

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

LUCAS GOMES CAMARGO

DESENVOLVIMENTO DE MODELO CINEMÁTICO DOS CENTROS DE USINAGEM
CNC PARA PREVISÃO DO TEMPO DE FRESAMENTO DE FORMAS COMPLEXAS
COM INTERPOLAÇÃO LINEAR.

Joinville

2017

LUCAS GOMES CAMARGO

DESENVOLVIMENTO DE MODELO CINEMÁTICO DOS CENTROS DE USINAGEM
CNC PARA PREVISÃO DO TEMPO DE FRESAMENTO DE FORMAS COMPLEXAS
COM INTERPOLAÇÃO LINEAR.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, no curso de Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Fagali de Souza

Joinville

2017

DESENVOLVIMENTO DE MODELO CINEMÁTICO DOS CENTROS DE USINAGEM
CNC PARA PREVISÃO DO TEMPO DE FRESAMENTO DE FORMAS COMPLEXAS
COM INTERPOLAÇÃO LINEAR.

LUCAS GOMES CAMARGO

Esta monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 01 de dezembro de 2017

Banca Examinadora:

Dr. Adriano Fagali de Souza
Presidente / Orientador

Dr. Thiago Antonio Fiorentin
Membro

Dr. Carlos Mauricio Sacchelli
Membro

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelos dons a mim concedidos, por ter iluminado meus caminhos e me fortificado nos momentos mais difíceis.

À minha família, por todo o amor dedicado à mim, apoio e confiança nas minhas decisões, e pelos melhores ensinamentos e exemplos de vida que eu poderia ter tido.

Aos colegas de faculdade, em especial ao Maikol e ao Cleverson, pela grande parceria estabelecida nos estudos e fora deles. Grande parte dos resultados que alcancei na graduação foi devido ao nosso trabalho conjunto.

Aos amigos, de Joinville e do Rio Grande do Sul, que souberam me apoiar sem medidas e entender minhas ausências, me fortalecendo nesta caminhada.

Ao meu orientador professor Dr. Adriano Fagali de Souza, por todos os ensinamentos acadêmicos e profissionais e pelas diversas oportunidades de atuar com pesquisas.

Aos colegas do GPCAM (Grupo de Pesquisa em Manufatura Auxiliada por Computador), por todo o conhecimento e amizade compartilhados durante esses anos.

Ao Thiago e Ivan da Tecnomotriz Ferramentaria, pela oportunidade de trabalho, por acreditarem em mim e cederem as instalações da empresa para realização deste trabalho, sem as quais não seria possível realizá-lo.

À todos os colaboradores da Tecnomotriz Ferramentaria, em especial ao Luis, Airton, Paulo, Jeferson e Julinho, pelos grandes ensinamentos a mim transmitidos, pela paciência durante o meu aprendizado e por todo o apoio imprescindível na realização deste trabalho.

Às entidades UFSC, CAPES, CNPq, FAPESC, e demais empresas parceiras do GPCAM, pelo apoio durante a minha graduação e desenvolvimento deste trabalho.

À todos os demais colegas, professores e funcionários que dê alguma forma contribuíram na minha formação.

RESUMO

O processo de usinagem por fresamento é altamente empregado na produção de peças para o setor aeronáutico, automotivo e de moldes e matrizes. Quando este processo é aplicado para a fabricação de formas complexas, os centros de usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado) aplicados nestas operações apresentam limitações na velocidade de movimentação que prejudicam a produtividade e o planejamento da produção. Conhecer o tempo real de fresamento poderia resultar em um grande aumento da eficiência da produção e melhorar a análise de custos do processo. Diversos autores desenvolveram métodos para previsão do tempo de fresamento. Porém, nenhum método abordou todos os aspectos da trajetória com segmentos lineares (combinação dos deslocamentos por eixo em segmentos consecutivos) e do centro de usinagem CNC (limitações cinemáticas de processamento) de forma aplicável à indústria. Desta forma, este trabalho visa desenvolver um modelo cinemático para fresamento de formas complexas que aborde todos os aspectos citados. Além disso, o modelo desenvolvido é ajustado através de experimentos simples, sem a necessidade de sensoriamento do centro de usinagem CNC. Testes de validação com geometrias complexas indicam a eficácia do modelo, sendo que o mesmo apresentou erro relativo médio de 15,21%. Este valor representa um aumento da precisão de quatro vezes em relação aos modelos anteriores encontrados na literatura.

Palavras-chave: Modelo cinemático. Fresamento de formas complexas. Tempo real de usinagem. Centro de usinagem CNC.

ABSTRACT

The milling process is highly used in the production of parts for the aeronautics, automotive and mold and die sectors. When this process is applied to the manufacturing of complex shapes, the CNC (Computer Numerical Control) machining centers applied in these operations shows some limitations in the speed of movement that might affect the productivity and production planning. Knowing the actual milling time could result in a highly increased production efficiency and improved process cost analysis. Several authors have developed methods to predicting the milling time. However, none method has addressed all aspects of the trajectory with linear segments (combination of axis displacement in consecutive segments) and the CNC machining center (kinematic and processing constraints) applied on the industry. In this way, this work aims to develop a kinematic model for milling complex shapes that approach all the mentioned aspects. In addition, the developed model is adjusted through simple experiments, without the need of monitoring the CNC machining center. Validation tests with complex geometries indicate the effectiveness of the model, because it presented average relative error of 15.21%. This value represents a fourfold increase in accuracy over previous models found in the literature.

Keywords: Kinematic model. Milling of complex shapes. Real machining time. CNC machining center.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Movimentações recorrentes durante o fresamento.....	19
Figura 2 - Sistema de acionamento dos eixos por servomotores e esferas recirculantes.....	20
Figura 3. Sistema de comando CNC simplificado.....	21
Figura 4 – Sistema de controle em malha fechada simplificado.....	22
Figura 5 – Composição vetorial tridimensional do movimento.....	24
Figura 6 – Procedimento geral de trabalho em sistemas CAM.....	26
Figura 7 – Etapas do pós-processamento para geração de programas CNC.....	28
Figura 8 – Cálculo dos Cutter Contact na banda de tolerância.....	29
Figura 9 – Conversão entre os pontos CC e CL.....	30
Figura 10 – Segmentos lineares da trajetória.....	31
Figura 11 - Descrição cinemática para segmentos lineares.....	34
Figura 12 - Modelo de movimentação em arco para a região de transição.....	37
Figura 13 – Movimento polinomial para região de transição.....	38
Figura 14 – Possível comportamento cinemático na região de transição.....	39
Figura 15 – Composição vetorial tridimensional do movimento com grande diferença no valor do deslocamento.....	45
Figura 16 – Comparação entre métodos de previsão de tempo de fresamento para centros de usinagem convencionais.....	46
Figura 17 – Centro de usinagem CNC HSM HERMLE C1200V.....	50
Figura 18 – Eixos de movimentação da HERMLE C1200V.....	50
Figura 19 – Esquema ilustrativo do experimento 1 para situação uniaxial (a) e biaxial (b) (dimensões em mm).....	53
Figura 20 – Esquema ilustrativo do experimento 2 com variação de deslocamento no eixo Z.....	54

Figura 21 – Geometria representativa de superfícies complexas utilizada para validação do modelo proposto.....	56
Figura 22 - Trajetórias em passes paralelos calculadas em 45° com o eixo X.....	57
Figura 23 – Ilustração do TES utilizado para quantificar o tempo de transição entre dois segmentos.....	59
Figura 24 – Comportamento real e comportamento assumido da velocidade de avanço para o equacionamento do CASO 1.....	61
Figura 25 – Comportamento do TES no CASO 2A para o eixo Y.....	64
Figura 26 - Comportamento do TES no CASO 2A para os eixos X e Z.....	65
Figura 27 – Possível comportamento da velocidade de avanço para o CASO 2A....	66
Figura 28 – Comportamento do coeficiente angular do CASO 2A no eixo Y.....	67
Figura 29 - Comportamento do coeficiente linear do CASO 2A no eixo Y.....	68
Figura 30 - Comportamento do coeficiente angular do CASO 2A no eixo X/Z.....	68
Figura 31 - Comportamento do coeficiente linear do CASO 2A no eixo X/Z.....	69
Figura 32 – Comportamento do TES no CASO 2B para S1=0,2mm.....	71
Figura 33 - Comportamento do TES no CASO 2B para S1=0,15mm.....	71
Figura 34 - Comportamento do TES no CASO 2B para S1=0,1mm.....	72
Figura 35 – Coeficiente angular de TES para CASO 2B.....	74
Figura 36 - Coeficiente linear de TES para CASO 2B e S1=0,2mm.....	75
Figura 37 - Coeficiente linear de TES para CASO 2B e S1=0,15mm.....	75
Figura 38 - Coeficiente linear de TES para CASO 2B e S1=0,1mm.....	76
Figura 39 - Coeficiente angular do coeficiente linear de TES para CASO 2B.....	77
Figura 40 - Coeficiente linear do coeficiente linear de TES para CASO 2B.....	77
Figura 41 - Comportamento de TES para o CASO 3.....	79
Figura 42 – Esquema de funcionamento do modelo proposto.....	80
Figura 43 – Comparativo entre os modelos analisados nos testes de validação.....	82
Figura 44 - Comparativo do erro relativo apresentado pelos modelos de previsão nos testes de validação.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no cálculo das trajetórias de validação.....	57
Tabela 2 – Dados do CASO 2A para o eixo Y.....	63
Tabela 3 - Dados do CASO 2A para o eixos X e Z.....	63
Tabela 4 – Equações geradas em função de S1 para o CASO 2A no eixo Y.....	66
Tabela 5 - Equações geradas em função de S1 para o CASO 2A nos eixos X e Z..	67
Tabela 6 – Equações de TES para o CASO 2B.....	72
Tabela 7 – Média dos coeficientes angulares em função de S1.....	73
Tabela 8 – Equações para o coeficiente linear de TES do CASO 2B.....	76
Tabela 9 – Resultados dos testes de validação: valores reais e previstos pelos diferentes modelos.....	81
Tabela 10 – Dados do experimento 1 para tamanho do deslocamento constante....	89
Tabela 11 - Dados do experimento 1 para tamanho do deslocamento variável.....	90
Tabela 12 - Dados do experimento 2 para o eixo Y.....	91
Tabela 13 - Dados do experimento 2 para o eixo X e Z.....	97
Tabela 14 - Dados do experimento 3.....	102

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

CAD – *Computer Aided Design* (Projeto Auxiliado por Computador)

CAM – *Computer Aided Manufacturing* (Manufatura Auxiliada por Computador)

CC – *Cutter Contact* (Ponto de Contato Ferramenta-Peça)

CL – *Cutter Location* (Ponto de Localização da Referência da Ferramenta)

EL – Eixo Limitante

ENL – Eixo Não Limitante

MRT – *Machine Response Time* (Tempo de Resposta da Máquina)

TES – Tempo de Execução de Segmento

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{a}	Vetor axial da ferramenta	
\vec{CC}	Vetor Cutter Contact	
\vec{CL}	Vetor Cutter Location	
\vec{n}	Vetor normal à superfície	
\vec{X}	Eixo x positivo	
\vec{Y}	Eixo y positivo	
\vec{Z}	Eixo z positivo	
T_e	Tolerância externa	[mm]
T_i	Tolerância interna	[mm]
$A(t)$	Aceleração em função do tempo	[mm/min ²]
$A_{max,i}$	Aceleração máxima no eixo i	[mm/min ²]
d	Diâmetro da ferramenta	[mm]
e	Tolerância especificada da máquina-ferramenta	[mm]
EL	Eixo limitante	
ENL	Eixo não limitante	
F	Velocidade de avanço	[mm/min]
F_{prog}	Velocidade de avanço programada	[mm/min]
$F_{s,i}$	Velocidade de avanço do segmento i	[mm/min]
$F_{t,i}$	Velocidade de avanço da transição i	[mm/min]
f_z	Avanço por aresta	[mm/aresta]
$J(t)$	Jerk em função do tempo	[mm/min ³]
$J_{max,i}$	Jerk máximo no eixo i	[mm/min ³]
l	Tamanho total do segmento	[mm]
l_{CC}	Comprimento do segmento entre Cutter Contact	[mm]
l_{CL}	Comprimento do segmento entre Cutter Location	[mm]
l_i	Tamanho do segmento i	[mm]
l_{lim}	Tamanho do segmento limitante	[mm]
l_{med}	Tamanho de segmento (Módulo) médio	[mm]
l_{min}	Tamanho de segmento mínimo para equacionamento com MRT	[mm]
$l_{s,i}$	Tamanho da região do segmento i	[mm]

$l_{t,i}$	Tamanho da região de transição i	[mm]
l_x	Deslocamento no eixo X	[mm]
l_y	Deslocamento no eixo Y	[mm]
l_z	Deslocamento no eixo Z	[mm]
M	Ponto de início da região de transição	
N	Ponto de final da região de transição	
n	Rotação da ferramenta	[RPM]
na	Número de arestas na ferramenta	
P_i	Ponto da trajetória do bloco i	
Q	Ponto central da região de transição	
R	Raio de curvatura da superfície	[mm]
r_i	Raio do arco da região de transição i	[mm]
S	Deslocamento em determinado eixo	[mm]
S_1	Maior valor de deslocamento do eixo limitante para segmentos em análise	[mm]
S_2	Menor valor de deslocamento do eixo limitante para segmentos em análise	[mm]
t	Tempo	[min]
TES	Tempo de execução de segmento	[s]
TES_1	Tempo de execução do deslocamento 1	[s]
TES_2	Tempo de execução do deslocamento 2	[s]
TES_{final}	Tempo total de fresamento	[s]
TES_i	i -ésimo tempo de execução de segmento	[s]
T_i	Tempo de cada fase	[min]
$T_{s,i}$	Tempo do segmento i	[mm/min]
$T_{t,i}$	Tempo da transição i	[mm/min]
$V(t)$	Velocidade em função do tempo	[mm/min]
V_c	Velocidade de corte	[mm/s]
V_F	Velocidade de avanço programada no eixo especificado	[mm/min]
V_j	Velocidade de avanço limitada pelo jerk máximo	[mm/min]
V_t	Velocidade calculada na transição	[mm/min]
$X(t)$	Posição em função do tempo	[mm]
α_i	Ângulo entre segmentos i	[°]
ρ	Raio da ponta da ferramenta	[mm]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos	15
1.1.1. Objetivo geral	15
1.1.2. Objetivos específicos.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Processo de usinagem por fresamento em centros de usinagem CNC	17
2.1.1. Usinagem por fresamento	17
2.1.2. Centros de usinagem CNC.....	19
2.2. Sistemas CAM para fresamento de formas complexas.....	24
2.3. Método básico de cálculo de trajetória no fresamento	29
2.4. Limitações na movimentação de centros de usinagem CNC em função da trajetória	32
2.4.1. Limitações cinemáticas dos acionamentos	33
2.4.2. Limitações de processamento do comando CNC	40
2.5. Métodos de previsão de tempo de fresamento por segmentos lineares (G01) ..	42
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	49
3.1. Avaliação da influência do deslocamento em cada eixo no TES em segmentos consecutivos sem alteração de direção ou sentido de movimentação (Experimento 1)	51
3.2. Avaliação da influência do deslocamento em cada eixo no TES em segmentos consecutivos com alteração na direção de movimentação e sentido constante (Experimento 2).....	53
3.3. Avaliação da alteração do sentido de movimentação no TES em função do tamanho do deslocamento (Experimento 3).....	55
3.4. Execução de programas CNC para fresamento de formas complexas calculadas via sistema CAM para validação do modelo.....	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	58

4.1. Análise do comportamento do TES em função do tamanho do deslocamento em cada eixo para movimentações com direção e sentido constantes (CASO 1)	59
4.2. Análise do comportamento do TES em movimentações com direção variável e sentido constante (CASO 2).....	61
4.2.1. Investigação do comportamento e equacionamento do CASO 2A.....	62
4.2.2. Investigação do comportamento e equacionamento do CASO 2B.....	70
4.3. Análise do comportamento do TES em movimentações com alteração do sentido de movimentação (CASO 3)	78
4.4. Esquema de funcionamento do modelo proposto através dos casos apresentados.....	80
4.5. Testes de validação do modelo proposto e análise de seus resultados perante modelo anterior de Coelho et al. (2009) e simulação oferecida pelo CAM.....	81
5. CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS.....	87
APÊNDICE A - Resultados dos experimentos e tratamento de dados.....	89

1. INTRODUÇÃO

O fresamento em centros de usinagem de Comando Numérico Computadorizado (CNC) é o processo de fabricação mais utilizado em peças prismáticas com formas complexas. Estas geometrias estão presentes no setor automotivo, aeroespacial e de moldes e matrizes, e se caracterizam pelas elevadas exigências quanto a suas tolerâncias geométricas e acabamento superficial.

