por fusao e deposição - FDM. Doutor em Engenharia Mecânica. *ITA-Sao Jose dos Campos*, p. 117, 2008.

LANZOTTI, A. et al. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in pla with an open-source 3-d printer. *Rapid Prototyping Journal*, v. 21, n. 5, p. 604–617, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0135>.

LEBEDEV, S. M. et al. Mechanical properties of pla-based composites for fused deposition modeling technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 97, n. 1, p. 511–518, Jul 2018. ISSN 1433-3015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1953-6>.

LEE, B.; ABDULLAH, J.; KHAN, Z. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 169, n. 1, p. 54 – 61, 2005. ISSN 0924-0136. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259>.

LI, H. et al. The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties. *Rapid Prototyping Journal*, v. 24, n. 1, p. 80–92, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2016-0090>.

LIOU, F. W. *Rapid Prototyping and Engineering Applications: A toolbox for Prototype Development*. [S.l.]: Boca Ranton CRC Press, 2008. 564 p. ISBN 978-0-8493-3409-2.

LIU, P.; YAO, Z.; ZHOU, J. Mechanical, thermal and dielectric properties of graphene oxide/polyimide resin composite. *High Performance Polymers*, v. 28, n. 9, p. 1033–1042, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954008315613558>.

LIU, Q. H.; YAO, X. Y.; LIU, Z. P. Single layer graphene oxide sheets-epoxy nanocomposites with greatly improved mechanical and thermal properties. In: *Chemical Engineering and Material Properties*. Trans Tech Publications, 2012. (Advanced Materials Research, v. 391), p. 175–179. Disponível em: <10.4028/www.scientific.net/AMR.391-392.175>.

LIU, X. et al. Mechanical property parametric appraisal of fused deposition modeling parts based on the gray Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 89, n. 5, p. 2387–2397, Mar 2017. ISSN 1433-3015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9263-3>.

MACHADO, A. R. et al. *Teoria da Usinagem dos Metais*. [S.l.]: Editora Edgar Blucher, 2011. 397 p. ISBN 978-85-212-0606-4.

MARQUES, S. et al. Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation. *Polimeros*, Scielo, v. 25, p. 564 – 574, 12 2015. ISSN 0104-1428. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2047>.

MELENKA, G. W. et al. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3d printed structures. *Composite Structures*, v. 153, p. 866 – 875, 2016. ISSN 0263-8223. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.018>.

MILAK, P. C. et al. Wear performance of alumina-based ceramics - a review of the influence of microstructure on erosive wear. *Ceramica*, scielo, v. 61, p. 88 – 103, 03 2015. ISSN 0366-6913. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613571871>.

MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; BHOWMIK, J. L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, v. 3, n. 1, p. 42–53, Mar 2015. ISSN 2195-3597. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>.

MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; BHOWMIK, J. L. Mathematical modeling and fdm process parameters optimization using response surface methodology based on q-optimal design. *Applied Mathematical Modelling*, v. 40, n. 23, p. 10052 – 10073, 2016. ISSN 0307-904X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.06.055>.

MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; BHOWMIK, J. L. Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion. *Measurement*, v. 81, p. 174 – 196, 2016. ISSN 0263-2241. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.011>.

MONTGOMERY, D. C.; C.RUNGER, G. *Estatistica Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. [S.l.]: LTC, 2016. 629 p. ISBN 978-85-216-3241-2.

NAMPOOTHIRI, K. M.; NAIR, N. R.; JOHN, R. P. An overview of the recent developments in polylactide (pla) research. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 22, p. 8493 – 8501, 2010. ISSN 0960-8524. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.092>.

NGO, T. D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, v. 143, p. 172 – 196, 2018. ISSN 1359-8368. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

NING, F. et al. Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties. *Journal of Composite Materials*, v. 51, n. 4, p. 451–462, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0021998316646169>.

NOVASKI, O. *Introducção a engenharia de fabricação mecanica*. 1. ed. [S.l.]: Editora Blucher, 2014. ISBN 978-85-212-0162-5.

PANES JUAN CLAVER, A. M. C. A. R. The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: A comparative analysis. *Materials (Basel,Switzerland)*, v. 11, n. (8 1333),(2018). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma11081333>.

PETRIE, C. A. H. E. M. *Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2003. ISBN 0-471-45603-9.

PHAM, D.; GAULT, R. A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 38, n. 10, p. 1257 – 1287, 1998. ISSN 0890-6955. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5>.

PHIRI, J. et al. A comparative study of mechanical, thermal and electrical properties of graphene-, graphene oxide- and reduced graphene oxide-doped microfibrillated cellulose nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 2018. ISSN 1359-8368. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.018>.

POPESCU, D. et al. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, v. 69, p. 157 – 166, 2018. ISSN 0142-9418. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>.

RABINOWICZ, E. *Friction and wear of materials*. 2nd edition. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons Inc., 1995. ISBN 0-471-83084-4.

RAHMATI, S.; VAHABLI, E. Evaluation of analytical modeling for improvement of surface roughness of FDM test part using measurement results. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 79, n. 5, p. 823–829, Jul 2015. ISSN 1433-3015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6879-7>.

RANKOUHI, B. et al. Failure analysis and mechanical characterization of 3d printed ABS with respect to layer thickness and orientation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, v. 16, n. 3, p. 467–481, Jun 2016. ISSN 1864-1245. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0113-2>.

