

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E
DE MATERIAIS – PPGEM

THIAGO TAVARES ZANOTTO

INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO DE TRAJETÓRIAS OCIOSAS DO BICO
EXTRUSOR EM PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2017

THIAGO TAVARES ZANOTTO

**INFLUÊNCIA DA OTIMIZAÇÃO DE TRAJETÓRIAS OCIOSAS DO BICO
EXTRUSOR EM PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Neri Volpato, *Ph.D.*

CURITIBA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Z33i
2017

Zanotto, Thiago Tavares
Influência da otimização de trajetórias ociosas do bico extrusor em processo de manufatura aditiva / Thiago Tavares Zanotto -- 2017.
107 f. : il. ; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.
Texto em português com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2017.
Bibliografia: f. 102-105.

1. Impressão tridimensional. 2. Processos de fabricação. 3. Microscopia eletrônica de varredura. 4. Plásticos - Extrusão. 5. Projeto de produto. 6. Processos de fabricação - avaliação. 7. Ensaios mecânicos. 8. Testes não-destrutivos. 9. Termoplásticos. 10. Engenharia mecânica – Dissertações. I. Volpato, Neri, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD: Ed. 22 – 620.1

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecária: Anna T. R. Caruso CRB9/935

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 306

A Dissertação de Mestrado intitulada: **Influência da Otimização de Trajetórias Ociosas do Bico Extrusor em Processo de Manufatura Aditiva**, defendida em sessão pública pelo Candidato **Thiago Tavares Zanotto**, no dia 29 de setembro de 2017, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Engenharia de Manufatura, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Neri Volpato, *Ph.D.*- Presidente - UTFPR

Dr. Eng. Fred Lacerda Amorim - PUCPR

Prof. Paulo André de Camargo Beltrão, *Ph.D.* - UTFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, ____ de _____ de 20__.

Carimbo e assinatura do Coordenador do Programa

DEDICATÓRIA

À minha esposa e filha, pelo amor e paciência.

À minha mãe e toda minha família.

Ao meu pai (*in memoriam*), que me deixou durante o período dessa pesquisa, o qual me deixou grandes ensinamentos de vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me dar a dádiva da vida.

A minha esposa pela paciência durante os momentos de ausência e pelo companheirismo durante a execução da pesquisa.

A minha amada filha que veio a esse mundo durante a execução da pesquisa, pelo seu amor e alegria que me motivaram ainda mais para o estudo.

A minha mãe, irmãos e toda a minha família.

Ao professor Neri Volpato por me aceitar na orientação do mestrado, pela paciência, disponibilidade e suporte devido minhas limitações de tempo.

Aos professores José A. Foggatto e Paulo Beltrão pelas contribuições na minha qualificação.

A professora Marcia Araújo por sua disposição e suporte na realização dos ensaios mecânicos no laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Ao meu colega Tiago Weller que me auxiliou durante toda a pesquisa, pelas discussões técnicas, pelo empréstimo da impressora para a fabricação das peças e pelo seu tempo e paciência durante todo o estudo.

Ao meu amigo Paulo pelo seu envolvimento na pesquisa e auxílio durante a execução dos ensaios.

A Luana, pelo auxílio no empréstimo de recursos utilizados na pesquisa.

Aos meus colegas, Daphene, Antonio, Paulo Canedo e Damaris, pelo seu auxílio e incentivo durante a pesquisa.

Ao meu colega Alex pelo seu tempo e disponibilidade em auxiliar na pesquisa.

A empresa Robert Bosch, sediada em Curitiba, pelo incentivo e entendimento da disponibilidade de tempo para a execução do trabalho.

RESUMO

ZANOTTO, Thiago T. **Influência da otimização de trajetórias ociosas do bico extrusor em processo de manufatura aditiva**. 2017. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 217.

A manufatura aditiva é um processo de fabricação que se caracteriza por adicionar material camada a camada, apresentando assim pouca limitação geométrica. Esta tecnologia tem revolucionado os processos produtivos, podendo ser inclusive empregados como parte dos produtos finais. Uma das tecnologias existentes é baseada no princípio de extrusão de material, o qual se caracteriza por adicionar um filamento polimérico através de um cabeçote extrusor. Dentro do planejamento do processo deste princípio existe a etapa de planejamento da trajetória, onde é definida a estratégia de deposição de material e qual a sequência de deposição do mesmo. Neste processo observam-se movimentos ociosos (sem deposição de filamento) do cabeçote de extrusão. Vários estudos já foram realizados a fim de minimizar os tempos ociosos, envolvendo algoritmos de otimização de trajetória, porém sem a preocupação da verificação de possíveis efeitos dessa otimização nas peças produzidas. Portanto, esse trabalho tem por objetivo avaliar a influência do planejamento de trajetória sem e com otimização nas propriedades mecânicas, dimensional e no tempo de fabricação no princípio de extrusão de material utilizando o poli (ácido láctico - PLA) como material. Também foi realizado um experimento onde foi possível analisar a influência do tempo ocioso do cabeçote extrusor durante a deposição de filamento em uma mesma camada. Para isso foi programado uma interrupção do bico extrusor durante a deposição do filamento. Corpos de prova foram fabricados utilizando a impressora 3D Cloner em diferentes quantidades. Ensaio de tração, flexão a 3 pontos, comparação do tempo de fabricação e avaliação dimensional foram realizadas. Os resultados mostraram uma variação de 7% e 10% na tensão de ruptura a tração e flexão, respectivamente, entre os diferentes planejamentos de trajetória testados. Já para os experimentos com interrupção do bico extrusor a variação chegou até 46% (decréscimo na resistência a flexão). Em relação ao tempo de fabricação entre os diferentes planejamentos testados houve uma diferença de até 42,7% no tempo de fabricação e na avaliação dimensional observou-se pouca variação entre os métodos testados.

Palavras Chaves: Manufatura aditiva. Otimização de trajetória. Bico extrusor. Planejamento de Processo.

ABSTRACT

Zanotto, Thiago T. **Influence of idle path optimization of nozzle extruder in additive manufacturing process**, 2017, 107f. Thesis (Masters in Mechanical Engineering and Materials), Technological University Federal of Parana. Curitiba, 2017.

Additive manufacturing is characterized by adding material layer by layer, thus presenting little geometric limitation. This technology has revolutionized the production process and can even be employed as part of the final product. One of the existing technologies is based on the material extrusion principle, which is characterized by adding a polymeric filament through an extruder head. One of the stage of the process planning in this principle is the path planning, where the strategy and the sequence of the material deposition is defined. In this process there are idle movements (without material deposition) of the extrusion head. Several studies have already been carried out to minimize the idle time, involving path optimization algorithms, but without considering the possible side effects caused by this optimization in the manufactured parts. Therefore, the aim of this work is to evaluate the influence of path planning with and without optimization on mechanical properties, dimensional and building time of manufactured parts based in the principle of material extrusion, using polylactic acid (PLA). An experiment also was performed where it was possible to analyze the influence of the idle time of the extruder head during the material deposition in the same layer. For that an interruption of the extruder head during the material deposition was programmed. Different numbers of specimens were fabricated using 3D Cloner printer. Building time and dimensional evaluation were performed, together with tensile and 3-point bending tests. The results of tensile and bending showed a variation of 7% and 10%, on tensile at break, respectively when compared to the different path planning tested. In the experiments with interruption of the nozzle extruder the variation reached up to 46% (decrease in flexural strength). Regarding the building time between the different path planning tested, there was a difference up to 42.7% and in the dimensional evaluation it was observed small variation between the tested methods.

Keywords: Additive manufacturing. Path optimization. Nozzle extruder. Process Planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Etapas do processo e do planejamento de processo da AM	22
Figura 2.2 - Princípio de funcionamento do processo FDM da Stratasys.....	23
Figura 2.3 - Tipos de preenchimento por FDM.....	24
Figura 2.4 - Preenchimento com alternância de direção entre camadas	25
Figura 2.5 - Parâmetros de processo	25
Figura 2.6 - Composição de uma peça pelo processo de extrusão de material.....	27
Figura 2.7 - Ilustração da união dos filamentos entre camadas e na mesma camada	27
Figura 2.8 - Formação de ligação entre dois filamentos: (a) contato entre filamentos, (b) crescimento do pescoço, (c) difusão molecular	28
Figura 2.9 – Análise da formação de ligação entre dois filamentos: (a) dois tamanhos de amostras para o ensaio de flexão, (b) comparação do perfil de temperatura das amostras.....	28
Figura 2.10 – Crescimento do pescoço e temperatura do filamento polimérico.....	30
Figura 2.11 - Peças em diferentes posições na plataforma de fabricação	31
Figura 2.12 - Perfil de temperatura em diferentes regiões na plataforma de construção	32
Figura 2.13 - Efeito da estratégia de deposição no perfil da temperatura de resfriamento	33
Figura 2.14 - Orientações das peças do teste de Faes, Ferraris e Moens 2016.....	34
Figura 2.15 - Ilustração de como as peças foram produzidas no trabalho de Faes, Ferraris e Moens (2016).....	34
Figura 2.16 - Resultado da tensão x orientação x quantidade de peças.....	35

Figura 2.17 - Vista esquemática da orientação (a) horizontal, (b) vertical e (c) perpendicular, que produziu uma conseqüente variação do ângulo de <i>raster</i> , quando este foi mantido alinhado na direção de construção conforme indicado	36
Figura 2.18 - Rugosidade (ângulo de <i>raster</i> e posicionamento).....	37
Figura 2.19 - Resultados do ensaio de tração; (a) temperatura da base e (b) velocidade de impressão.....	38
Figura 2.20 - Trajetórias de deposição e reposicionamento para processos baseados em extrusão de material.....	40
Figura 2.21 - Grafo de um TSP	42
Figura 2.22 - Trajetória proposta pelo GTSP.....	43
Figura 2.23 - Uso do SOP na otimização com restrições de precedências: (a) peça exemplo e (b) hierarquização	44
Figura 2.24 - Definições de (a) células formadas pelas trajetórias da ferramenta e (b) restrições entre as trajetórias baseadas na hierarquia definidas por Castelino, Souza e Wright (2003).....	45
Figura 2.25 – Resultado da otimização com 242 pontos: (a) solução inicial e (b) algoritmo proposto utilizado.....	46
Figura 2.26 - Representação esquemática do processo de furação utilizando diferentes ferramentas	47
Figura 2.27 - Trajetória antes (esquerda) e trajetória otimizada (direita).....	48
Figura 2.28 - Procedimento para inserir contorno na trajetória	50
Figura 2.29 - Procedimento para inserir <i>raster</i> na trajetória	51
Figura 2.30 – Comparação da trajetória pelo método guloso (a) e o método proposto (b).....	52
Figura 3.1 – Fluxograma dos ensaios e análises realizadas.....	54
Figura 3.2 - Dimensões do corpo de prova de tração	56

Figura 3.3 - Dimensões do corpo de prova de flexão.....	56
Figura 3.4 - Ilustração da trajetória do bico extrusor na 1ª camada para o método CRCR-NO	58
Figura 3.5 - Ilustração da trajetória do bico extrusor na 2ª camada para o método CRCR-NO	59
Figura 3.6 - Ilustração do método CCRR-O para a 1ª camada: (a) contornos realizados e	60
Figura 3.7 - Ilustração da trajetória do bico extrusor na 1ª camada para o método CRCR-O.....	61
Figura 3.8 - Ilustração da trajetória do bico extrusor na 2ª camada para o método CRCR-O.....	62
Figura 3.9 - Ilustração do experimento com interrupção do bico extrusor.....	63
Figura 3.10 - Impressora 3D Cloner utilizada para a fabricação dos CPs.....	65
Figura 3.11 – Ilustração da disposição do corpo de prova na plataforma; (a) tração e (b) flexão	65
Figura 3.12 - Corpos de prova fabricados: (a) de tração e (b) de flexão	67
Figura 3.13 - Cotas medidas no corpo de prova de tração	68
Figura 3.14 - Cotas medidas no corpo de prova de flexão.....	68
Figura 3.15 - Ensaio de tração	69
Figura 3.16 - Ensaio de flexão.....	70
Figura 3.17 – Gráfico Boxplot.....	70
Figura 3.18 - Ilustração da disposição dos corpos de prova de tração; (a) 2 corpos de prova, (b) 3 corpos de prova e (c) 4 corpos de prova.....	72
Figura 3.19 - Ilustração da disposição dos corpos de prova de flexão; (a) 2 corpos de prova, (b) 3 corpos de prova e (c) 4 corpos de prova.....	72

Figura 4.1 – Resultados da tensão máxima obtida nos ensaios de tração dos CPs produzidos considerando a fabricação de um (1) corpo de prova na plataforma	76
Figura 4.2 – Resultados da tensão na ruptura obtida nos ensaios de flexão dos CPs produzidos considerando a fabricação de um (1) corpo de prova na plataforma	78
Figura 4.3 - Fotos de alguns corpos de prova de tração fraturadas para os métodos CRCR-NO, CCRR-O e CRCR-O	79
Figura 4.4 - Fotos dos corpos de prova de tração fraturadas com interrupção de (a) P17e (b) P65	80
Figura 4.5 - Micrografia da região fraturada para o corpo de prova de tração com interrupção de: (a) P17 e (b) P65	81
Figura 4.6 - Corpo de prova de flexão com interrupção	82
Figura 4.7 - Fotos dos corpos de prova de tração fraturadas com interrupção de (a) P17e	82
Figura 4.8 - Micrografia da região fraturada para o corpo de prova de flexão com interrupção de: (a) CRCR-NOP17 e (b) CRCR-NOP65	83
Figura 4.9 – Esquemático ilustrativo das possíveis diferentes temperaturas nas camadas transversais e longitudinais nos corpos de prova com interrupção forçada do bico extrusor	84
Figura 4.10 – Resultados da tensão máxima obtida nos ensaios de tração dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR-NO	88
Figura 4.11 – Resultados do E obtido nos ensaios de tração dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR-NO	89
Figura 4.12 – Resultados da tensão máxima obtida nos ensaios de tração dos CPs produzidos em lotes pelo método CCRR-O	90
Figura 4.13 – Resultados do E obtido nos ensaios de tração dos CPs produzidos em lotes pelo método CCRR-O	90

Figura 4.14 – Resultados da tensão máxima obtida nos ensaios de tração dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR-O	91
Figura 4.15 – Resultados do E obtido nos ensaios de tração dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR-O.....	92
Figura 4.16 – Resultados da tensão na ruptura obtida nos ensaios de flexão dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR-NO.....	93
Figura 4.17 – Resultados do E obtido nos ensaios de flexão dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR-NO	94
Figura 4.18 – Resultados da tensão na ruptura obtida nos ensaios de flexão dos CPs produzidos em lotes pelo método CCRR-O	95
Figura 4.19 – Resultados do E obtido nos ensaios de flexão dos CPs produzidos em lotes pelo método CCRR-O.....	95
Figura 4.20 – Resultados da tensão na ruptura obtida nos ensaios de flexão dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR- O	96
Figura 4.21 – Resultados do E obtido nos ensaios de flexão dos CPs produzidos em lotes pelo método CCRR-O.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultados dos ensaios de flexão	29
Tabela 2.2 - Comparação dos ensaios de flexão	29
Tabela 2.3 - Resultados experimentais de diferentes peças dispostas na plataforma	31
Tabela 2.4 - Resultados experimentais do crescimento do “pescoço” nas camadas inferiores e superiores.....	33
Tabela 2.5 - Parâmetros de processo avaliados	38
Tabela 3.1 – Valores das propriedades mecânicas do PLA.....	55
Tabela 3.2 - Parâmetros de processo utilizado	66
Tabela 4.1 - Tempo de fabricação em segundos - corpos de prova de tração para 1CP	74
Tabela 4.2 - Tempo de fabricação em segundos - corpos de prova de flexão para 1CP	75
Tabela 4.3 - Tempo de fabricação em segundos - corpos de prova de tração	85
Tabela 4.4 - Tempo de fabricação em segundos - corpos de prova de flexão.....	85
Tabela 4.5 - Resultado dimensional para corpos de prova de tração e flexão	86

LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

AM	Manufatura Aditiva (<i>Additive Manufacturing</i>)
AMF	<i>Additive Manufacturing Format</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
GTSP	Problema do Caixeiro Viajante Generalizado (<i>Generalized Traveling Salesman Problem</i>)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PLA	Poli (ácido láctico) (<i>PolyLactic Acid</i>)
STL	<i>STereoLithography</i>
SLM	Fusão Seletiva a Laser (<i>Selective Laser Melting</i>)
SOP	<i>Sequential Ordering Problem</i>
Tg	Temperatura de Transição Vítreia (<i>Glass transition temperature</i>)
TSP	Problema do Caixeiro Viajante (<i>Traveling Salesman Problem</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 OPORTUNIDADE DE PESQUISA.....	18
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	18
1.2.1 Objetivo Geral.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
1.3 JUSTIFICATIVA.....	19
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	19
2 OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE MANUFATURA.....	21
2.1 PLANEJAMENTO DE PROCESSO NA MANUFATURA ADITIVA.....	21
2.2 PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL.....	22
2.3 PARÂMETROS DE PROCESSO E PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA.....	24
2.4 EFEITOS DE PARÂMETROS DE PROCESSO NAS PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	26
2.5 REPOSICIONAMENTO ENTRE TRAJETÓRIAS DE DEPOSIÇÃO.....	39
2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE OTIMIZAÇÕES DE TRAJETÓRIAS EM PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	41
2.6.1 Problema do caixeiro viajante (TSP).....	41
2.6.2 TSP Generalizado (GTSP).....	42
2.6.3 Método de otimização guloso (<i>greedy</i>).....	43
2.6.4 Precedências a serem observadas.....	43
2.7 OTIMIZAÇÃO EM PROCESSO POR EXTRUSÃO DE MATERIAL.....	48
2.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO DA LITERATURA.....	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1 MATERIAL UTILIZADO POLI (ÁCIDO LÁCTICO) – PLA.....	54
3.2 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....	55
3.2.1 Definição dos corpos de prova.....	56
3.2.2 Planejamentos das trajetórias de deposição.....	57
3.3 ANÁLISE DE CORPO DE PROVA FABRICADO INDIVIDUALMENTE.....	64

3.3.1	Fabricação dos corpos de prova	64
3.3.2	Análise do tempo de fabricação	67
3.3.3	Análise dimensional	67
3.3.4	Ensaio de tração	68
3.3.5	Ensaio de flexão em três pontos	69
3.3.6	Análise com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da região da fratura	71
3.4	ANÁLISE DE CORPO DE PROVA FABRICADO EM LOTES.....	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1	ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA FABRICADOS INDIVIDUALMENTE.....	74
4.1.1	Análise do tempo de fabricação	74
4.1.2	Análise dimensional	75
4.1.3	Ensaio de tração	76
4.1.4	Ensaio de flexão.....	78
4.1.5	Verificação por MEV da adesão entre filamentos na região da fratura	79
4.2	ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA FABRICADOS EM LOTES.....	85
4.2.1	Análise do tempo de fabricação	85
4.2.2	Análise dimensional	86
4.2.3	Ensaio de tração	87
4.2.4	Ensaio de flexão.....	93
5	CONCLUSÕES.....	99
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
5.2	CONCLUSÕES.....	99
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
	REFERÊNCIAS	102
	APÊNDICE	106

1 INTRODUÇÃO

Devido às grandes mudanças e requisitos no mercado de trabalho, torna-se cada vez mais importante o rápido desenvolvimento de novos produtos. Desenvolvimento esse que deve ser baseado em baixo custo, com alta qualidade e que seja rápido para a sua criação. Uma das tecnologias utilizadas neste desenvolvimento é a Manufatura Aditiva (AM – *Additive Manufacturing*), a qual é um processo de fabricação de objetos físicos a partir de um modelo geométrico tridimensional CAD (*Computer-Aided Design*). A AM se caracteriza pela adição de material, geralmente em camadas sucessivas, diferenciando-se dos processos tradicionais, os quais envolvem a remoção de material como fundamento principal do processo.

Um dos grandes desafios da AM quando comparado com o processo tradicional (remoção de material) é em relação ao custo de fabricação das peças. Vários fatores podem ser atribuídos a isso, entre eles o tempo de execução da peça a ser fabricada.

Um dos princípios de tecnologia de AM que é impactado pelo grande tempo de construção das camadas é o de extrusão de material, o qual é baseado na adição de filamentos de material polimérico por meio de um cabeçote extrusor. Neste princípio o cabeçote extrusor deve interromper a extrusão e realizar movimentos ociosos (sem deposição de material) para deslocamento até a próxima zona de deposição (trajetória de reposicionamento). Este reposicionamento sem deposição pode ser reduzido, otimizando o tempo de construção do modelo. Vários algoritmos de otimizações de trajetórias já foram realizados a fim de reduzir esse tempo de fabricação (trechos em vazio).

Entretanto, a otimização de deslocamentos ociosos da trajetória pode ter efeitos nas características (mecânicas) das peças produzidas. Sendo assim, um estudo sobre este tema faz-se necessário, a fim de identificar qual a relação entre a otimização de trajetória e os efeitos nas peças produzidas.

1.1 OPORTUNIDADE DE PESQUISA

Um dos grandes desafios da tecnologia AM baseada no princípio de extrusão de material (deposição de filamento) é a redução do tempo ocioso na trajetória do cabeçote de extrusão. Os reposicionamentos, que ocorrem sem deposição de material, podem ser reduzidos, otimizando o tempo de construção do modelo. Alguns algoritmos já foram testados para essa tecnologia de AM, porém uma avaliação dos efeitos que a otimização de trajetórias ociosas pode ocasionar nas peças fabricadas não foi evidenciada.

Com base no que já foi citado abre-se um campo de estudo dos efeitos que podem ser gerados em peças produzidas por extrusão de material utilizando otimizações de planejamento de trajetória ociosas do bico extrusor pelo princípio de deposição de filamento.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo Geral

O trabalho tem por objetivo principal avaliar a influência da otimização de deslocamentos ociosos da trajetória de deposição no princípio de AM por extrusão de material nas propriedades mecânicas (tensão e flexão), nas dimensões e no tempo de fabricação de corpos de prova produzidos em poli (ácido láctico) – PLA.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Comparar as propriedades mecânicas (tração e flexão) e dimensionais de corpos de provas obtidos com planejamento de trajetória com e sem otimização de deslocamento ocioso do bico extrusor;
- b) Avaliar o efeito de se fabricar diferentes quantidades de corpos de prova na plataforma de impressão, com otimização do planejamento de trajetória, nas suas propriedades mecânicas;

- c) Avaliar a influencia da adesão entre filamentos de material de trechos de *raster* vizinhos, através da interrupção forçada do bico extrusor, nas propriedades mecânicas (tensão e flexão) de corpos de prova, por meio do uso de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

1.3 JUSTIFICATIVA

A otimização pode auxiliar na redução de custos e prazos na produção de peças pelo princípio de extrusão de material. No entanto, conhecer o efeito desta otimização nas propriedades mecânicas das peças produzidas por essa tecnologia é fundamental para que esta redução não seja alcançada em detrimento da qualidade causada por essa otimização.

Outra justificativa é a contribuição ao conhecimento científico na área de otimização de deslocamentos ociosos do bico extrusor pelo princípio de extrusão de material, uma vez que durante a revisão bibliográfica não foram identificados trabalhos referentes ao estudo em questão. O que foi evidenciado foram alguns estudos relacionados a otimizações do deslocamento ocioso, porém sem a preocupação do efeito que isso poderia ocasionar nas propriedades mecânicas das peças produzidas.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1 do trabalho é apresentada uma introdução ao tema, ressaltando a oportunidade de pesquisa e os objetivos da pesquisa. No Capítulo 2, o trabalho relata a tecnologia de manufatura aditiva, o processo de extrusão de material, os principais trabalhos científicos que buscaram entender quais os efeitos dos parâmetros de processo que afetam a qualidade final das peças fabricadas. Alguns trabalhos sobre otimização de trajetória foram relatados. No Capítulo 3 são mostrados os materiais e o método utilizado para que os objetivos do trabalho fossem alcançados. São mostrados os planejamentos de trajetórias que foram

utilizados, equipamentos e a definição dos experimentos realizados. No Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões sobre os ensaios apresentados no Capítulo 3. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo assim como propostas para trabalhos futuros.

2 OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE MANUFATURA

Neste capítulo é apresentada a definição da manufatura aditiva (AM- *Additive Manufacturing*), em especial no processo de manufatura pelo princípio de extrusão de material. São relatados os trabalhos que já foram realizados sobre a otimização de trajetória, tanto em processos tradicionais (remoção de material) de fabricação, como no processo de deposição de filamento. Estes trabalhos serviram de base teórica e de referência aos estudos propostos nesta pesquisa.

2.1 PLANEJAMENTO DE PROCESSO NA MANUFATURA ADITIVA

A AM pode ser definida como um processo de adicionar material a partir de dados de um modelo geométrico 3D, camada sob camada, ao contrário da manufatura por remoção de material (ISO/ASTM 52900:2015). Segundo Volpato e Carvalho (2017, cap. 1) as principais etapas do processo de AM são: a obtenção do modelo geométrico 3D, o planejamento do processo, a fabricação no equipamento AM e o pós-processamento para obtenção da peça final, conforme ilustrado na Figura 2.1. A AM parte de um modelo 3D, após isso escolhe-se uma técnica para se reproduzir fisicamente a peça. Inicialmente, o modelo tridimensional é projetado em algum *software* de modelagem geométrica (exemplo: CAD). Em seguida, o modelo é convertido em um formato adequado para AM, que pode ser nos padrões STL (*STereoLithography*), AMF (*additive manufacturing format*) ou outro formato 3D aceito pelo equipamento (VOLPATO e CARVALHO, 2017, cap.1).

A etapa do planejamento de processo então é realizada, a qual tem início com a orientação da geometria, posicionamento na plataforma de construção, fatiamento, cálculo da base e das estruturas de suporte, cálculo da trajetória e/ou geometria do contorno e/ou preenchimento das camadas e geração de dados a serem enviados a máquina de AM. Todo o ciclo do processo pode-se repetir quantas vezes for necessário até que seja completado satisfatoriamente, com o produto atendendo as necessidades do projeto (VOLPATO E SILVA, 2017, cap.5), todo esse processo é ilustrado na Figura 2.1.

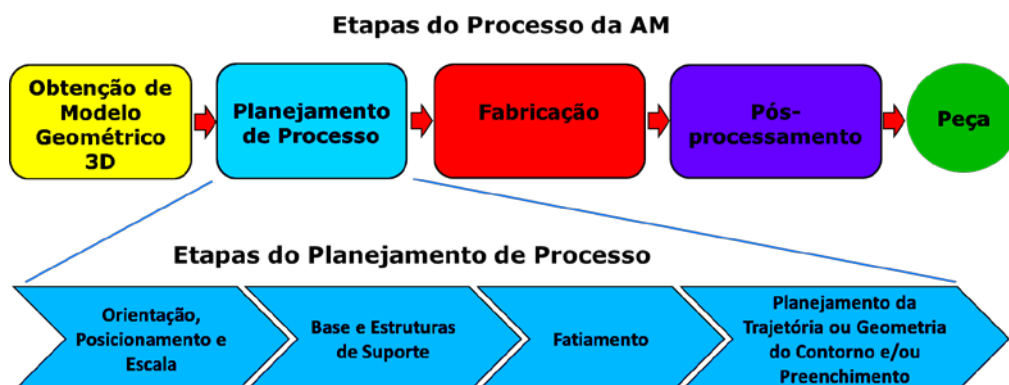


Figura 2.1 - Etapas do processo e do planejamento de processo da AM

Fonte: Volpato e Silva (2017, cap. 5).

2.2 PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL

Este processo de AM é baseado no princípio de extrusão de um filamento de material utilizando um cabeçote extrusor que se movimenta nos planos X-Y. Este filamento de material irá preencher as áreas da peça em cada camada, sendo a tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*) uma das mais difundidas (VOLPATO et al., 2013). Caso o planejamento de processo identifique a necessidade, devem ser construídas estruturas de suportes para sustentar a peça durante o processo, que posteriormente serão removidas no pós-processamento. Ao final do preenchimento de cada camada, a plataforma se desloca para baixo uma distância igual à espessura da camada, formando camadas sobrepostas de material até se obter o objeto pretendido (Figura 2.2).

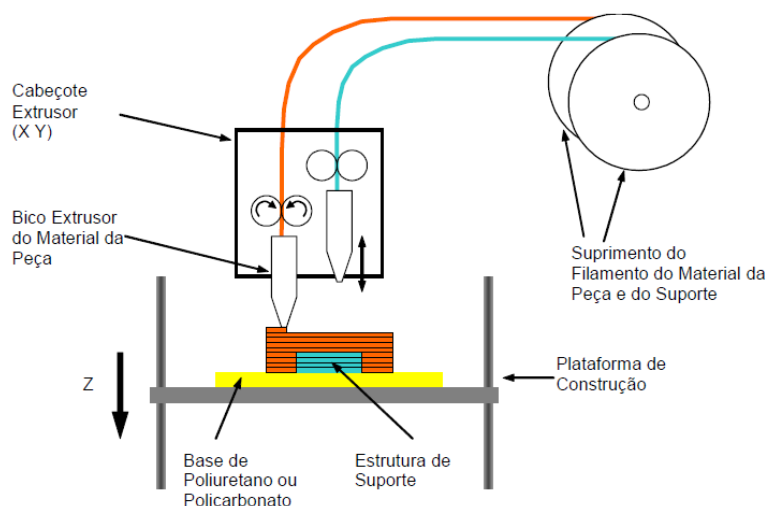


Figura 2.2 - Princípio de funcionamento do processo FDM da Stratasys
Fonte: Volpato et al. (2007).