Boujelbene et al. (2004) afirmam que 30% do custo de um produto polimérico injetado é relacionado à produção do molde de injeção. Fallbohmer et al. (1996) indicam que o tempo gasto com usinagem pode ultrapassar 50% do tempo total de produção dos moldes de injeção, chegando a 60% para matrizes de forjamento. Esses trabalhos demonstram a relevância do processo de usinagem por fresamento quanto ao tempo e custo de produção deste setor.

Os baixos valores de tolerância requeridos associados às características das superfícies dos produtos (raios de curvatura reduzidos) geram trajetórias com pequenos segmentos. Neste caso, a velocidade de avanço programada não é atingida por limitações do centro de usinagem. Este fato gera grandes oscilações na velocidade de avanço durante a usinagem de formas complexas, mesmo em máquinas de Usinagem em Altas Velocidades (HSM - High Speed Machining), o que aumenta o tempo real de usinagem e prejudica o acabamento superficial da peça (SOUZA; COELHO, 2006).

Os métodos de previsão de tempo de fresamento existentes não conseguem descrever completamente o comportamento cinemático das operações considerando todas as variáveis do programa CNC (combinação dos deslocamentos por eixo em segmentos consecutivos) e do centro de usinagem (características cinemáticas e capacidade de processamento). Além disso, a maioria dos modelos necessita de parâmetros obtidos pelo monitoramento dos dados da interpolação diretamente do CNC, ou dados da máquina que não são normalmente informados pelo fabricante como acelerações e jerks (capacidade de variação da aceleração) máximos (COELHO et al., 2009; PESSOLES; LANDON; RUBIO, 2009; TULSYAN, 2014).

Desta forma, buscou-se neste trabalho desenvolver um modelo de previsão do tempo de fresamento três eixos em função da combinação dos deslocamentos por eixo em segmentos consecutivos no qual os parâmetros sejam obtidos através de experimentos simples. O método proposto tem maior aplicabilidade do que os já existentes por não necessitar de parâmetros de movimentação da máquina ou da realização do monitoramento dos dados cinemáticos diretamente do CNC.

Esta proposta segue o modelo desenvolvido por Coelho et al. (2009), no qual o parâmetro base chamado de MRT (*Machine Response Time* – Tempo de Resposta da Máquina) é obtido por experimentos de execução simples. Porém, na atual proposta de modelo considera-se, além da limitação de processamento, as limitações cinemáticas que não são consideradas em Coelho et al. (2009). Sendo assim, o atual trabalho caracteriza-se como uma progressão do modelo de Coelho et al. (2009) para máquinas de alta velocidade de avanço.

Para o desenvolvimento do modelo, foram realizados experimentos com a variação dos valores dos deslocamentos para segmentos consecutivos, bem como com a inversão no sentido de movimentação dos eixos. O tempo de execução de cada teste foi obtido do monitor do CNC e utilizado para mapear o comportamento do tempo de execução de cada segmento. Foi desenvolvido um modelo matemático para descrição dos dados experimentais, o qual foi validado na previsão do tempo real de fresamento.

1.1. Objetivos

1.1.1. *Objetivo geral*

Desenvolver um modelo cinemático dos centros de usinagem CNC para previsão do tempo de fresamento de formas complexas com interpolação linear.

1.1.2. *Objetivos específicos*

- Avaliar a influência do deslocamento em cada eixo no tempo de execução de segmentos consecutivos com e sem alteração da direção de movimentação para sentido constante;

- Investigar o comportamento do tempo de execução de cada segmento com a alteração do sentido de movimentação;
- Equacionar o tempo de execução de cada segmento segundo cada caso identificado e propor o método para previsão do tempo de fresamento;
- Validar o modelo proposto através de testes com programas CNC para fresamento de formas complexas gerados em sistema CAM para uma operação de acabamento;
- Comparar o desempenho obtido pelo modelo proposto em relação aos tempos previstos pelo sistema CAM e pelo modelo anterior (Coelho et al., 2009).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de fabricação de peças por fresamento em centros de usinagem CNC envolve vários aspectos e o uso de diversas tecnologias. O estudo do comportamento cinemático deste processo exige o conhecimento de todos os fatores que o influenciam e as limitações existentes atualmente. Neste âmbito, os principais aspectos para o desenvolvimento deste trabalho são abordados neste capítulo.

2.1. Processo de usinagem por fresamento em centros de usinagem CNC

Segundo Santos e Sales (2007), o processo de usinagem é caracterizado pela transformação da matéria-prima em uma geometria definida através da remoção de material por cisalhamento na forma de cavaco. Dentre os processos de fabricação, a usinagem se destaca pela quantidade de métodos que podem empregá-la e por sua presença significativa na cadeia produtiva de bens manufaturados.

Diferentes tecnologias podem ser empregadas para remover material no processo de usinagem. Na usinagem convencional, a remoção de material ocorre pela ação de uma ferramenta de corte com geometria definida. Esta categoria engloba diversos processos de fabricação muito difundidos como furação, torneamento, fresamento, serramento, dentre outros (SOUZA; ULBRICH, 2013; SANTOS; SALES, 2007).

2.1.1. Usinagem por fresamento

Segundo Souza e Ulbrich (2013), o fresamento é o processo de usinagem mais complexo em função das movimentações que pode realizar. Neste caso, a ferramenta de corte (fresa) pode se mover removendo material em três eixos

simultâneos (XYZ) ou até cinco eixos em máquinas mais modernas (três eixos cartesianos + dois eixos rotativos). Devido a este fato, muitas vezes a geração da trajetória da ferramenta neste caso requer a utilização de sistemas CAM, como será apresentado em itens posteriores.

Pelas características apresentadas, o fresamento pode ser considerado como o processo de fabricação mais versátil e indicado para as geometrias mais complexas. Durante o processo de usinagem, são identificados diversos movimentos relativos entre a peça e a ferramenta que são necessários à remoção de material. Por convenção, estes movimentos são sempre realizados pela ferramenta com a peça fixa na mesa da máquina.

O movimento em estudo neste trabalho é o movimento de avanço. Este ocorre entre a ferramenta e a peça para provocar uma remoção contínua ou repetida do cavaco durante as rotações da ferramenta. A velocidade de avanço (F) é a velocidade resultante desta movimentação, sendo definida pela rotação da ferramenta (n), número de arestas de corte da ferramenta (n_a) e avanço por aresta (f_z), a qual é apresentada na Equação 1 (SANTOS; SALES, 2007).

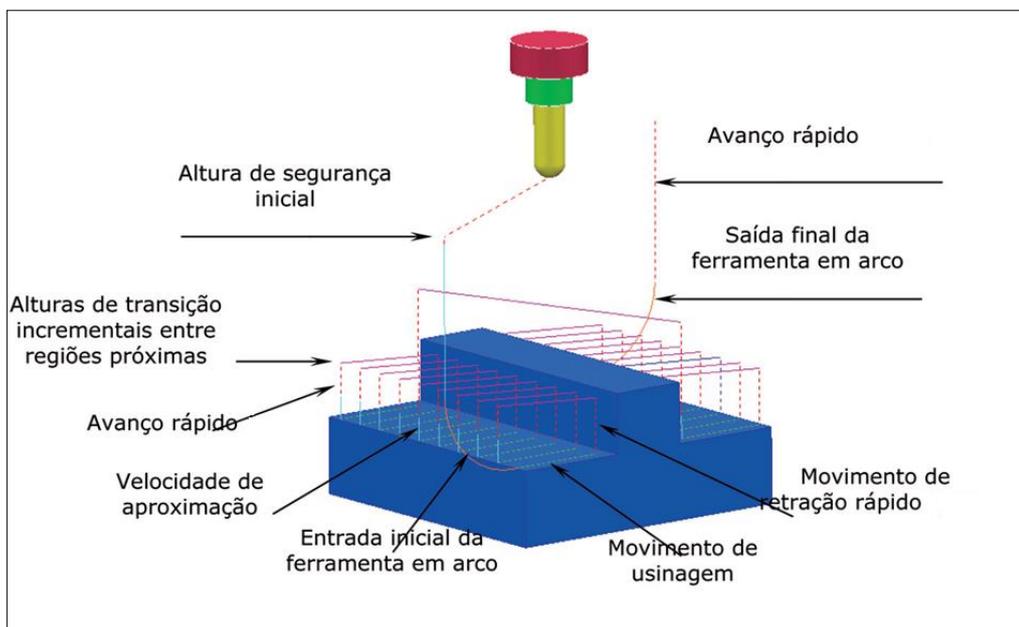
$$F=f_z \times n_a \times n \quad (1)$$

O avanço por aresta é a espessura de material (cavaco) que cada aresta de corte da ferramenta irá remover. Faixas para avanço por aresta são definidas pelos fabricantes de ferramenta, mas o seu valor também está diretamente relacionado à qualidade superficial desejada.

Com isso, a partir da ferramenta, da rotação e do avanço por aresta definida calcula-se a velocidade de avanço. Esta é a velocidade programada para a ferramenta percorrer a trajetória especificada e dela depende diretamente o tempo de usinagem da operação.

A Figura 1 apresenta as diferentes movimentações realizadas durante o processo de usinagem. Ainda podem ser realizadas movimentações de correção para compensar alterações do processo como desgaste da ferramenta, dilatações térmicas, dentre outras.

Figura 1 - Movimentações recorrentes durante o fresamento.



Fonte: Adaptado de Souza e Ulbrich (2013, p.265).

Cada um dos processos de fabricação por usinagem citado é realizado em uma máquina-ferramenta específica. No caso da usinagem por fresamento, a máquina ferramenta que realiza as operações é denominada fresadora e apresenta algumas variações. O centro de usinagem CNC é o modelo mais desenvolvido e o foco deste estudo em questão.

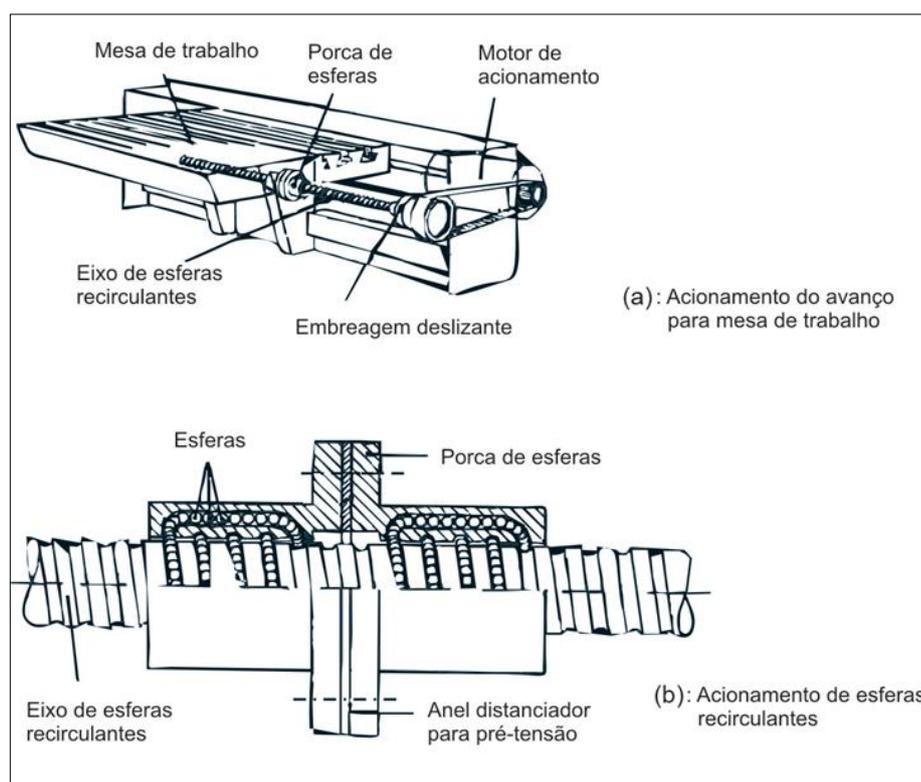
2.1.2. Centros de usinagem CNC

Em todos os modelos de máquina ferramenta, o objetivo é realizar a movimentação da fresa contra a peça removendo material por sua rotação. Para isso, os componentes básicos são a mesa de trabalho e o eixo-árvore. A mesa de trabalho é o local onde a peça a ser usinada é fixada. O eixo-árvore é o local onde a ferramenta é fixada sendo responsável por fornecer a rotação da mesma.

No centro de usinagem CNC, a movimentação da ferramenta é realizada por servomotores e as definições de rotação e acionamentos dos eixos, bem como funções auxiliares, são comandadas por um CNC. Para movimentar ferramenta em três eixos (XYZ), por exemplo, deve haver uma composição de movimentos dos três eixos simultaneamente.

O método mais comum para acionamento dos eixos é através de servomotores acoplados a sistemas de esferas recirculantes (Figura 2) que transformam movimentação angular em linear (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Figura 2 - Sistema de acionamento dos eixos por servomotores e esferas recirculantes.



Fonte: Souza e Ulbrich (2013, p.215).

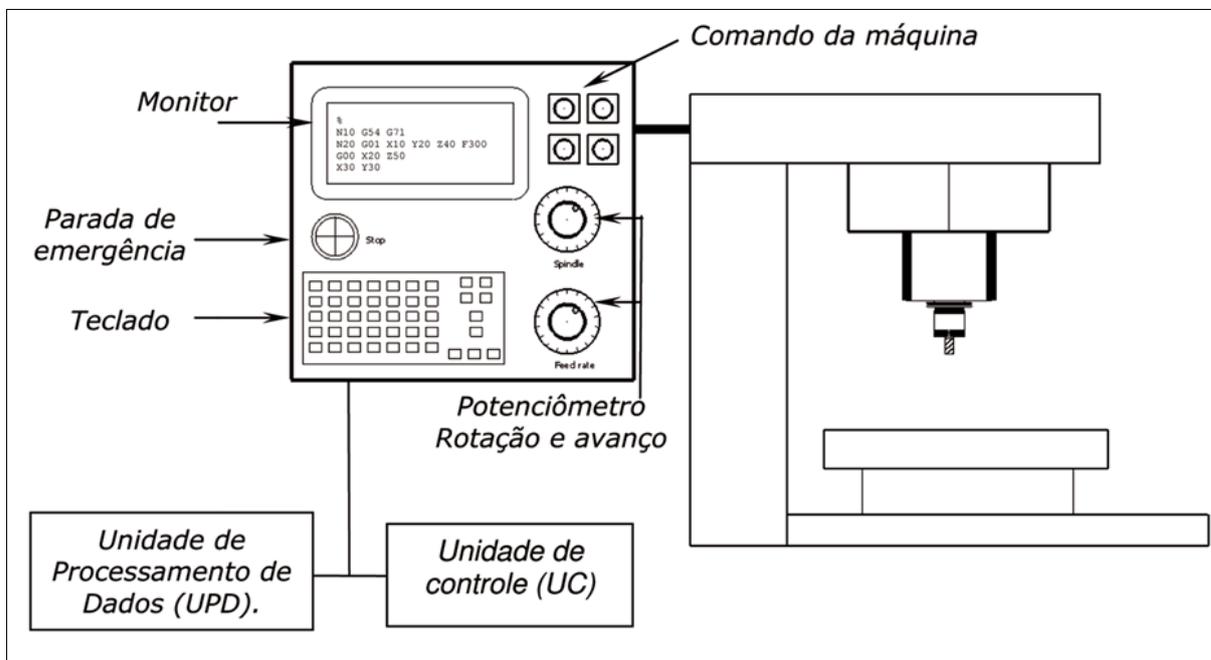
Desta forma, tem-se uma parte fixa sobre a qual uma parte móvel se desloca. A parte móvel pode ser tanto o eixo-árvore com a ferramenta como a mesa da máquina, dependendo da configuração da máquina. Estes acionamentos podem ser equipados com sensores chamados de transdutores que informam a velocidade do eixo (tacômetro) ou a sua posição (encoder linear ou angular) (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Segundo Souza e Ulbrich (2013), o CNC representa o comando de equipamentos por coordenadas numéricas controlado por um computador. Este sistema pode ser incorporado em máquinas-ferramenta, máquinas para montagem, máquinas de medir por coordenadas, máquinas de soldagem, robôs, dentre outros.

O programa de instruções denominado programa CNC incorpora informações numéricas bem como codificações ASCII na forma de blocos (linhas), onde cada linha representa uma ação comandada para a máquina. O referenciamento entre a peça fixada na máquina e o programa CNC é realizado através de um “zeramento”, onde um determinado ponto da peça representa uma coordenada específica do programa CNC.