REDDY, V. et al. Study on surface texture of Fused Deposition Modeling. *Procedia Manufacturing*, v. 25, p. 389 – 396, 2018. ISSN 2351-9789. Proceedings of the 8th Swedish Production Symposium (SPS 2018). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.108>.

RTP. *RTP - Imagineering Plastics*. 2019. Disponível em: <http://web.rtpcompany.com/contact/request.htm>. Acesso em: 25 abr. 2019.

SANTANA, L.; ALVES, J. L.; NETTO, A. da C. S. A study of parametric calibration for low cost 3D printing: Seeking improvement in dimensional quality. *Materials and Design*, v. 135, p. 159 – 172, 2017. ISSN 0264-1275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.020>.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. *Aspectos Tribologicos da Usinagem dos Metais*. [S.l.]: Editora Artliber, 2007. 246 p. ISBN 8588098385.

SCHWAB, K. *A quarta revolucao industrial*. 1. ed. [S.l.]: Edipro, 2016. ISBN 978-85-7283-978-5.

SILVA, J. A manufatura aditiva no desenvolvimento de produtos. *Revista MM - Maquinas e Metais*, v. 592, p. 84–109, 2015.

SIN A.R. RAHMAT, W. R. L. T. *Polylactic Acid: PLA Biopolymer Technology and Applications*. [S.l.]: William Andrew, 2012. (Plastics Design Library). ISBN 978-1-4377-4459-0.

SLIC3R. *Slic3r manual*. 2019. Disponível em: <https://manual.slic3r.org/expert-mode/print-settings>. Acesso em: 13 abril de 2019.

SMITH WILLIAM F.; HASHEMI, J. *Fundamentos da Engenharia e Ciencias dos Materiais*. 5. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2012. ISBN 978-85-8055-114-3.

SOLDANO, C.; MAHMOOD, A.; DUJARDIN, E. Production, properties and potential of graphene. *Carbon*, v. 48, n. 8, p. 2127 – 2150, 2010. ISSN 0008-6223. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.01.058>.

SONG, Y. et al. Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA. *Materials and Design*, v. 123, p. 154–164, 2017. ISSN 0264-1275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.051>.

SOOD, A. K.; OHDAR, R.; MAHAPATRA, S. Improving dimensional accuracy of fused deposition modelling processed part using grey Taguchi method. *Materials and Design*, v. 30, n. 10, p. 4243 – 4252, 2009. ISSN 0261-3069. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.030>.

SOOD, A. K.; OHDAR, R.; MAHAPATRA, S. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials and Design*, v. 31, n. 1, p. 287 – 295, 2010. ISSN 0261-3069. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research*, v. 3, n. 1, p. 81 – 90, 2012. ISSN 2090-1232. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.05.001>.

SRIVATSAN, T.; SUDARSHAN, T. *Additive Manufacturing: Inovations, Advances and Applications*. [S.l.]: Boca Ranton CRC Press, 2016. 449 p. ISBN 978-1-4987-1478-5.

SUDEEPAN, J. et al. Study of friction and wear of ABS/ZnO polymer composite using taguchi technique. *Procedia Materials Science*, v. 6, p. 391 – 400, 2014. ISSN 2211-8128. 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC 2014). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.050>.

TYMRAK, B.; KREIGER, M.; PEARCE, J. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3D printers under realistic environmental conditions. *Materials and Design*, v. 58, p. 242 – 246, 2014. ISSN 0261-3069. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>.

VANDRESEN, M. Aplicação da tecnica do nucleo perdido na injeção de peças complexas, em moldes de ferramental rapido, a partir da estereolitografia. Doutor em Engenharia Mecânica. *UFSC-Santa Catarina*, p. 177, 2003.

VIJAYARAGHAVAN, V. et al. Process characterisation of 3D-printed FDM components using improved evolutionary computational approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 78, n. 5, p. 781–793, May 2015. ISSN 1433-3015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6679-5>.

VOLPATO, N. *Manufatura aditiva: tecnologia e aplicações da impressão 3D*. [S.l.]: Editora Blucher, 2017. 400 p. ISBN 978-85-212-1150-1.

WANG, L.; GRAMLICH, W. M.; GARDNER, D. J. Improving the impact strength of poly(lactic acid) (PLA) in fused layer modeling (FLM). *Polymer*, v. 114, p. 242 – 248, 2017. ISSN 0032-3861. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.03.011>.

WENG, Z. et al. Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. *Materials and Design*, v. 102, p. 276 – 283, 2016. ISSN 0264-1275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.045>.

WITTBRODT, B.; PEARCE, J. M. The effects of PLA color on material properties of 3D printed components. *Additive Manufacturing*, v. 8, p. 110 – 116, 2015. ISSN 2214-8604. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.006>.

WU, W. et al. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D printed PEEK and a comparative mechanical study between peek and abs. *Materials*, v. 8, n. 9, p. 5834–5846, Sep 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma8095271>.

ZALDIVAR, R. et al. Influence of processing and orientation print effects on the mechanical and thermal behavior of 3d-printed ultem 9085 material. *Additive Manufacturing*, v. 13, p. 71 – 80, 2017. ISSN 2214-8604. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.007>.

ZHUANG, Y. et al. 3D printing of materials with anisotropic heat distribution using conductive polylactic acid composites. *Materials and Design*, v. 126, p. 135 – 140, 2017. ISSN 0264-1275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.047>.

ZUREK. *Processo FDM*. 2008. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/FDMbyZureks.png>. Acesso em: 05 jul. 2018.