Observa-se na Figura 2.2 que na tecnologia FDM existe um bico extrusor para o material da peça e um segundo bico extrusor para depositar o material de suporte. A estrutura de suporte é necessária quando existirem regiões que não estejam conectadas ao corpo da peça ou que possuam superfícies negativas com inclinação abaixo do ângulo de autossuporte. Segundo Volpato et al. (2017), qualquer material que possa ser levado ao estado pastoso e depois endurecido por ação física ou química pode ser processado com esse princípio. Dependendo do material, o bico extrusor pode trabalhar desde a temperatura ambiente até a temperatura de fusão específica do material, como é o caso de extrusão de polímeros (VOLPATO, 2017, cap.7).

A expansão da AM ou tecnologia de impressão de baixo custo é decorrente, em parte, do crescimento dos chamados movimentos *open source*, disseminados através da internet. O conceito *open source* (código aberto), segundo Johnson et al. (2014), é utilizado para referenciar o direito de copiar, redistribuir e modificar *hardware e software*. Diferentes dos modelos tradicionais dos equipamentos FDM, os modelos com base no conceito de código aberto permitem maior flexibilidade e adaptações ao usuário para pesquisas, uma vez que na maioria das vezes permitem o acesso aos protocolos de controle e funcionamento desta tecnologia.

2.3 PARÂMETROS DE PROCESSO E PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA

O planejamento da trajetória de preenchimento no processo de extrusão de material permite a utilização de diferentes estratégias de preenchimento da área de cada camada. Conforme Volpato (2007, cap.4), nessa tecnologia o preenchimento pode ser realizado por três formas:

- *Raster*: preenchimento realizado em movimentos de passes paralelos (ziguezague) (Figura 2.3a).
- Contorno ou *offset*: vários contornos fechados ou equidistantes são depositados conforme o perímetro ou perfil da camada (Figura 2.3b).
- Contorno e *raster*: são combinadas as duas estratégias de preenchimento em cada camada (Figura 2.3c).

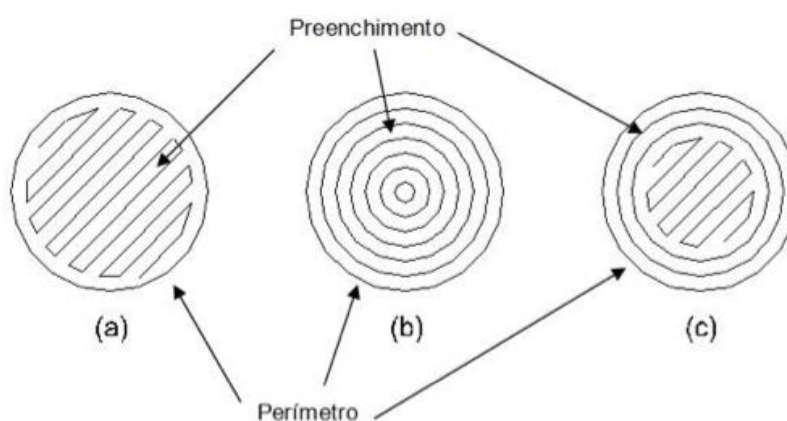


Figura 2.3 - Tipos de preenchimento por FDM
 Fonte: Adaptado de Volpato (2007).

Conforme Volpato et al. (2013), o preenchimento tipo *raster* é o mais empregado devido a sua maior velocidade de construção. A direção do *raster* é alternada em 90° de uma camada para outra, pois dessa maneira há uma maior resistência mecânica da peça produzida conforme ilustrado na Figura 2.4.

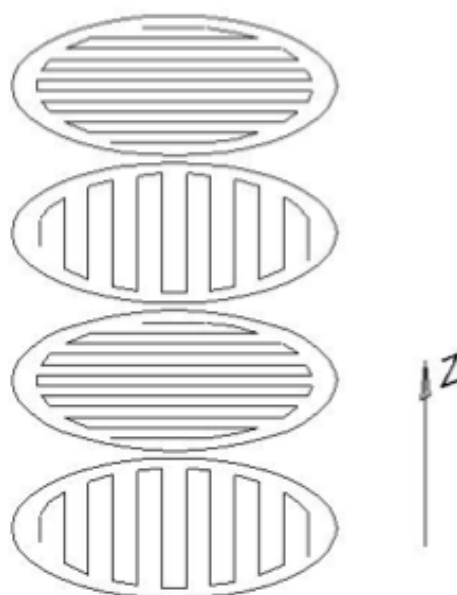


Figura 2.4 - Preenchimento com alternância de direção entre camadas
Fonte: Adaptado de Volpato (2007).

Os principais parâmetros de processo, segundo Hossain et al. (2013), são: orientação da construção, espessura da camada, ângulo de *raster*, largura de contorno, número de contornos e espaçamento entre *raster*, conforme ilustrado na Figura 2.5.

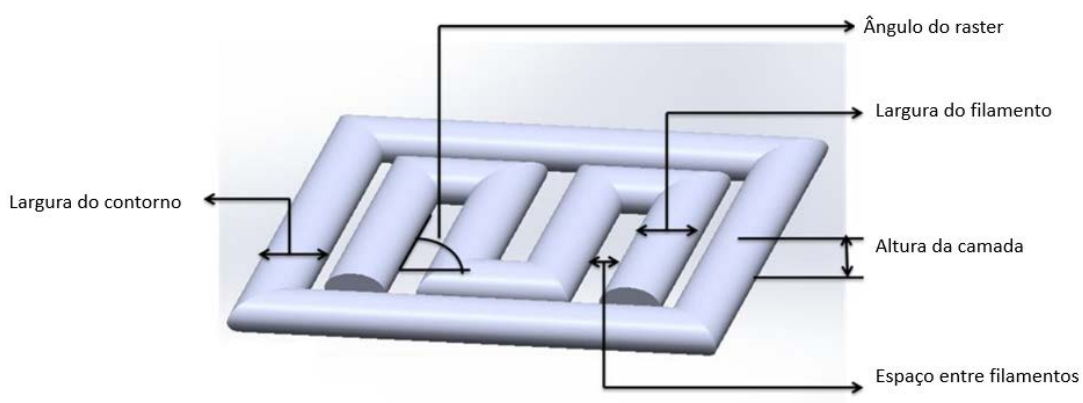


Figura 2.5 - Parâmetros de processo
Fonte: Adaptado de Hossain et al. (2013).

Todos os parâmetros da Figura 2.5 são descritos abaixo:

- Ângulo do *raster*: é a direção das linhas de preenchimento da estratégia tipo *raster* em relação ao eixo X da plataforma (SOOD et al., 2011);
- Largura do filamento no preenchimento: é a largura utilizada no preenchimento da parte interna da fatia delimitada pelo contorno (FOGGIATTO, 2005);
- Espessura da camada: é a altura da camada, medida ao longo da direção Z;
- Espaço entre filamentos (*gap*): é a distância entre dois filamentos adjacentes na mesma camada, se o valor for zero significa que os filamentos irão estar lado a lado, sem nenhum espaçamento entre eles (AHN et al., 2002);
- Largura do contorno: define a largura do filamento depositado no contorno (C) da camada;
- Orientação da construção: é a orientação da peça em relação aos eixos X, Y e Z, onde X e Y são considerados paralelos à plataforma de construção e o eixo Z ao longo da direção da construção da peça (SOOD et al., 2011).

2.4 EFEITOS DE PARÂMETROS DE PROCESSO NAS PROPRIEDADES DO MATERIAL

De acordo com Bellini e Guçeri (2003), as propriedades mecânicas de peças produzidas por AM no processo de extrusão de material dependem principalmente de dois fatores: a orientação de construção e a estratégia de preenchimento da camada.

Segundo Bellini (2002), a temperatura da câmara de construção (envelope) é importante para a adesão entre os filamentos da mesma camada e entre camadas. Segundo o autor, essa adesão entre os filamentos termoplásticos caracteriza-se por um elemento básico na determinação das propriedades mecânicas das peças. Ressalta ainda que a temperatura de envelope deve ser mantida a mais alta possível para que resistência da união entre os filamentos seja maior.

Os componentes construídos pelo princípio de extrusão de material são composições de filamentos poliméricos, ligações parciais entre filamentos e vazios (Bellehumeur et al., 2004) conforme ilustrado na Figura 2.6. A formação da ligação entre camadas é conduzida pela energia térmica dispendida do material semifundido.

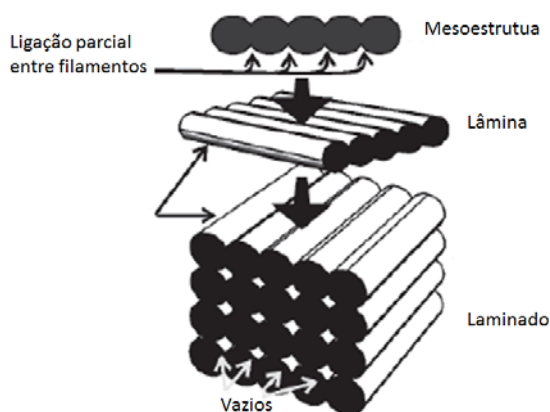


Figura 2.6 - Composição de uma peça pelo processo de extrusão de material
Fonte: Adaptado de Bellehumeur et al. (2004).

De acordo com Gurralla e Regalla (2014), existem dois tipos de união entre os filamentos conforme ilustrado na Figura 2.7. A primeira é dentro das camadas, ou seja, na união entre filamentos adjacentes pertencentes à mesma camada, e a segunda, na adesão entre camadas, ou seja, na união entre duas camadas sucessivas.

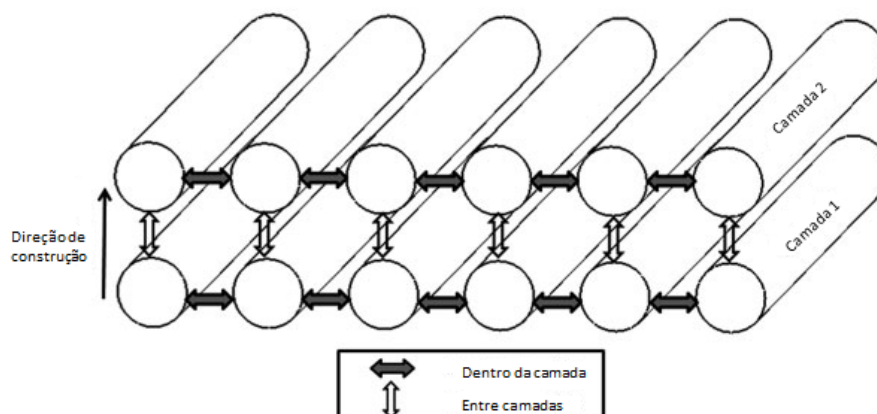


Figura 2.7 - Ilustração da união dos filamentos entre camadas e na mesma camada
Fonte: Adaptado de Gurralla e Regalla (2014).

Ainda de acordo com os autores a força total de união dos filamentos depende do tamanho do “pescoço” entre os filamentos, formado pelo resultado da combinação da difusão molecular do processo e das cadeias poliméricas, conforme ilustrado na Figura 2.8.

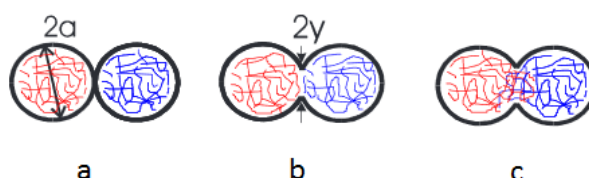


Figura 2.8 - Formação de ligação entre dois filamentos: (a) contato entre filamentos, (b) crescimento do pescoço, (c) difusão molecular

Fonte: Adaptado de Sun et al. (2003).

Sun et al. (2003) realizaram um experimento onde dois conjuntos de amostras foram construídos para realizar testes mecânicos com o objetivo de avaliar a força de ligamentos entre os filamentos. No primeiro conjunto, as amostras (de 31x19,1x3,1mm) foram construídas individualmente. Já para o segundo conjunto, uma amostra longa (comprimento equivalente a três amostras), foi fabricada individualmente e as amostras menores então foram cortadas a partir dessa (Figura 2.9a). Os perfis de temperatura da base das amostras foram registrados e são ilustrados na Figura 2.9b.

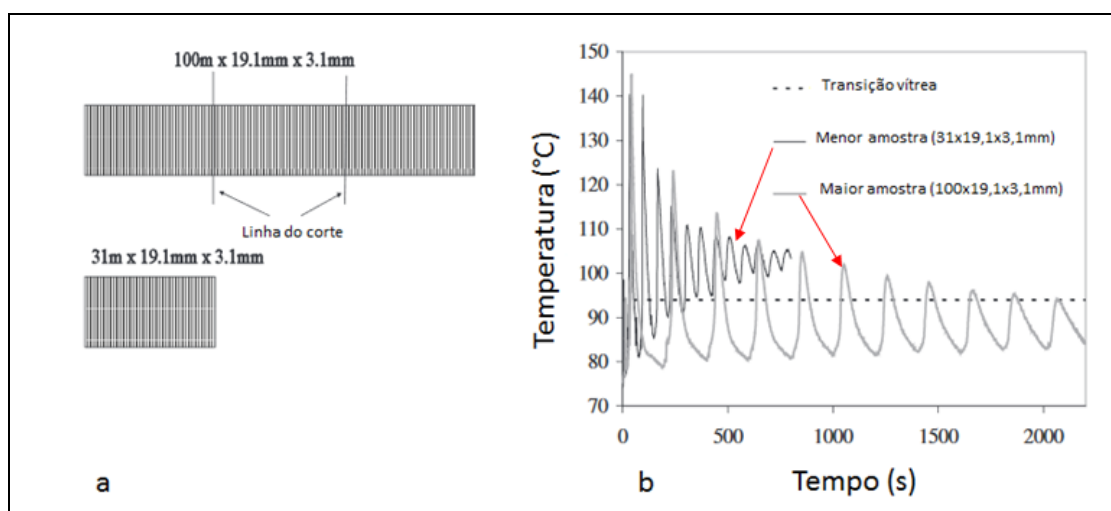


Figura 2.9 – Análise da formação de ligação entre dois filamentos: (a) dois tamanhos de amostras para o ensaio de flexão, (b) comparação do perfil de temperatura das amostras

Fonte: Adaptado de Sun et al. (2003).

Pode ser observado que para as amostras construídas individualmente (primeiro conjunto), a temperatura na base da peça permanece acima da temperatura de transição vítrea (T_g) por um longo período. Para o segundo conjunto de amostras, a temperatura da base atinge um nível acima de T_g por apenas uma curta duração durante a deposição de cada camada de filamentos. Portanto, as amostras curtas feitas individualmente tem uma resistência maior quando comparadas com as amostras extraídas de um corpo maior, do segundo conjunto. Os resultados podem ser verificados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Resultados dos ensaios de flexão

Característica	Identificação das amostras	
	3 amostras cortadas	Individual
Resistência a Flexão (kPa)	2277	2810
Desvio padrão (kPa)	105.9	87.2
Total de amostras usadas	8	4

Fonte: Adaptado de Sun et al. (2003).

Sun et al. (2003) relatam que o perfil de temperatura da amostra mais longa mostrada na Figura 2.9b também sugere que as camadas superiores da amostra estão expostas a durações de temperatura mais curtas acima da T_g , em comparação com as camadas inferiores. Isto indicaria que as camadas inferiores da amostra deveriam ter maiores forças de ligação que as camadas superiores. Com base nisso, os autores realizaram um experimento onde a fratura pudesse ocorrer tanto na camada superior como inferior, posicionando os corpos de prova com a face superior e a face inferior durante a realização dos ensaios. Na Tabela 2.2 são ilustrados os resultados destes ensaios.

Tabela 2.2 - Comparação dos ensaios de flexão

Característica	Posição da camada	
	Inferior	Superior
Resistência a Flexão (kPa)	2277.2	2153.6
Desvio padrão (kPa)	105.9	65.9
Total de amostras usadas	8	5

Fonte: Adaptado de Sun et al. (2003).

Com base nos resultados da Tabela 2.2 os autores relatam que nas camadas superiores, a resistência à flexão é menor quando comparada com as camadas inferiores. Este resultado é atribuído a melhor adesão dos filamentos nas primeiras camadas devido ao perfil de temperatura conforme Figura 2.9b. Ou seja, as camadas de base possuem mais condições, temperatura e tempo, para que ocorra a difusão das moléculas dos filamentos.

Conforme Li et al. (2002), quando há a deposição do filamento de material, a temperatura na interface entre filamentos encontra-se acima da T_g , o que auxilia na adesão das camadas. Com base nisso, os autores relatam que o crescimento do “pescoço” ocorre nos primeiros segundos após a deposição do filamento, considerando a temperatura de extrusão e a temperatura do envelope (câmara de construção) como parâmetros fundamentais para que isso ocorra. Na Figura 2.10 é ilustrado o crescimento do “pescoço” (y/a), onde y é o raio do pescoço e a o raio do filamento.

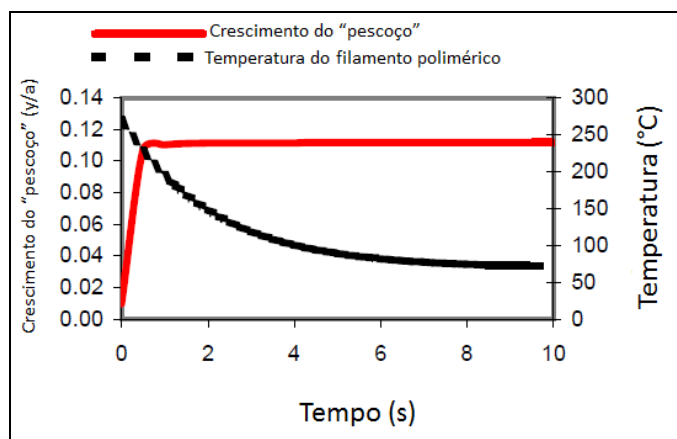


Figura 2.10 – Crescimento do pescoço e temperatura do filamento polimérico

Fonte: Adaptado de Li et al. (2002).

Sun et al. (2008) realizaram experimentos a fim de analisar o efeito da temperatura da câmara de construção durante a fabricação de peças em diferentes regiões da plataforma de construção no processo de FDM conforme Figura 2.11. Os mesmos fabricaram 24 corpos de prova simultaneamente para ensaio de flexão.

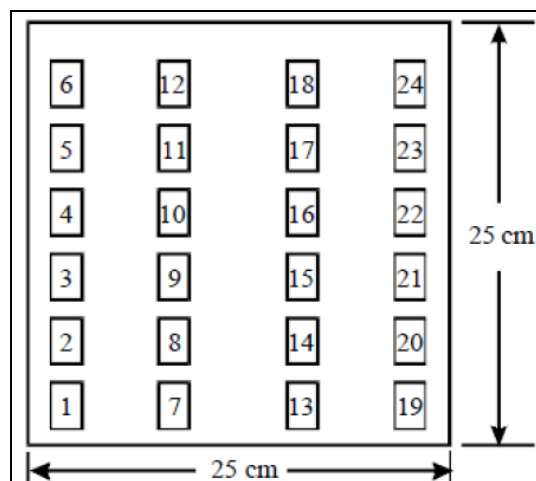


Figura 2.11 - Peças em diferentes posições na plataforma de fabricação

Fonte: Adaptado de Sun et al. (2008).

A Tabela 2.3 mostra os resultados encontrados para as peças 1, 9 e 15, que segundo os autores representaram, respectivamente, a maior, a menor e a média temperatura registrada durante os experimentos.

Tabela 2.3 - Resultados experimentais de diferentes peças dispostas na plataforma

Característica	Localização da peça na plataforma		
	Peça 1	Peça 9	Peça 15
Raio do “pescoço” (μm)	66,4	87,3	79,6
Desvio padrão (μm)	4,82	4,42	3,63
Crescimento do “pescoço” (y/a)	0,54	0,71	0,65
Carga média de ruptura (N)	185,5	233,1	211,3
Desvio padrão (N)	9,78	5,44	7,42

Fonte: Adaptado de Sun et al. (2008).

Segundo Sun et al. (2008), esses resultados são atribuídos aos diferentes perfis de temperatura de cada peça nas diferentes posições das peças na plataforma de construção. Esses perfis de temperatura são ilustrados na Figura 2.12.

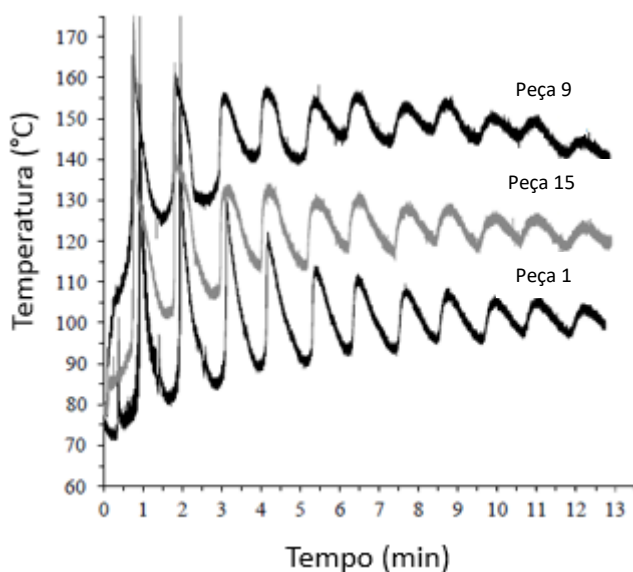


Figura 2.12 - Perfil de temperatura em diferentes regiões na plataforma de construção
Fonte: Adaptado de Sun et al. (2008).

De acordo com os autores essa diferença nos perfis de temperatura influenciou tanto na mesoestrutura como na qualidade de adesão entre os filamentos.

A Figura 2.13 mostra o perfil da temperatura ao longo do tempo de peças produzidas com diferentes orientações de deposição de material (ângulo de *raster*, longitudinal e lateral). Segundo Sun et al. (2008), na orientação longitudinal, a temperatura mantém-se acima da T_g em grande parte do tempo. Os picos de temperatura foram relativamente baixos devido ao bico extrusor percorrer um comprimento de *raster* longo até a camada seguinte, permitindo assim que o material depositado esfrie antes da próxima deposição. Já para a orientação lateral, segundo os autores, os picos de temperaturas são explicados devido ao menor comprimento de *raster*, uma vez que o bico extrusor fica sempre próximo da peça durante a deposição de material.

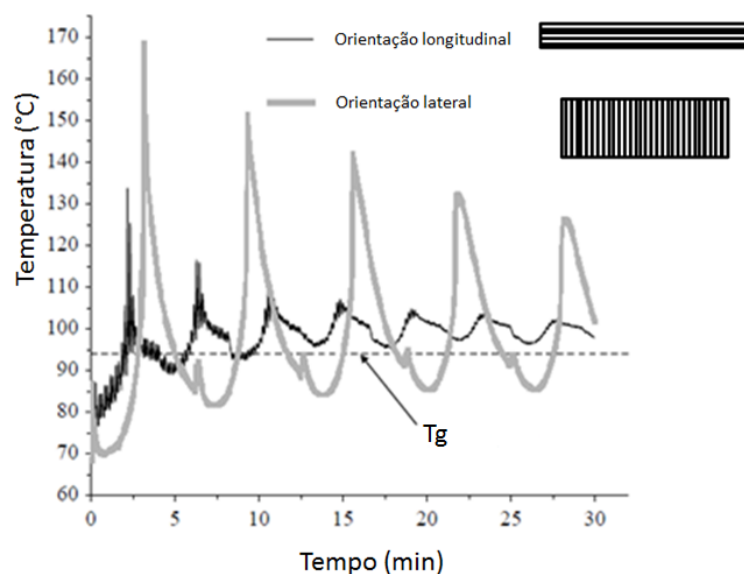


Figura 2.13 - Efeito da estratégia de deposição no perfil da temperatura de resfriamento
Fonte: Adaptado de Sun et al. (2008).

Ainda de acordo com Sun et al. (2008), as camadas inferiores (contato com a plataforma de impressão) das peças produzidas no processo de FDM permanecem a temperaturas superiores a T_g por um longo período de tempo quando comparada com as camadas superiores. Com base nisso, os autores relatam que o crescimento do “pescoço” entre os filamentos adjacentes da mesma camada é maior nas camadas inferiores do que nas superiores.

A Tabela 2.4 sumariza os experimentos realizados por Sun et al. (2008) comparando as camadas inferiores e superiores quanto ao crescimento do “pescoço”.

Tabela 2.4 - Resultados experimentais do crescimento do “pescoço” nas camadas inferiores e superiores.

Característica	Posição da camada	
	Inferior	Superior
Raio do “pescoço” (μm)	75.4	50.9
Desvio padrão (μm)	2.63	2.69
Crescimento do “pescoço” (y/a)	0.61	0.41

Fonte: Adaptado de Sun et al. (2008).

Faes, Ferraris e Moens (2016) demonstram a influência do tempo de deposição entre camadas na aderência dos filamentos de material. O estudo foi conduzido de forma a testar peças com diferentes orientações (horizontal e vertical, vide Figura 2.14), e também variando a quantidade de peças produzidas simultaneamente na plataforma de impressão conforme ilustrado na Figura 2.15.



Figura 2.14 - Orientações das peças do teste de Faes, Ferraris e Moens 2016

Fonte: Adaptado de Faes, Ferraris e Moens (2016).

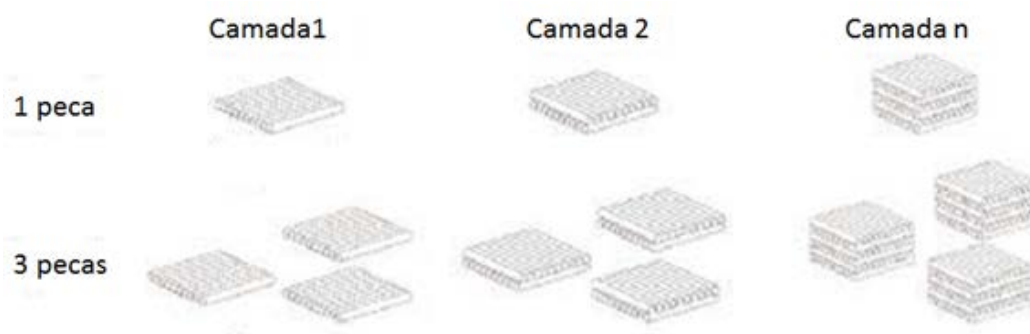


Figura 2.15 - Ilustração de como as peças foram produzidas no trabalho de Faes, Ferraris e Moens (2016)

Fonte: Adaptado de Faes, Ferraris e Moens (2016).

Os autores concluíram que a aderência entre camadas é influenciada alterando a quantidade de peças produzidas. Na Figura 2.16 observa-se uma correlação inversa entre o tempo de resfriamento entre as camadas (maior número de peças fabricadas juntas) e a tensão de ruptura encontrada quando o corpo de prova foi fabricado na vertical. Segundo os autores, isso é atribuído ao tempo prolongado de

resfriamento entre as camadas, o que resulta em uma adesão mais fraca entre camadas. Observa-se que, mesmo para as amostras fabricadas na orientação horizontal (maior tempo de deposição entre camadas), o efeito entre o número de peças não representou grandes alterações nos valores de tensão na ruptura. Segundos os autores, esse comportamento é atribuído ao fato de que nessa orientação o carregamento acontece dentro das camadas (filamentos adjacentes), ou seja, o fator tempo entre camadas nesse caso não foi diretamente influenciado.

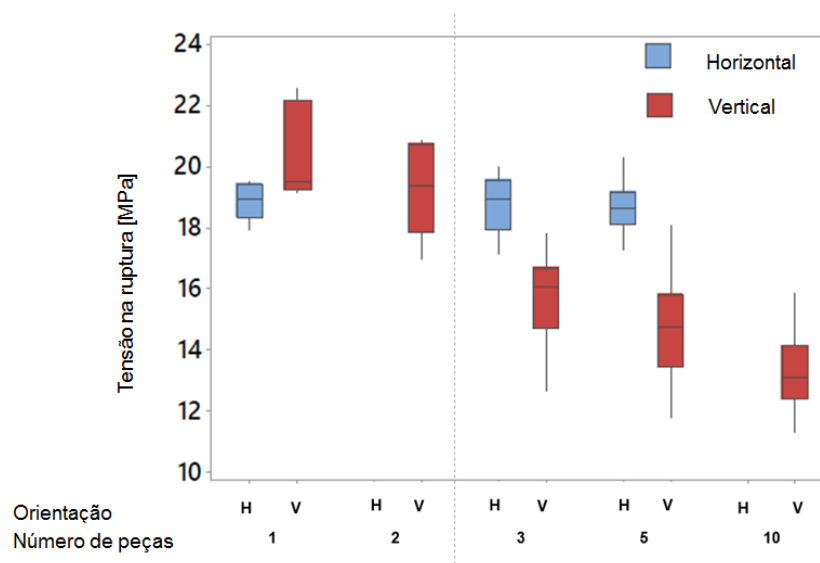


Figura 2.16 - Resultado da tensão x orientação x quantidade de peças
Fonte: Adaptado de Faes, Ferraris e Moens (2016).

Para trabalhos futuros os autores sugerem o monitoramento real da temperatura durante o processo de fabricação para estabelecer uma correlação mais concreta, assim como um estudo aprofundado do efeito do comprimento das linhas de *raster* sobre as propriedades mecânicas entre as camadas.