Souza e Ulbrich (2013) afirma que o comando CNC é composto por duas unidades de hardware: unidade de processamento de dados (UPD) e unidade de controle (UC). A Figura 3 apresenta um exemplo de sistema CNC simplificado. A UPD é responsável por receber o programa CNC, ler e interpretar os seus blocos e enviar os comandos de acionamento para a execução das tarefas. O tempo de processamento de bloco (TPB) é o tempo que a UPD necessita para realizar a leitura e interpretação de uma linha de programa CNC e transformar estas informações em acionamentos.

Figura 3. Sistema de comando CNC simplificado.

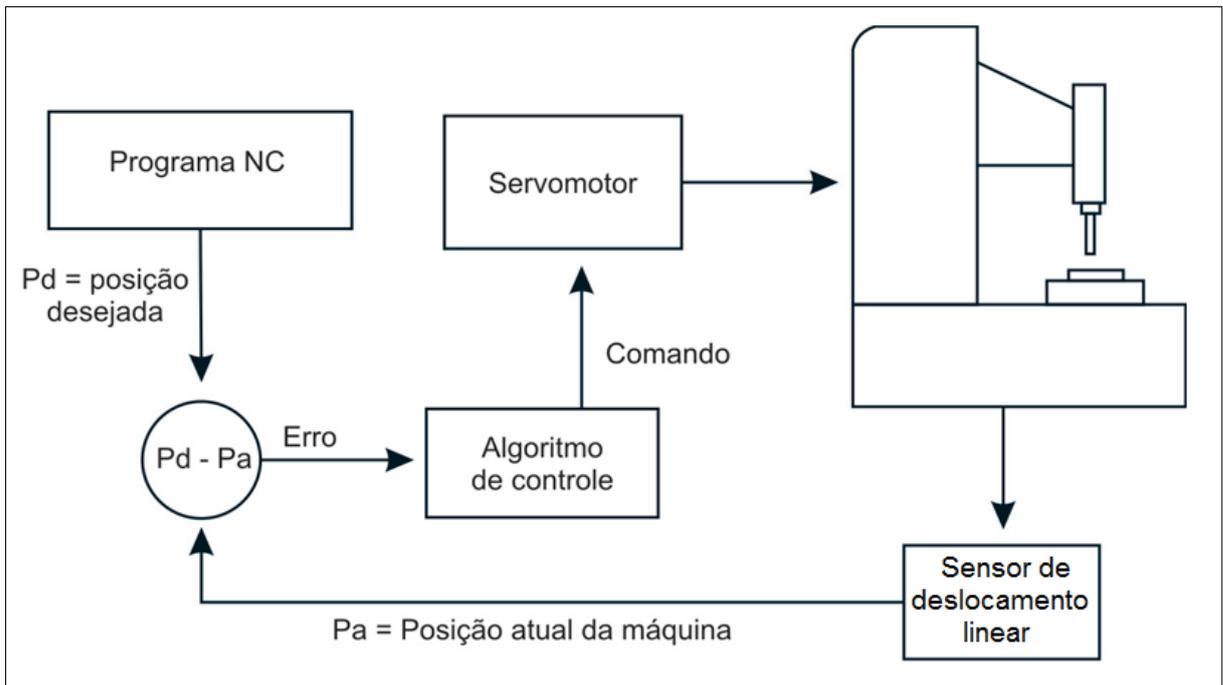


Fonte: Souza e Ulbrich (2013, p.221).

Conforme Souza e Ulbrich (2013), a UC é responsável por realizar o monitoramento e correção da posição da ferramenta e assim manter a precisão da máquina. A posição real da ferramenta é captada em tempo real através de

encoders. Este valor é comparado com a posição que a ferramenta deveria estar naquele momento. A diferença entre essas posições é inserida no algoritmo de controle que atua nos acionamentos da máquina para realizar esta correção constantemente. Este sistema é denominado sistema de controle em malha fechada (Figura 4).

Figura 4 – Sistema de controle em malha fechada simplificado.



Fonte: Adaptado de Souza e Ulbrich (2013, p. 223).

Em síntese, unindo a UPD e a UC, podemos listar as seguintes atividades que o comando CNC deve realizar para ocorrer a movimentação de usinagem:

- Carregar/descarregar da memória as linhas do programa CNC;
- Interpretar as linhas do programa CNC;
- Transformação dos comandos do programa CNC em acionamentos dos eixos e demais funções auxiliares;
- Verificação e correção do posicionamento dos eixos.

O programa CNC é enviado para a memória do CNC via cabeamento padrão (RS232), rede ethernet, memórias removíveis (pen drive e cartão de memória) ou wireless. Normalmente, as memórias internas destes equipamentos são limitadas em relação aos programas CNC que podem chegar a 50 MB de arquivo texto (.txt).

Com isso, o comando CNC deve ser alimentado com o programa CNC através de um equipamento externo em um processo chamado de execução online (SOUZA; ULBRICH, 2013). Neste processo, o deve carregar um certo número de linhas do programa CNC para a sua memória interna e após realizar a sua leitura excluí-la da memória.

Cada sistema de comunicação para execução online acima citado apresenta uma velocidade de transferência de dados específica definida em bits por segundo (baud rate). Esta taxa de transferência de dados pode variar de 110 a 115200 baud para RS232 e de 4 a 10 Mbps para padrão ethernet (SOUZA; ULBRICH, 2013). De modo estimado, cada linha do programa CNC pode conter em média 319 bits.

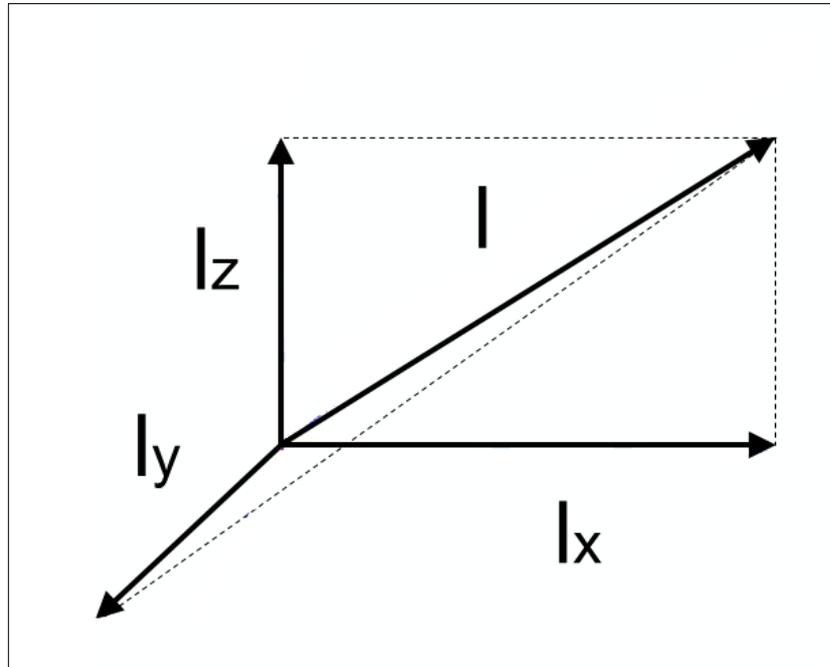
Atualmente, os fabricantes de máquinas-ferramenta têm empregado comandos CNC de arquitetura aberta. Estes sistemas propiciam ao usuário uma comunicação padronizada e facilitada com os dados internos do comando CNC. Com isso, o usuário pode desenvolver sistemas de monitoramento do processo utilizando estes dados fornecidos pela máquina (SOUZA; ULBRICH, 2013).

A movimentação da ferramenta pode ser descrita por diferentes métodos de interpolação. A definição matemática de interpolação é a estimativa de um valor desconhecido a partir de valores conhecidos. As funções de interpolação utilizadas na movimentação de usinagem são linear, circular e spline. A mais utilizada atualmente é a interpolação linear, foco de estudo deste trabalho.

Neste método, o comando CNC calcula a movimentação no tempo que cada eixo deve realizar para que a ferramenta se desloque linearmente a partir de um ponto inicial e final. No caso tridimensional, o comando CNC calcula o segmento linear e a velocidade que cada eixo deve seguir para compor vetorialmente o segmento linear proposto.

Os valores relativos para cada eixo são definidos geometricamente em função do ângulo entre o segmento linear e os eixos. A Figura 5 apresenta um exemplo desta composição vetorial tridimensional. A Equação 2 define o tamanho do segmento linear (l) em função dos deslocamentos em cada eixo (l_x , l_y e l_z), com todas as variáveis em mm. A precisão desta movimentação é função do sincronismo entre os eixos apresentado pela máquina (SOUZA; ULBRICH, 2013).

Figura 5 – Composição vetorial tridimensional do movimento.



Fonte: Autor (2017).

$$I = \sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2} \quad (2)$$

Quando a geometria a ser usinada for descrita por formas simples como retas e arcos, pode-se programar a máquina manualmente diretamente no comando CNC inserindo as posições que a ferramenta deve percorrer durante a usinagem. No caso de a geometria apresentar formas complexas, a descrição da trajetória da ferramenta exige a utilização de um sistema CAM.

2.2. Sistemas CAM para fresamento de formas complexas

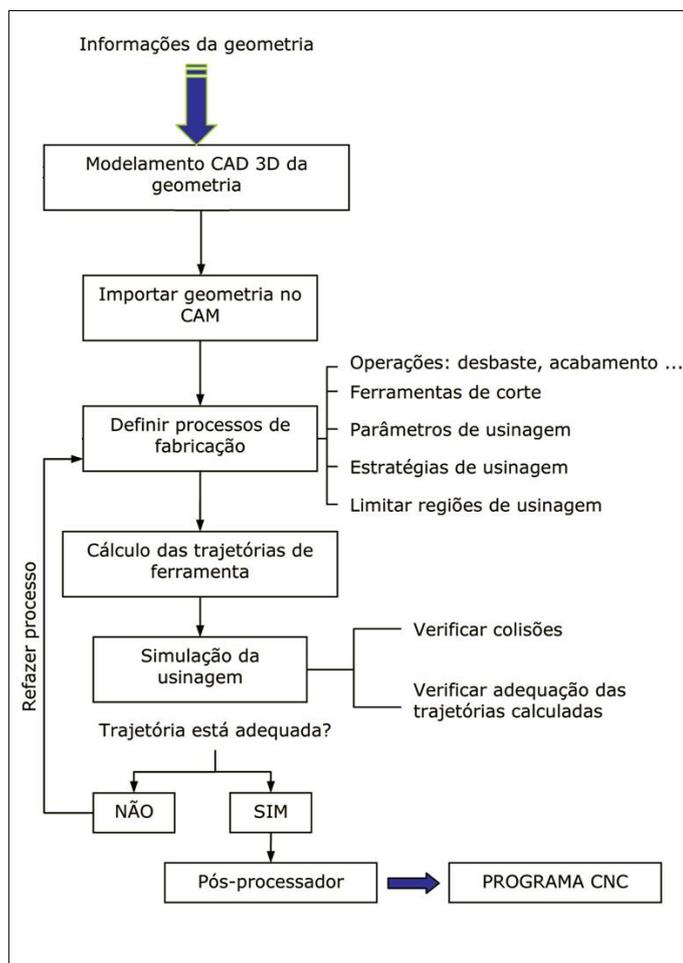
Segundo Lasemi, Xue e Gu (2010), formas complexas são aquelas que contêm uma ou mais superfícies não planares e não quadráticas geralmente representadas por funções paramétricas. Esta representação matemática geométrica mais complexa torna o seu modelamento viável apenas com a utilização de um programa de Projeto Auxiliada por Computador (CAD – Computer Aided Design).

Os sistemas CAM atuam na fabricação tanto de formas simples como complexas. Segundo Souza e Ulbrich (2013), um sistema CAM tem três atividades principais:

- Calcular as trajetórias de movimentação da ferramenta durante a usinagem;
- Realizar a simulação da usinagem calculada;
- Gerar programas CNC para máquinas CNC específicas.

Dentre as funções citadas, a primeira relativa ao cálculo de trajetória é a mais relevante para o processo de fabricação. Para a realização de suas funções, o sistema CAM necessita que o usuário insira uma série de informações. Com isso, a qualidade da trajetória gerada e conseqüentemente da usinagem final depende totalmente da experiência do usuário. A Figura 6 apresenta o procedimento geral de trabalho em sistemas CAM.

Figura 6 – Procedimento geral de trabalho em sistemas CAM.



Fonte: Adaptado de Souza e Ulbrich (2013, p. 260).

Inicialmente, deve-se importar para o sistema CAM a geometria modelada em um sistema CAD. Este arquivo fornecerá as informações de representação matemática da peça a ser fabricada necessárias ao cálculo de trajetória. Deve-se também importar ou definir no CAM a geometria da matéria-prima inicial do processo de fabricação chamada de “bruto”.

O processo de usinagem envolve várias etapas dependendo da quantidade de material a ser removida. Com isso, têm-se diferentes operações de usinagem e para cada uma delas diferentes estratégias e algoritmos de cálculo de trajetória. O desbaste é uma operação que visa grande remoção de material com baixa qualidade, empregando ferramentas com diâmetro elevado e estratégias de usinagem por planos.

O pré-acabamento busca remover o material remanescente do desbaste para deixar uma camada constante de material com pequena espessura para o acabamento. O acabamento então remove a última camada de material com uma tolerância reduzida e empregando ferramentas de pequeno diâmetro com pequena remoção de material. O emprego destas diferentes operações visa tornar o processo produtivo mais eficiente e eficaz.

Para cada operação devem ser observados a ferramenta de corte a ser utilizada e os parâmetros de usinagem. Estes parâmetros envolvem as velocidades de corte (V_c) e avanço (F), rotação da ferramenta (n), avanço por aresta (f_z), profundidades de corte radial (a_e) e axial (a_p). Todos estes parâmetros estão relacionados com a quantidade de material a ser removida na operação, indicações do fabricante da ferramenta e material a ser usinado.

A estratégia de usinagem é definida por Souza e Ulbrich (2013) como o formato geométrico e topológico da trajetória de usinagem. Atualmente os sistemas CAM oferecem diferentes estratégias de usinagem de acordo com a região a ser usinada, o qual pode ser limitada para cada operação. Os sistemas CAM também possibilitam alterar os parâmetros das movimentações passivas para tornar a operação mais eficiente ou suave, por exemplo.

Com estas informações, o sistema CAM realiza o cálculo das trajetórias de ferramenta. Um método básico de cálculo de trajetória será apresentado no próximo item deste trabalho. Após o cálculo da trajetória, o usuário pode realizar a verificação da mesma quanto à ocorrência de colisões com a peça ou a máquina à sua adequação às necessidades do usuário.

Se o percurso não estiver adequado o usuário pode alterar os parâmetros acima descritos e outros específicos de cada sistema para buscar o formato desejado. Porém, estas alterações são limitadas e com isso a trajetória gerada depende essencialmente da experiência do usuário com determinado sistema CAM.

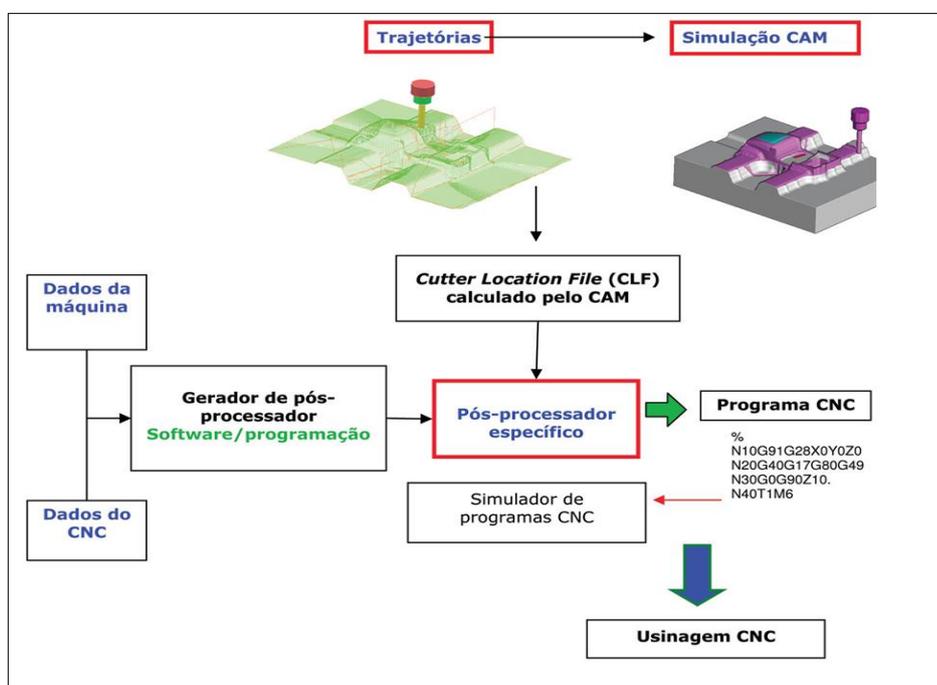
Após a aprovação da trajetória deve-se realizar o pós-processamento da mesma. Conforme Souza e Ulbrich (2013), esta etapa compreende a transformação da trajetória da linguagem interna do sistema para o programa CNC na sintaxe aceita pela máquina/CNC. O cálculo de trajetória gera um arquivo genérico sem especificações que contém os pontos da trajetória conhecido como *Cutter Location File* (CLF).