Durgun e Ertan (2014) realizaram um estudo demonstrando a influência nas propriedades mecânicas de peças produzidas quando utilizados diferentes ângulos de *raster* (0° , 30° , 45° , 60° e 90°) para três tipos de orientações diferentes (horizontal, vertical e perpendicular) conforme ilustração da Figura 2.17.

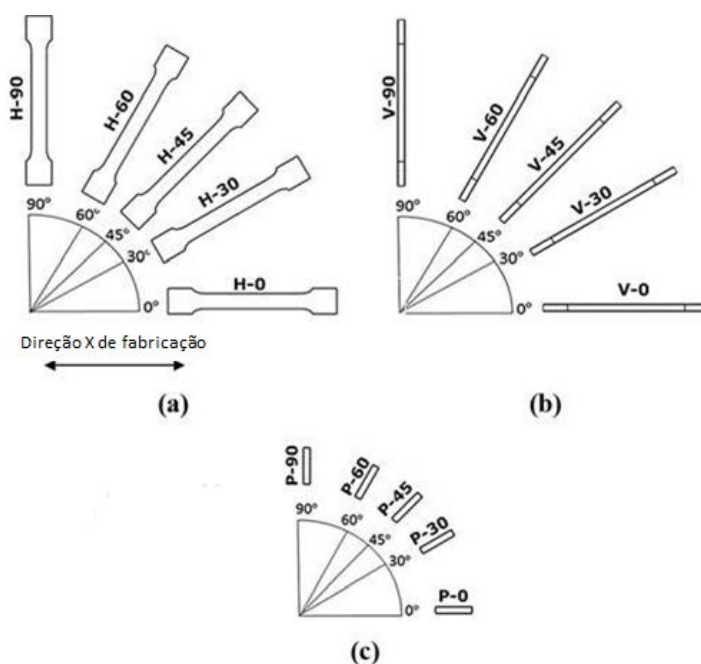
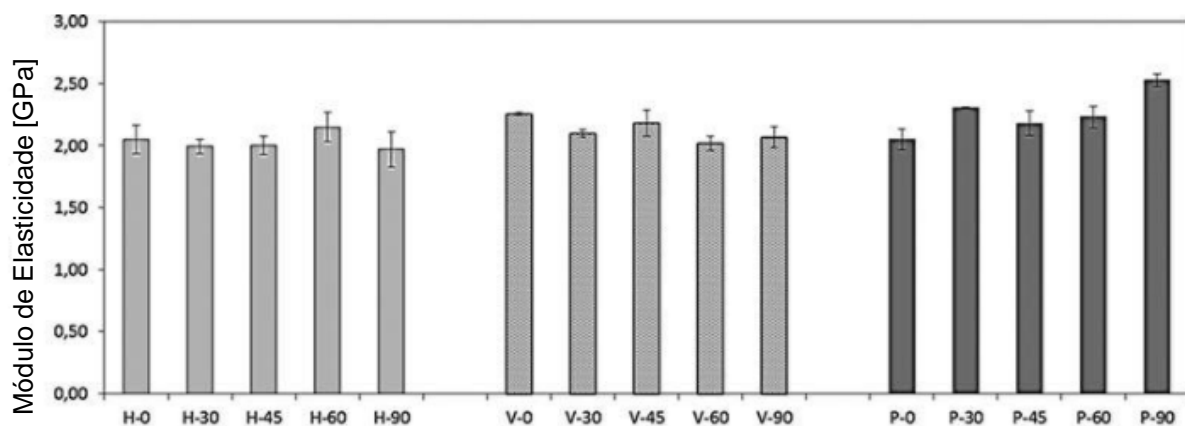


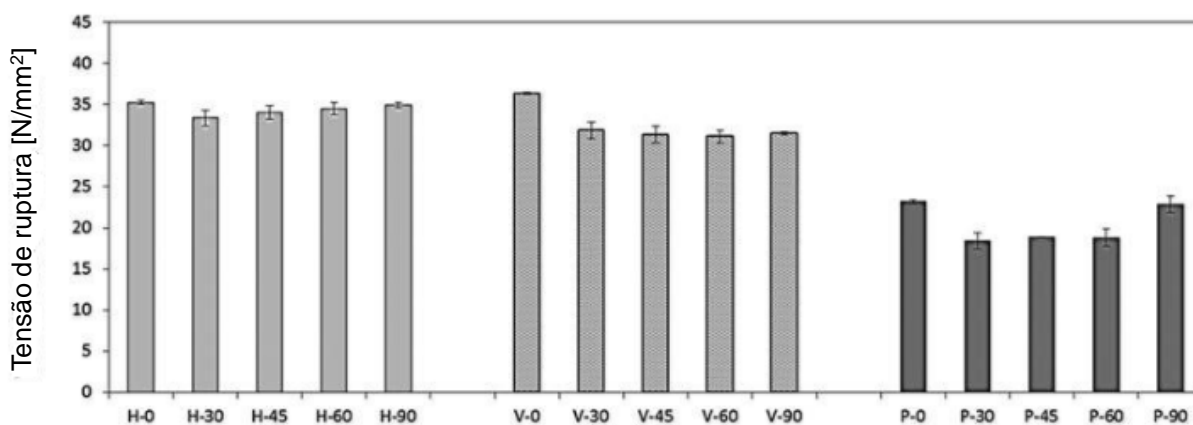
Figura 2.17 - Vista esquemática da orientação (a) horizontal, (b) vertical e (c) perpendicular, que produziu uma consequente variação do ângulo de *raster*, quando este foi mantido alinhado na direção de construção conforme indicado

Fonte: Adaptado de Durgun e Ertan (2014).

Os resultados dos ensaios de tração e flexão são ilustrados na Figura 2.18. Os autores indicam que o ângulo de *raster* afetou significativamente as propriedades mecânicas das peças fabricadas. Observa-se maior resistência a tração das amostras na H-0 e V-0 (horizontal e vertical com ângulo de *raster* 0°). Ainda segundo Durgun e Ertan (2014), as peças que são fabricadas por FDM em diferentes ângulos de *raster* exibem propriedades de resistência à tração anisotrópicas, dependentes da orientação de construção. Em particular, as amostras que foram construídas perpendiculares à direção do teste de tração, demonstraram propriedades mecânicas mais baixas.



(a)



(b)

Figura 2.18 - Rugosidade (ângulo de *raster* e posicionamento)

Fonte: Adaptado de Durgun e Ertan (2014).

Albuquerque (2014) realizou um estudo em que avaliou a resistência mecânica de amostras fabricadas utilizando PLA. Quatro parâmetros de processo foram escolhidos para o estudo: resfriamento da camada depositada, velocidade de impressão, temperatura da base (plataforma) e temperatura de extrusão. Ensaio de tração foram realizados em amostras a fim de verificar a influência dos parâmetros de processo. Na Tabela 2.5 encontram-se os parâmetros avaliados no estudo.

Tabela 2.5 - Parâmetros de processo avaliados

Fatores	Domínio Experimental	
	Nível (-)	Nível (+)
Resfriamento das camadas (%)	0	100
Velocidade de impressão (mm/s)	30	60
Temperatura da base (°C)	24,2	70
Temperatura de extrusão (°C)	195	215

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2014).

Com os resultados obtidos nos ensaios de tração o autor observou que dentre os parâmetros de processo avaliados, a temperatura da base e a velocidade de impressão apresentaram maior influência sobre os resultados de tensão. Na Figura 2.19 observam-se os resultados do estudo em questão.

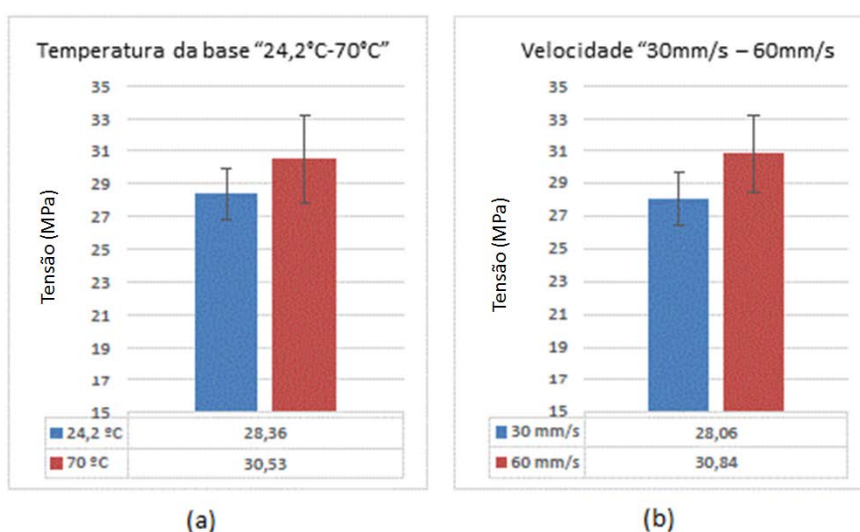


Figura 2.19 - Resultados do ensaio de tração; (a) temperatura da base e (b) velocidade de impressão

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2014).

O autor destaca que os melhores parâmetros obtidos no estudo estão relacionados com a velocidade de impressão de 60mm/s, temperatura da base de 70°C, resfriamento da camada de 100% e temperatura de extrusão de 195°C. Estes fatores podem estar relacionados com uma melhora na adesão da camada, devido à temperatura da base em torno da temperatura de T_g do PLA.

2.5 REPOSICIONAMENTO ENTRE TRAJETÓRIAS DE DEPOSIÇÃO

Além dos parâmetros de processo acima, o planejamento das trajetórias de deposição podem gerar diferentes situações de processamento do material sendo que a estratégia de deposição normalmente empregada para as tecnologias de extrusão de material é depositar primeiramente os filamentos dos contornos (C) das peças (formados por uma sequência de pontos que formam polígonos) e então preencher as áreas internas de cada contorno com trechos contínuos de *raster* (CRS). Como pode ser observada na Figura 2.20, a deposição das camadas é normalmente realizada em movimentos de zigue-zague.

Os deslocamentos entre os trechos de deposição são realizados em movimentos rápidos pelo equipamento representados por linhas retas tracejadas conforme Figura 2.20. Estes deslocamentos são também conhecidos como deslocamentos ociosos (ou em vazio), os quais são definidos quando se estabelece a sequência de deposição de todos os Cs e CRSs. A trajetória final é especialmente relevante para os processos de AM baseados em extrusão de material, pois o bico extrusor produz um filamento fino de material que deve preencher toda a área da peça e, adicionalmente a isso, existem os deslocamentos ociosos, que somados tornam o processo muito lento (VOLPATO et al., 2013).

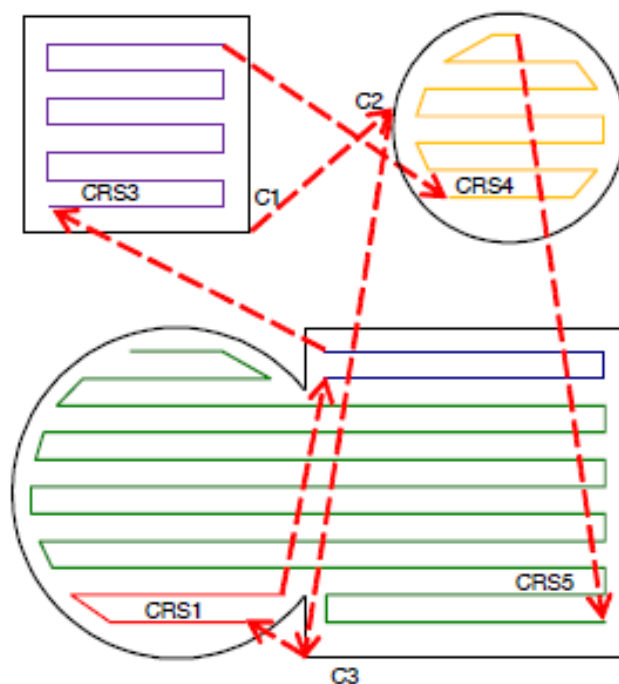


Figura 2.20 - Trajetórias de deposição e reposicionamento para processos baseados em extrusão de material

Fonte: Volpato et al. (2015).

Observa-se que, mesmo quando geometria da peça é considerada simples, em muitos casos não existe a possibilidade de preencher toda a área interna com apenas um CRS. Na Figura 2.20 observa-se que o C3 precisou de três CRSs para realizar o preenchimento completo da área interna. Analisando a camada completa verifica-se que para o preenchimento dos três Cs da Figura 2.20, existe a necessidade de cinco CRSs. Baseado nestas características do processo de deposição, Volpato et al. (2013) indicam que a otimização das trajetórias (melhor sequência para se depositar todos os Cs e CRSs) é promissora na redução dos deslocamentos de reposicionamento ou em vazio.

2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE OTIMIZAÇÕES DE TRAJETÓRIAS EM PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Uma das formas mais clássicas de ganhar produtividade dentro das organizações é o uso de melhorias de processos. Uma alternativa é procurar otimizações de tempo de fabricação.

Baseado nisso, alguns autores realizaram alguns estudos com o objetivo de redução do tempo de fabricação, dentre eles pode-se citar o estudo de Jin et al. (2013), que otimizaram a trajetória de preenchimento pelo ângulo de *raster*. Já Ding et al. (2014) propuseram uma otimização na geração da trajetória de preenchimento (trajetória contínua de preenchimento tipo *raster*). Em outro estudo de Jin et al. (2014) foi proposto uma otimização de trajetória baseados em linhas paralelas considerando os espaços em vazios deixados quando utilizado o princípio de extrusão de material com a trajetória tipo *raster*. Outra opção de otimização de trajetória é realizar a otimização de deslocamentos em vazio, onde não há remoção ou adição de material durante o processo de fabricação.

Neste sentido, algumas considerações sobre a otimização de processo, mais especificamente de trajetórias das ferramentas de corte, e um algoritmo de otimização básico são apresentados a seguir.

2.6.1 Problema do caixeiro viajante (TSP)

Volpato et al. (2007) descrevem que a otimização pode-se dar aproximando o problema de preenchimento ao problema do caixeiro viajante (TSP). Este problema requer a determinação de um caminho ótimo para visitar todas as cidades (neste caso Cs e CRSs) estabelecidas, priorizando a menor distância, em um determinado percurso que pode ser composto por algumas restrições, como a necessidade de se passar por uma cidade antes de outra. A representação destas cidades pode ser realizada na forma de grafo, onde cada nó (n) representa uma cidade formando uma matriz $n \times n$ onde C_{ij} é a distância (custo) de deslocamento entre os nós i e j . Na Figura 2.21 observa-se a construção do gráfico de maneira simplificada com quatro

nós. Cada nó n forma um vértice e o comprimento das arestas ligando estes vértices representam o custo de deslocamento.

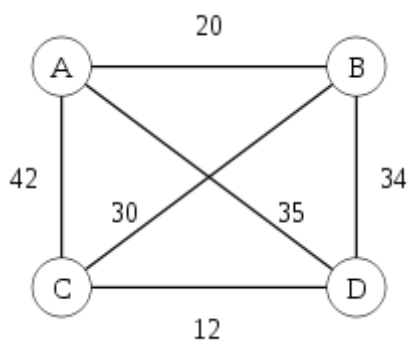


Figura 2.21 - Grafo de um TSP
Fonte: Adaptado de Woeginger (2003).

2.6.2 TSP Generalizado (GTSP)

Uma variação do TSP é o GTSP (*Generalized Traveling Salesman Problem*), onde o caixeiro viajante visita regiões com várias cidades agrupadas onde, para a análise de otimização, a visita é realizada em apenas uma cidade do agrupamento. Neste problema n cidades são agrupadas em m distritos (*clusters*) onde ocorre a visita de apenas uma cidade em cada distrito e posteriormente ocorre o retorno para a posição inicial, conforme Figura 2.22. Fazendo-se isso, reduz-se o número de pontos (agrupamentos) a serem considerados, tornando a análise de otimização mais rápida. Uma otimização local nos agrupamentos também precisa ser realizada, mas pelos pontos estarem próximos isso fica simplificado.

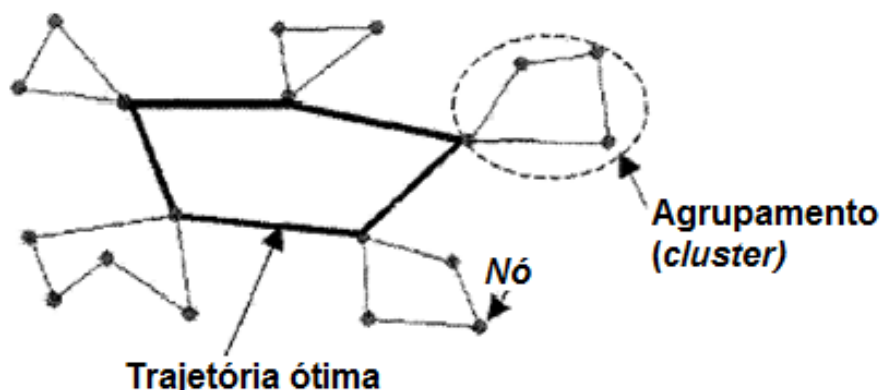


Figura 2.22 - Trajetória proposta pelo GTSP
 Fonte: Adaptado de Castelino, Souza e Wright (2003).

2.6.3 Método de otimização guloso (*greedy*)

Este método de otimização é bastante básico, sendo conhecido por método guloso, uma vez que cria a rota, incluindo o próximo ponto como sendo o ponto mais próximo da última parada. Basicamente, o método adiciona a rota o ponto que pertence a um contorno que ainda não foi visitado e cuja distância para o último ponto visitado é o menor possível (VOLPATO et al., 2015).

2.6.4 Precedências a serem observadas

Alguns autores realizaram estudos com o objetivo de redução de reposicionamentos de trajetórias em vazio nos processos tradicionais de fabricação (remoção de material).

Castelino, Souza e Wright (2003) implementaram dois algoritmos derivados do problema do caixeiro viajante (TSP), com objetivo de reduzir o tempo de reposicionamento em operações de fresamento e que pode ser facilmente adaptado para outros processos como corte a *laser* ou FDM. A implementação usou os algoritmos que os autores denominaram de GTSP e *Sequential Ordering Problem* (SOP), dependendo da existência de restrições e de precedência.

O SOP objetiva visitar um grupo de cidades que possuem restrições de precedência de trajetória entre elas, ou seja, existe uma sequência previamente estabelecida. A partir da hierarquização das regiões decompostas automaticamente

pelo planejamento de processos, o algoritmo calcula a minimização de trajetória baseado nestas precedências, conforme indicado na Figura 2.23a e 2.23b.

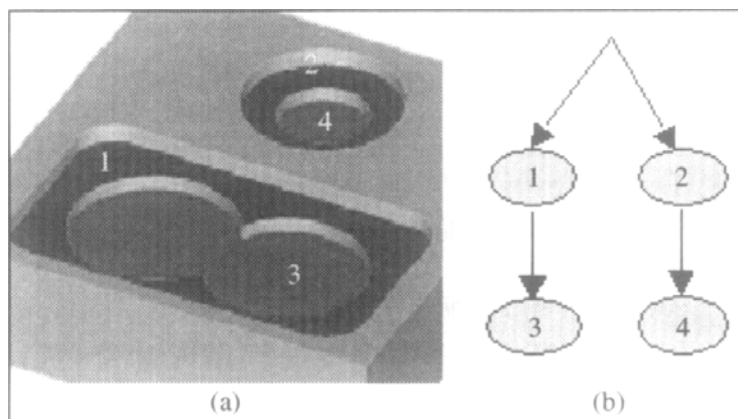


Figura 2.23 - Uso do SOP na otimização com restrições de precedências: (a) peça exemplo e (b) hierarquização

Fonte: Adaptado de Castelino, Souza e Wright (2003).

Ainda segundo os autores, pode-se aplicar o GTSP na estratégia de usinagem por contornos paralelos (estratégia de *raster* similar à utilizada na AM), que numa operação de fresamento apresenta vantagens com relação à cinemática do equipamento. A segunda implementação aconteceu com a aplicação de SOP na forma de um TSP assimétrico com restrições de precedência. Desta forma, dado um conjunto de n nós o problema consiste em encontrar uma solução que minimize a distância percorrida entre os nós de 1 até n , visitando cada nó apenas uma vez e ainda obedecendo as restrições de precedência. A implementação começa a partir de um sistema de planejamento de processo.

Para minimização da trajetória de usinagem, primeiramente devem ser determinadas quais regiões as células serão visitadas e os pontos de entrada e saída da ferramenta. Aparecem aqui duas grandes diferenças para o TSP tradicional. Como existe uma hierarquia entre as *features*, as trajetórias dos itens pais (primeira na ordem de precedência) devem ser realizadas antes dos itens filhos, conforme Figura 2.24.

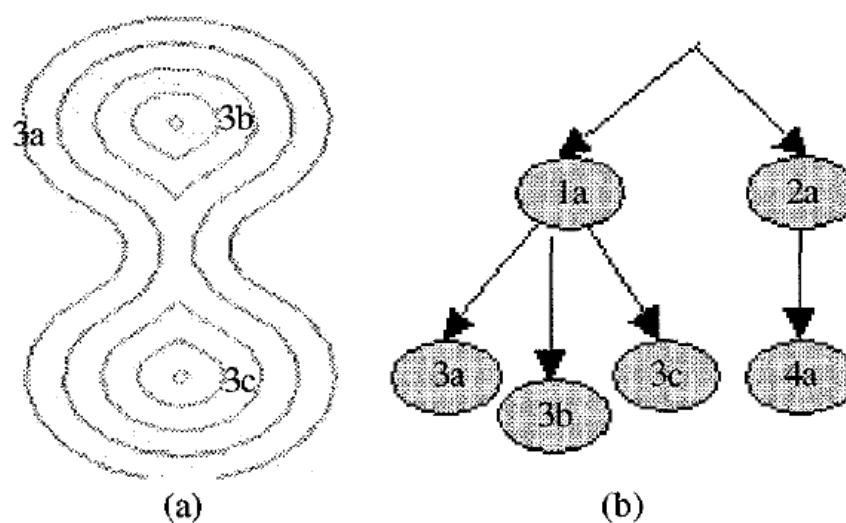


Figura 2.24 - Definições de (a) células formadas pelas trajetórias da ferramenta e (b) restrições entre as trajetórias baseadas na hierarquia definidas por Castelino, Souza e Wright (2003).

Fonte: Adaptado de Castelino, Souza e Wright (2003).

Na Figura 2.24b a trajetória da *feature* 3 deve ser calculada depois da *feature* 1. As trajetórias geradas são polígonos com diversos nós, gerando a necessidade de escolha dos pontos de entrada e saída. Para o caso de fresamento paralelo os nós do polígono mais interno são escolhidos como candidatos a ponto de entrada, sendo o ponto de saída os nós mais próximos presentes no contorno externo, desta forma garante-se que no caso do fresamento a usinagem ocorra com o mínimo tempo possível. Formulando o problema desta forma Castelino, Souza e Wright (2003) puderam considerar o problema como GTSP com restrições onde os possíveis pontos de entrada/saída como uma cidade dentro do distrito.

As implementações propostas foram aplicadas para um problema com 82 polígonos e 242 pontos, conforme solução inicial e final mostrada respectivamente na Figura. 2.5.

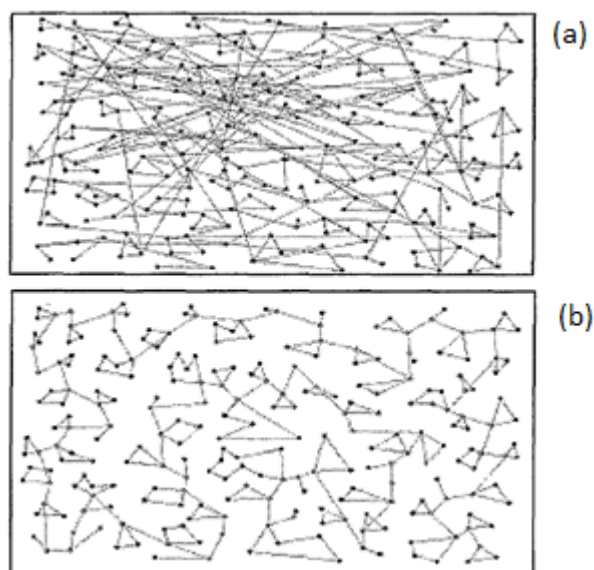


Figura 2.25 – Resultado da otimização com 242 pontos: (a) solução inicial e (b) algoritmo proposto utilizado

Fonte: Adaptado de Castelino, Souza e Wright (2003).

O resultado do algoritmo foi uma melhora de 544% em relação à solução inicial e uma melhora de 65-70% em comparação a um algoritmo guloso tradicional. Os autores concluíram que ambas as heurísticas implementadas em conjunto deram soluções ótimas para as peças usadas no sistema de planejamento de processo, sendo uma boa opção para os problemas normalmente encontrados em processo de fresamento, podendo ainda ser adaptado aos processos de corte *laser* ou FDM.

Kolahan e Liang (2000) implementaram um algoritmo de busca tabu (que a partir de uma solução inicial, tenta avançar para uma outra solução melhor que a anterior na sua vizinhança até que satisfaça um determinado critério de parada) para otimização de operação de furação. O problema foi estruturado de forma semelhante a um TSP, porém com diferença de ser mais complexo devido à associação de custos dependentes de cada sequência, operação e posição.

A função objetivo busca otimizar o custo total da operação de furação levando em consideração no cálculo, de forma simultânea, a combinação do conjunto de ferramentas disponíveis, da sequência de operações, do custo da troca de ferramenta, dos custos de deslocamento em reposicionamento e velocidade de corte para uma placa de fixação de molde de injeção. Os autores colocam que dependendo do diâmetro do furo, da geometria da ferramenta e qualidade superficial um furo pode necessitar de várias operações em sequência onde diferentes

conjuntos de ferramentas podem ser utilizados, conforme esquema apresentado na Figura 2.26.

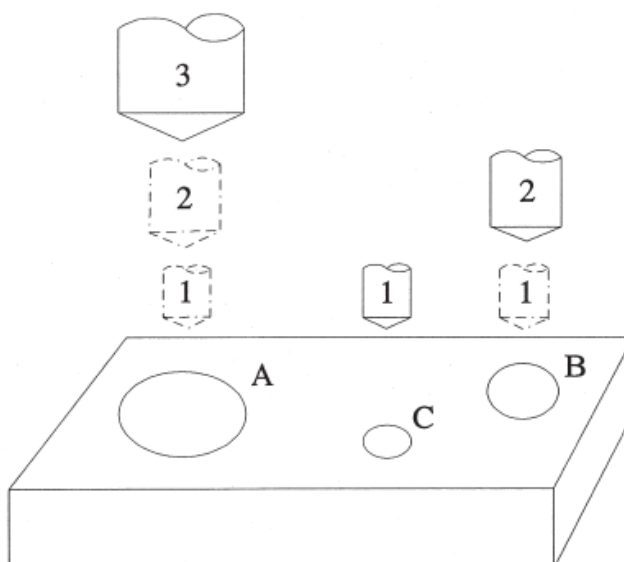


Figura 2.26 - Representação esquemática do processo de furação utilizando diferentes ferramentas

Fonte: Adaptado de Kolahan e Liang (2000).

Como parâmetros de entrada foram utilizados 12 tipos de ferramentas diferentes com velocidades de corte, avanço, diâmetro, custo unitário e ainda sua posição no porta ferramentas. Como cada furo pode ser realizado por diferentes combinações de ferramentas, a solução inicial constrói uma possível sequência de operações viáveis. A peça utilizada no estudo de caso possui 26 furos com posições, profundidades, operações e acabamentos diferentes. O algoritmo inclui ainda diferentes expressões de duração da vida de cada diferente ferramenta que será levada em consideração no cálculo da função objetivo.

Para um determinado número de parâmetros testados como tamanho da lista tabu e critério de diversificação, o algoritmo reduziu de 80 possíveis operações dadas na solução inicial para 56 operações requeridas. Isso representou uma significativa redução de 47% sobre a solução inicial em 10 minutos de execução.

2.7 OTIMIZAÇÃO EM PROCESSO POR EXTRUSÃO DE MATERIAL

Muitos algoritmos já foram testados para o princípio de extrusão de material com ganhos potenciais consideráveis (tempo de fabricação). Com base no problema do TSP, Volpato et al. (2007) propõem um algoritmo capaz de otimizar o tempo ocioso do cabeçote de extrusão no processo FDM onde o mesmo executaria o mínimo de movimentos durante o processo. Na Figura 2.27 observam-se duas peças em formato “W” no qual é realizada a comparação da trajetória com e sem otimização.

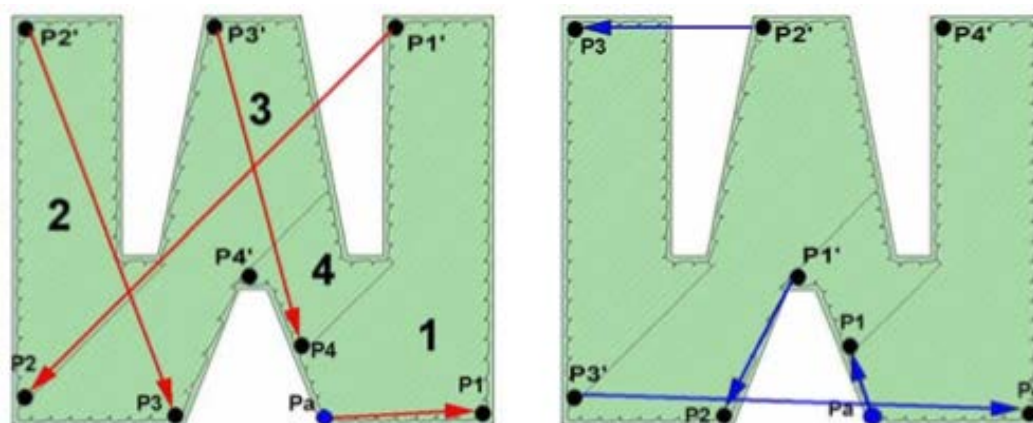


Figura 2.27 - Trajetória antes (esquerda) e trajetória otimizada (direita)
Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2007).

Segundo os autores, a trajetória otimizada tem por objetivo minimizar as distâncias em vazios entre os pontos, fazendo com que o tempo ocioso do cabeçote seja menor. Com base nisso, alguns experimentos foram realizados onde se constatou que existe um ganho significativo no tempo de fabricação de peças com a aplicação do algoritmo proposto. Em particular, foi mencionado que não foi encontrado nenhuma deformação ou empenamento nas peças produzidas com a nova estratégia de deposição devido a uma possível diferença de temperatura durante a deposição do filamento.

Porém, considerando o que foi observado em estudos anteriores sobre a influência da temperatura na adesão dos filamentos, a reorganização da sequência

em que os trechos de *raster* são depositados pode ter influência na qualidade final da peça produzida.

Neste sentido, os autores comentam que estudos futuros devem ser realizados com diferentes geometrias a fim de entender qual a real influência da otimização de trajetórias nas características mecânicas das peças produzidas. Isto em função do diferente acúmulo de calor em certas regiões que podem ser gerados oriundos da otimização de trajetória.

Volpato et al. (2013) realizaram uma proposta de otimização de trajetória minimizando a distância de deslocamento de reposicionamento em uma máquina de FDM aplicando duas propostas de otimização baseadas no método guloso (*greedy*) e na inserção do ponto mais próximo e mais distante.

O processo se iniciou com os contornos e trechos tipo *raster* já definidos pelo planejamento de processo. A partir dos dados de entrada foram implementadas duas abordagens de otimização baseadas em:

- Método 1: método guloso (*greedy*): a partir do ponto inicial, pula para o ponto de contorno mais próximo, posteriormente repete isto para os *rasters*.
- Método 2: inserção do contorno pelo ponto mais próximo e dos trechos de *raster* pelo ponto mais distante.

Implementando os dois métodos básicos para redução de reposicionamento, Volpato et al. (2013) descobriram que o método 1, no geral, obteve melhor resultado para geometrias mais simples, chegando a obter uma redução de deslocamento de 39,5%. Já o método 2 obteve melhores resultados para geometrias mais complexas, em que o número de contornos e *rasters* aumenta, apresentando uma redução de até 58,5% na distância de deslocamento em vazio (em relação a uma deposição aleatória). Para os estudos relatados acima não houve nenhum estudo relacionado ao efeito das otimizações de trajetórias nas características físicas das peças fabricadas.

Volpato et al. (2015) realizaram um outro trabalho onde o tempo gasto em deslocamentos de reposicionamento num processo baseado em extrusão de material é otimizado utilizando um algoritmo combinando duas heurísticas

conhecidas como inserção do mais próximo e OPT-2, e realizaram uma comparação com um algoritmo guloso.

O algoritmo foi estruturado de forma a tratar da otimização de múltiplas camadas e ainda a possibilidade de incluir deslocamentos para limpeza do cabeçote como acontece em muitos processos comerciais, porém dificilmente encontrada em equipamentos de baixo custo. O cálculo inicia através da inserção do nó mais próximo para os contornos da camada a partir de uma solução inicial gerada considerando a mínima distância entre dois pontos informados (x e y). Após ser definida uma trajetória de deposição dos contornos conforme Figura 2.28 são iniciados os mesmos procedimentos para deposição dos trechos de *raster* conforme Figura 2.29.

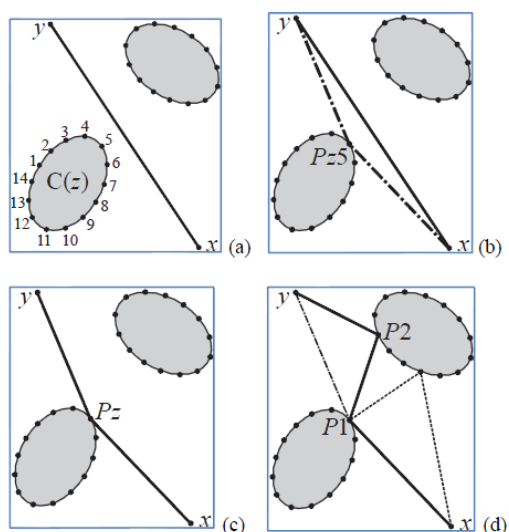


Figura 2.28 - Procedimento para inserir contorno na trajetória
Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2015).

Os métodos testados no trabalho seguiram uma estratégia tradicional de deposição em processos AM por extrusão que é primeiro a deposição dos contornos e posteriormente o preenchimento com os trechos de *raster*. Como já mencionado esta sequência cria restrições de precedência que devem ser respeitadas, podendo limitar o resultado da otimização.

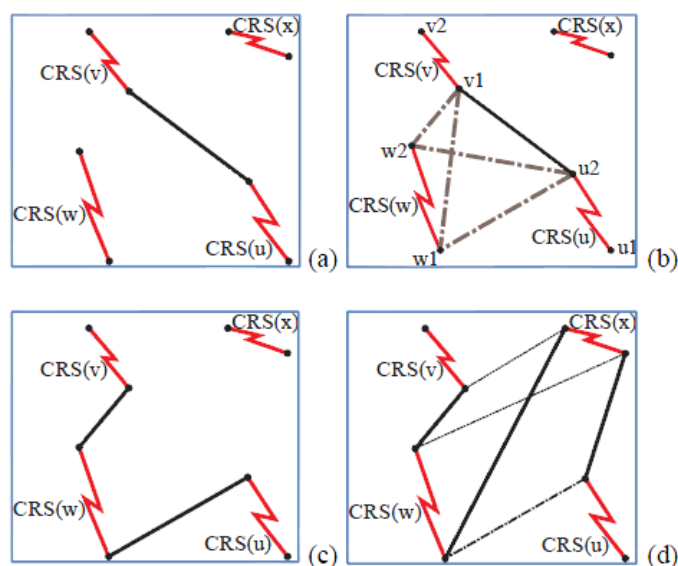


Figura 2.29 - Procedimento para inserir raster na trajetória
Fonte: Adaptado de Volpato et al. (2015).

O procedimento repete-se até que todos os trechos de raster tenham sido incluídos no cálculo. Em uma segunda etapa sobre o resultado é realizada uma segunda otimização utilizando OPT-2 (heurística baseada na troca de um par de segmentos de rota e após isso é verificado se existe redução na rota original). A implementação aconteceu com dados de entrada obtidos a partir de um sistema de planejamento de processo próprio. Foi considerada ainda a possibilidade de incluir no algoritmo o deslocamento para limpeza do cabeçote extrusor como acontece em processos comerciais, onde foram testadas as possibilidades de limpeza a cada duas ou, dez camadas e ainda a não realização da limpeza durante o processo. A conexão entre as camadas ocorreu de duas formas. A primeira é onde o cabeçote extrusor não necessita realizar a limpeza, assim ele se desloca do último ponto do trecho de *raster* para o ponto de início de contorno mais próximo na próxima camada. Na segunda, onde há a necessidade de limpeza o cabeçote, o mesmo é direcionando para o ponto de troca, e o processo de deposição começa do início.

Analisando-se os resultados para uma das peças testadas, apresentados na Figura 31, observa-se que a trajetória obtida com o algoritmo proposto (Figura 2.30b) obteve um resultado 46,3% melhor que a solução aleatória inicial e ainda 25,1% em relação ao método guloso utilizado para comparação (Figura 2.30a). Os resultados mostram que os ganhos com otimização de trajetórias de reposicionamento em

processo de AM por extrusão de filamento são significativos mesmo com algoritmos considerados simples. Mesmo com todos os aspectos considerados nesta proposta, não houve uma análise do impacto das otimizações nas propriedades das peças.

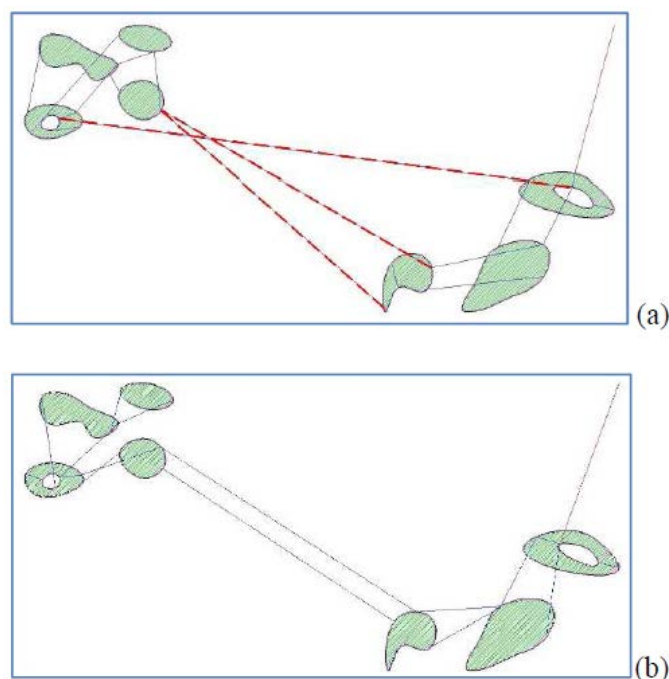


Figura 2.30 – Comparação da trajetória pelo método guloso (a) e o método proposto (b)
Fonte: Adaptado de Volpato (2015).

2.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura mostrou que vários estudos avaliaram a influência de diferentes parâmetros de processo nas propriedades mecânicas de peças produzidas pelo processo de extrusão de material. Especial interesse tem sido dada ao efeito do tempo de deposição entre camadas de uma mesma peça, ao uso de diferentes ângulos de *raster*, diferentes estratégias de deposição e otimizações dos deslocamentos em vazio entre os trechos de preenchimento. Para este último, foram verificados alguns trabalhos relacionados a esse tema, porém o foco dos mesmos foi a redução de tempo de fabricação baseado nos deslocamentos ociosos do bico

extrusor, sem a preocupação do efeito que isso poderia ocasionar nas peças produzidas.

Portanto, essa pesquisa identificou esta oportunidade de estudo, abordando a compreensão do comportamento mecânico de peças produzidas aplicando otimização de trajetória ociosa do bico extrusor no processo de AM pelo princípio de extrusão de material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentados todos os recursos, equipamentos, procedimentos e métodos que foram utilizados no desenvolvimento desta pesquisa. Uma visão geral das atividades realizadas nesse trabalho é apresentada no fluxograma na Figura 3.1. Atividades essas, que serão detalhadas nas próximas seções.

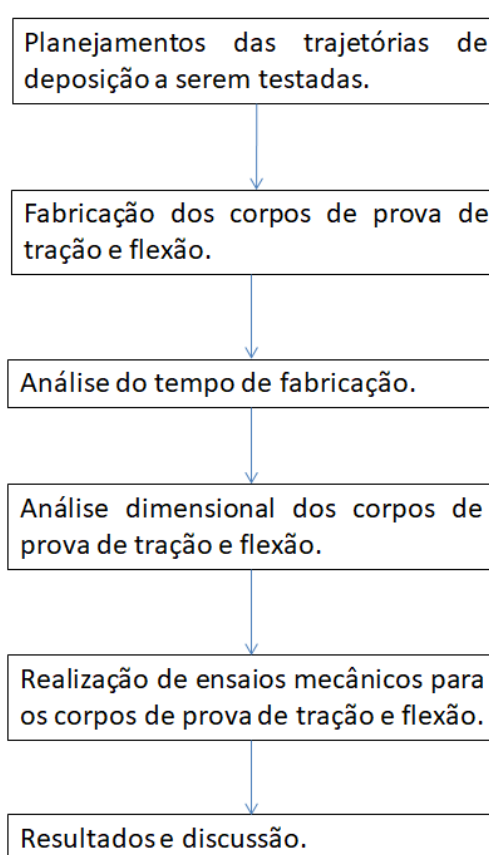


Figura 3.1 – Fluxograma dos ensaios e análises realizadas
Fonte: Autoria própria

3.1 MATERIAL UTILIZADO POLI (ÁCIDO LÁCTICO) - PLA

O material utilizado para essa pesquisa foi o PLA, o qual é um poliéster termoplástico, semicristalino feito com ácido láctico obtido por fermentação bacteriana

de glicose extraída do milho, ou seja, de uma fonte renovável (BRITO et al., 2012). O PLA foi escolhido por ser comercialmente bastante utilizado em impressoras 3D de baixo custo baseadas no princípio de extrusão de material e pela disponibilidade do mesmo. O fabricante do material é a empresa, Filamentos 3D Brasil, localizada no Rio Grande do Sul. O diâmetro do filamento utilizado foi de 1,75mm da cor vermelha.

Uma das aplicações do PLA é na área médica, onde geralmente pode ser utilizado em produtos de fixação ortopédica (pinos, hastes, ligamentos, etc.), aplicações cardiovasculares, intestinais e odontológicas. Também pode ser aplicado na indústria alimentícia em embalagens de doces, cereais, produtos lácteos entre outros (MUTHUI et al., 2014).

Segundo BRITO et al. (2012), o PLA possui elevada fragilidade, o que limita em alguns casos a sua aplicação. Os valores das propriedades mecânicas do PLA fabricados pelo princípio de extrusão de material são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Valores das propriedades mecânicas do PLA

Propriedade	PLA
Resistência à tração (MPa)	15,5 – 72,5
Módulo de elasticidade na tração (MPa)	2020 – 3550
Alongamento na ruptura (%)	0,5 – 9,2
Resistência à flexão (MPa)	52 – 115,1
Módulo de elasticidade na flexão (MPa)	2392 – 4930

Fonte: Adaptado de Chácon et al. (2017).

3.2 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Esta seção apresenta a definição dos corpos de prova (CP) testados, assim como a caracterização dos planejamentos com e sem otimização de trajetória ociosa do bico extrusor. Também é apresentado um experimento com interrupção forçada do bico extrusor durante a deposição do filamento nas camadas transversais dos CP (tração e flexão).

3.2.1 Definição dos corpos de prova

Corpos de prova de tração e flexão, baseados nas normas ASTM D638-14 (*American Society for Testing and Materials*) e ASTM D790-10, respectivamente, foram modelados com a utilização do *software* Catia. As dimensões (mm) dos corpos de prova são ilustradas conforme Figura 3.2 e 3.3, respectivamente.

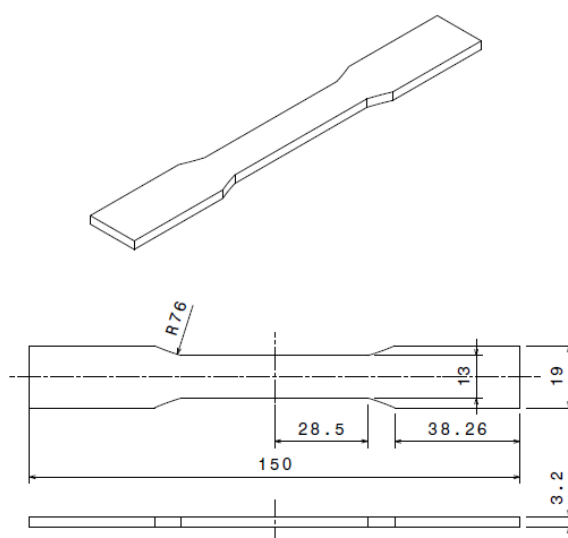


Figura 3.2 - Dimensões do corpo de prova de tração

Fonte: Autoria própria.

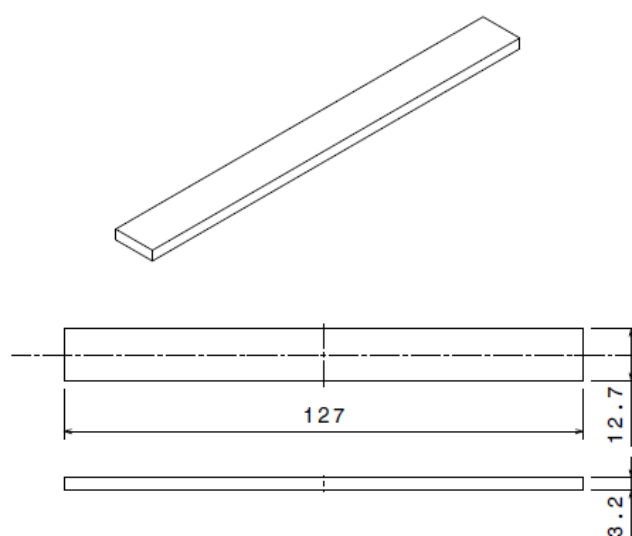


Figura 3.3 - Dimensões do corpo de prova de flexão

Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Planejamentos das trajetórias de deposição

Para analisar a influência da otimização no processo, foram definidos três planejamentos distintos de trajetória de deposição. O primeiro foi denominado de intercalado não otimizado, o segundo de sequencial otimizado e o último de intercalado otimizado. Estes planejamentos são detalhados logo a seguir. A escolha para do primeiro e terceiro planejamento de trajetória foi baseado no uso comum destes planejamentos em impressoras 3D de baixo custo. Já para o segundo planejamento de trajetória a escolha foi devido ser bastante comum a utilização deste planejamento em máquinas da empresa Stratasys, fabricante da tecnologia FDM. O método de otimização utilizado nos dois planejamentos foi o guloso, esta escolha foi devido à facilidade de implementação deste algoritmo.

Para os três métodos propostos, corpos de prova de tração e flexão foram fabricados em conjunto com outras peças, chamadas de arruelas (dimensões: 15x30x3,2 mm), na mesma plataforma de impressão (Figura 3.4). Essas arruelas tiveram por objetivo aumentar o número de Cs e CRSs em cada camada, gerando assim, maior possibilidade da otimização de trajetória ociosa influenciar nos resultados. Isso foi feito uma vez que, caso apenas os corpos de prova fossem fabricados sem a presença das mesmas, a mesma sequência de deposição poderia ocorrer para os métodos testados, não evidenciando assim alterações de trajetória do bico extrusor durante a deposição do filamento.

Observa-se na Figura 3.4 um contorno ao redor do corpo de prova (em azul claro), que é denominado saia (*skirt*). Esse parâmetro de processo foi utilizado para fazer a purga do bico extrusor evitando assim erros no início da deposição do filamento nos corpos de prova. Vale ressaltar que esse contorno foi realizado apenas antes do primeiro C de cada corpo de prova e arruela, e somente na primeira camada.

Apesar de apenas corpos de prova de tração serem ilustrados nas próximas subseções, vale ressaltar que os planejamentos das trajetórias foram aplicados também para os corpos de prova de flexão.

Planejamento de trajetória intercalado não otimizado (CRCR-NO)

Este planejamento baseia-se em realizar o contorno (C) da peça e logo em seguida realizar os trechos de *raster* (CRS) correspondentes deste C. Caso haja um contorno interno a este primeiro C, o C interno é depositado logo após o primeiro C, sendo então seguido dos seus CRSs. Esta sequência se repete até a deposição de todos os Cs e CRSs da camada. Para facilitar a identificação ao longo do trabalho, este planejamento foi representado pela sequência de letras CRCR-NO, onde C é o contorno, R é - por facilidade - a abreviação dos trechos de *raster* (CRS) e NO significa trajetória não otimizada. A sequência de C e CRS de todas as camadas se repetem, ou seja, não há uma otimização de planejamento de trajetória ociosa do bico extrusor para esse método. Na Figura 3.4 é ilustrado o planejamento em questão da primeira camada. O ângulo de *raster* adotado é de zero graus em relação ao eixo X, sendo este rotacionado de 90° a cada camada. A sequência de fabricação das peças da Figura 3.4 é: primeiro a arruela superior, depois o CP e depois arruela inferior.

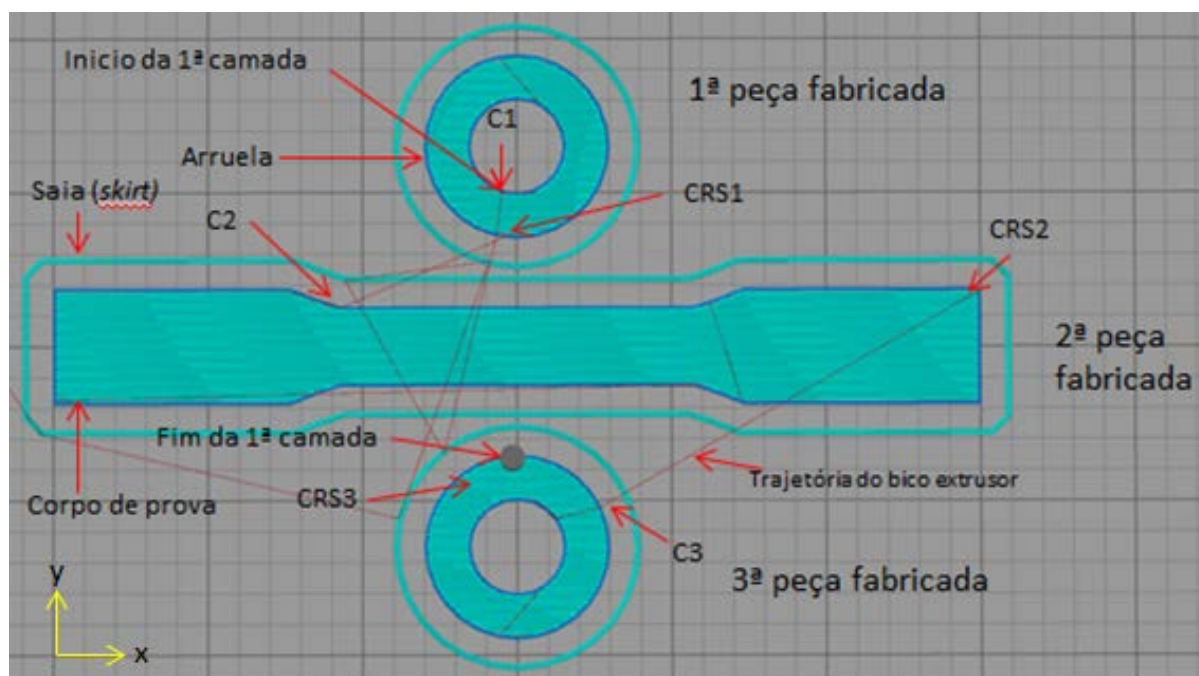


Figura 3.4 - Ilustração da trajetória do bico extrusor na 1ª camada para o método CRCR-NO

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 3.5 é ilustrado o início da segunda camada, observa-se que a deposição inicia-se na mesma arruela da primeira camada (superior), ou seja, o bico extrusor percorre toda a plataforma de impressão para iniciar novamente a deposição do material (não é evidenciado otimização de trajetória ociosa). O ângulo de *raster* nesta camada é de 90 graus em relação a primeira camada. Esse planejamento de trajetória utilizado é *default* do *software* de planejamento de processo usado nesse trabalho, o qual será detalhado nas próximas seções.

Para a terceira camada, a trajetória do bico extrusor permanece a mesma da primeira camada. Assim se repete para as demais camadas.

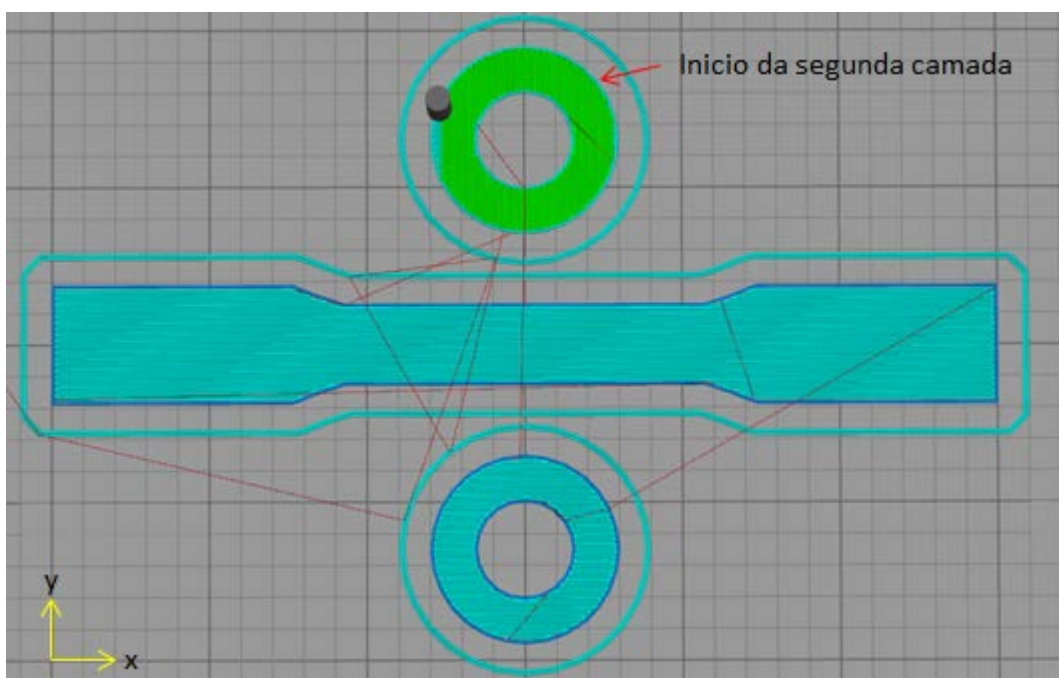


Figura 3.5 - Ilustração da trajetória do bico extrusor na 2ª camada para o método CRCR-NO
Fonte: Autoria própria.

Planejamento de trajetória sequencial otimizado (CCRR-O)

O planejamento desta trajetória envolve depositar todos os contornos primeiros, seguido de todos os CRSs. Este planejamento foi denominado de CCRR-O, seguindo a mesma lógica da CRCR anterior, sendo a letra O se referindo a estratégia otimizada. A otimização foi baseado no algoritmo guloso tradicional onde, a partir do ponto inicial, o bico extrusor pula para o ponto do contorno mais próximo, após percorrer todos os contornos, posteriormente repete isto para os CRSs. Na

Figura 3.6 (a) é ilustrado a sequencia de deposição para a primeira camada para todos os Cs e na Figura 3.6 (b) a sequencia de deposição para os CRSs.

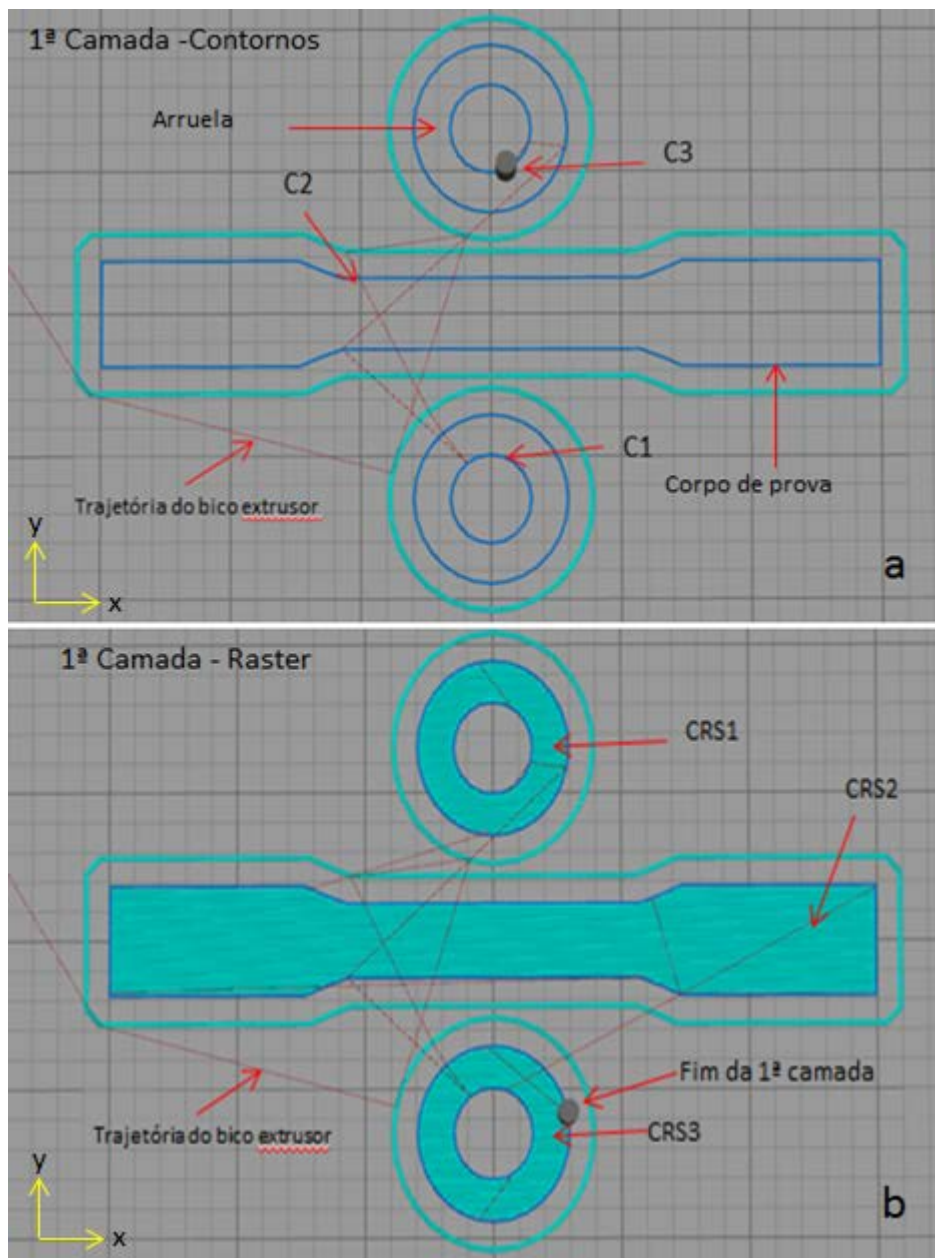


Figura 3.6 - Ilustração do método CCRR-O para a 1ª camada: (a) contornos realizados e (b) sequência de raster.
Fonte: Autoria própria.