O pós-processador transforma este arquivo em um programa CNC no formato específico para ser interpretado pelo conjunto máquina/CNC. Com isso, cada pós-processador é exclusivo para realizar o pós-processamento de um determinado sistema CAM para um conjunto máquina/CNC. A geração de um pós-processador envolve informação da máquina e do comando CNC.

As informações da máquina são suas características físicas como limites de movimentação, número de eixos e velocidades características. Quando ao comando CNC, as informações são relativas à sua sintaxe de comandos, as quais têm suas funções principais padronizadas pela ISO 66025 (SOUZA; ULBRICH, 2013).

A Figura 7 apresenta as etapas envolvidas no pós-processamento. Cabe ressaltar que conforme Camargo et al. (2014), a simulação oferecida pelos sistemas CAM é baseada no CLF e não no programa CNC que irá para a máquina. Com isso, podem ocorrer divergências entre a simulação do CAM e a movimentação real. Para isso, existem no mercado programas específicos que realizam a simulação do programa CNC incorporando as características do conjunto máquina/CNC.

Figura 7 – Etapas do pós-processamento para geração de programas CNC.



Fonte: Souza e Ulbrich (2013, p.287).

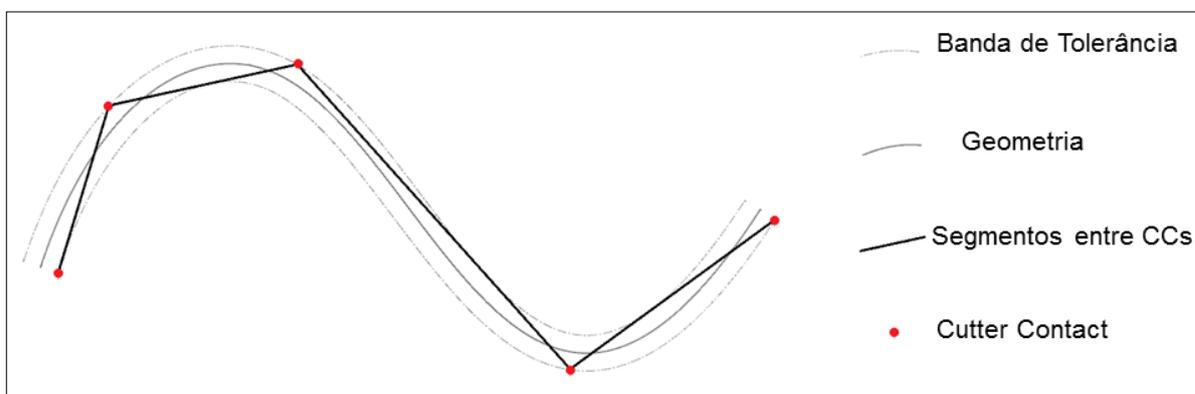
Como já comentado anteriormente no texto, o cálculo de trajetórias é a finalidade principal dos sistemas CAM. A qualidade do percurso gerado influencia diretamente na qualidade da geometria usinada e na produtividade do processo. As suas características são fundamentais no comportamento cinemático do centro de usinagem CNC durante o fresamento.

2.3. Método básico de cálculo de trajetória no fresamento

O método amplamente utilizado para interpolação da trajetória da ferramenta é a geração de segmentos de reta ao longo do perfil usinado. Os segmentos de retas são representados pelo comando G01 nos programas CNC pela linguagem de programação ISO 6983. Este método tem uma representação matemática mais simples em relação aos demais e por isso é a mais utilizada atualmente.

O usuário do sistema CAM define a geometria da peça e a banda de tolerância na usinagem. A banda de tolerância é a região de máximo erro permitido pelo usuário gerado por superfícies em offset acima e abaixo da geometria original. Estes offsets são distantes da geometria original pela tolerância definida pelo usuário. Neste caso, o sistema CAM calcula a posição dos pontos de contato da ferramenta com a peça (Cutter Contact – CC) dentro da banda de tolerância (Figura 8), segundo metodologia apresentada por Choi e Jerard (1998).

Figura 8 – Cálculo dos Cutter Contact na banda de tolerância.



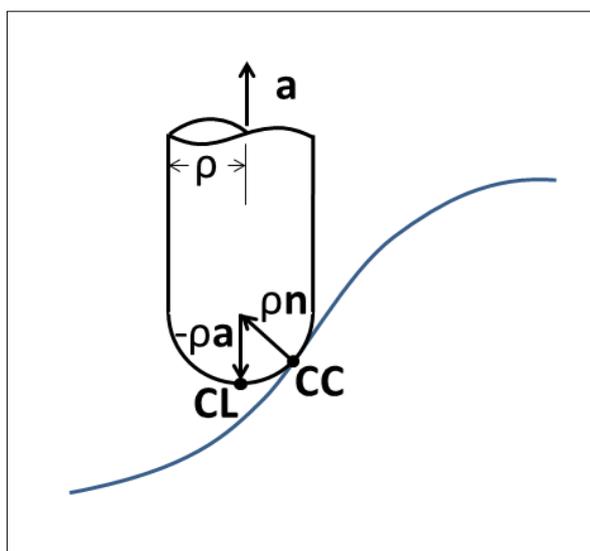
Fonte: Autor (2017).

O ponto de referência da movimentação da ferramenta durante a usinagem é o seu centro. A cada CC deve-se calcular o ponto de localização da referência da ferramenta chamada de Cutter Location (CL). Estes pontos cartesianos é que estarão presentes no programa CNC que irá comandar a movimentação do centro de usinagem.

Considerando uma ferramenta de ponta esférica com a referência em sua extremidade central tem-se o cálculo do CL através da Equação vetorial 3 (CHOI; JERARD, 1998). Esta conversão de pontos está representada na Figura 9, onde \vec{n} e \vec{a} são vetores unitários: normal à superfície e axial da ferramenta de corte, respectivamente.

$$\vec{CL} = \vec{CC} + \rho(\vec{n} - \vec{a}) \quad (3)$$

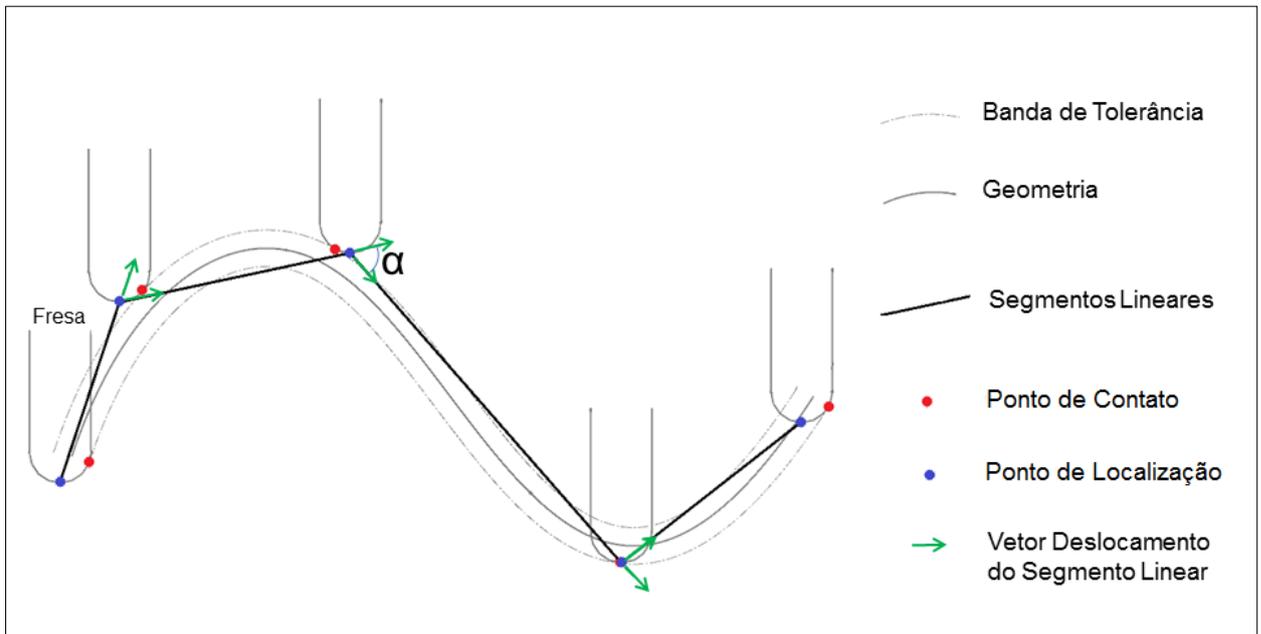
Figura 9 – Conversão entre os pontos CC e CL.



Fonte: Adaptado de Choi e Jerard (1998, p.42).

Segundo Souza e Coelho (2006), na interpolação linear, o sistema CAM determina a trajetória da ferramenta através de segmentos de retas que melhor se adaptam à faixa de tolerância utilizada. Neste caso ideal, os segmentos entre CCs tangenciam a banda de tolerância de forma a utilizá-la ao máximo (Figura 8) e gerar os segmentos da trajetória com o maior tamanho possível (Figura 10).

Figura 10 – Segmentos lineares da trajetória.



Fonte: Autor (2017).

Ao mesmo tempo, esta estratégia pode gerar grandes variações no tamanho do segmento definido em função da curvatura da geometria e da banda de tolerância (SOUZA; COELHO, 2006). As Equações 4 a 7 (CHOI; JERARD, 1998) apresentam o cálculo do tamanho do segmento em função das demais variáveis geométricas para regiões convexas e côncavas, onde R é o raio de curvatura da superfície, ρ é o raio da ponta da ferramenta e T_i e T_e são as tolerâncias internas e externas, respectivamente, todas as variáveis em mm.

$$l_{CC\text{-convexo}} = 2R\{1 - [(R + \rho - T_i)/(R + \rho)]^2\}^{1/2} \quad (4)$$

$$l_{CL\text{-convexo}} = 2\{2T_i(R + \rho) - (T_i)^2\}^{1/2} \quad (5)$$

$$l_{CC\text{-côncavo}} = 2R\{1 - [(R - \rho - T_e)/(R - \rho)]^2\}^{1/2} \quad (6)$$

$$l_{CL\text{-côncavo}} = 2\{2T_e(R - \rho) - (T_e)^2\}^{1/2} \quad (7)$$

Nota-se que quanto maior o raio de curvatura da superfície maior serão os segmentos gerados, visto que a geometria se aproxima de um formato linear. O mesmo comportamento é observado com o aumento da tolerância especificada, pois maiores serão os erros permitidos entre a superfície original e os segmentos lineares interpolados.

A relação existente indica que quanto menor o tamanho dos segmentos menor será a alteração na direção de movimentação entre eles, pois a trajetória irá se aproximar mais da curvatura da superfície. O contrário também é válido. Naturalmente, uma maior divisão da trajetória em segmentos menores gera um maior número de pontos calculados.

De acordo com Pessoles, Landon e Rubio (2009), dependendo da qualidade solicitada e da geometria complexa, os segmentos que descrevem o percurso são extremamente pequenos, onde o tempo de interpolação do comando CNC ou a capacidade de movimentação da máquina são limitantes para a velocidade de avanço atingida.

Estas limitações geram oscilações no avanço que prejudicam a qualidade superficial da peça e a produtividade do processo. Este fenômeno é constatado por vários autores (SOUZA, COELHO, 2006; PESSOLES; LANDON; RUBIO, 2009), mas ainda não compreendido com total clareza, devido às muitas variáveis que a definem.

2.4. Limitações na movimentação de centros de usinagem CNC em função da trajetória

Souza e Coelho (2006) analisaram as variações e limitações da velocidade de avanço na usinagem de formas complexas em altas velocidades (HSM). Os autores identificaram que a variação da velocidade de avanço durante o fresamento três eixos poderiam ocorrer principalmente por:

- Limitação dinâmica da máquina: Trajetórias 3D em altas velocidades estão sujeitas aos efeitos inerciais e do sistema de controle da dinâmica dos eixos, limitando então a velocidade de avanço pela estrutura física da máquina.

- Alto tempo de processamento do bloco e do loop de controle, onde a máquina não consegue processar os comandos de movimentação para atingir a velocidade de avanço programada.
- Estratégia de usinagem com segmentos pequenos, o que faz a máquina reduzir para manter a continuidade C^0 da curva.

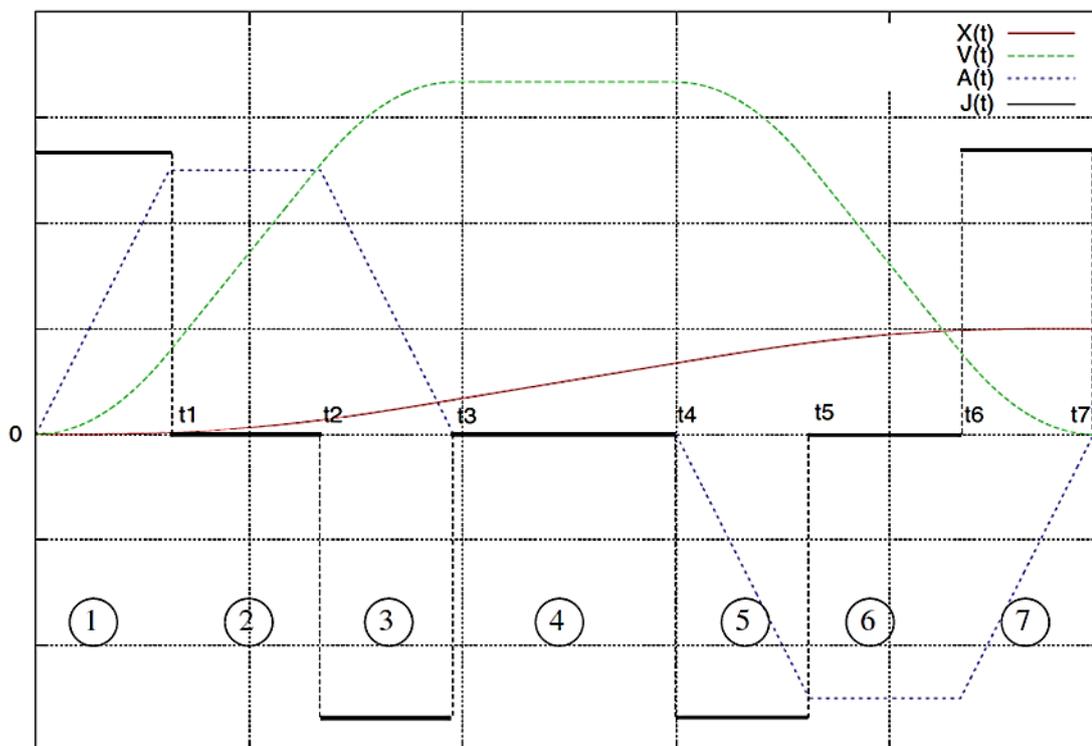
A ocorrência destes fatores está diretamente relacionada com as características da trajetória de usinagem calculada (distribuição dos deslocamentos em cada eixo para segmentos consecutivos). A seguir apresentam-se as limitações cinemáticas que ocorrem durante a movimentação.

2.4.1. Limitações cinemáticas dos acionamentos

Da parte dinâmica, os fabricantes de centros de usinagem CNC apontam uma lei cinemática para a movimentação dos eixos em cada segmento linear considerando aceleração trapezoidal (SIEMENS, 2016).

Esta descrição cinemática das grandezas de deslocamento, velocidade, aceleração e jerk possui 7 fases de movimentação apresentadas na Figura 11. Cada fase é descrita por um conjunto de equações válidas para cada intervalo de tempo. Os 7 conjuntos de equações são apresentadas nas Equações 8 a 35 segundo Pessoles, Landon e Rubio (2009), onde J é o *jerk* [mm/min^3], A é a aceleração [mm/min^2], V é a velocidade [mm/min], X é a posição [mm], t é o tempo total [min] e T é o tempo de cada fase [min].

Figura 11 - Descrição cinemática para segmentos lineares.