Observa-se que, diferente do CRCR-NO, para o planejamento de trajetória CCRR-O existe otimização de trajetória ociosa do bico extrusor após o término do C3, uma vez que o CRS1 já é iniciado na mesma peça (arruela) em que ocorreu o

último C (C3) da primeira camada. Essa mesma lógica ocorre em todos os Cs e CRSs para todas as camadas.

Planejamento de trajetória intercalado otimizado (CRCR-O)

Este planejamento baseia-se em realizar o C da peça e em seguida o CRS da mesma peça conforme planejamento CRCR-NO. Porém para este planejamento a otimização foi baseada no algoritmo guloso onde, a partir do ponto inicial, o bico extrusor pula para o ponto do contorno mais próximo, realizando o mesmo e, se não houver nenhum contorno interno a este primeiro, já seria possível preencher o CRS deste contorno, antes de procurar o próximo C. Esta rotina se repete para todas as peças e camadas. A identificação para esse planejamento foi CRCR-O. Na Figura 3.7 é ilustrado um exemplo desta sequência de deposição.

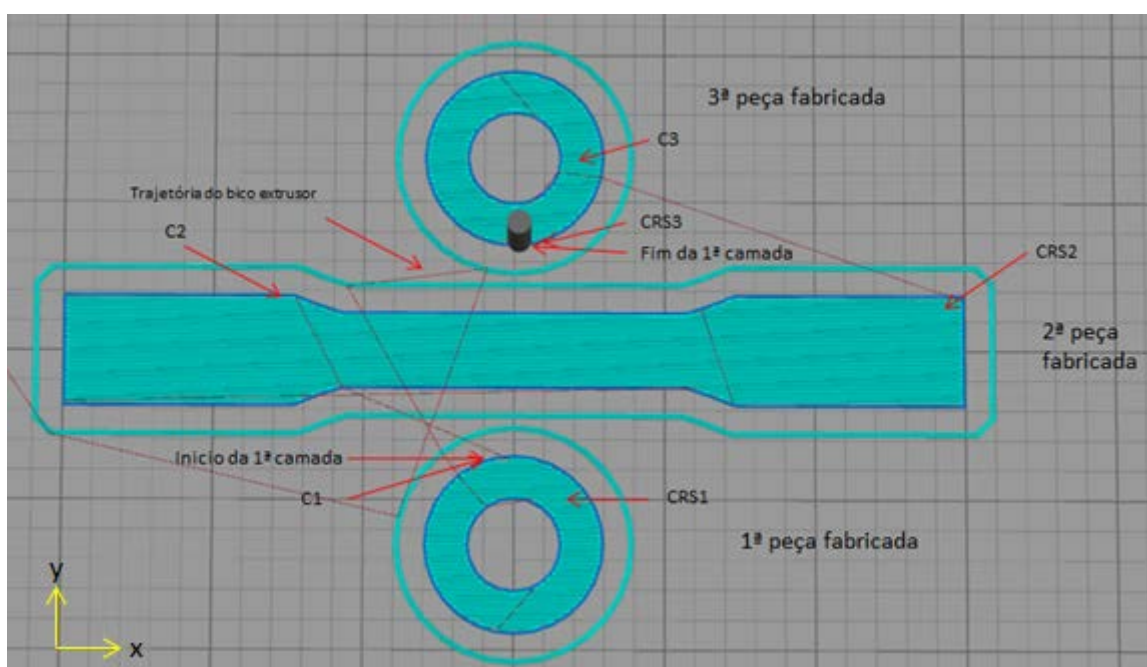


Figura 3.7 - Ilustração da trajetória do bico extrusor na 1ª camada para o método CRCR-O

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 3.8 é mostrado o início da segunda camada para esse método. Observa-se que o início da segunda camada é na mesma peça (mas com diferente ângulo de *raster*) que acabara de ser fabricada (arruela superior). Portanto o conceito do contorno mais próximo é utilizado para esse planejamento de trajetória.

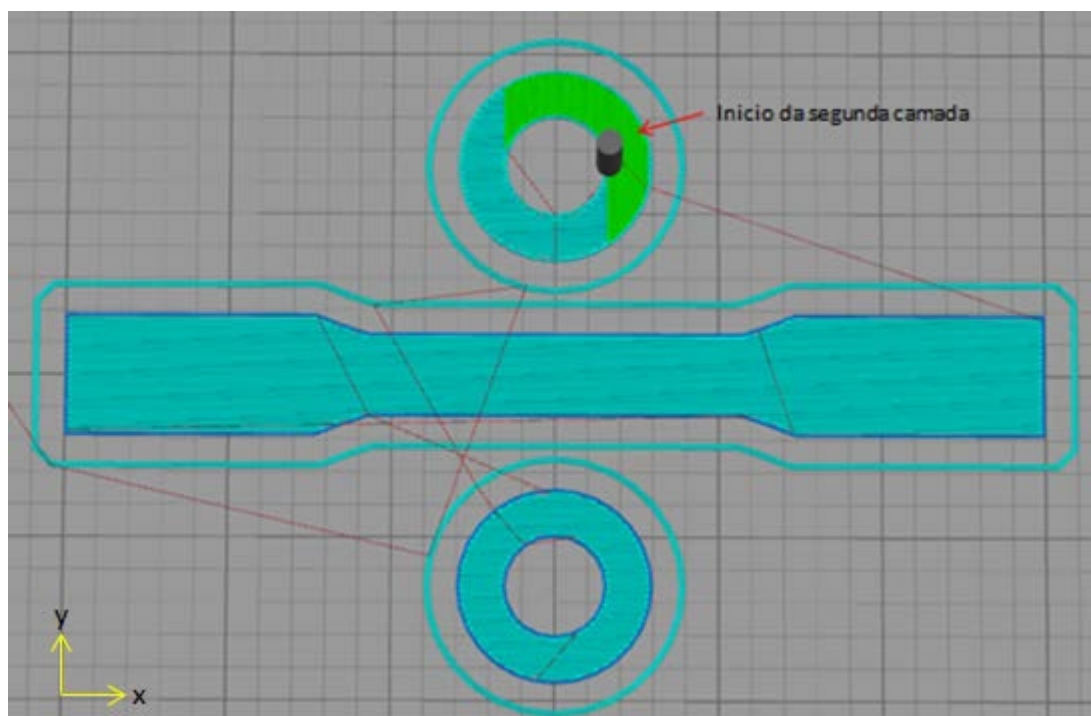


Figura 3.8 - Ilustração da trajetória do bico extrusor na 2ª camada para o método CRCR-O
Fonte: Autoria própria.

Observa-se que nesse método a otimização do planejamento de trajetória ociosa do bico extrusor faz com que o início da deposição da segunda camada seja na última peça que foi depositado material na primeira camada.

Planejamento de trajetória com interrupção forçada do bico extrusor

Um experimento foi realizado prevendo uma interrupção do trecho de *raster* durante a deposição do filamento nas camadas transversais (ângulo de *raster* 90°) dos corpos de prova (tração e flexão). Na Figura 3.9 há uma ilustração do método aplicado para esse experimento para o corpo de prova de tração sendo que a mesma metodologia foi aplicada para o corpo de prova de flexão. O objetivo principal desse experimento foi avaliar a influência da adesão entre filamentos de CRS vizinhos, uma vez que uma possível otimização pode levar a variação do tempo de preenchimento destes trechos.

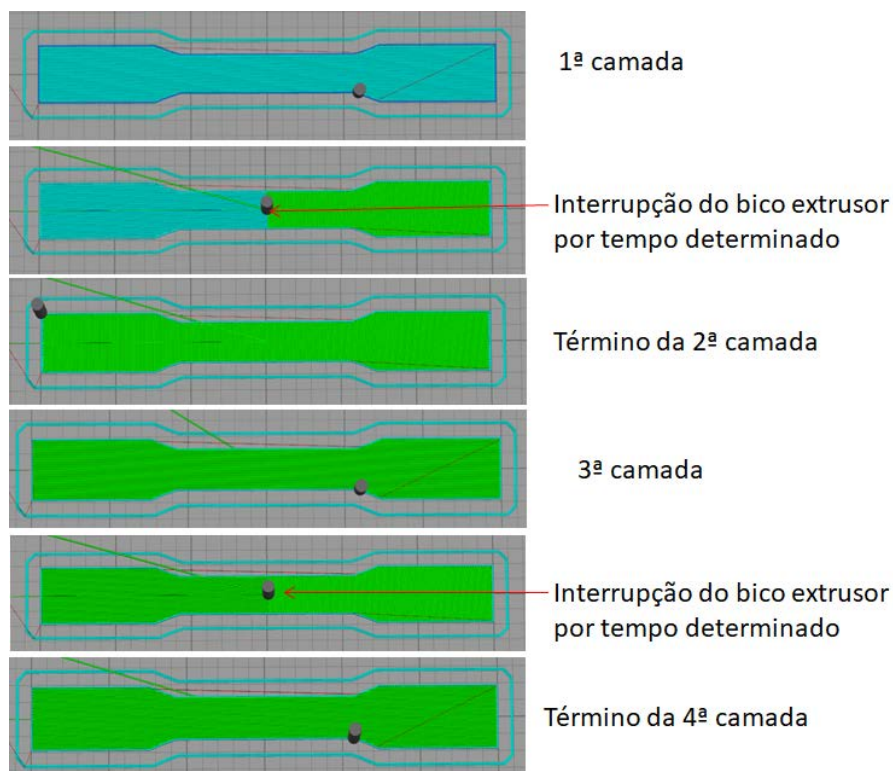


Figura 3.9 - Ilustração do experimento com interrupção do bico extrusor

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado na Figura 3.9, o bico extrusor realiza a deposição sem interrupção do filamento nas camadas ímpares (ângulo de *raster* 0°), e nas camadas pares há uma interrupção do bico extrusor no centro da peça (eixo x e y). Para que esse fato pudesse ocorrer foi modificado o G-code original gerado pelo *software* de planejamento de processo para que houvesse a interrupção do bico extrusor no centro da peça.

É importante ressaltar que após a interrupção do deslocamento do cabeçote e da extrusão, o bico extrusor foi deslocado para a coordenada X0 (extremidade lateral da plataforma), e ficava se movimentando somente no eixo y por 65 segundos. Isso foi feito de modo que não houvesse contato do bico com a peça, uma vez que o objetivo foi que houvesse pouca irradiação de calor do bico para o corpo de prova durante esse tempo ocioso. Após esse tempo o bico retornava a realizar a impressão do ponto que havia sido interrompido. O tempo de 65 segundos (P65) foi utilizado, pois é o tempo estimado em que o bico extrusor gasta para realizar o *raster* de 50% de uma camada transversal. Adicionalmente, foram fabricados corpos de prova nessas mesmas condições com interrupção de 17

segundos (P17), tempo estimado para um reposicionamento (zeramento dos eixos xy) do bico extrusor até sua posição original. O método utilizado para realizar esse experimento foi baseado no CRCR-NO, sendo então denominados de CRCR-NOP17 e CRCR-NOP65. Não foram utilizadas as arruelas laterais neste estudo.

Foram realizadas análises de corpos de prova fabricados individualmente na plataforma de impressão e fabricados em lotes (2, 3 e 4 corpos de prova) para os planejamentos de trajetória apresentados nessa seção com exceção da interrupção forçada do bico extrusor. O objetivo foi avaliar qual a influência dos planejamentos de trajetória em relação com o aumento da quantidade de corpos de prova fabricados na plataforma, análises essas que são apresentadas da seção 3.3.

3.3 ANÁLISE DE CORPO DE PROVA FABRICADO INDIVIDUALMENTE

Nesta seção são apresentados os parâmetros de processo utilizados para os corpos de prova fabricados individualmente (além das arruelas laterais já explicadas anteriormente), assim como o conjunto de análises realizadas para caracterizar os planejamentos de trajetórias apresentados na seção 3.2. Estas análises envolvem a variação do tempo de fabricação, do dimensional dos corpos de prova, os ensaios de tração, flexão e a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos de prova com interrupção forçada do bico extrusor.

3.3.1 Fabricação dos corpos de prova

A fabricação dos corpos de prova (5 amostras para cada ensaio) foi realizada na impressora 3D Cloner, ilustrado na Figura 3.10, pertencente à empresa Inventiva Solutions localizada em Curitiba-PR.



Figura 3.10 - Impressora 3D Cloner utilizada para a fabricação dos CPs
Fonte: Autoria própria.

Este equipamento possui uma plataforma de 320 x 210 mm e não possui plataforma aquecida. A disposição do corpo de prova de tração e de flexão na plataforma pode ser visualizada na Figura 3.11, sendo estes localizados no centro da mesma.

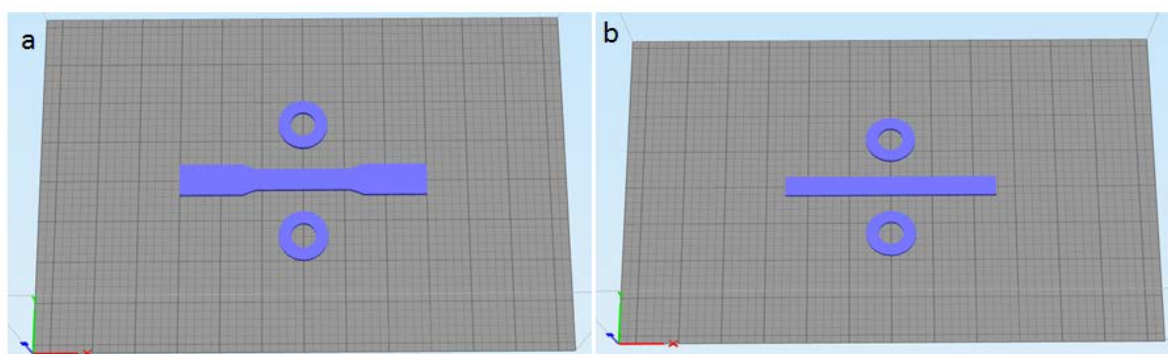


Figura 3.11 – Ilustração da disposição do corpo de prova na plataforma; (a) tração e (b) flexão
Fonte: Autoria própria.

A etapa de planejamento do processo, que inclui o fatiamento do modelo 3D dos corpos de prova e, portanto, a configuração dos parâmetros de processo, foi executada a partir do uso do *software* Simplify3D, parâmetros esses que são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros de processo utilizado

Parâmetros	Valores
Diâmetro do bico	0,4mm
Diâmetro do filamento	1,75mm
Preenchimento	100%
Espessura da camada	0,25mm
Velocidade de impressão	40mm/min
Temperatura de extrusão	200°C
Ângulo do <i>raster</i>	0°/90°

Fonte: Autoria própria

Todos os parâmetros acima citados foram mantidos constantes para a fabricação dos corpos de prova de tração e flexão, e replicado para os planejamentos de trajetória CRCR-NO, CCRR-O, CRCR-O e também para o planejamento de trajetória com interrupção forçada do bico extrusor.

Vale a pena ressaltar que o ajuste da quantidade de material no preenchimento em 100% foi uma estratégia utilizada para que os filamentos depositados ficassem o mais próximo possível um dos outros — permitindo assim o estudo da adesão lateral entre os mesmos —, uma vez que o *software* não disponibiliza em suas janelas de configuração um parâmetro específico para o controle da folga (*gap*) entre os filamentos. O ajuste em 100% significa que a densidade de material no interior do objeto é máxima. Em contrapartida, um valor 0% indica uma peça oca (Bratl, 2013).

A Figura 3.12 apresenta alguns dos corpos de prova de tração e flexão fabricados no presente estudo.

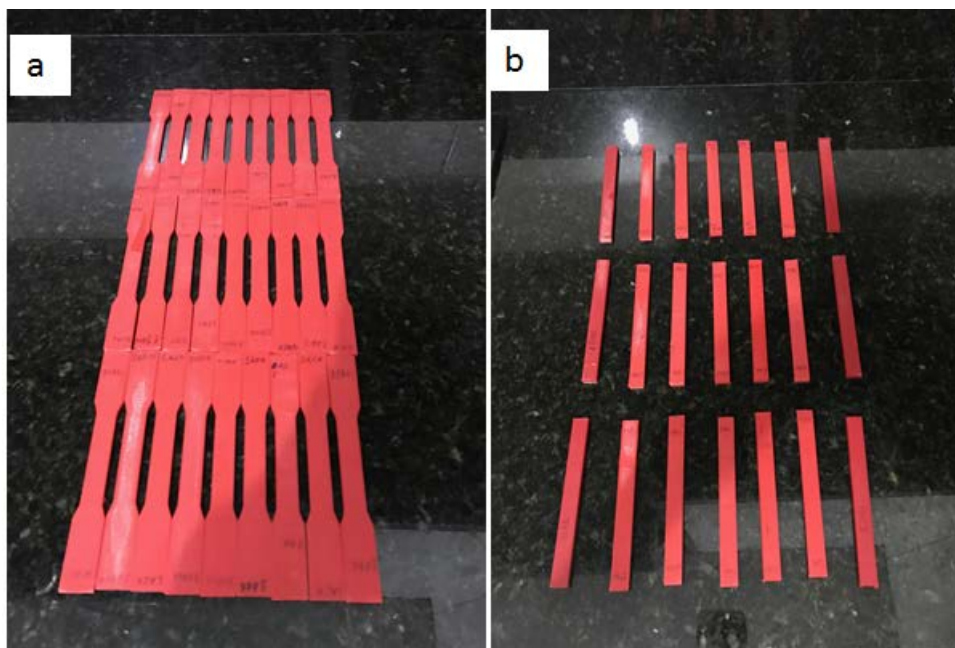


Figura 3.12 - Corpos de prova fabricados: (a) de tração e (b) de flexão

Fonte: Autoria própria.

3.3.2 Análise do tempo de fabricação

O tempo de fabricação dos CPs para cada planejamento da trajetória CRCR-NO, CCRR-O e CRCR-O foi registrado através do tempo estimado pelo *software* Cloner3D (*firmware*) da própria impressora. Este tempo também foi cronometrado por amostragem a fim de se certificar que o tempo estimado pelo equipamento estava correto.

Os tempos de fabricação dos corpos de prova foram comparados, a fim de avaliar a diferença de tempo entre os métodos com e sem otimização de trajetória ociosa do bico extrusor.

3.3.3 Análise dimensional

Após a fabricação das amostras, uma avaliação dimensional foi realizada em todos os corpos de prova de tração e flexão para os planejamentos de trajetória CRCR-NO, CCRR-O, CRCR-O, assim como para o planejamento de trajetória com interrupção forçada do bico extrusor (CRCR-NOP17 e P65). A medição foi realizada com um paquímetro digital 150mm com resolução de 0,01mm da marca Mitutoyo.

As cotas medidas para o corpo de prova de tração e flexão são ilustradas nas Figuras 3.13 e 3.14.

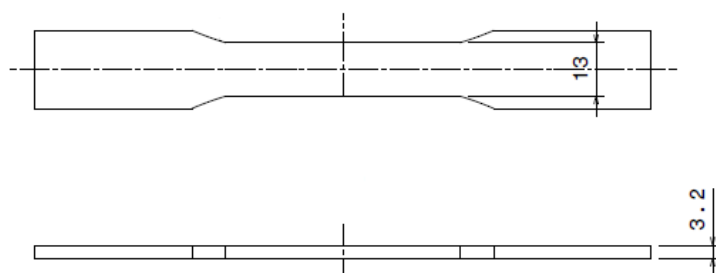


Figura 3.13 - Cotas medidas no corpo de prova de tração

Fonte: Autoria própria.

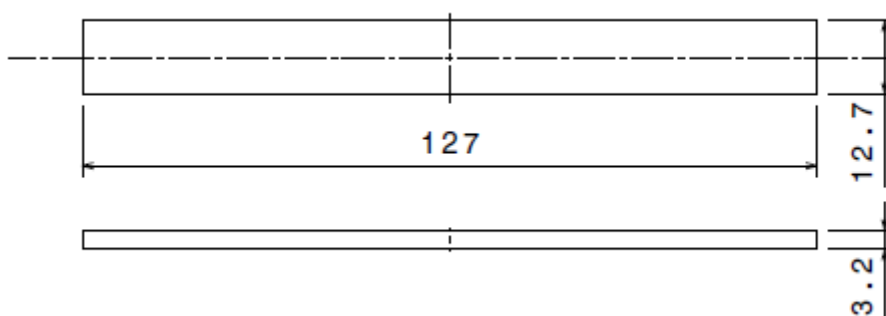


Figura 3.14 - Cotas medidas no corpo de prova de flexão

Fonte: Autoria própria.

3.3.4 Ensaio de tração

Os ensaios de resistência à tração foram realizados no laboratório de ensaios de polímeros de engenharia civil localizado na Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR). O equipamento utilizado foi a máquina de ensaio EMIC TM, modelo DL 1000, com célula de carga com capacidade de 1000N, interligada ao *software* Tesc V3.04, o qual registrava os valores de força e deslocamento. O ensaio foi realizado em ambiente climatizado com temperatura em torno de 21°C e umidade de 50%. Na Figura 3.15 observa-se um corpo de prova disposto na EMIC durante a execução do ensaio de tração.

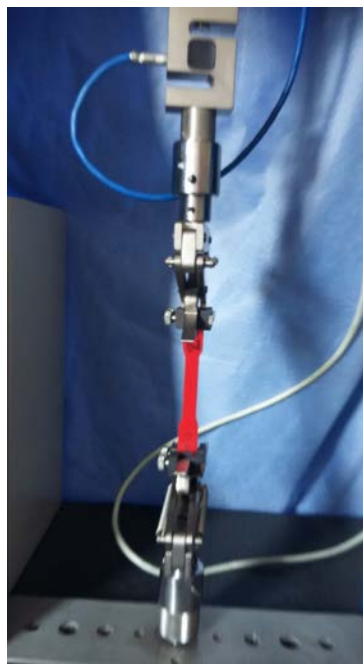


Figura 3.15 - Ensaio de tração

Fonte: Autoria própria.

Para o ensaio de tração foi utilizada a velocidade de deslocamento de 5 mm/min, conforme norma ASTM D638-14 (*American Society for Testing and Materials*). O número de amostras foi adaptada da ASTM D638-14, sendo mensurado no mínimo cinco (5) corpos de prova para cada teste.

3.3.5 Ensaio de flexão em três pontos

NO mesmo equipamento utilizado para os ensaios de tração realizaram-se os ensaios de flexão, como a mesma temperatura e umidade durante os ensaios (21°C e 50 %, respectivamente). Na Figura 3.16 é possível observar um corpo de prova de flexão disposto na EMIC.

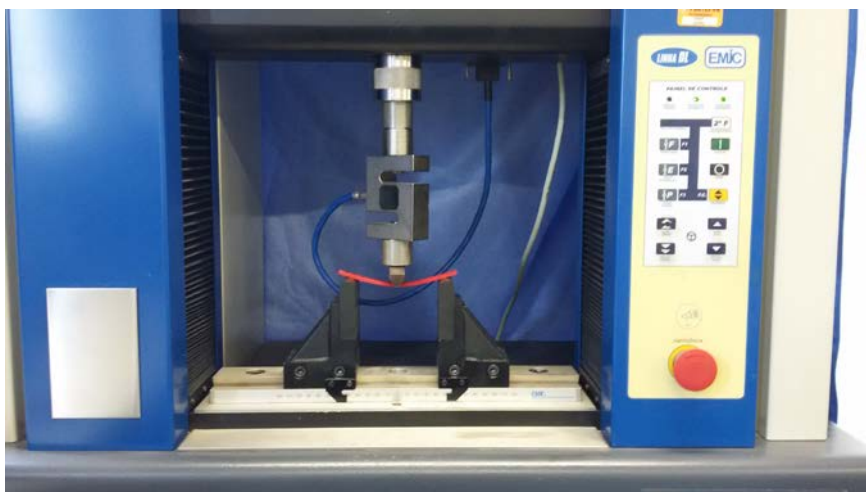


Figura 3.16 - Ensaio de flexão

Fonte: Autoria própria.

Para os ensaios de flexão foi utilizado a velocidade de 5,4 mm/min, valor este obtido através da equação 1 da norma ASTM D790-03. Foram ensaiados no mínimo 5 corpos de prova para os planejamentos CRCR-NO, CCRR-O, CRCR-O e CRCR-NOP17 e P65. Durante os ensaios todos os CPs foram posicionados com a primeira camada para baixo, fato esse atribuído a estudo encontrado na literatura que apontou diferenças nos resultados quando analisado a primeira ou a última camada para baixo.

Para a análise dos resultados dos ensaios de tração e flexão foi utilizado o *software* estatístico Minitab V18.1 e construído gráficos Boxplot para facilitar a visualização dos dados, o conceito do gráfico pode ser visualizado na Figura 3.17.

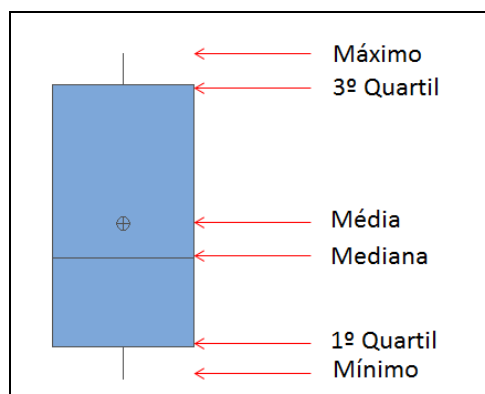


Figura 3.17 – Gráfico Boxplot

Fonte: Autoria própria.

3.3.6 Análise com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da região da fratura

Para análise das fraturas dos corpos de prova desses experimentos foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), o qual tem por característica reproduzir com alta resolução imagens da superfície de uma amostra. O equipamento utilizado foi TM3000 da empresa Hitachi, com range de energia de 5kV a 15kV.

A mensuração e análise das regiões fraturadas dos corpos de prova de tração e flexão foram realizadas em uma amostra fabricada com interrupção forçada da deposição de material (CRCR-NO). O objetivo foi verificar o efeito da interrupção da deposição na adesão entre os filamentos.

3.4 ANÁLISE DE CORPO DE PROVA FABRICADO EM LOTES

Para mensurar a influência da quantidade de peças nas condições de fabricação desse estudo decidiu-se também pela fabricação dos corpos de prova em lotes contendo 2, 3 e 4 corpos de prova fabricados simultaneamente na plataforma. Conforme já relatado no Capítulo 2, Faes (2016) verificou que existe influência na tensão de ruptura de corpos de prova produzidos simultaneamente em diferentes quantidades na plataforma, devido ao tempo de resfriamento entre as camadas.

Para esse experimento, os planejamentos de trajetória testados foram CRCR-NO, CCRR-O e CRCR-O. Na Figura 3.18 e 3.19 são ilustrados os corpos de prova de tração e flexão que foram fabricados em lotes.

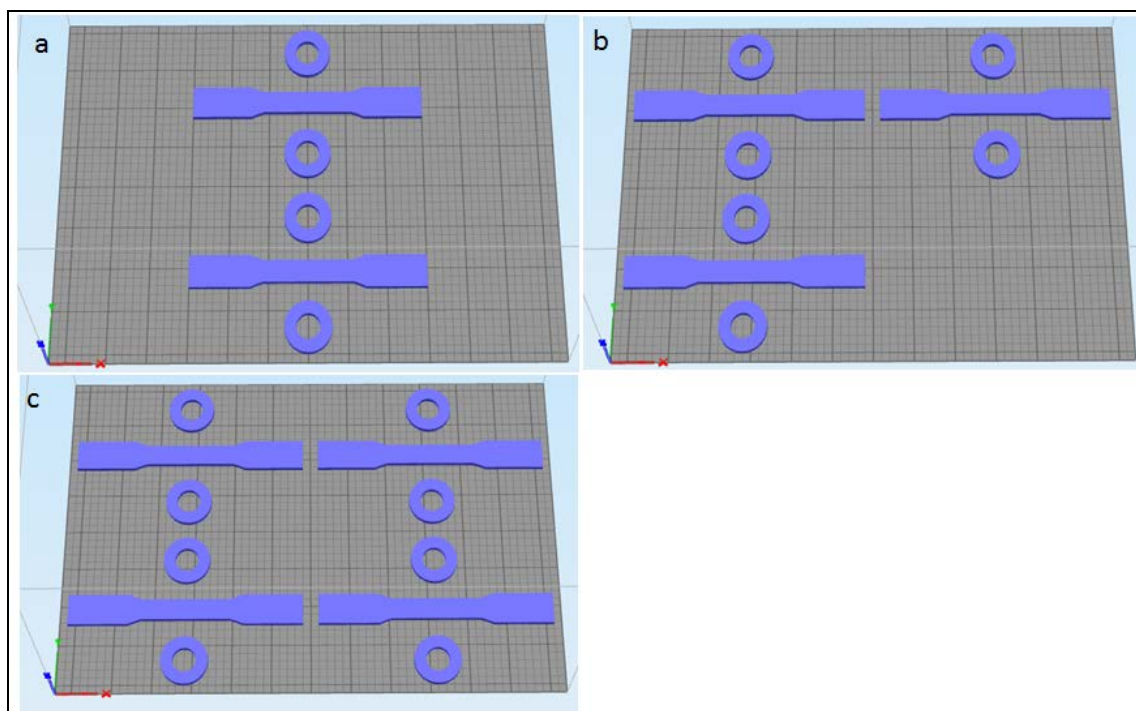


Figura 3.18 - Ilustração da disposição dos corpos de prova de tração; (a) 2 corpos de prova, (b) 3 corpos de prova e (c) 4 corpos de prova

Fonte: Autoria própria.