Fonte: Pessoaes, Landon e Rubio (2009, p. 2).

$$\forall t \in [T_0, T_1] \begin{cases} J_i(t) = J_{\max,i} & (8) \\ A_i(t) = A_{0,i} + J_{\max,i}(t-T_0) & (9) \\ V_i(t) = V_{0,i} + A_{0,i}(t-T_0) + \frac{1}{2} J_{\max,i}(t-T_0)^2 & (10) \\ X_i(t) = X_{0,i} + V_{0,i}(t-T_0) + \frac{1}{2} A_{0,i}(t-T_0)^2 + \frac{1}{6} J_{\max,i}(t-T_0)^3 & (11) \end{cases}$$

$$\forall t \in [T_1, T_2] \begin{cases} J_i(t) = 0 & (12) \\ A_i(t) = A_{\max,i} & (13) \\ V_i(t) = V_i(T_1) + A_{\max,i}(t-T_1) & (14) \\ X_i(t) = X_i(T_1) + V_i(T_1)(t-T_1) + \frac{1}{2} A_{\max,i}(t-T_1)^2 & (15) \end{cases}$$

$$\forall t \in [T_2, T_3] \begin{cases} J_i(t) = -J_{\max,i} & (16) \\ A_i(t) = A_i(T_2) - J_{\max,i}(t-T_2) & (17) \\ V_i(t) = V_i(T_2) + A_i(T_2)(t-T_2) - \frac{1}{2}J_{\max,i}(t-T_2)^2 & (18) \\ X_i(t) = X_i(T_2) + V_i(T_2)(t-T_2) + \frac{1}{2}A_i(T_2)(t-T_2)^2 - \frac{1}{6}J_{\max,i}(t-T_2)^3 & (19) \end{cases}$$

$$\forall t \in [T_3, T_4] \begin{cases} J_i(t) = 0 & (20) \\ A_i(t) = 0 & (21) \\ V_i(t) = V_{F,i} & (22) \\ X_i(t) = X_i(T_3) + V_{F,i}(t-T_3) & (23) \end{cases}$$

$$\forall t \in [T_4, T_5] \begin{cases} J_i(t) = -J_{\max,i} & (24) \\ A_i(t) = A_i(T_4) - J_{\max,i}(t-T_4) & (25) \\ V_i(t) = V_i(T_4) + A_i(T_4)(t-T_4) - \frac{1}{2}J_{\max,i}(t-T_4)^2 & (26) \\ X_i(t) = X_i(T_4) + V_i(T_4)(t-T_4) + \frac{1}{2}A_i(T_4)(t-T_4)^2 - \frac{1}{6}J_{\max,i}(t-T_4)^3 & (27) \end{cases}$$

$$\forall t \in [T_5, T_6] \begin{cases} J_i(t) = 0 & (28) \\ A_i(t) = -A_{\max,i} & (29) \\ V_i(t) = V_i(T_5) - A_{\max,i}(t-T_5) & (30) \\ X_i(t) = X_i(T_5) + V_i(T_5)(t-T_5) - \frac{1}{2}A_{\max,i}(t-T_5)^2 & (31) \end{cases}$$

$$\forall t \in [T_6, T_7] \begin{cases} J_i(t) = J_{\max,i} & (32) \\ A_i(t) = A_i(T_6) + J_{\max,i}(t-T_6) & (33) \\ V_i(t) = V_i(T_6) + A_i(T_6)(t-T_6) + \frac{1}{2}J_{\max,i}(t-T_6)^2 & (34) \\ X_i(t) = X_i(T_6) + V_i(T_6)(t-T_6) + \frac{1}{2}A_i(T_6)(t-T_6)^2 + \frac{1}{6}J_{\max,i}(t-T_6)^3 & (35) \end{cases}$$

Nota-se pelas equações que o comportamento cinemático da máquina é função das suas capacidades dinâmicas máximas (aceleração e jerk). A eficácia em realizar a movimentação desejada depende diretamente desses parâmetros que são caracterizados como limitantes do processo. A resolução do sistema de equações decorre das condições de contorno definidas em cada fase.

Pessoles, Landon e Rubio (2009) afirmam que este caso ideal apresentado com 7 fases completas e velocidades inicial e final nulas não ocorre na prática. Em

usinagens reais, de acordo com o tamanho do segmento, a velocidade de avanço programada e a aceleração máxima podem não ser atingidas. Além disso, não é desejado que a máquina pare a cada linha do programa CNC pela baixa produtividade e variação da carga sobre a ferramenta geradas, o que danifica a qualidade superficial da peça e a ferramenta (PESSOLES; LANDON; RUBIO, 2009). Verifica-se então uma limitação inercial que ocorre no ponto de encontro dos segmentos.

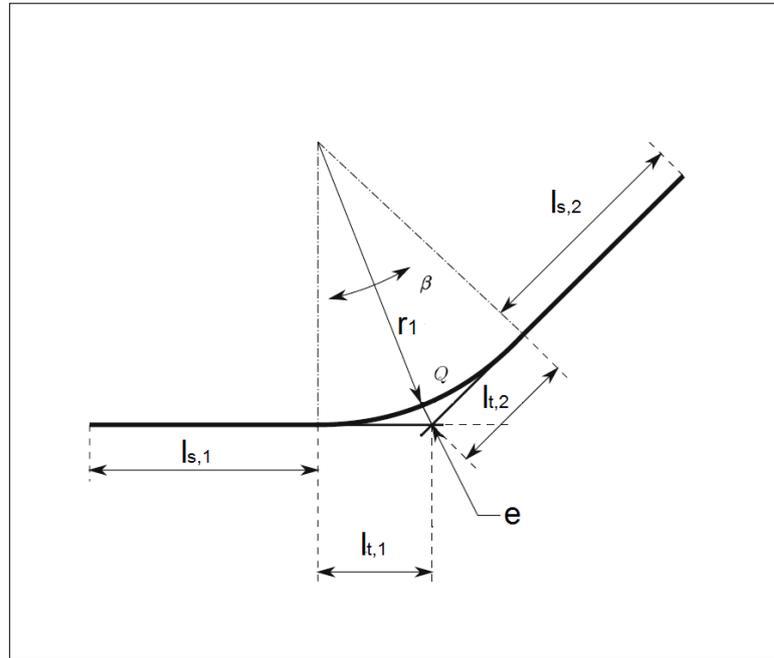
Normalmente dois segmentos de reta da trajetória em sequência não apresentam a mesma direção e sentido de deslocamento. Neste caso, para realizar exatamente a movimentação determinada sem parar, a velocidade de avanço deveria alterar instantaneamente o seu valor em cada eixo de movimentação no ponto de encontro dos segmentos. Este comportamento cinemático é impossível visto que exigiria uma aceleração infinita.

O que ocorre na realidade é uma adequação entre a precisão requerida e a velocidade de avanço nesta região de transição. Para manter a velocidade de avanço o mais alta possível, o centro de usinagem CNC modifica a trajetória de forma a iniciar a movimentação do próximo segmento de reta antes do seu ponto inicial. Esta prática gera uma trajetória curva com um erro associado nesta região de transição.

Pessoles, Landon e Rubio (2009) apresentam dois modelos cinemáticos para a descrição desta região de transição: arco e polinômio de quinto grau. A movimentação em arco é o modelo descrito na literatura (Figura 12), onde o seu raio é definido pela Equação 36 e a velocidade de avanço durante a transição pela Equação 37, segundo os autores.

Nestas equações o r_1 é o raio da região de transição [mm], a é a tolerância especificada da máquina [mm], β é o ângulo formado entre os segmentos na região de transição [°], l é o tamanho dos segmentos [mm], V_t é a velocidade na transição [mm/min], V_F é a velocidade programada [mm/min], V_a é a velocidade limitada pela aceleração (A [mm/min²]) [mm/min] e V_j é a velocidade limitada pelo *jerk* (J [mm/min³]) [mm/min].

Figura 12 - Modelo de movimentação em arco para a região de transição.



Fonte: Adaptado de Pessoles, Landon e Rubio (2009, p.4).

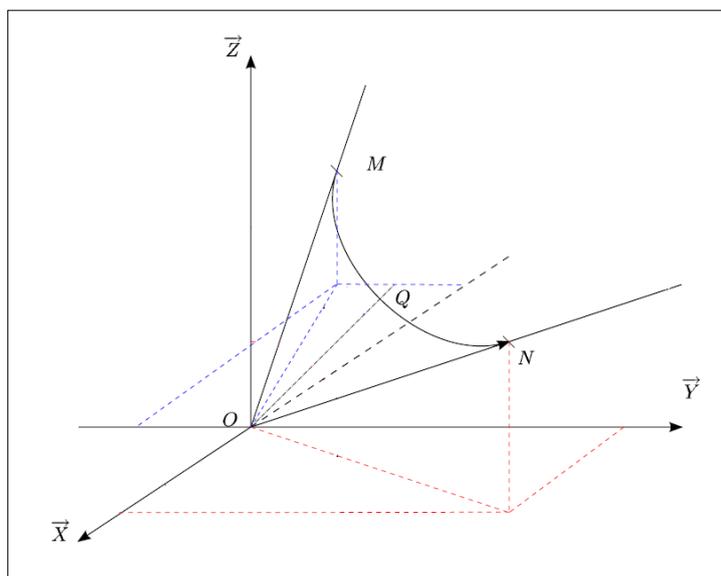
$$r_1 = \min \left(e \frac{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{1 - \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}, \frac{l}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} - e \right), \text{ onde } l = \min(l_1, l_2) \quad (36)$$

$$V_t = \min \left(V_F, V_a = \sqrt{A_{\max,i} r_1}, V_j = \sqrt[3]{J_{\max,i} r_1^2} \right) \quad (37)$$

Este modelo apresenta um equívoco cinemático, sendo que prevê um salto na aceleração entre a fase 4 do modelo anteriormente apresentado (aceleração nula) e a região de transição (aceleração centrípeta com valor não nulo gerado pela alteração da direção da velocidade no arco), o que não ocorre na realidade.

Com isso, os autores propõe um novo modelo utilizando um equacionamento polinomial de quinto grau para a posição do deslocamento na transição (Figura 13). Neste caso, as condições de contorno permitem que a aceleração no início e final da transição (pontos M e N) sejam nulas e que o perfil cinemático seja simétrico em relação ao ponto Q.

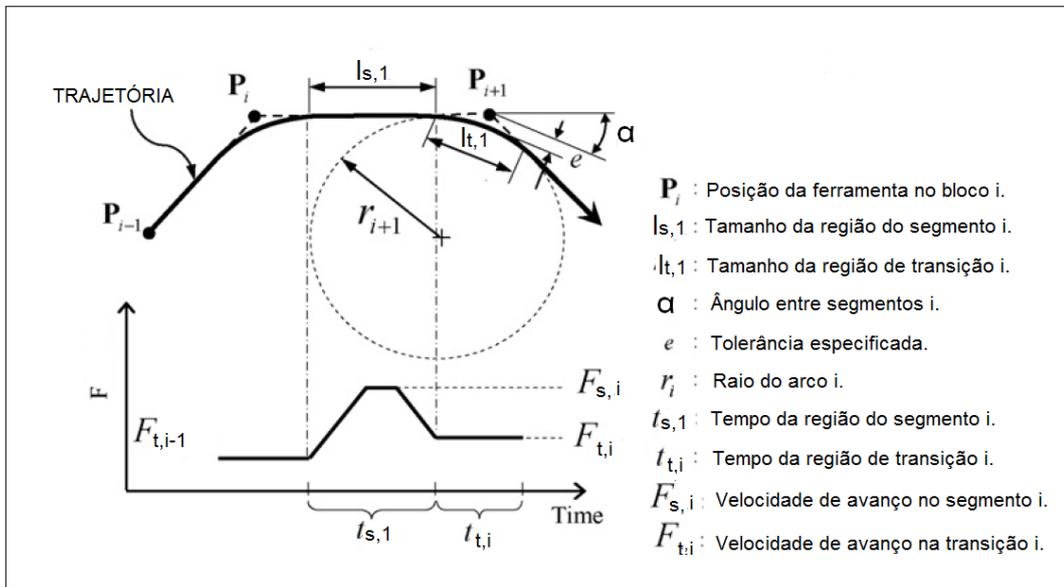
Figura 13 – Movimento polinomial para região de transição.



Fonte: Adaptado de Pessoles, Landon e Rubio (2009, p.8).

So et al. (2007) utilizam o modelo em arco para equacionar a cinemática da região de transição. Um possível comportamento nesta região pode ser observado na Figura 14. Nota-se em ambos os modelos que o tamanho da região de transição depende do tamanho e ângulo dos segmentos, bem como da tolerância especificada pelo fabricante do centro de usinagem CNC.

Figura 14 – Possível comportamento cinemático na região de transição.



Fonte: Adaptado de So et al. (2007, p. 3).

Os comandos CNC dos centros de usinagem oferecem algumas opções de funções que visam alterar o perfil cinemático para tornar as movimentações mais suaves e manter a velocidade de avanço o mais alta possível (ROMI, 2011):

- Bell-Shape: Modifica a curva de aceleração/desaceleração para tornar as transições entre velocidades mais suaves;
- Look-Ahead: Realiza a leitura antecipada de um certo número de blocos do programa CNC para analisar a trajetória que a ferramenta deverá realizar. Desta forma, ele consegue programar previamente as curvas cinemáticas de cada segmento e melhorar o desempenho centro de usinagem durante a trajetória;
- AI CONTOUR CONTROL (Fanuc) ou similar: Permite ao usuário escolher o nível de velocidade de avanço x precisão de posicionamento desejado, onde 1 prioriza a velocidade e 10 prioriza a precisão, por exemplo. Esta função atua na cinemática da região de transição de modo a aumentar o erro permitido e com isso minimizar a redução e oscilação da velocidade de avanço neste local.

Considerando as limitações cinemáticas existentes e a ocorrência desta região de transição entre segmento, as fases do comportamento apresentado por Siemens (2016) acabam se modificando e algumas destas não ocorrem

(PESSOLES; LANDON; RUBIO, 2009). No caso de o deslocamento ocorrer em mais de um eixo, o tempo de duração de cada fase deve ser igualada em todos os eixos para a sincronização da movimentação (PESSOLES; LANDON; RUBIO, 2009).

Com base no deslocamento que deve ser realizado em cada eixo (l_i), pode-se determinar através do comportamento cinemático qual eixo será o mais lento. Este eixo limitante definirá o tempo de execução deste segmento pelo seu deslocamento (l_{lim}). Desta forma, a partir da velocidade programada (V_F) e das capacidades dinâmicas máximas do centro de usinagem (A_{max} e J_{max}), determinam-se as curvas cinemáticas dos demais eixos pelas Equações 38, 39 e 40 (PESSOLES; LANDON; RUBIO, 2009).

$$V_i = \frac{l_i}{l_{lim}} V_F \quad (38)$$

$$A_i = \frac{l_i}{l_{lim}} A_{max,i} \quad (39)$$

$$J_i = \frac{l_i}{l_{lim}} J_{max,i} \quad (40)$$

A análise do comportamento cinemático dos centros de usinagem CNC pelas limitações dos seus acionamentos demonstra a dificuldade em determinar com exatidão o seu tempo real de usinagem. Além disso, compreende-se de que forma o tamanho e ângulo dos segmentos atua no tamanho das regiões e no perfil cinemático, sendo diretamente responsáveis pelas velocidades de avanço atingidas e oscilações da mesma.

2.4.2. Limitações de processamento do comando CNC

Como já comentado, a movimentação do centro de usinagem é controlada pelo seu comando CNC. As limitações de processamento de suas unidades (UPD e UC) podem resultar em problemas de desempenho do sistema de acionamento da máquina. Como os limitantes cinemáticos, esses comportamentos afetam

diretamente a qualidade da usinagem e dificultam a previsão do seu tempo real de usinagem.

Como já apresentado, a comunicação de dados com o comando CNC para execução online de programas pode ser realizado por diferentes interfaces. Independente da interface utilizada, cada sistema tem uma velocidade de transferência máxima. Segundo Souza e Ulbrich (2013), esta velocidade de transferência é um limitante da velocidade de avanço.

Segundo os autores, quando se programa o centro de usinagem para operar em altas velocidades de avanço (HSM – entre 2000 e 10000 mm/min), a velocidade de transferência máxima pode ser alcançada. Isto pode gerar solavancos na máquina que degradam a qualidade superficial. Os autores apresentam a Equação 41 que estima a velocidade de transferência necessária para uma operação em função do tamanho do segmento linear, velocidade de avanço programada e número de bits por bloco do programa CNC.

$$\text{Baud}_{\text{Necessário}} = \frac{F \text{ [mm/s]}}{l_i \text{ [mm]}} \times \text{número de bits por linha} \quad (41)$$

A ação de carregar/descarregar as linhas do programa CNC durante a execução online de programas também exige alta velocidade de processamento do comando CNC. Experimentos com 4 eixos de movimentação demonstram que a associação deste fator com demais limitantes do comando CNC podem travar a máquina e reduzir a velocidade de avanço a zero, marcando a peça (CAMARGO, 2016).