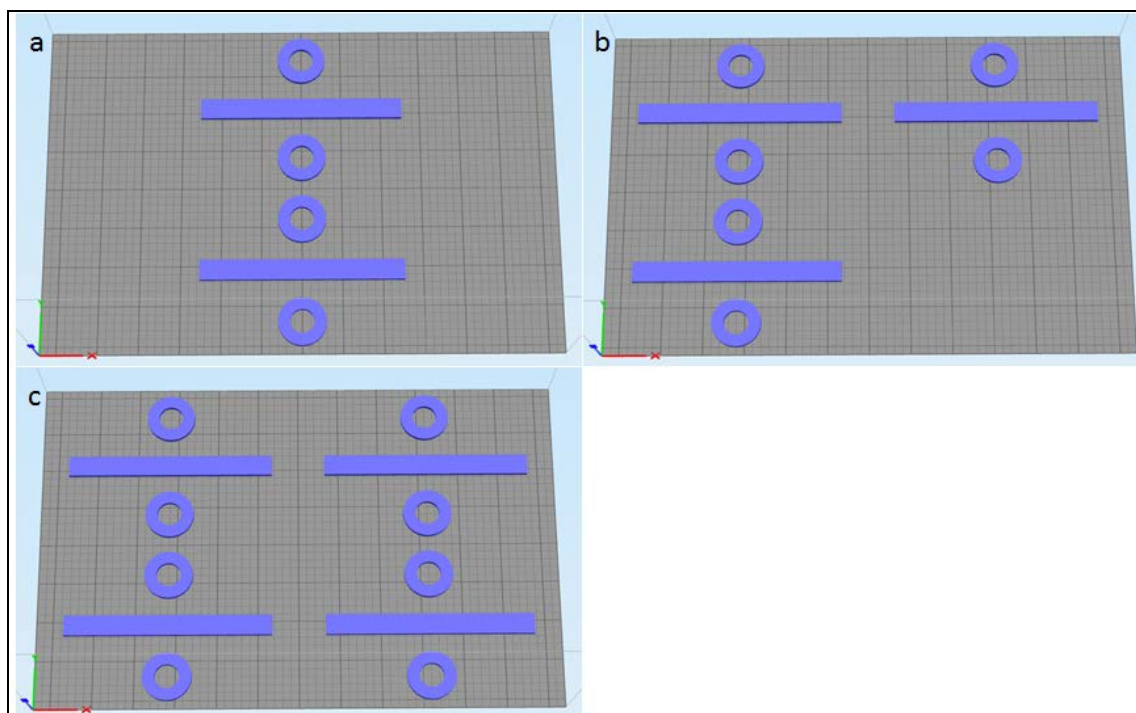


Figura 3.19 - Ilustração da disposição dos corpos de prova de flexão; (a) 2 corpos de prova, (b) 3 corpos de prova e (c) 4 corpos de prova

Fonte: Autoria própria.

Para a realização desse experimento, os mesmos parâmetros de processo apresentados na seção 3.3.1 foram utilizados. Foram fabricados no mínimo 5 corpos de prova para cada planejamento de trajetória testado assim como para cada lote (2, 3 e 4 corpos de prova) fabricado.

As análises realizadas nesse experimento foram as mesmas apresentadas nas seções 3.3.2 (análise do tempo de fabricação), 3.3.3 (análise dimensional), 3.3.4 (ensaio de tração) e 3.3.5 (ensaio de flexão). A mesma metodologia das seções anteriores foi aplicada, assim como a forma de análise dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados e discussões sobre os ensaios realizados conforme mostrado no Capítulo 3.

4.1 ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA FABRICADOS INDIVIDUALMENTE

Nesta seção são apresentados os resultados e análises realizados quando da fabricação de corpos de prova individualmente na plataforma de impressão.

4.1.1 Análise do tempo de fabricação

Na Tabela 4.1 observa-se o tempo gasto na fabricação de um corpo de prova para os planejamentos com e sem otimização da trajetória ociosa do bico extrusor. São apresentados os resultados para os corpos de prova de tração e flexão. A variação apresentada representa a comparação do método CRCR-NO com os métodos CCRR-O e CRCR-O.

Tabela 4.1 - Tempo de fabricação em segundos - corpos de prova de tração para 1CP

Corpo de prova	CRCR-NO (s)	CCRR-O (s)	Variação (%)	CRCR-O (s)	Variação (%)
Tração	3139	4452	+41,8	3135	-0,13
Flexão	2392	3377	+41,2	2383	-0,38

Fonte: Autoria própria

Com base nos resultados acima, pode-se observar que a variação entre os métodos CRCR-NO e CRCR-O foi muito pequena, o que implica que para o caso de um corpo de prova a otimização praticamente não afetou o resultado, i.e. não reduziu o tempo de fabricação.

Já para o método CCRR-O observa-se um aumento de 41,8% e 41,2% no tempo de fabricação dos corpos de prova de tração e flexão, respectivamente quando comparados com o método CRCR-NO. Este fato pode ser relacionado à

estratégia de planejamento aplicado por este método (CCRR-O), que automaticamente gera mais deslocamentos ociosos, uma vez que tem que obrigatoriamente, percorrer todos os Cs antes de iniciar os CRSs.

4.1.2 Análise dimensional

Os resultados das medições dimensionais após a fabricação das amostras estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Tempo de fabricação em segundos - corpos de prova de flexão para 1CP

Método	Tração		Flexão		
	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
Dimensões Nominais	13	3,2	12,7	3,2	127
CRCR-NO	13,26±0,09	3,21±0,05	12,87±0,07	3,19±0,04	126,87±0,10
CCRR-O	13,26±0,09	3,25±0,04	12,74±0,07	3,20±0,05	126,47±0,39
CRCR-O	13,44±0,44	3,19±0,02	13,12±0,24	3,17±0,08	127,15±0,05
CRCR-NOP17	13,21±0,04	3,31±0,02	12,68±0,03	3,29±0,02	126,69±0,04
CRCR-NOP65	13,15±0,06	3,36±0,04	12,71±0,07	3,28±0,06	126,73±0,16

Fonte: Autoria própria

Com base nestes resultados, pode-se verificar para os corpos de tração que a máxima variação na largura do corpo de prova foi de aproximadamente 3,4% no método CRCR-O em relação as dimensões nominais. Já na espessura a maior variação foi de aproximadamente 5% para o método P65. Quando comparados os métodos CRCR-NO, CCRR-O e CRCR-O observa-se que, quando considerado as médias e dispersões dos valores obtidos, as diferenças dimensionais foram pequenas.

Para os corpos de flexão, o método CRCR-O teve a maior variação (3,3%) nos valores da largura dos corpos de prova em comparação com os valores nominais. Já na medição da espessura dos corpos de prova, observa-se que as maiores variações (2,8% e 2,5%) em relação ao valor nominal foram com os métodos CRCR-NOP17 e CRCR-NOP65, respectivamente. Na avaliação do comprimento, a variação encontrada foi pequena, não ultrapassando em 0,5% de variação em relação ao valor nominal.

Outra observação é que houve pouca diferença na largura e comprimento dos corpos de prova quando se compara os métodos CRCR-NO, CRCR-NOP17 e CRCR-NOP65. Já para a espessura, tanto do corpo de prova de tração como o de flexão, a máxima variação foi de 4,7% quando comparado CRCR-NO e P65. Portanto, mesmo com a interrupção forçada de 17 e 65 segundos, pode-se notar pouca influência nos resultados, uma vez que, considerando a média e o desvio padrão para os três métodos, os valores obtidos são comparáveis.

4.1.3 Ensaio de tração

Os resultados dos ensaios de tração considerando a fabricação de um (1) corpo de prova são apresentados na Figura 4.1 (tensão máxima).

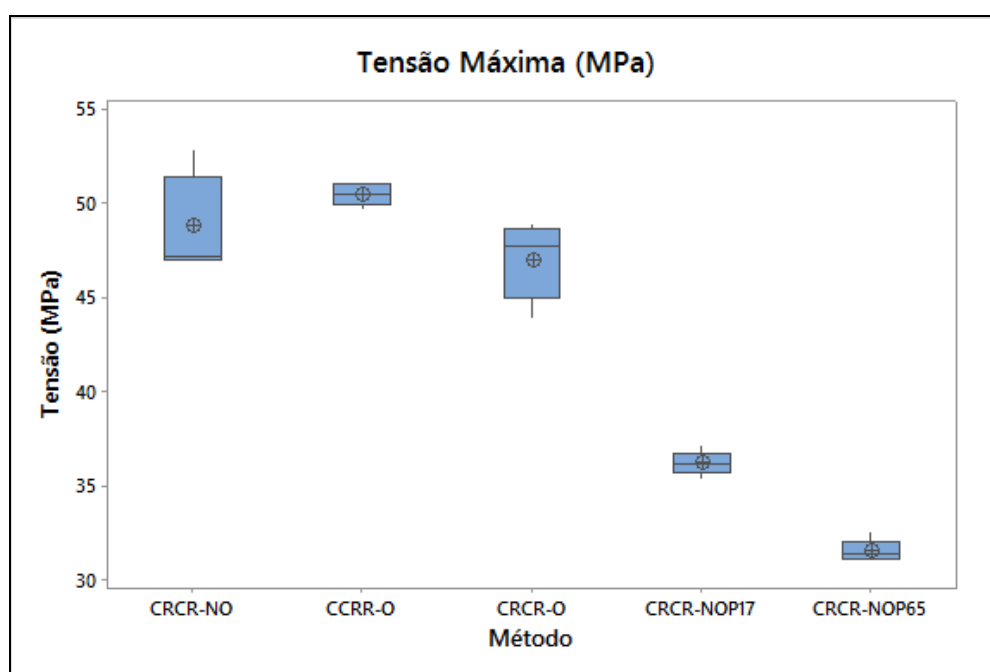


Figura 4.1 – Resultados da tensão máxima obtida nos ensaios de tração dos CPs produzidos considerando a fabricação de um (1) corpo de prova na plataforma

Fonte: Autoria própria.

O gráfico da Figura 4.1 mostra os resultados (média dos corpos de prova produzidos para cada método) obtidos da tensão máxima quando fabricado apenas 1 corpo de prova para os métodos CRCR-NO, CCRR-O, CRCR-O, CRCR-NOP17 e CRCR-NOP65. O maior valor (média) de tensão máxima encontrado foi de 50,4 MPa

quando os CPs foram fabricados pelo método CCRR-O. Para o método CRCR-O houve um decréscimo de 7% quando comparado com o método CCRR-O. Considerando a média e o desvio padrão dos resultados pode-se dizer que os valores são comparáveis e tiveram pouca variação entre si quando analisados os métodos CRCR-NO, CCRR-O e CRCR-O.

Quando se compara o valor de tensão máxima para o CRCR-NOP65 e o CRCR-NO (mesmo planejamento básico utilizado), houve um decréscimo de aproximadamente 35%, enquanto que para o CRCR-NOP17 o decréscimo foi de aproximadamente 25%. Como a única alteração de processo nos dois casos foi o tempo de interrupção durante a deposição dos filamentos é possível afirmar que, a aderência não eficiente entre os filamentos vizinhos foi o motivo para esta queda da propriedade do material. Este resultado corrobora com estudos realizados por Gurralla e Regalla (2014), no qual os mesmos analisaram as alterações da estrutura e o grau de solidificação das interfaces entre junções dos filamentos. Os mesmos concluíram que a estratégia de fabricação e a temperatura ambiente são fatores que afetam a qualidade e os resultados de resistência da união entre os filamentos. Uma vez depositado, cada filamento deve solidificar o mais rápido possível a fim de evitar deformação devido à gravidade e massa do material depositado em cima, porém, o filamento deve manter-se aquecido o suficiente para garantir a ligação adequada entre o segmento ao lado depositado.

Os resultados acima apresentados mostram que houve pouca variação entre os métodos com e sem otimização de trajetória ociosa do bico extrusor considerando as condições de fabricação desse estudo. Porém, para os métodos com interrupção forçada, observa-se uma variação considerável na tensão máxima obtida. Estes resultados indicam uma fragilidade no corpo de prova na região onde foi realizada a interrupção, fato esse atribuído a adesão não eficiente entre as camadas e entre filamentos adjacentes na mesma camada. Outro ponto a ser ressaltado é que em caso de uma otimização de trajetória aumente o tempo de deposição de filamentos vizinhos, possivelmente as peças produzidas terão um impacto negativo em suas propriedades mecânicas. Porém, em caso de otimizações, espera-se que o tempo entre trechos vizinhos seja menor, e com isso as propriedades mecânicas de peças fabricadas não seriam negativamente afetadas.

4.1.4 Ensaio de flexão

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de flexão considerando a fabricação de apenas um (1) corpo de prova na plataforma. Vale ressaltar que três dos cinco corpos de prova para o método P65 não sofreram ruptura durante a execução do ensaio. Esse comportamento não era esperado, uma vez que, na teoria, quanto mais tempo para a deposição do filamento adjacente (ao seu vizinho), mais frágil ficaria a união entre eles.

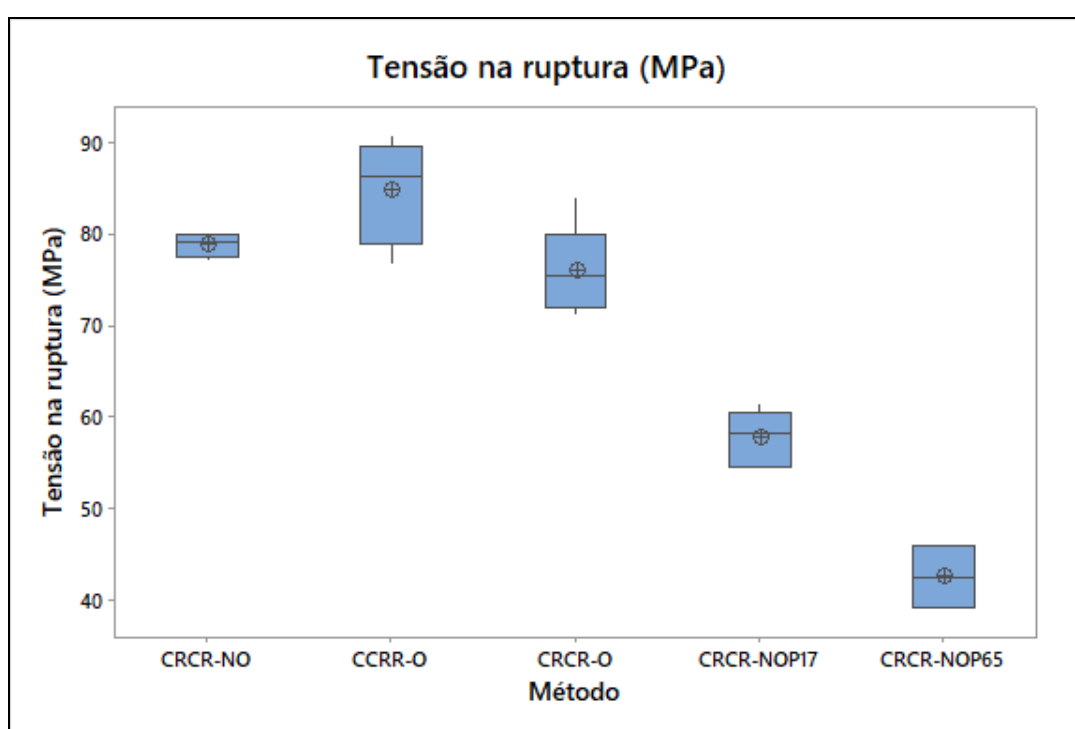


Figura 4.2 – Resultados da tensão na ruptura obtida nos ensaios de flexão dos CPs produzidos considerando a fabricação de um (1) corpo de prova na plataforma

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados do gráfico da Figura 4.2 se pode observar que o maior valor médio da tensão na ruptura foi de 84,64MPa, quando utilizado o método CCRR-O. Houve um decréscimo na tensão de ruptura de aproximadamente de 7% e 10% para os métodos CRCR-NO e CRCR-O, respectivamente, quando comparados com o método CCRR-O. Porém, considerando a média e o desvio padrão dos valores obtidos os resultados foram próximos.

Analisando os métodos CRCR-NOP17 e CRCR-NOP65, observa-se um decréscimo de aproximadamente 26% para o método CRCR-NOP65 quando

comparado ao CRCR-NOP17, ou seja, o aumento do tempo de interrupção de 17 para 65 segundos tem correlação direta com a diminuição dos valores de tensão na ruptura. Já comparando P17 e P65 com CRCR-NO, o decréscimo no valor da tensão de ruptura foi de aproximadamente de 26% e 46%, respectivamente. Fica evidente que o tempo de interrupção durante a deposição dos filamentos teve bastante influência no comportamento mecânico do material. Este tempo afetou negativamente a aderência entre os filamentos adjacentes.

Assim como nos ensaios de tração, os resultados dos ensaios de flexão mostram que quando utilizados tempo prolongados para a deposição do filamento em uma mesma camada, há uma grande interferência na adesão dos filamentos adjacentes, ocasionando uma diminuição nas propriedades mecânicas dos corpos de prova.

4.1.5 Verificação por MEV da adesão entre filamentos na região da fratura

Nas Figuras 4.3 e 4.4 são ilustrados alguns corpos de prova de tração fraturados para os métodos CRCR-NO, CCRR-O, CRCR-O, CRCR-NOP17 e CRCR-NOP65.



Figura 4.3 - Fotos de alguns corpos de prova de tração fraturadas para os métodos CRCR-NO, CCRR-O e CRCR-O

Fonte: Autoria própria.

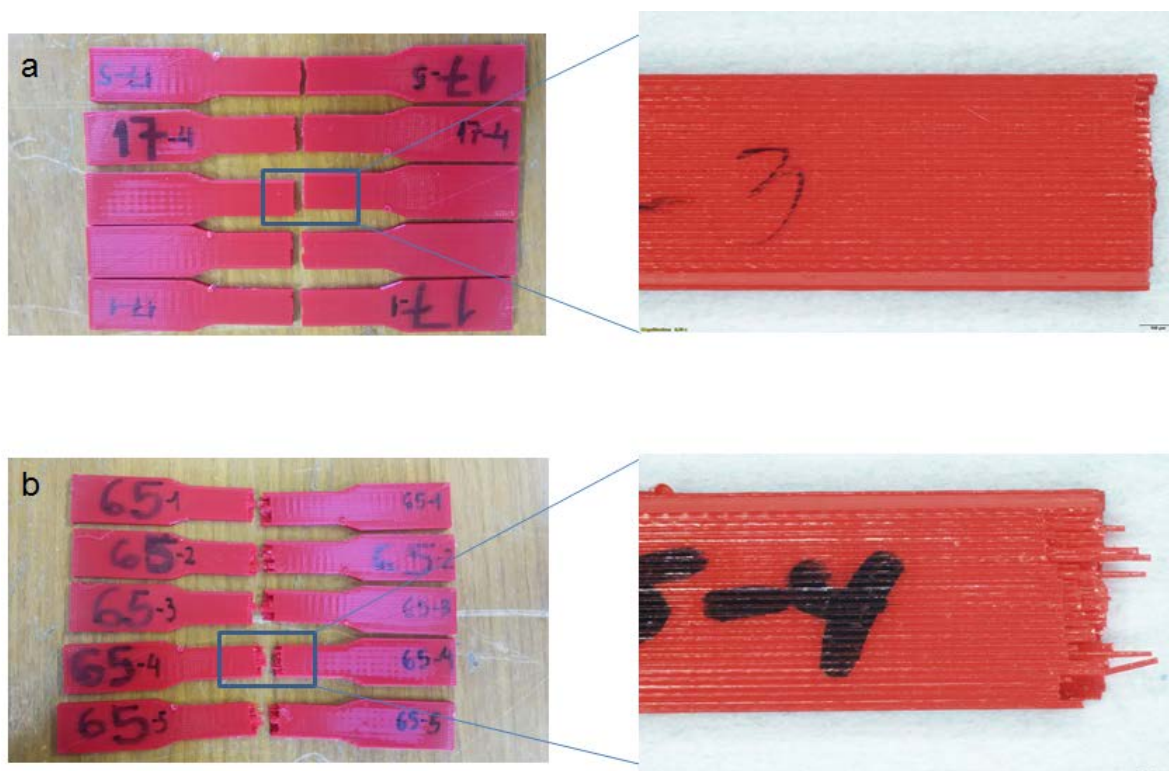


Figura 4.4 - Fotos dos corpos de prova de tração fraturadas com interrupção de (a) P17e (b) P65

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que, para os dois métodos com interrupção forçada do bico extrusor (Figura 4.4), todas as fraturas nos corpos de prova ocorreram exatamente na região onde foi realizada a interrupção (centro do corpo de prova). Já para os demais métodos, a região fraturada não foi sempre centralizada no corpo de prova, havendo variações conforme ilustrados na Figura 4.3. Também ficam evidenciadas as diferenças na fratura entre os métodos P17 e P65 (destaques das Figuras 4.4a e b), sendo que no P65 os filamentos longitudinais ficaram mais aparentes na ruptura do corpo de prova.

Estes filamentos aparentes são das camadas acima e abaixo da camada com interrupção. Este comportamento sugere que, devido ao longo tempo de interrupção nas camadas transversais, as camadas anteriores poderiam estar mais frias, causando assim uma adesão não eficiente dos filamentos.

A Figura 4.4 b evidencia que em quase todas as camadas longitudinais ocorreu a delaminação dos filamentos longitudinais (0°).

Na Figura 4.5 são apresentadas imagens da microscopia eletrônica de varredura (MEV) da área fraturada para os corpos de prova com interrupção da trajetória do bico extrusor. Percebe-se que o rompimento do corpo de prova ocorreu na direção de tração em ambos os casos

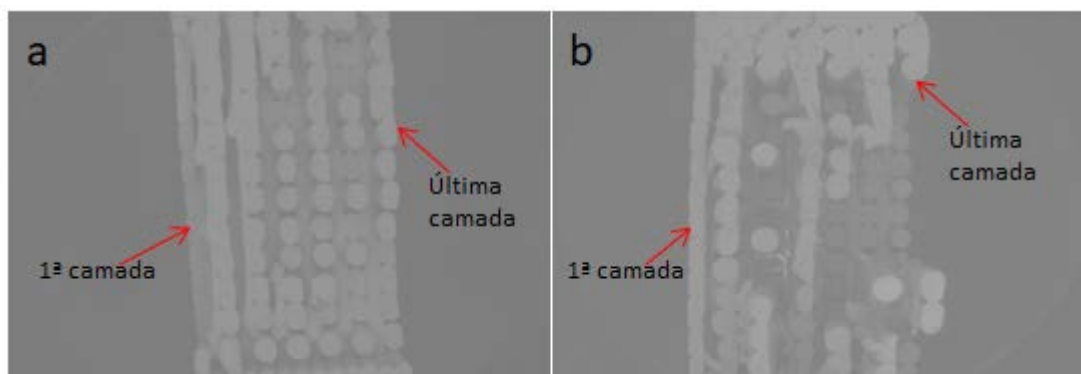


Figura 4.5 - Micrografia da região fraturada para o corpo de prova de tração com interrupção de: (a) P17 e (b) P65

Fonte: Autoria própria.

Observa-se também que, para as primeiras camadas, ou seja, camadas que estão próximas à plataforma de impressão, há uma melhor adesão entre os filamentos quando comparadas com as últimas camadas. No caso da P65 pode-se encontrar alguns filamentos com seção transversal bastante circular, diferente do esperado que seria mais próximo de uma elipse. Isto indica um filamento que não teve uma boa interação com seus vizinhos (tanto lateralmente quanto verticalmente). Isto implica que deve estar ocorrendo deslizamento entre os filamentos nesta região durante a solicitação, i.e., não houve uma boa amarração entre camadas.

Esse resultado do MEV corrobora com os estudos onde Sun et al. (2003) que evidenciou que existe uma correlação da melhora na adesão dos filamentos quando comparadas as primeiras e últimas camadas depositadas. Sun et al. (2008) também relata que as camadas inferiores das peças mantem maior a temperatura por um longo período de tempo quando comparado com as camadas superiores. O crescimento do “pescoço” entre os filamentos é esperado que seja maior nas camadas inferiores do que nas camadas superiores, relatam os autores. Isto pode ser observado na Figura 4.5 a, ao se comparar a primeira e a última camada.

A mesma análise foi realizada para os corpos de flexão com interrupção da deposição. Na Figura 4.6 são ilustrados os corpos de prova fabricados (CRCR-NOP17 e CRCR-NOP65) com destaque para a região em que houve a interrupção programada.



Figura 4.6 - Corpo de prova de flexão com interrupção
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.7 são ilustradas algumas fotos dos corpos de prova fraturados para esses métodos.

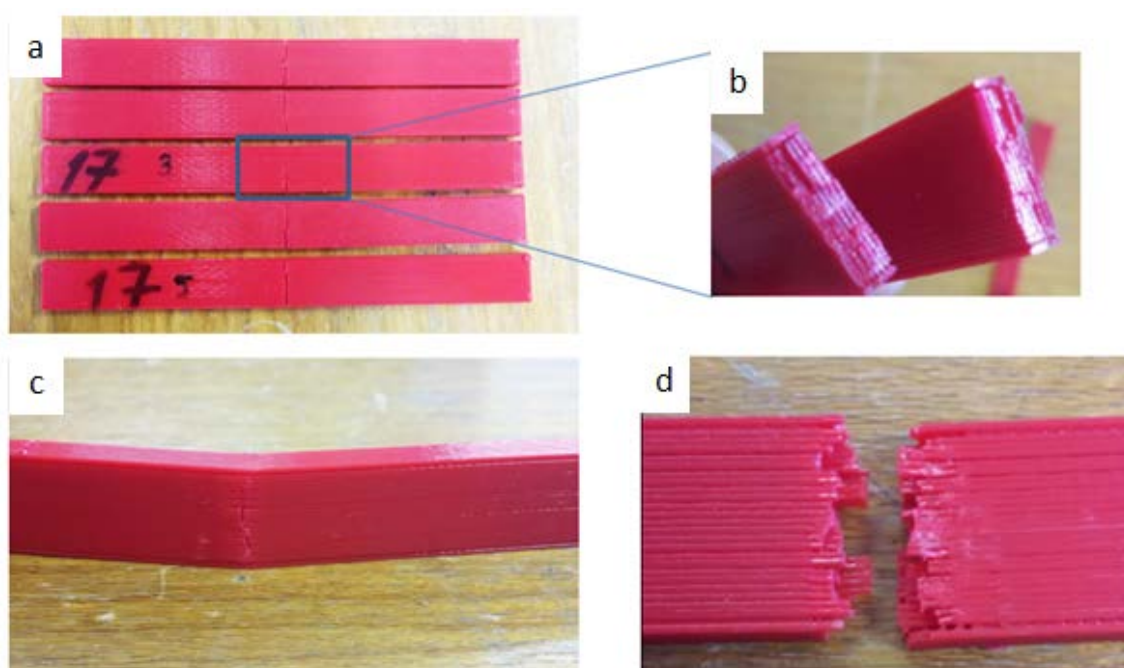


Figura 4.7 - Fotos dos corpos de prova de tração fraturadas com interrupção de (a) P17e (b) P65

Fonte: Autoria própria.

Observam-se na Figura 4.7 diferentes tipos de rupturas para os dois tempos de interrupção do filamento. No corpo de prova P65 (Figura 4.7d) alguns filamentos ficaram aparentes após a ruptura, comportamento semelhante aos ensaios de tração. Este comportamento não é evidente na fratura da P17 (Figura 4.7b). A hipótese para esse caso assemelha-se a do corpo de prova de tração, onde devido ao longo tempo de interrupção nas camadas transversais, as camadas anteriores poderiam estar mais frias, causando assim uma adesão não eficiente dos filamentos.

A Figura 4.8 apresenta as imagens da microscopia eletrônica de varredura da área fraturada. Percebe-se que o rompimento do corpo de prova ocorreu perpendicular a direção da carga.

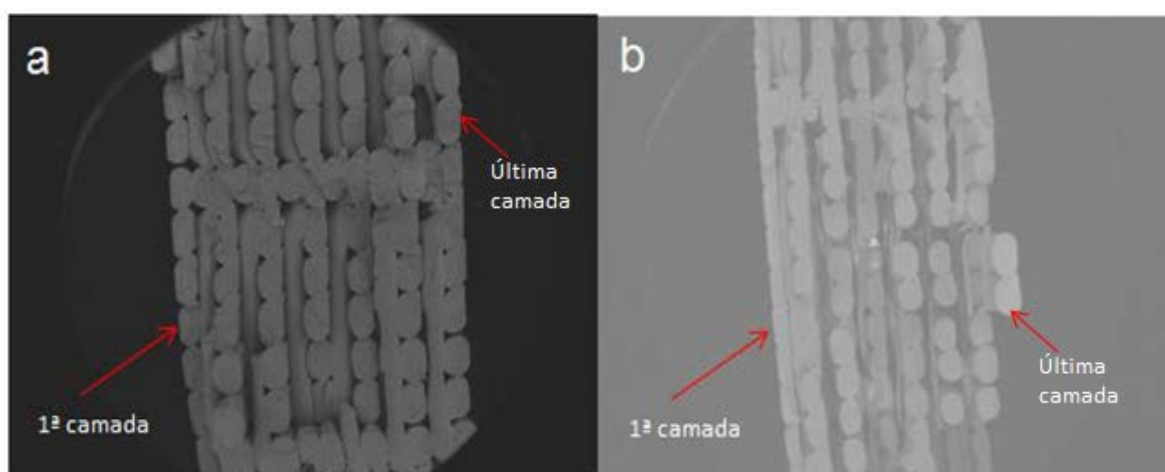


Figura 4.8 - Micrografia da região fraturada para o corpo de prova de flexão com interrupção de: (a) CRRCR-NOP17 e (b) CRRCR-NOP65

Fonte: Autoria própria.

Semelhante à micrografia apresentada para os corpos de prova de tração, observa-se uma melhor adesão entre os filamentos nas primeiras camadas, principalmente para o método P65.

A hipótese acima para o comportamento da adesão não eficiente entre filamentos adjacentes e entre camadas pode ser visualizada na Figura 4.9. O esquemático apresenta uma possível diferença de temperatura nas camadas transversais e longitudinais dos corpos de prova fabricados com interrupção forçada do bico extrusor. A Figura apresenta a sequência de deposição com variação de

temperatura em 6 diferentes momentos, para as 5 primeiras camadas. Na Figura 4.9a é apresentada a deposição da segunda camada sobre a primeira até o momento da interrupção, sendo assim, pode-se assumir que o material está com alta temperatura (coloração vermelha). Porém, com a interrupção, esse material já depositado resfria. Com isso, na continuação da deposição, a união entre filamentos laterais e também da camada anterior ocorre com um material à temperatura mais baixa (Figura 4.9b). Na Figura 4.9c a deposição ocorre sem interrupção na camada longitudinal. Já para a Figura 4.9d ocorre à interrupção conforme já descrito para a Figura 4.9a, ou seja, o material depositado resfria durante a deposição até que o bico extrusor retorne e continue a realizar a deposição (Figura 4.9e).

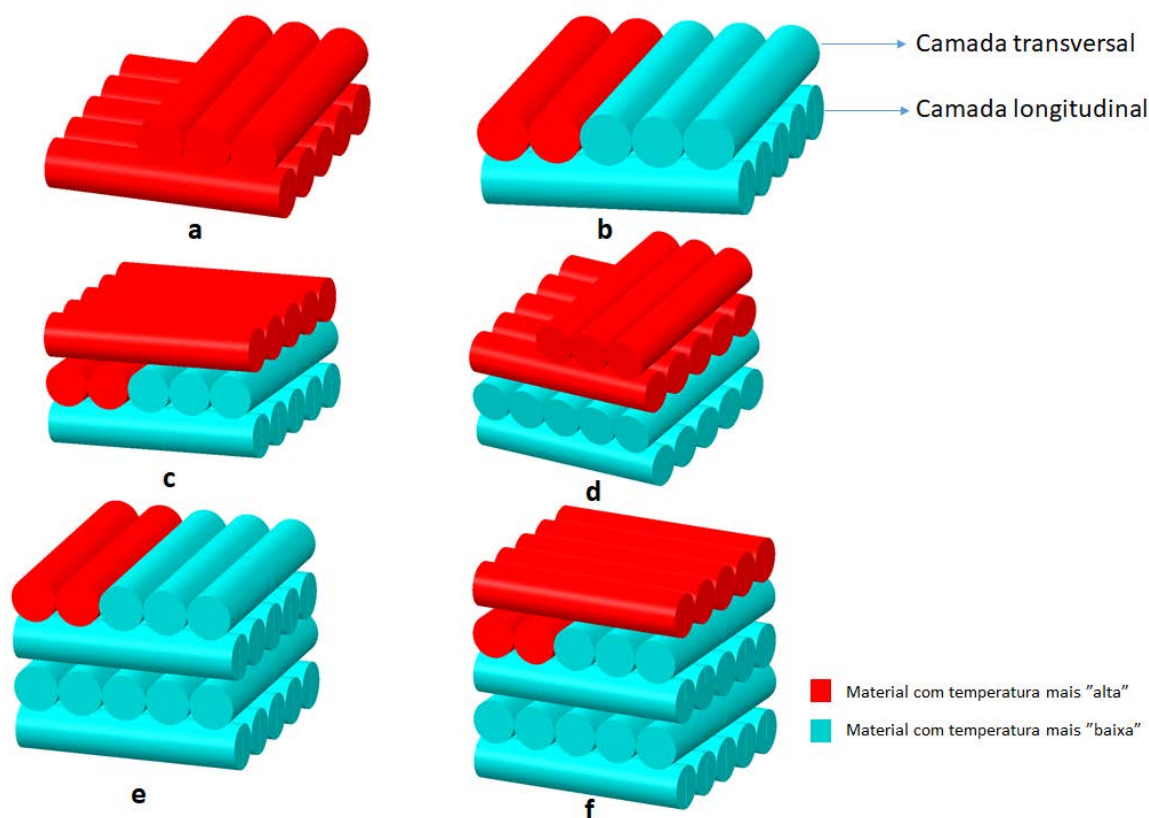


Figura 4.9 – Esquemático ilustrativo das possíveis diferentes temperaturas nas camadas transversais e longitudinais nos corpos de prova com interrupção forçada do bico extrusor.

Fonte: Autoria própria.

4.2 ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA FABRICADOS EM LOTES

São apresentados nesta seção os resultados e análises realizadas dos corpos de prova fabricados em lotes na plataforma de impressão para os métodos CRCR-NO, CCRR-O e CRCR-O.

4.2.1 Análise do tempo de fabricação

Na Tabela 4.3 e 4.4 observam-se os tempos de fabricação para cada peça, lote e métodos dos corpos de prova (tração e flexão) fabricados. A variação apresentada representa a comparação do método CRCR-NO com os CCRR-O e CRCR-O.

Tabela 4.3 - Tempo de fabricação em segundos - corpos de prova de tração

Quantidade de CP na plataforma	CRCR-NO (s)	CCRR-O (s)	Variação (%)	CRCR-O (s)	Variação (%)
1	3139	4452	+41,8	3135	-0,1
2	6268	8866	+41,4	6245	-0,4
3	9514	13411	+41,0	9400	-1,2
4	12715	17861	+40,5	12519	-1,5

Fonte: Autoria própria

Tabela 4.4 - Tempo de fabricação em segundos - corpos de prova de flexão

Quantidade de CP na plataforma	CRCR-NO (s)	CCRR-O (s)	Variação (%)	CRCR-O (s)	Variação (%)
1	2392	3377	+41,2	2383	-0,4
2	4853	6896	+42,1	4844	-0,2
3	7384	10370	+40,4	7289	-1,3
4	9898	13798	+39,4	9712	-1,9

Fonte: Autoria própria

Com base nos tempos de fabricação apresentados, pode-se concluir que entre os métodos CRCR-NO e CRCR-O a diferença entre os tempos de fabricação final das amostras foi pequena, variou de 0,1% até 1,9%, considerando as diferentes quantidades de peças e corpos de prova.

Já para o método CCRR-O, houve uma diferença considerável de tempo de fabricação em relação aos outros dois métodos. O aumento de tempo variou de

39,4% até 42,7% considerando as diferentes quantidades de peças, e os outros dois métodos comparados.

Os resultados estão diretamente ligados aos diferentes planejamentos de trajetória utilizados para cada método testado, onde houve grandes variações dos métodos CRCR-NO e CRCR-O em comparação com o método CCRR-NO, o qual tem que percorrer todos os Cs antes de iniciar os CRSs, gerando assim mais deslocamentos ociosos.

4.2.2 Análise dimensional

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados dimensionais para os diferentes métodos testados, assim como as diferentes quantidades de corpos de prova fabricados simultaneamente na plataforma de impressão.

Tabela 4.5 - Resultado dimensional para corpos de prova de tração e flexão

Método	Tração			Flexão		
	Quantidade de peças na plataforma	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
Dimensões Nominais		13	3,2	12,7	3,2	127
CRCR-NO	1	13,26±0,09	3,21±0,05	12,87±0,07	3,19±0,04	126,87±0,10
	2	13,37±0,08	3,18±0,03	13,10±0,09	3,18±0,04	127,26±0,38
	3	13,47±0,13	3,26±0,05	13,19±0,02	3,16±0,04	127,04±0,18
	4	13,28±0,09	3,25±0,06	12,77±0,34	3,17±0,03	126,91±0,15
CCRR-O	1	13,26±0,09	3,25±0,04	12,74±0,07	3,20±0,05	126,47±0,39
	2	13,18±0,15	3,33±0,03	12,78±0,11	3,35±0,13	126,79±0,11
	3	13,16±0,20	3,19±0,05	12,45±0,43	3,26±0,09	126,24±0,49
	4	13,13±0,17	3,29±0,12	12,59±0,33	3,36±0,04	126,31±0,38
CRCR-O	1	13,44±0,44	3,19±0,02	13,12±0,24	3,17±0,08	127,15±0,05
	2	13,48±0,17	3,13±0,03	12,80±0,11	3,22±0,06	126,78±0,04
	3	13,34±0,16	3,23±0,12	12,83±0,11	3,24±0,07	126,77±0,13
	4	13,28±0,15	3,15±0,09	12,91±0,15	3,14±0,10	126,91±0,40

Fonte: Autoria própria

Os resultados para os corpos de prova de tração produzidos utilizando o método CRCR-NO mostram pouca variação tanto na largura quanto na espessura dos corpos de prova com o aumento da quantidade de peças fabricadas. A variação máxima encontrada quando comparado as diferentes quantidades de corpos de prova foi de 1,6% e 2,5% na largura e espessura, respectivamente. Para os corpos

de prova de flexão também não foi evidenciado nenhum desvio considerável significativo. A maior variação entre as quantidades de corpos de prova foi de 3,2% encontrada na largura do corpo de prova.

Para o método CCRR-O, a espessura dos corpos de prova de tração e flexão apresentaram variações de 3 e 4,5%, respectivamente, quando comparados as diferentes quantidades de corpos de prova para o mesmo método. Para as demais características medidas a variação não ultrapassou 2,6% entre os lotes (diferentes quantidades de corpos de prova produzidos) comparados.

Assim como nos demais métodos, o método CRCR-O também demonstrou pouca variação na avaliação dimensional dos corpos de prova de tração e flexão. As maiores variações encontradas foram de 3,1% na espessura dos corpos de provas. Para as outras características analisadas a variação máxima encontrada foi de 2,4 % na largura dos corpos de prova de flexão, quando comparados os diferentes lotes produzidos.

Com base nos resultados, observa-se pouca variação dimensional dos CPs, quando comparado os métodos de planejamento de trajetória com otimização considerando a média e o desvio padrão encontrado.

4.2.3 Ensaio de tração

Os resultados para os ensaios de tração considerando lotes produzidos na plataforma de impressão para os métodos CRCR-NO, CCRR-O e CRCR-O são apresentados nesta seção.

4.2.3.1 Método CRCR-NO

Os resultados obtidos no ensaio de tração (tensão máxima) para o método CRCR-NO são apresentados na Figura 4.10.

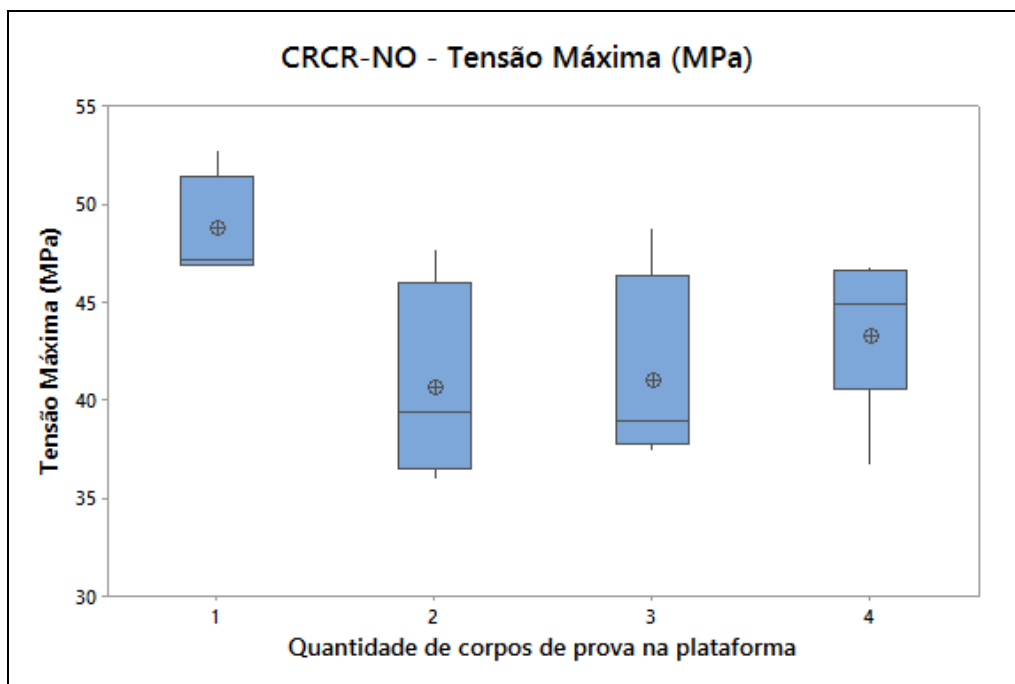


Figura 4.10 – Resultados da tensão máxima obtida nos ensaios de tração dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR-NO

Fonte: Autoria própria.

Os resultados demonstram que quando fabricados apenas um (1) corpo de prova na plataforma a tensão máxima é aproximadamente 17% maior de que quando produzidos em lotes de dois (2) corpos de prova (menor valor médio). Observa-se também uma menor dispersão entre os valores de tensão máxima obtida quando fabricados apenas um (1) corpo de prova em relação aos demais. Os resultados acima avaliados convergem com o estudo de Faes (2016), em que o mesmo variou a quantidade de peças fabricadas na plataforma e verificou que a menor dispersão entre os resultados para a tensão de ruptura dá-se quando o menor tempo de fabricação acontece, ou seja, nesse caso com uma peça fabricada na plataforma em relação aos outros lotes de peças fabricados.

Para a fabricação em lotes (2, 3 e 4 peças) observa-se um comportamento similar entre os valores de tensão máxima obtida. Considerando a média e o desvio padrão pode-se dizer que os resultados entre os lotes não tiveram diferenças significativas, mesmo com o aumento da quantidade de peças e, conseqüentemente, do tempo de deposição entre as camadas.

Na Figura 4.11 são apresentados os resultados do módulo de elasticidade (E) para o referido método.

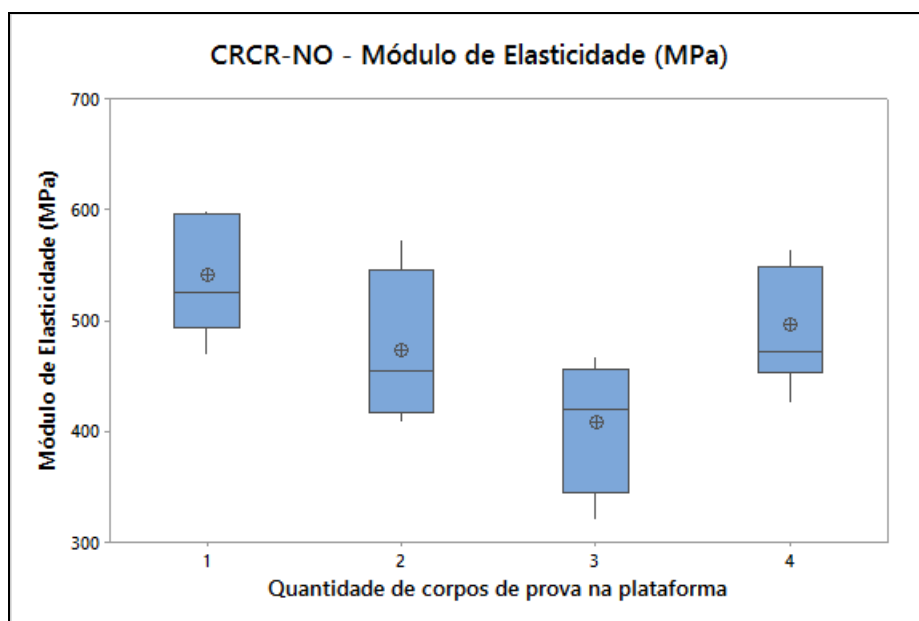


Figura 4.11 – Resultados do E obtido nos ensaios de tração dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR-NO
Fonte: Autoria própria.

Observa-se que para os resultados do E é possível verificar uma variação de até 25% quando comparado à fabricação de uma e três peças na plataforma (maior e menor valor médio obtido). Considerando os lotes de 2, 3 e 4 peças observam-se valores médios próximos, e, considerando o desvio padrão entre os valores, as diferenças foram pequenas.

4.2.3.2 Método CCRR-O

Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentados os resultados da tensão máxima e módulo de elasticidade, respectivamente, com diferentes quantidades de corpos de prova produzidos simultaneamente na plataforma pelo método CCRR-O.

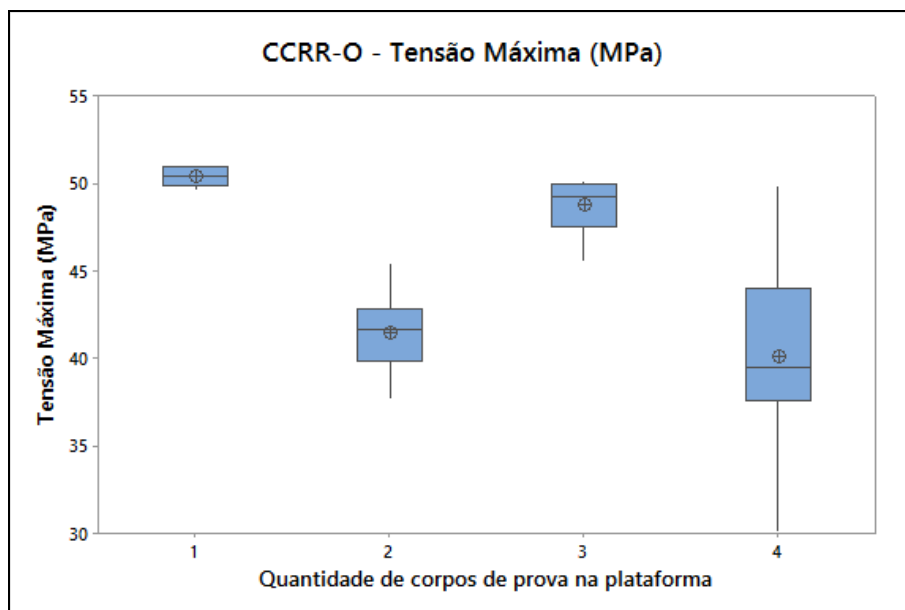


Figura 4.12 – Resultados da tensão máxima obtida nos ensaios de tração dos CPs produzidos em lotes pelo método CCRR-O

Fonte: Autoria própria.

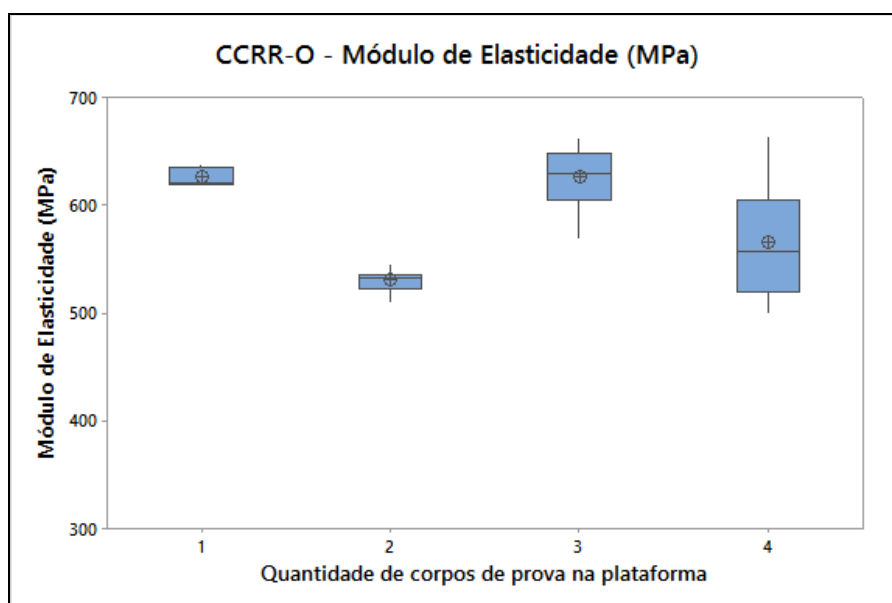


Figura 4.13 – Resultados do E obtido nos ensaios de tração dos CPs produzidos em lotes pelo método CCRR-O

Fonte: Autoria própria.

Os resultados da Figura 4.12 demonstram que para o método CCRR-O a menor dispersão entre as diferentes quantidades de peças na plataforma foi evidenciada quando fabricada apenas um corpo de prova, assim como o maior valor médio de tensão máxima. Quando comparado os valores entre um e quatro corpos

de prova produzidos, observa-se uma diminuição de aproximadamente 20% na tensão máxima quando fabricado quatro CPs.

Para o módulo de elasticidade observa-se que o maior valor obtido foi quando fabricado um corpo de prova. A menor dispersão entre os lotes produzidos também foi evidenciada com a fabricação de 1 CP. Quando comparado a fabricação de quatro CPs, observa-se uma diminuição de aproximadamente 10% em relação a um CP fabricado.

Esses resultados, assim como no método CRCR-NO, mostram que o aumento da quantidade de peças fabricadas ao mesmo tempo na plataforma tem influência nas propriedades mecânicas dos corpos de prova considerando as condições de fabricação desse estudo.

4.2.3.3 Método CRCR-O

Os resultados da tensão máxima e módulo de elasticidade para o método CRCR-O são apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15.

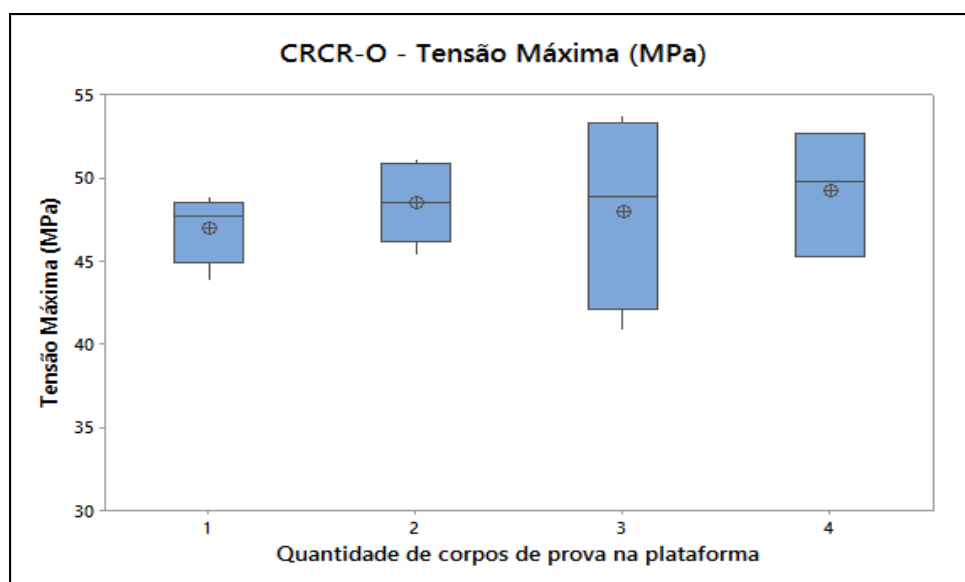


Figura 4.14 – Resultados da tensão máxima obtida nos ensaios de tração dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR-O

Fonte: Autoria própria.

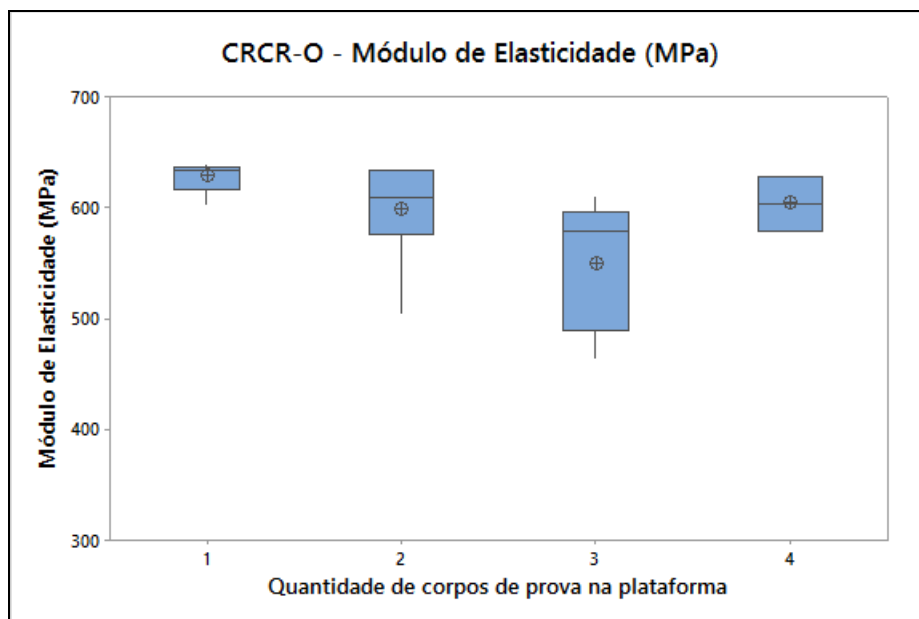


Figura 4.15 – Resultados do E obtido nos ensaios de tração dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR-O

Fonte: Autoria própria.

Para os resultados de tensão máxima, observa-se que o aumento na quantidade de corpos de prova para o método CRCR-O não foi evidenciado alterações consideráveis, considerando a média e o desvio padrão dos valores obtidos. Esse mesmo fato também é evidenciado para os resultados do módulo de elasticidade.

Uma possível explicação para esse fato da não variação na tensão máxima com o aumento da quantidade de corpos de prova é a estratégia de deposição aplicada para esse método (utilização do algoritmo guloso e preenchimento do C seguido do CRS de cada CP). Onde, a cada duas camadas pelo menos um corpo de prova tem o tempo de deposição entre camadas igual ao tempo entre camadas quando fabricado apenas um CP. Isso porque o método utilizado realiza sempre o contorno e o trecho de *raster* mais próximo, mesmo que este C e CRS tenham sido os últimos a serem realizados na camada precedente. Portanto sempre o CP que for depositado o último C e CRS de uma camada, também será o primeiro a receber o C e CRS da próxima camada. Desta forma, se assemelha a um CP produzido individualmente, onde o mesmo sempre recebe a deposição em sequência do C e CRS com o mesmo tempo entre cada camada.

4.2.4 Ensaio de flexão

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios de flexão para os métodos CRCR-NO, CCRR-O e CRCR-O quando fabricados lotes de corpos de prova na plataforma de impressão.

4.2.4.1 Método CRCR-NO

Nas Figuras 4.16 e 4.17 observam-se os resultados de tensão máxima na ruptura e o módulo de elasticidade para os CPs produzidos com o método CRCR-NO.

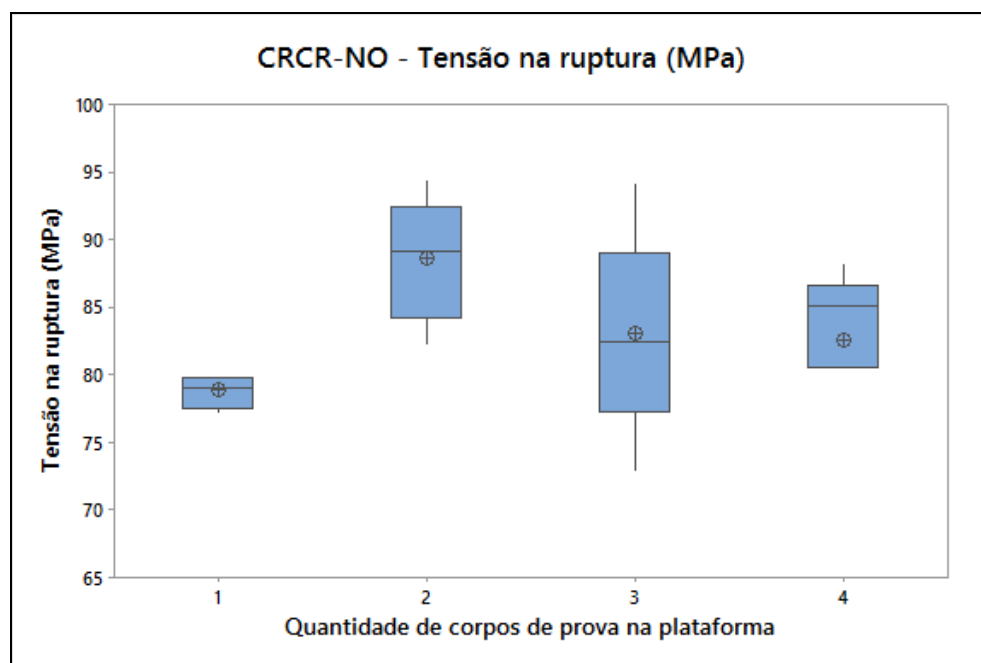


Figura 4.16 – Resultados da tensão na ruptura obtida nos ensaios de flexão dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR-NO

Fonte: Autoria própria.