Isto ocorre por que a velocidade geral de leitura e processamento das linhas supera a sua capacidade de carregar/descarregar as linhas de sua memória volátil. Com isso, o comando CNC já realizou as movimentações correspondentes às linhas carregadas em sua memória, mas ainda não conseguiu carregar a memória volátil com novas linhas (CAMARGO, 2016).

O TPB também é fator limitante para a movimentação do sistema e é utilizado por muitos fabricantes de comando CNC como uma medida da performance do sistema (SOUZA, ULBRICH, 2013). Porém, os mesmos autores (SOUZA, ULBRICH, 2013) afirmam que outros fatores também devem ser

considerados, como o tempo para a realização do loop de controle em malha fechada.

Souza e Ulbrich (2013) explicam que a somatória do TPB mais o tempo necessário para a realização do loop de controle deve ser menor que o tempo de deslocamento de um segmento linear na velocidade programada. Se isto não ocorrer, a máquina já completou a movimentação e os novos comandos de deslocamento ainda não estão disponíveis. Para evitar este possível travamento do sistema, os comandos CNC mais modernos reduzem a velocidade de avanço para a máxima que o processamento permite para aquele tamanho de segmento.

Coelho et al. (2009) demonstrou a relação entre a velocidade de avanço atingida pela máquina-CNC e o tamanho do segmento da trajetória para usinagens com até três eixos. Constatou-se que o comportamento é linear e que desta forma é possível conhecer a velocidade atingida (F) para determinado tamanho de segmento (l_i). O parâmetro da máquina que define esta relação foi nomeado Tempo de Resposta da Máquina (MRT - *Machine Response Time*), o qual é definido pela Equação 42.

$$\text{MRT [ms]} = \frac{l_i \text{ [mm]}}{F \text{ [mm/min]}} \times 60,000 \quad (42)$$

Este valor indica a capacidade do conjunto máquina-CNC em alcançar a velocidade programada em usinagens com pequenos segmentos lineares, como em geometrias complexas. Ele considera tanto o tempo de leitura de cada linha do programa CNC e os seus comandos de movimentação (TPB), quanto o tempo do loop de controle.

Desta forma, é possível verificar de que maneira o tamanho do segmento influencia na velocidade de avanço atingida e o quanto o desempenho de processamento do comando CNC é relevante para o comportamento cinemático do centro de usinagem.

2.5. Métodos de previsão de tempo de fresamento por segmentos lineares (G01)

Liu et al. (2013) caracterizaram os métodos de previsão do tempo de usinagem em quatro grupos:

- Previsão baseada na taxa de remoção de material;
- Previsão baseada em inteligência artificial;
- Previsão baseada no programa CNC;
- Previsão baseada no programa CNC e características do conjunto máquina-CNC.

Os autores afirmam que os métodos baseados na taxa de remoção de material e em inteligência artificial só podem ser aplicados em previsões grosseiras devido às informações inadequadas. Tulsyan (2014) afirma que os modelos que utilizam a remoção de material são limitados a determinada operação e desconsideram as características relevantes da máquina.

O método de previsão baseada no programa CNC considera apenas o tamanho dos segmentos da trajetória e a velocidade de avanço programada. Este método é utilizado por sistemas CAM e sistemas de simulação de programas CNC, sendo mais preciso do que os citados anteriormente, mas ainda é equivocado por desconsiderar as limitações da máquina (LIU et al., 2013; CAMARGO et al., 2015)

Liu et al. (2013) declaram que o método baseado no programa CNC e nas características do conjunto máquina-CNC pode ser muito mais preciso que os demais. Tulsyan (2014) subdivide este método em 3 classes de modelos:

- Modelos analíticos: Deduzidos matematicamente sendo que as informações necessárias a esses modelos são de difícil obtenção, o que os torna limitados em suas aplicações;
- Modelos empíricos: Baseados na regressão linear da nuvem de dados experimentais para geração de equações polinomiais. O grande número de experimentos necessários à geração das equações dificulta a sua aplicação;
- Modelos mecanísticos: Esta classe de modelos utiliza o conhecimento sobre o fenômeno para propor o modelo, o qual é ajustado a partir de constantes de calibração obtidas por experimentos.

Coelho et al. (2009) apresentam um modelo mecanístico de previsão de tempo de usinagem utilizando o parâmetro MRT descrito no item 2.4.2. Este parâmetro identifica a capacidade de movimentação do centro de usinagem em função do tamanho do segmento. Para encontrar o MRT da máquina deve-se

programar uma trajetória com uma velocidade de avanço alta (5000 mm/min) e pequenos segmentos lineares (0,1 mm) sem alteração da direção por 300 mm.

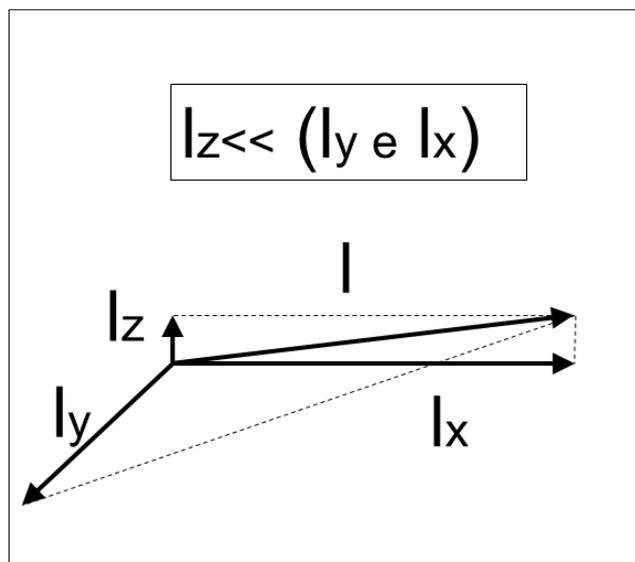
Desta forma, a máquina irá atingir uma velocidade de avanço constante menor que a programada. Aplicando o tamanho do segmento utilizado no experimento e a velocidade de avanço alcançada pela máquina na Equação 43 tem-se o MRT da máquina. O modelo proposto por Coelho et al. (2009) analisa o programa CNC e relaciona o tamanho de cada segmento linear com o MRT da máquina.

Se a velocidade de avanço programada for menor ou igual à velocidade prevista pelo MRT para aquele segmento, este modelo considera que a máquina se movimenta na velocidade programada neste segmento. Do contrário, o modelo considera que a máquina se movimenta na velocidade prevista pelo MRT.

Relacionando o tamanho de cada segmento com a sua velocidade de deslocamento encontra-se o tempo de usinagem de cada segmento. A somatória de todos os tempos será o tempo de usinagem total previsto. Com isso, a partir de um experimento simples tem-se uma estimativa do tempo de usinagem muito superior à estimativa oferecida pelos sistemas CAM.

Porém, verifica-se que um mesmo valor de tamanho do segmento (l) pode ser obtido com diferentes combinações de deslocamentos nos eixos (l_x , l_y e l_z). Nesta combinação, um dos eixos pode ser muito menor que os demais (Figura 15). Desta forma, conforme visto nas limitações cinemáticas, uma maior alteração no deslocamento de um eixo em relação aos demais pode torná-lo um eixo limitante da velocidade de avanço (inserção de ângulo entre segmentos).

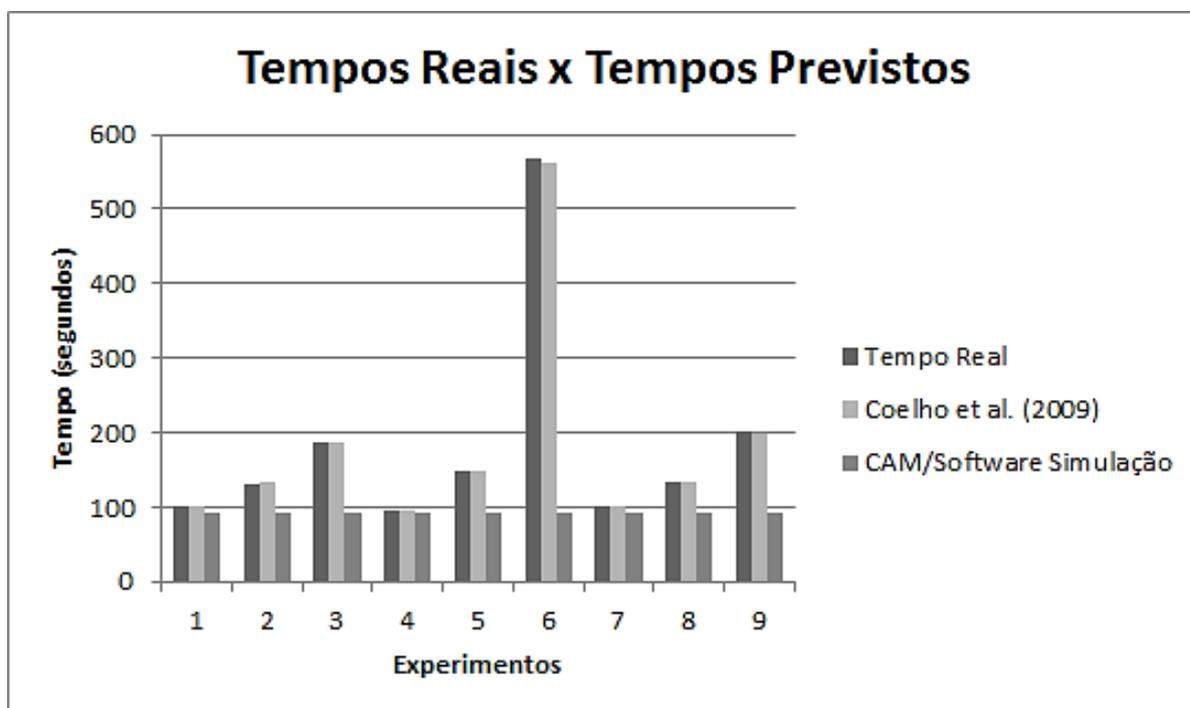
Figura 15 – Composição vetorial tridimensional do movimento com grande diferença no valor do deslocamento.



Fonte: Autor (2017).

Estudos realizados anteriormente (CAMARGO et al., 2015) empregando o método de Coelho et al. (2009) para centros de usinagem convencionais demonstram que sua estimativa é muito mais precisa que a obtida do CAM (Figura 16). Neste estudo, a média do erro deste método foi de 0,007%.

Figura 16 – Comparação entre métodos de previsão de tempo de fresamento para centros de usinagem convencionais.



Fonte: Adaptado de Camargo et al. (2015, p. 9).

Para centros de usinagem convencionais, o modelo proposto por Coelho et al. (2009) é altamente preciso, pois suas limitações de processamento são muito mais significativas que as limitações cinemáticas. Porém, experimentos preliminares demonstraram que para centros de usinagem HSM as limitações cinemáticas são altamente significativas, o que faz com que o modelo de Coelho et al. (2009) perca precisão neste caso.

Moreira (2010) demonstra que o modelo do MRT é válido apenas quando o ângulo entre os segmentos lineares é inferior a 2° para centros de usinagem HSM. Acima deste valor, o ângulo entre os segmentos é relevante para a velocidade de avanço atingida além do tamanho dos mesmos. Monreal e Rodriguez (2001) evidenciam que o ângulo entre os segmentos influencia fortemente o tempo real de usinagem para um mesmo tamanho de segmento.

Moreira (2010) estudou a relação entre o ângulo entre os segmentos e a velocidade de avanço. A partir de um determinado ângulo a velocidade de avanço varia entre um valor máximo e um mínimo a cada segmento. O autor (MOREIRA,

2010) equacionou a velocidade mínima atingida na transição entre os segmentos em função do ângulo entre os mesmos. Para tanto, utilizou um sistema de monitoramento da velocidade de avanço diretamente do CNC neste estudo.

Siller et al. (2006) desenvolveram um método empírico que aproxima o tempo de usinagem através da velocidade de avanço média para duas situações extremas na máquina: movimentações bruscas e suaves. Estas movimentações são caracterizadas através de experimentos e suas influências no tempo de usinagem são diretamente relacionadas à complexidade da geometria, analisada através da distribuição dos tamanhos dos segmentos da trajetória em classes.

O tempo total de usinagem é obtido através de uma equação analítica que relaciona a porcentagem da usinagem realizada com movimentações bruscas com a realizada em movimentações suaves. A variável de proporção entre os dois casos é determinada empiricamente considerando a extensão dos segmentos pequenos quando toda a movimentação é considerada como brusca.

Pessoles, Landon e Rubio (2009) modelaram analiticamente o comportamento cinemático considerando os parâmetros de movimentação máximos da máquina. Os autores desenvolveram um equacionamento para a região de transição e outro para o segmento linear.

O sistema de equações para o segmento considera o seu tamanho, velocidades de entrada, saída e a programada, sendo que as velocidades de entrada e saída são determinadas pela região de transição. A partir das capacidades dinâmicas da máquina, utiliza o modelo padrão com 7 fases do item 2.4.1 para descrever 10 casos de comportamento possíveis, considerando se a máquina irá atingir as velocidades programadas e acelerações máximas.

Na região de transição os autores utilizam um polinômio de 5º grau para descrever a movimentação. O modelo tem as seguintes considerações:

- Aceleração é máxima no meio da transição;
- Módulos das velocidades na entrada e na saída da transição são iguais;
- Tamanho da região de transição para ambos os segmentos (anterior e posterior) são iguais;
- A velocidade de entrada na transição é limitada pela programada e pelos limites dinâmicos da máquina (Jerk e aceleração máximos).

Além disso, o ângulo entre os segmentos e a tolerância de movimentação de cada eixo são considerados no cálculo. Contudo, o modelo apresentado não

considera os limites de processamento do CNC, fator relevante em trajetórias com pequenos segmentos (COELHO et al., 2009).

Os testes apresentados foram realizados com tamanho de segmentos elevados, onde a velocidade de avanço é atingida, fato que dificilmente ocorre na usinagem de formas complexas. Nestes casos o erro no tempo previsto de usinagem foi menor que 0,2%. Além disso, os dados da máquina necessários ao modelo normalmente não são informados pelo fabricante e são de difícil aquisição.

Tulsyan (2014) desenvolveu um modelo *mecânico* para geração das curvas cinemáticas da máquina. Este modelo considera que o perfil cinemático da aceleração/desaceleração tem comportamento exponencial e que a execução do novo segmento se inicia na desaceleração do segmento anterior. Além disso, considera-se que o loop de controle não influencia no desempenho da máquina, ao contrário do afirmado por Souza e Ulbrich (2013) e Coelho et al. (2009).

Desta forma, a partir do perfil cinemático desenvolvido e do tamanho do segmento calcula-se o tempo de usinagem para cada segmento, desconsiderando o ângulo entre os segmentos. Porém, para se adquirir os parâmetros do modelo deve-se obter o perfil cinemático da máquina através de monitoramento da mesma, o que exige sensoriamento específico e que o CNC seja de arquitetura aberta.

A partir dos modelos encontrados na literatura, bem como as limitações de acionamento e de processamento apresentadas, o próximo tópico propõe os experimentos e o procedimento para desenvolvimento do modelo deste trabalho.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este trabalho é de caráter experimental e tem como objetivo desenvolver um modelo mecânico de previsão do tempo de usinagem onde os parâmetros do equacionamento sejam obtidos por experimentos simples. Para o desenvolvimento do modelo foram realizados três experimentos com o intuito de avaliar a influência do tamanho dos segmentos em cada eixo no tempo de execução de cada segmento (TES) para três situações:

- Segmentos consecutivos com direção e sentido de movimentação constantes;
- Segmentos consecutivos com variação da direção de movimentação e sentido constante;
- Segmentos consecutivos com alteração no sentido de movimentação e direção constante.

Os programas CNC utilizados nos experimentos foram gerados no programa Microsoft Excel 2010. Foi desenvolvida uma rotina neste programa na qual se insere os deslocamentos desejados em cada eixo para dois segmentos consecutivos e a mesma atualiza os valores das coordenadas XYZ. Os deslocamentos utilizados nos experimentos encontram-se em torno de valores médios de tamanho de segmento ao comparar programas gerados por cinco diferentes sistemas CAM na operação de acabamento de formas complexas por fresamento (CAMARGO, 2016).

A velocidade de avanço programada (F) nos testes foi de 15000mm/min para que em nenhum momento a mesma fosse atingida e descaracterizasse assim a ocorrência de uma limitação, o que afetaria os dados. Todos os programas foram executados com o potenciômetro da velocidade de avanço em 100% e partindo do mesmo ponto (X=0, Y=0 e Z=0).

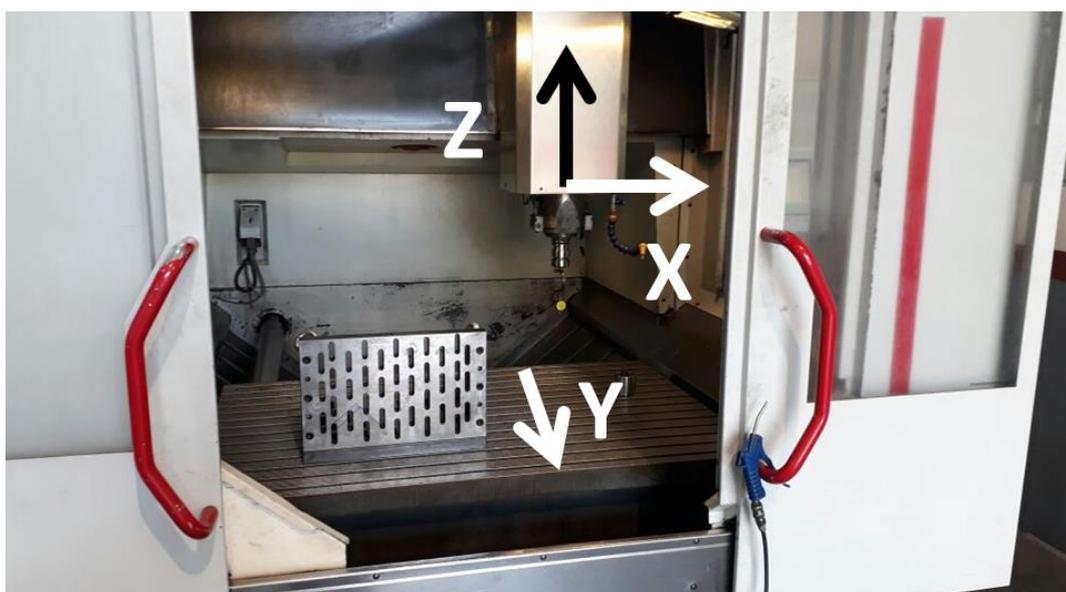
Todos os experimentos foram realizados no centro de usinagem HSM modelo C1200V (Figuras 17 e 18) da empresa Tecnomotriz Ferramentaria na cidade de Joinville/SC. Esta máquina é fabricada pela empresa alemã HERMLE e possui o comando CNC HEIDENHAIN iTNC530.

Figura 17 – Centro de usinagem CNC HSM HERMLE C1200V.



Fonte: Autor (2017).

Figura 18 – Eixos de movimentação da HERMLE C1200V.



Fonte: Autor (2017).

Como já apresentado no texto, experimentos preliminares em centros de usinagem convencionais não apresentaram limitações cinemáticas significativas. Com isso, a máquina utilizada no desenvolvimento do modelo é HSM para realmente captar as limitações cinemáticas não incorporadas ao modelo de Coelho et al. (2009). Desta forma, o foco do modelo proposto são os centros de usinagem HSM a fim de suprir a lacuna existente.

A variável de saída de cada experimento foi o tempo total de execução do programa CNC fornecido pelo próprio CNC em seu monitor. Os dados obtidos foram trabalhados no programa Microsoft Excel 2010 em seu tratamento e análise. O método utilizado para equacionar os dados foi o de regressão linear apresentado em Barbeta e Reis (2009).

As equações geométricas e logarítmicas neperianas foram obtidas pelo método de linearização apresentado em Franco (2011) com posterior regressão linear. O tempo total de execução de cada experimento foi dividido pelo número de segmentos do mesmo para a obtenção da variável TES, a qual é utilizada em todo o equacionamento realizado posteriormente.

Devido à resolução limitada do dado obtido (1 segundo), as movimentações são repetidas inúmeras vezes até o limite de deslocamento dos eixos. Desta forma, ao dividir o tempo total pelo número de repetições da movimentação reduz-se o erro máximo inserido.

Após o seu desenvolvimento, o modelo proposto foi implementado no programa Microsoft Excel e validado através de testes com execução de programas CNC para fresamento de superfícies complexas calculadas via sistema CAM comercial. O modelo proposto foi comparado com os valores previstos pelo sistema CAM e pelo modelo de Coelho et al. (2009) através do erro relativo. O procedimento realizado nos três experimentos, bem como os testes de validação do modelo, são apresentados nos itens que seguem.

3.1. Avaliação da influência do deslocamento em cada eixo no TES em segmentos consecutivos sem alteração de direção ou sentido de movimentação (Experimento 1)

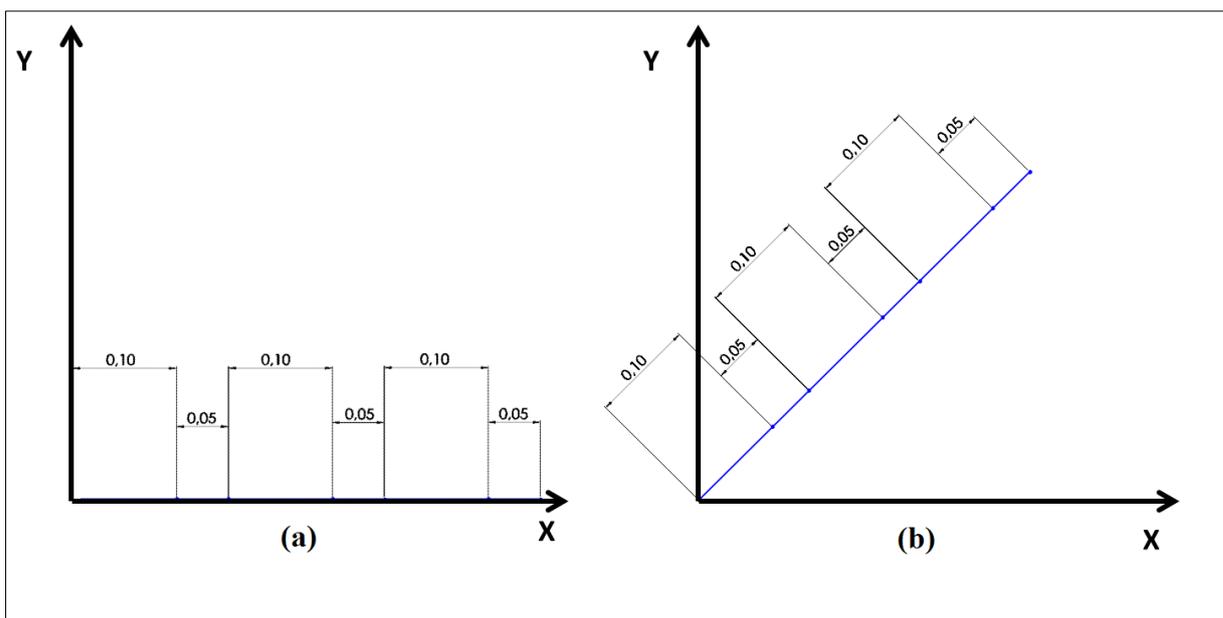
O objetivo deste experimento foi constatar e mensurar a limitação de processamento durante o fresamento de superfícies complexas em centros de usinagem CNC. Sabe-se de Coelho et al. (2009) que cada conjunto máquina/CNC

possui um valor de MRT (*Machine Response Time* – Tempo de Resposta da Máquina) que caracteriza a sua limitação de processamento. Este valor é obtido através de movimentações com pequenos segmentos lineares de deslocamento, mantendo a direção e sentido constantes em cada eixo.

Os experimentos do presente trabalho buscaram avaliar o comportamento do MRT com a variação individual do tamanho do segmento nos eixos (l_x , l_y e l_z) mantendo a mesma direção e sentido de movimentação (Figura 19). Para tanto, foram utilizados pequenos valores de segmentos (0,1mm; 0,01mm; 0,005mm e 0,001mm) nos seguintes experimentos:

- (E1V1) Movimentação uniaxial com deslocamento (l_x , l_y ou l_z) constante;
- (E1V2) Movimentação tridimensional com deslocamento equivalente ($l_x=l_y=l_z$);
- (E1V3) Movimentação tridimensional com deslocamento em um eixo menor que nos demais (ex.: $l_x < l_y=l_z$);
- (E1V4) Movimentação uniaxial com deslocamento (l_x , l_y ou l_z) variando entre dois valores;
- (E1V5) Movimentação tridimensional com deslocamento de cada eixo variando entre dois valores equivalentes entre os eixos ($l_{x1}=l_{y1}=l_{z1}=l_1$ e $l_{x2}=l_{y2}=l_{z2}=l_2$);
- (E1V6) Movimentação uniaxial com exclusão de eixo do programa CNC.

Figura 19 – Esquema ilustrativo do experimento 1 para situação uniaxial (a) e biaxial (b) (dimensões em mm).



Fonte: Autor (2017).

Os valores de deslocamento utilizados estão entre o limite de movimentação mínimo da máquina (0,001mm) e o valor proposto por Coelho et al. (2009) para realização deste teste (0,1mm). A descrição dos valores de deslocamento para cada eixo encontra-se nas Tabelas 10 e 11 do Apêndice A, seguindo os códigos apresentados acima (E_V_), onde E é o experimento e V a variação específica do sub caso.

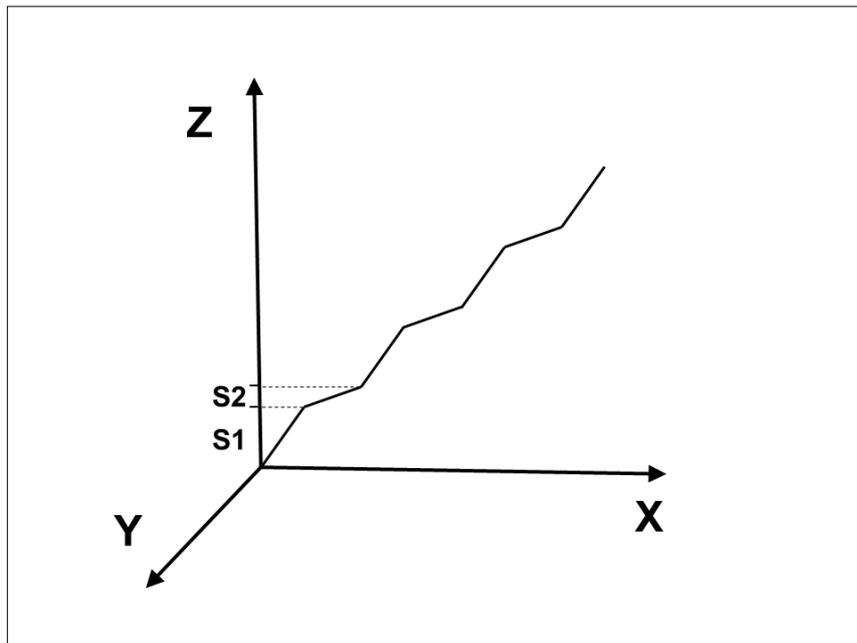
3.2. Avaliação da influência do deslocamento em cada eixo no TES em segmentos consecutivos com alteração na direção de movimentação e sentido constante (Experimento 2)

Neste experimento buscou-se verificar de que forma a alteração na direção de deslocamento com sentido constante modifica o TES. Conforme apresentado anteriormente, a alteração da direção de movimentação evidencia as limitações cinemáticas em conjunto com as limitações de processamento.

Para caracterizar o comportamento do conjunto máquina/CNC neste caso, foram executadas movimentações em que um eixo apresenta variação no seu valor de deslocamento enquanto os demais eixos têm seus valores de deslocamento

fixos. Desta forma, o eixo que apresenta a variação limita a velocidade de avanço dos demais eixos e consequentemente define o TES. A Figura 20 apresenta um exemplo ilustrativo desta movimentação, sendo Z o eixo com variação e portanto o limitante.

Figura 20 – Esquema ilustrativo do experimento 2 com variação de deslocamento no eixo Z.



Fonte: Autor (2017).

Os valores de deslocamento dos eixos não limitantes (ENL) foram definidos nas seguintes combinações:

- (0,2mm; 0,2mm);
- (0,2mm; 0,1mm);
- (0,1mm; 0,2mm);
- (0,1mm; 0,1mm).

As diferentes combinações investigam se há influência de um eixo assumido como não limitante no TES. No eixo limitante (EL) foram utilizados dois níveis de deslocamento: superior (S1) e inferior (S2) (Figura 20), os quais foram estabelecidos nos seguintes valores:

- (S1)=(0,2mm; 0,1mm; 0,05mm; 0,01mm e 0,005mm);
- (S2)=(0,1mm; 0,05mm; 0,01mm; 0,005mm e 0,001mm).

Os experimentos executados realizaram todas as combinações de deslocamento acima descritas para cada eixo separadamente e são apresentados nas Tabelas 12 (EL = Y) e 13 (EL = X e Z) do Apêndice A. Os valores delineados neste experimento estão na região do limite inferior de deslocamento da máquina, onde a ocorrência das limitações é mais evidente. Além disso, a ampla combinação de valores obtida proporciona uma análise abrangente dos dados.

Durante o processo de equacionamento, experimentos adicionais foram necessários para melhorar a descrição dos dados pelas equações. Os valores utilizados nos experimentos adicionais estão dentro da faixa estabelecida inicialmente e estão apresentados na Tabela 12 do Apêndice A.

3.3. Avaliação da alteração do sentido de movimentação no TES em função do tamanho do deslocamento (Experimento 3)

A alteração no sentido de movimentação de um eixo apresenta um caso de grande limitação cinemática nos centros de usinagem CNC. Neste caso, a máquina deve obrigatoriamente reduzir a sua velocidade a zero para então movimentar-se no sentido oposto. Para isso, utiliza a sua capacidade máxima de aceleração.

Este experimento pretende obter dados para equacionar o TES em função do tamanho de deslocamento no eixo quando o mesmo altera o seu sentido de movimentação. Foram executados programas CNC com movimentações positivas seguidas de movimentações negativas com deslocamento constante em cada um dos eixos separadamente (X, Y e Z).

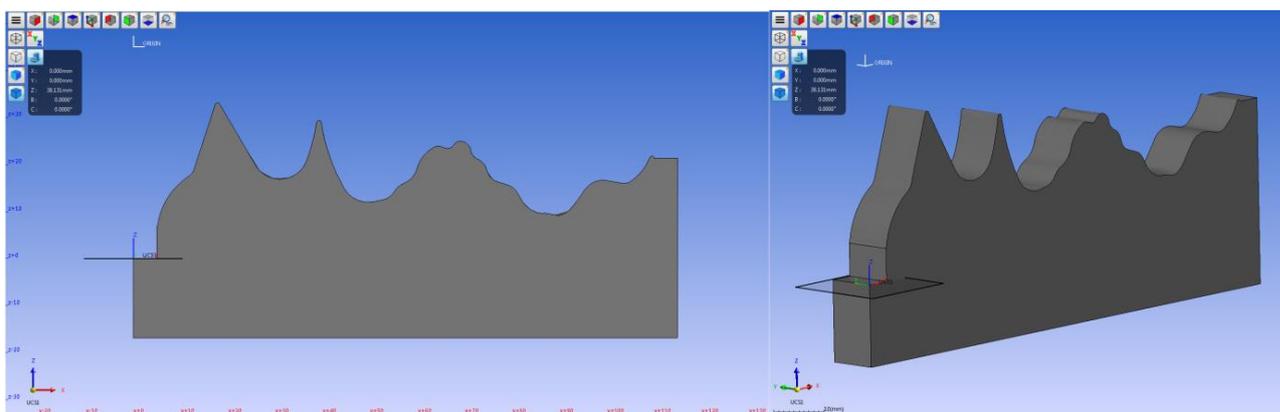
A movimentação positiva foi determinada nos seguintes valores: 0,001mm; 0,005mm; 0,01mm; 0,05mm; 0,1mm; 0,2mm; 0,4mm; 0,6mm; 0,8mm e 1mm. Após o deslocamento positivo a máquina retorna à sua coordenada inicial (X=0; Y=0; Z=0), para realização da movimentação negativa. Os dados dos testes referentes ao experimento 3 são apresentados na Tabela 14 do Apêndice A.

3.4. Execução de programas CNC para fresamento de formas complexas calculadas via sistema CAM para validação do modelo

A fim de realizar a validação do modelo cinemático proposto, foram executados programas CNC com características reais de uma operação de

acabamento de superfície complexa em três eixos. A geometria (Figura 21) foi obtida de Souza (2004), sendo que seu perfil é composto por curvas representativas de superfícies complexas presentes em moldes e matrizes. A mesma possui 300 mm de comprimento, 120 mm de largura e 70 mm de altura. Os programas CNC foram calculados e pós-processados no sistema CAM comercial WorkNC v.23.