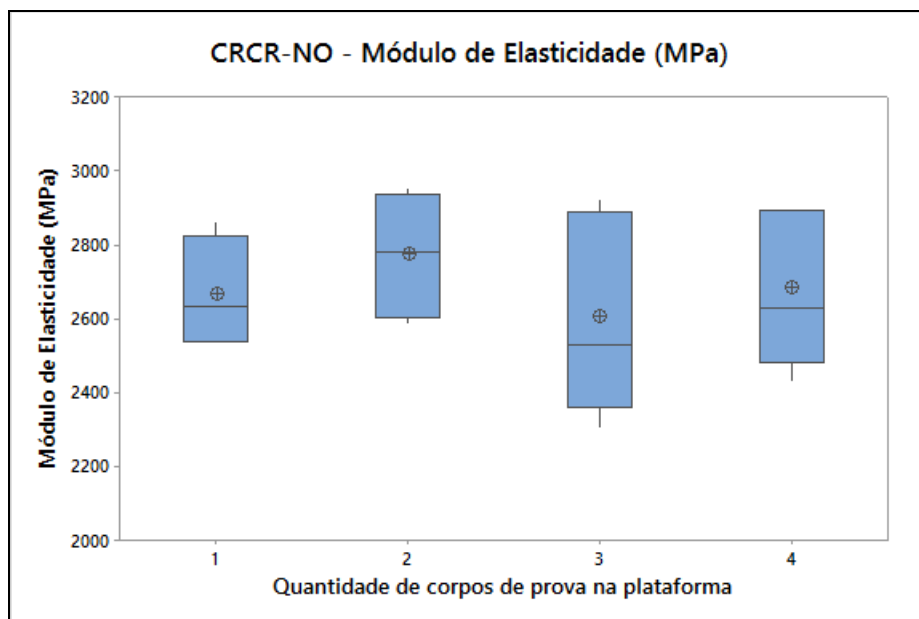


Figura 4.17 – Resultados do E obtido nos ensaios de flexão dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR-NO

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados da Figura 4.16, observa-se pouca variação na tensão de ruptura quando fabricado 2, 3 e 4 corpos de prova na plataforma. Para apenas um corpo de prova fabricado, o resultado obtido mostrou uma diminuição de aproximadamente 11% quando comparado com dois (2) CPs produzidos simultaneamente. Porém, a dispersão entre os valores foi a menor obtida entre as diferentes quantidades de corpos de prova fabricados.

Para o módulo de elasticidade houve pouca influência com o aumento da quantidade de corpos de prova considerando a média e o desvio padrão dos resultados obtidos.

A variação entre um (1) CP e os demais CPs produzidos em lotes não era esperada, pois na teoria, o aumento da quantidade de corpos de prova resulta em um aumento no tempo de deposição das camadas, o que, por consequência, deveria ter um impacto negativo nas propriedades mecânicas do material.

4.2.4.2 Método CCRR-O

Para o método CCRR-O, os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 4.18 e 4.19, tensão na ruptura e módulo de elasticidade, respectivamente.

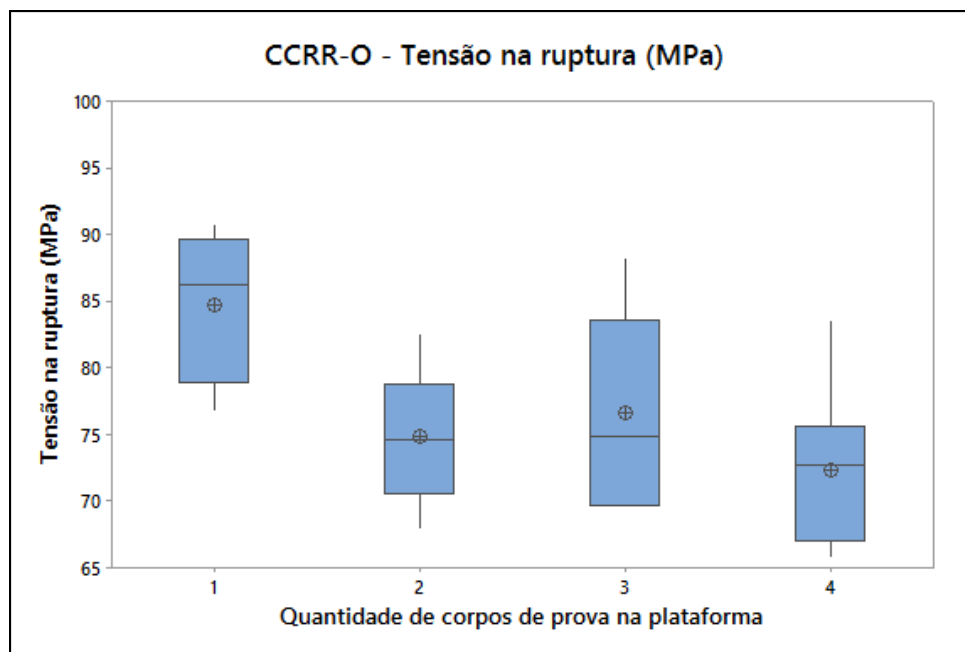


Figura 4.18 – Resultados da tensão na ruptura obtida nos ensaios de flexão dos CPs produzidos em lotes pelo método CCRR-O

Fonte: Autoria própria.

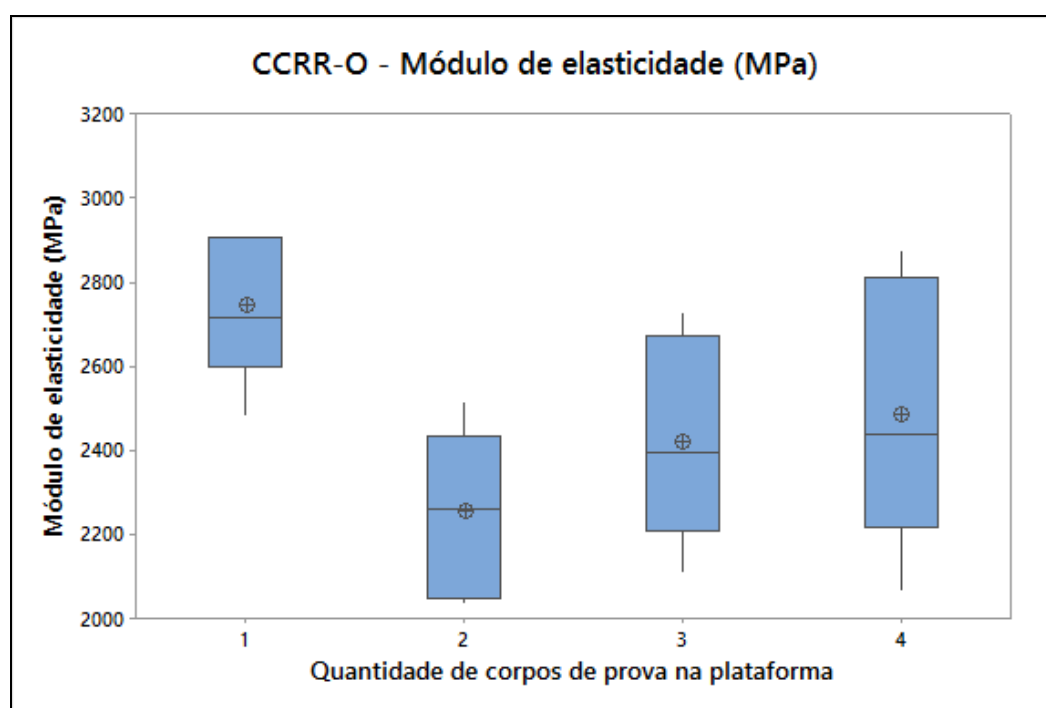


Figura 4.19 – Resultados do E obtido nos ensaios de flexão dos CPs produzidos em lotes pelo método CCRR-O

Fonte: Autoria própria.

A tensão na ruptura máxima encontrada com a variação da quantidade de corpos de prova foi de 84,66 MPa para a fabricação de um (1) CP. Valor esse 15% maior em relação aos resultados obtidos quando produzidos quatro (4) CPs simultaneamente. Para os lotes de 2, 3 e 4 corpos de prova houve pouca diferença entre os resultados obtidos para tensão de ruptura.

A variação do módulo de elasticidade entre um (1) CP e dois (2) CPs fabricados (maior e menor valores obtidos, respectivamente) foi de 18%. Semelhante aos resultados de tensão na ruptura, os resultados para 2, 3 e 4 CPs produzidos não foi evidenciado diferenças consideráveis considerando a média e o desvio padrão.

4.2.4.3 Método CRCR-O

Nas Figuras 4.20 e 4.21 são apresentados os resultados de tensão na ruptura e módulo de elasticidade, respectivamente, dos CPs fabricados utilizando o método CRCR-O e diferentes quantidades de CPs.

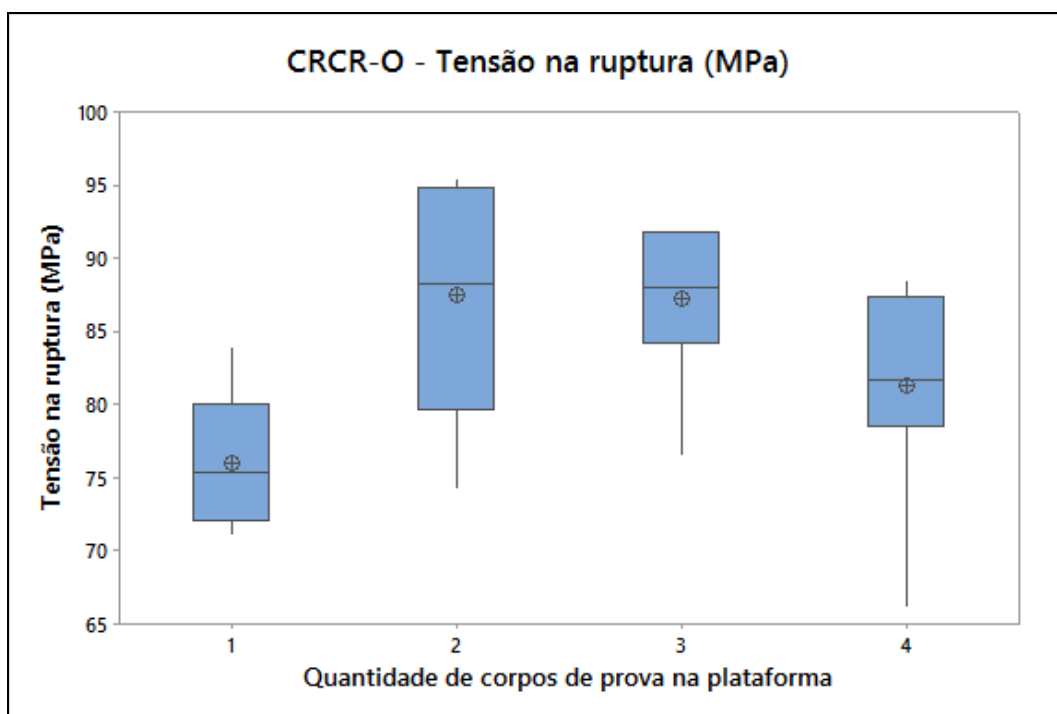


Figura 4.20 – Resultados da tensão na ruptura obtida nos ensaios de flexão dos CPs produzidos em lotes pelo método CRCR- O

Fonte: Autoria própria.

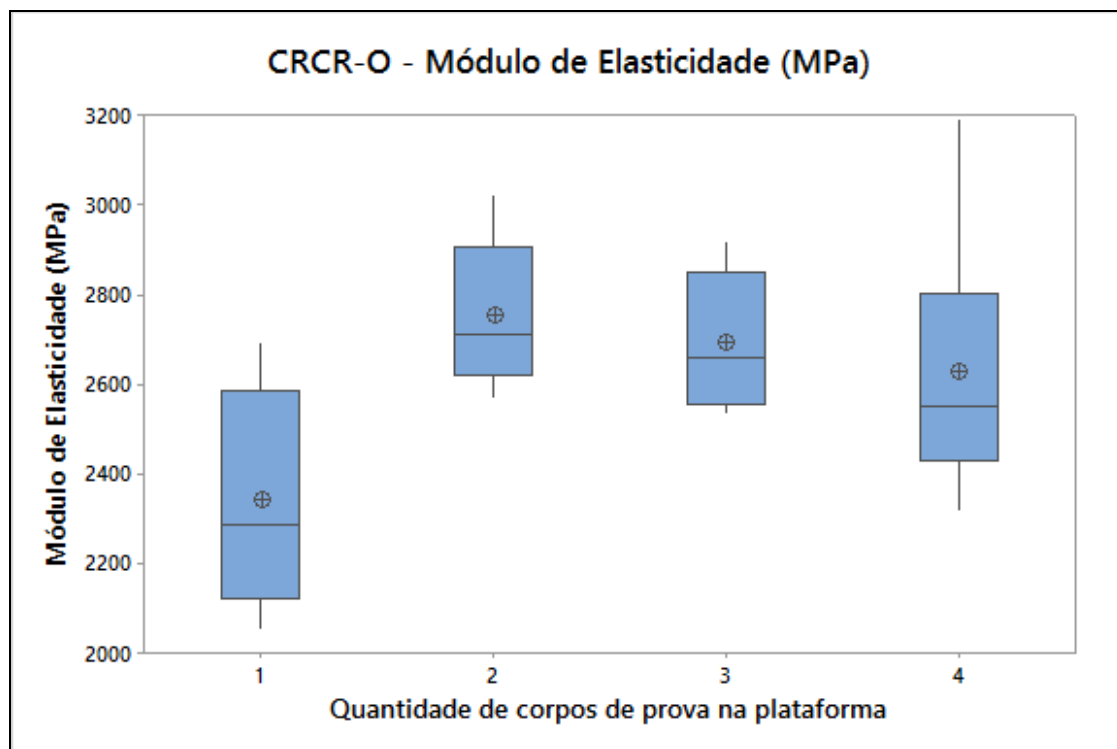


Figura 4.21 – Resultados do E obtido nos ensaios de flexão dos CPs produzidos em lotes pelo método CCRR-O

Fonte: Autoria própria.

Semelhante aos resultados do método CRCR-NO observa que tanto para a tensão na ruptura como no módulo de elasticidade, quando fabricado um (1) corpo na plataforma, têm-se valores menores do que quando fabricados em lotes. A variação máxima é aproximadamente de 14% e 15%, respectivamente. Já analisando os valores com dois (2), três (3) e quatro (4) corpos na plataforma, os resultados são comparáveis tanto para tensão na ruptura como para o módulo de elasticidade considerando a média e o desvio padrão de cada lote.

Observa-se também que a menor dispersão entre os resultados obtidos para a tensão na ruptura ocorreu quando fabricado apenas um (1) corpo de prova. Este fato, provavelmente, pode ser explicado pelo menor tempo de deposição entre as camadas quando comparado com maior quantidade de peças na plataforma.

Para o módulo de elasticidade a variação máxima encontrada quando comparado as diferentes quantidades de corpos de prova foi de 15%. A hipótese para o aumento da tensão na ruptura com o aumento de CPs fabricados simultaneamente, tem relação com a estratégia de deposição em cada camada, conforme já citado para o caso de tração, para este método, algumas camadas de

alguns CPs tem tempo de deposição de filamento entre camadas com o mesmo tempo de deposição de apenas um CP fabricado.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A impressora utilizada neste estudo não permitia o controle da temperatura de envelope. Este controle seria importante, pois reduziria as deformações nas peças fabricadas, causadas pelas variações de temperatura durante a deposição.

Outro ponto que poderia ter contribuído para a análise dos ensaios realizados seria avaliar a adesão entre as camadas dos corpos de prova antes dos ensaios mecânicos. Isto poderia ter sido feito seccionando os CPs (talvez num corte criogênico) e analisando a seção em um MEV. Isto seria importante para evitar as deformações dos filamentos durante os ensaios de tração e flexão.

A análise da influência da otimização foi realizada somente com um método (guloso), sendo que este é bastante básico e nem sempre dando o melhor resultado. O método CCRR-NO poderia ter sido utilizado, tornando a comparação entre os diferentes planejamentos de trajetória desse estudo mais completa. Outros métodos como a inserção do C mais próximo e do CRS pelo mais distante (sugerido por Volpato et al., 2013), poderia resultar em uma análise mais completa.

Por fim, não foi considerado nesse estudo o possível efeito de diferentes planejamentos de trajetória para geometrias mais complexas. Aumentando o número de contornos e de trechos de *raster*, o efeito da otimização poderia ser melhor analisado.

5.2 CONCLUSÕES

Esta pesquisa abordou a influência de diferentes planejamentos de trajetória (otimizações de trajetórias ociosas) nas propriedades mecânicas de corpos de prova

produzidos de forma individual e em lotes com o processo de manufatura aditiva por deposição de material.

Nos resultados dimensionais observou-se pouca variação quando comparados os planejamentos com e sem otimização, tanto para um corpo de prova quanto para a fabricação em lotes na plataforma.

Os resultados de tração e flexão mostraram que quando fabricado apenas um corpo de prova na plataforma (extraindo-se o efeito do número de peças), o método CCRR-O obteve melhores resultados nas propriedades mecânicas em relação aos outros planejamentos de trajetórias testados. Porém, considerando a média e o desvio padrão, observa-se pouca diferença entre os métodos.

Considerando o aumento do número de peças fabricadas simultaneamente, para os ensaios de tração constatou-se uma diminuição nos valores de tensão máxima com o aumento da quantidade de corpos de prova para os métodos CRCR-NO e CCRR-O. Já para o método CRCR-O não houve variações significativas. Nos ensaios de flexão foi observado para o método CCRR-O uma diminuição nos valores de tensão na ruptura com o aumento da quantidade de corpos de prova produzidos. Porém, para os outros dois métodos CRCR-NO e CRCR-O, o efeito mostrou-se o oposto.

Para os experimentos com interrupção da deposição do material no centro da peça por 17 e 65 segundos, nas camadas transversais, constatou-se uma grande diminuição (46% na resistência a flexão) nas propriedades mecânicas quando comparados aos sem interrupção. Também foram observadas imperfeições na região onde houve a interrupção do bico extrusor, fato esse que pode ser explicado pela união não uniforme dos filamentos adjacentes devido ao tempo prolongado de interrupção da extrusão. Na análise de microscopia eletrônica de varredura foi possível observar que as camadas não sofreram a adesão adequada, visto os resultados dos ensaios de tração e flexão.

Considerando a geometria e o método de otimização (guloso) testado, a influência nas propriedades mecânicas foi pequena. Um ponto a ser observado é que, se a otimização implicar em preencher os trechos de *raster* vizinhos com um tempo menor que o das estratégias sem otimização, isso não vai afetar negativamente as propriedades mecânicas. Esta observação se apoia nos

resultados observados com interrupção do bico extrusor durante a deposição de filamento.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a essa pesquisa são destacadas a seguir sugestões para trabalhos futuros.

- Realizar experimentos para geometrias mais complexas a fim de entender os efeitos de diferentes planejamentos de trajetória.
- Testar diferentes temperaturas de envelope da plataforma de impressão com o objetivo de entender a influência para diferentes planejamentos de trajetória.
- Realizar um estudo considerando outros tipos de otimizações de trajetória diferente do presente estudo.
- Realizar experimentos onde seja possível correlacionar o tempo de deposição entre cada camada, a temperatura do filamento depositado, a adesão entre camadas e entre filamentos adjacentes.

REFERÊNCIAS

- ASTM D 638-14 - **Standard test Methods for Tensile Properties of Plastics**, American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2014.
- ASTM D 790-10 - **Standard test Methods for flexural Properties Unreinforced and reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**, American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2010.
- AHN, S.H.; MONTERO, M.; ODELL, Dan.; ROUNDY, S.; Wright, P.K. **Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS**. Rapid Prototyping Journal, v. 8, Iss. 4, p. 248 – 257, 2002.
- ALBUQUERQUE, Alberto J. **Optimización y Caracterización de Piezas de PLA Fabricadas Mediante Técnicas Aditivas**. 2014, 138p. Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid, Madri, 2014.
- BELLEHUMEUR, C. T.; LI, L.; SUN, Q.; GU, P. **Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process**. Journal of Manufacturing Processes, v. 6, n. 2, p. 170-178, 2004.
- BELLINI, A. **Fused Deposition of Ceramics: A Comprehensive Experimental, Analytical and Computational Study of Material Behavior, Fabrication Process and Equipment Design**. 2002. Ph.D. Dissertation, Philadelphia, USA: Drexel University, 2002.
- BELLINI, A.; GÜÇERI, S. **Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling**. Rapid Prototyping Journal, v. 9, n. 4, p.252-264, 2003.
- Bratl, M.; **Customizable Personal Manufacturing**. Master Thesis, Fachhochschule Der Wirtschaft , Hannover, 2013.
- BRITO, G. F.; AGRAWAL, P.; ARAÚJO E. M.; MELO, T. J. A. de. **Tenacificação do Poli(Ácido Lático) pela Adição do Terpolímero (Etileno/Acrilato de Metila/Metacrilato de Glicidila)**. Polímeros [online], v. 22, n. 2, p. 164-169, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282012005000025>>. Acesso em: 04 mar. 2017.

CASTELINO, K.; D'SOUZA, R.; WRIGHT, P.K. **Toolpath optimization for minimizing airtime during machining.** Journal of Manufacturing Systems, v. 22, n. 3, p. 173–180, 2003.

CHACON, J.M.; CAMINERO, M.A.; GARCIA-PLAZA, E.; NÚÑEZ, P.J. **Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection.** Materials & Design, v. 124, p. 143-157, 2017.

DING, D.; PAN, Z.S.; CUIURI, D.; LI, H. **A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 73, p. 173-183, 2014.

DURGUN, I.; ERTAN, R. **Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost.** Rapid Prototyping Journal, v. 20, p. 228 – 235, 2014.

FAES, M.; FERRARIS, E.; MOENS, D. **Influence of inter-layer cooling time on the quase-static properties of ABS components produced via Fused Deposition Modeling.** In 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 2016.

FOGGIATTO, J. A. **Utilização do Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) na Fabricação Rápida de Insetos para Injeção de Termoplásticos.** 2005, 155p. Tese de Doutorado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

GURRALA, P. K.; REGALLA, S. P. **Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling: This paper studies how coalescence of filaments contributes to the strength of final FDM part.** Virtual and Physical Prototyping, v. 9, n. 3, p. 141-149, 2014.

HOSSAIN, M. S.; RAMOS, J.; ESPALIN, D.; PEREZ, M.; WICKER, R. **Improving Tensile Mechanical Properties of FDM-Manufactured Specimens via Modifying Build Parameters.** International Solid Freeform Fabrication Symposium: An Additive Manufacturing Conference. Austin, p. 380-392, 2013.

ISO/ASTM 52900 - **Additive manufacturing - General principles - Terminology,** 2015.

JIN, G.Q.; Li, W. D.; GAO, L.; POPPLEWELL, K. **A hybrid and adaptive tool-path generation approach of rapid prototyping and manufacturing for biomedical models.** Computer Industry, v. 64, p. 336-349, 2013.

JIN, Y.; HE, YONG.; FU, J.Z.; GAN, W.F.; Lin, Z.W. **Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology,** Additive manufacturing. v. 1- 4, p. 32-47, 2014.

JOHNSON, W.M.; ROWELL, M.; DEASON, B.; EUBANKS, M. **Comparative evaluation of an open-source FDM system.** Rapid Prototyping Journal, v. 20, iss 3, p. 205 – 214, 2014.

KOLAHAN, F.; LIANG, M. **Optimization of hole-making operations: a tabu-search approach.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 40, p. 1735-1753, 2000.

LI, L.; SUN, Q.; BELLEHUMEUR, C.; GU, P. **Investigation of bond formation in FDM process.** In: Solid Freeform Fabrication Symp.Austin, TX, p. 1-8, 2002.

MUTHUI, Z. W.; NDERITU, F. G.; HUSSEIN, S. A.; KAMWERU, P. K. G.; NGUMBU, R. **Determination of the Glass Transition Temperature and Modulus of PLA Films Using Dynamic Mechanical Analysis at $c^{\circ} 50$ and Amplitude of $10 \mu\text{m}$.** Asian Journal of Natural & Applied Sciences, v. 3, 2014.

SOOD, ANOOP. K.; OHDAR, RAJ. K.; MAHAPATRA, SIBA. S. **Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement.** Journal of Advanced Research, v. 3, p. 81-90, 2011.

SUN, Q.; RIZVI, G.; BELLEHUMEUR, C.; GU, P. **Experimental Study of the Cooling Characteristics of Polymer Filaments in FDM and Impact on the Mesostructures and Properties of Prototypes.** In: Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, ago 2003.

SUN, Q.; RIZVI, G.M.; GU, P.; BELLEHUMEUR C.T. **Effect of processing conditions on the bounding quality of FMD polymer filaments.** Rapid Prototyping Journal, v. 14, p. 72-80, 2008.

VOLPATO, N.; FOGGIATTO, J.A.; LIMA, M.V.A. de.; MANCZAK, T. **Uma Otimização da Estratégia de Preenchimento do Processo FDM.** In: 4^o Congresso

Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Estância de São Pedro. Anais do Congresso COBEF. São Paulo: ABCM, v. 1, 2007.

VOLPATO, N.; AHRENS, C. H.; FERREIRA, C. V.; GÜNTHER, P.; CARVALHO, J. de.; SANTOS, J. R. L. dos.; SILVA, J. V. L. da. **Prototipagem Rápida: Tecnologia e Aplicações**. Primeira Edição. São Paulo: Blücher, 2007.

VOLPATO, N., FOGGIATTO, J. A.; LIMA, M. V. A. de. **Modelo de Fatiamento Adaptativo em Processo de Prototipagem Rápida**. Congresso de Engenharia de Fabricação COBEF. Abril, Minas Gerais, Brazil, 2009.

VOLPATO, N.; NAKASHIMA, R.T.; GALVÃO, L.C.; BARBOZA, A.O.; BENEVIDES, P.F.; NUNES, L.F. **Reducing repositioning distances in fused deposition-based processes using optimization algorithms**. In: **High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping**, Leiria, Portugal, 1-5 October, 2013.

VOLPATO, N.; GALVAO, L.C.; NUNES, L.F.; SCANAVINI, L.G. **Combining Heuristics for Tool-path Optimization in Additive Manufacturing**. In: **Computer-Aided Production Engineering - CAPE Conference**, Edinburgh. Proceedings of the 23rd CAPE Conference. Edinburgh: University of Edinburgh, v. 1, 2015.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. de. **Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D**. In: VOLPATO, N. (ed.), **Manufatura Aditiva – Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017, 400p.

VOLPATO, N.; SILVA, J.V.L da. **Planejamentos de processo para tecnologias de AM**. In: VOLPATO, N. (ed.), **Manufatura Aditiva – Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017.

WOEGINGER, G.J. **Exact Algorithms for NP-Hard Problems: A Survey, Combinatorial Optimization**. Lecture notes in computer science, v. 2570, p. 185–207, 2003.

APÊNDICE

Apêndice A: resultados dos ensaios mecânicos (tração e flexão)

Tabela A.1 – Resultado dos ensaios mecânicos para corpos de prova de tração

Ensaio de Tração					
		Tensão Máxima (Mpa)		Módulo de Elasticidade (Mpa)	
Método	Quantidade de peças na plataforma	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
CRCR-NO	1	48,76	2,61	540,81	55,40
	2	40,60	5,14	472,43	70,69
	3	41,00	5,23	406,69	62,10
	4	43,23	3,91	495,08	54,18
CCRR-O	1	50,40	0,57	625,71	8,66
	2	41,41	2,47	529,91	11,40
	3	48,71	1,70	625,52	32,28
	4	40,08	5,78	565,00	54,35
CRCR-O	1	46,92	2,05	628,32	14,93
	2	48,47	2,42	598,42	48,46
	3	47,93	5,72	549,64	59,84
	4	49,24	3,73	603,70	24,53
	P17	36,15	0,66	529,58	8,72
	P65	31,50	0,59	456,39	40,59

Tabela A.2 – Resultado dos ensaios mecânicos para corpos de prova de flexão

Ensaio de Flexão					
Método	Quantidade de peças na plataforma	Tensão na ruptura (Mpa)		Módulo de Elasticidade (Mpa)	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
CRCR-NO	1	78,79	1,27	2664,90	155,11
	2	88,53	4,60	2771,98	167,50
	3	83,00	7,60	2605,09	273,90
	4	82,54	6,14	2683,27	206,67
CCRR-O	1	84,66	5,72	2744,59	176,18
	2	74,73	5,07	2254,22	200,95
	3	76,53	7,66	2418,35	242,04
	4	72,29	6,21	2482,10	310,67
CRCR-O	1	75,87	4,93	2338,17	250,55
	2	87,46	8,57	2751,11	171,12
	3	87,16	5,68	2693,19	158,00
	4	81,17	7,23	2627,42	282,97
	P17	57,61	3,07	2768,08	82,72
	P65	42,49	4,87	2431,55	143,93