Figura 21 – Geometria representativa de superfícies complexas utilizada para validação do modelo proposto.



Fonte: Autor (2017).

Para uma completa avaliação do modelo, foram calculadas operações de acabamento utilizando a estratégia passes paralelos em 45° com o eixo X. Desta forma, pôde-se avaliar o comportamento do modelo em situações triaxiais, a qual foi o foco deste estudo.

A tolerância de cálculo foi variada em três níveis para estes programas (0,1mm; 0,01mm e 0,005mm). Esta especificação influencia diretamente na distribuição de pontos e conseqüentemente no tempo de usinagem, como já mencionado no texto.

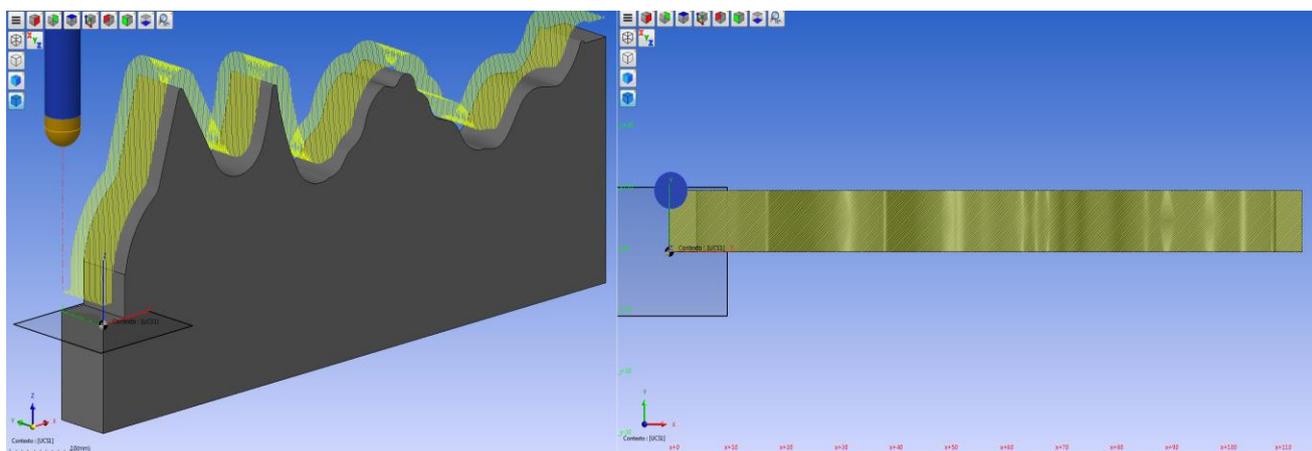
Os valores de tolerância estabelecidos abrangem desde uma operação com baixa necessidade de precisão (0,1mm), até próximo do limite de incremento de movimentação da máquina (0,005mm). Além disso, a tolerância intermediária (0,01mm) é um valor comumente utilizado no acabamento de cavidades de moldes segundo membros de ferramentarias.

A Tabela 1 apresenta os demais parâmetros inseridos no cálculo das trajetórias, os quais foram definidos com base em Souza e Coelho (2006). A Figura 22 apresenta as trajetórias em passes paralelos na direção de 45° com o eixo X.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no cálculo das trajetórias de validação.

Velocidade de avanço programada	4000 mm/min
Ferramenta	Esférica \varnothing 6mm
Sobremetal	0mm
Ciclo	Contínuo
Avanço Radial (ae)	0,2mm

Fonte: Autor (2017).

Figura 22 - Trajetórias em passes paralelos calculadas em 45° com o eixo X.

Fonte: Autor (2017).

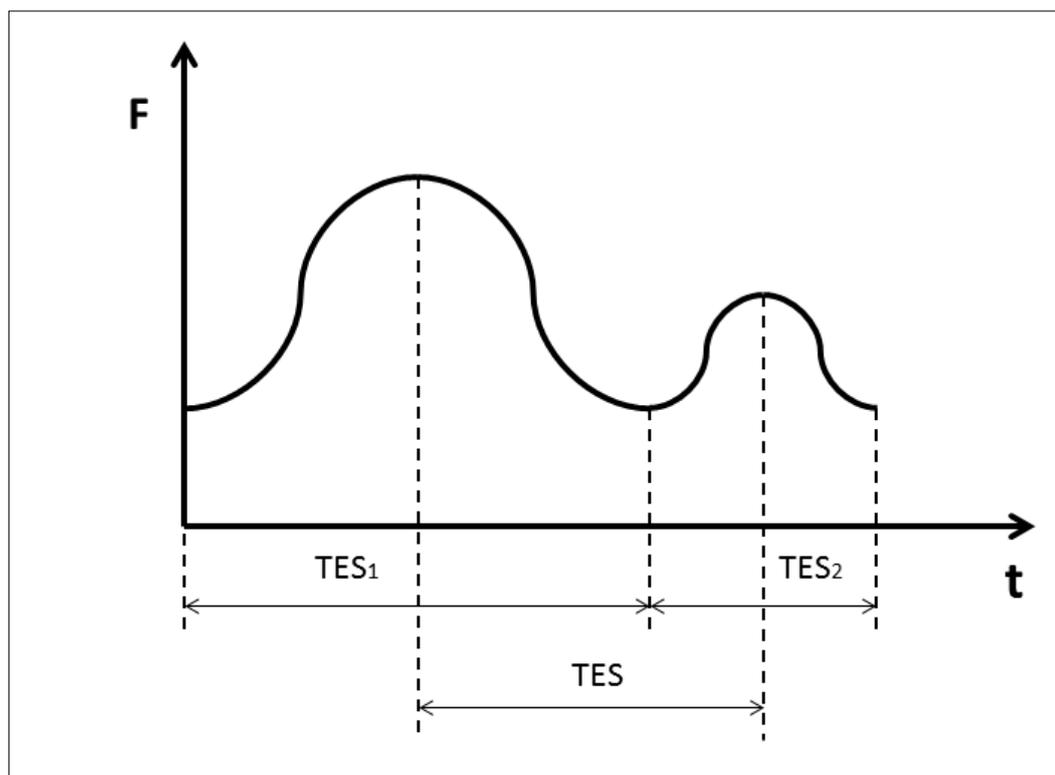
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos dos experimentos realizados, o desenvolvimento do equacionamento e algoritmo do modelo proposto e a validação do mesmo. A partir da análise dos dados experimentais foi possível compreender de que forma o TES é afetado pela distribuição dos tamanhos dos segmentos em cada um dos eixos, identificar subcasos recorrentes durante a movimentação e mensurar o desempenho de cada eixo nos subcasos.

Nos experimentos com variação do tamanho do segmento, o TES calculado é um valor médio entre os TES individuais de cada segmento, visto que representa a soma das metades de seus TES individuais. A Equação 44 e a Figura 23 apresentam esta metodologia. Desta forma, os TES calculados nas equações do modelo proposto são sempre relativos à transição entre dois segmentos em sequência.

$$TES = \frac{TES_1}{2} + \frac{TES_2}{2} = \frac{TES_1 + TES_2}{2} \quad (44)$$

Figura 23 – Ilustração do TES utilizado para quantificar o tempo de transição entre dois segmentos.



Fonte: Autor (2017).

4.1. Análise do comportamento do TES em função do tamanho do deslocamento em cada eixo para movimentações com direção e sentido constantes (CASO 1)

Neste item serão apresentados os dados obtidos do experimento 1 e o equacionamento do TES quando este é definido apenas pela limitação de processamento do centro de usinagem CNC. Os resultados dos testes realizados neste experimento são apresentados nas Tabelas 10 e 11 do Apêndice A conforme a codificação já apresentada.

A partir dos valores de deslocamento por eixo de cada teste, são calculados os valores de módulo para cada segmento seguindo a Equação 2. Para testes com variação do tamanho dos deslocamentos no eixo e conseqüentemente do módulo dos segmentos, calcula-se o módulo médio através da média aritmética dos módulos individuais dos segmentos 1 e 2. Com o valor do tempo total de execução de cada teste e o número de linhas do mesmo calcula-se o tempo/linha que é assumida como a variável TES.

Do grupo de experimentos E1V1 foi possível constatar que para limitação de processamento não há diferença no valor do TES entre os eixos. Além disso, o tempo total de execução de cada teste depende exclusivamente do número de linhas do programa, o que faz com o TES apresente um valor constante neste caso igual a 0,45ms.

A diferença observada nos experimentos E1V1P1 a E1V1P3 em relação aos demais do grupo E1V1 se deve ao baixo valor de tempo obtido, o que reduz a precisão pela baixa resolução da medição. Este fato levou à desconsideração de todos os experimentos com 4000 linhas para evitar a inserção de erros no modelo.

Dos grupos de experimentos E1V2 ao E1V6 verificou-se que não existem diferenças significativas entre todas as variações anteriormente apresentadas. Este comportamento demonstra que no caso da limitação de processamento, independente dos valores de deslocamento nos eixos, das variações destes ou do número de eixos em movimento, o TES permanece constante.

Para este conjunto máquina/CNC assumiu-se o MRT como 0,45ms. Apesar de sua metodologia de obtenção diferente, este parâmetro é chamado de MRT seguindo nomenclatura proposta por Coelho et al. (2009), por caracterizar a limitação de processamento anteriormente detectada pelos autores.

A condição em que o valor do TES para dois segmentos consecutivos é função da limitação de processamento é chamada de CASO 1. Como apresentado por Coelho et al. (2009), o MRT fornece uma relação direta entre a velocidade de avanço para determinado segmento e o seu módulo (Equação 42), uma vez que o tempo para realizar essa movimentação é constante.

Dessa forma, a partir do MRT já conhecido e da velocidade de avanço programada (F) é possível calcular o valor do módulo mínimo (l_{\min}) que o segmento deve possuir para atingir a velocidade programada (Equação 45). Se o módulo médio de dois segmentos consecutivos (l_{med}) é maior ou igual ao módulo mínimo, calcula-se o TES pela Equação 46 que considera que a velocidade de avanço programada foi atingida. Do contrário, é assumida a Equação 47, que simplesmente transforma a variável MRT de [ms] para a variável TES em [s].

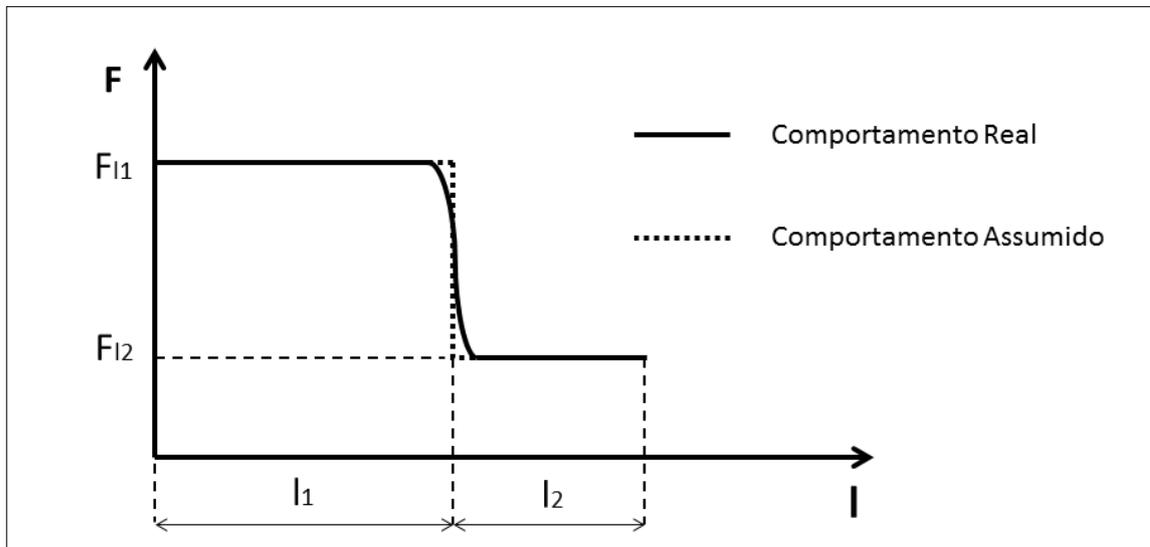
$$l_{\min} [\text{mm}] = \frac{\text{MRT} [\text{ms}] \times F [\text{mm}/\text{min}]}{60.000} \quad (45)$$

$$\text{TES [s]} = \frac{l_{\text{med}} [\text{mm}]}{F [\text{mm/min}]} \times 60 \quad (46)$$

$$\text{TES [s]} = \frac{\text{MRT [ms]}}{1000} \quad (47)$$

A Figura 24 ilustra o comportamento da velocidade de avanço assumido para o equacionamento do modelo e o comportamento real teórico. Como neste caso a velocidade de avanço é igual a um valor proporcional ao módulo na maior parte do segmento, o erro encontra-se na região de aceleração/desaceleração entre as duas velocidades dos dois segmentos. Porém, como demonstrado nos dados experimentais, este erro é insignificante.

Figura 24 – Comportamento real e comportamento assumido da velocidade de avanço para o equacionamento do CASO 1.



Fonte: Autor (2017).

4.2. Análise do comportamento do TES em movimentações com direção variável e sentido constante (CASO 2)

Neste item serão apresentados os dados obtidos do experimento 2 e o equacionamento do TES quando este é definido pela atuação conjunta das limitações de processamento e cinemáticas do centro de usinagem CNC. Os

resultados dos testes realizados neste experimento encontram-se nas Tabelas 12 e 13 do Apêndice A.

Na Tabela 12 estão contidos os dados obtidos aplicando as variações de deslocamento no eixo Y, sendo este o eixo limitante. Da mesma forma, a Tabela 13 exhibe os dados obtidos referentes aos eixos X e Z. No decorrer dos experimentos, notou-se que os eixos X e Z apresentavam exatamente o mesmo comportamento e que o eixo Y era mais lento que os demais.

Isto ocorre devido ao fato de a movimentação dos eixos X e Z ocorrerem no eixo árvore da máquina, enquanto que a do eixo Y ocorre na mesa da máquina (Figura 18). Com isso, o eixo Y precisa deslocar uma quantidade muito superior de massa, o que o torna mais lento cinematicamente. Em razão desse comportamento, tanto os dados como os equacionamentos foram divididos entre o eixo Y e os eixos semelhantes X e Z.

Inicialmente, observaram-se dois padrões de limitação distintos nos eixos. Os experimentos nos quais ambos os valores de deslocamento do eixo limitante (S1 e S2 de EL) são menores que ambos os valores de deslocamento dos eixos não limitantes (ENL1 e ENL2) são atribuídos ao CASO 2A.

Os experimentos nos quais o valor superior de deslocamento do eixo limitante (S1 – EL) é igual ou superior aos valores de deslocamento dos eixos não limitantes foram classificados como CASO 2B. Os CASOS 2A e 2B são discutidos e equacionados nos itens que seguem.

4.2.1. Investigação do comportamento e equacionamento do CASO 2A

Nestes testes, o comportamento do TES foi aproximadamente constante para cada combinação de valores S1-S2 do eixo limitante e independente do módulo médio dos segmentos. Este dado revelou que a variação do deslocamento no eixo limitante associado aos seus valores reduzidos de deslocamento perante os demais eixos o torna absoluto na definição do TES.

Os valores identificados do CASO 2A foram reunidos e são apresentados nas Tabelas 2 e 3. Nos casos em que houve divergência nos valores em função do número de linhas pela resolução reduzida dos dados obtidos optou-se por selecionar o maior valor do TES.

Tabela 2 – Dados do CASO 2A para o eixo Y.

S1 (mm)	S2 (mm)	TES (s)
0,100	0,050	0,02900
0,100	0,030	0,03800
0,100	0,010	0,04400
0,100	0,005	0,04500
0,100	0,001	0,04600
0,075	0,050	0,02000
0,075	0,030	0,02750
0,075	0,010	0,03700
0,075	0,005	0,03900
0,050	0,025	0,02000
0,050	0,010	0,02500
0,050	0,005	0,02800
0,050	0,001	0,03050
0,030	0,020	0,01250
0,030	0,010	0,01800
0,030	0,005	0,02000
0,030	0,001	0,02150
0,010	0,007	0,00700
0,010	0,005	0,00900
0,010	0,003	0,01050
0,010	0,001	0,01200
0,005	0,001	0,00800

Fonte: Autor (2017).

Tabela 3 - Dados do CASO 2A para o eixos X e Z

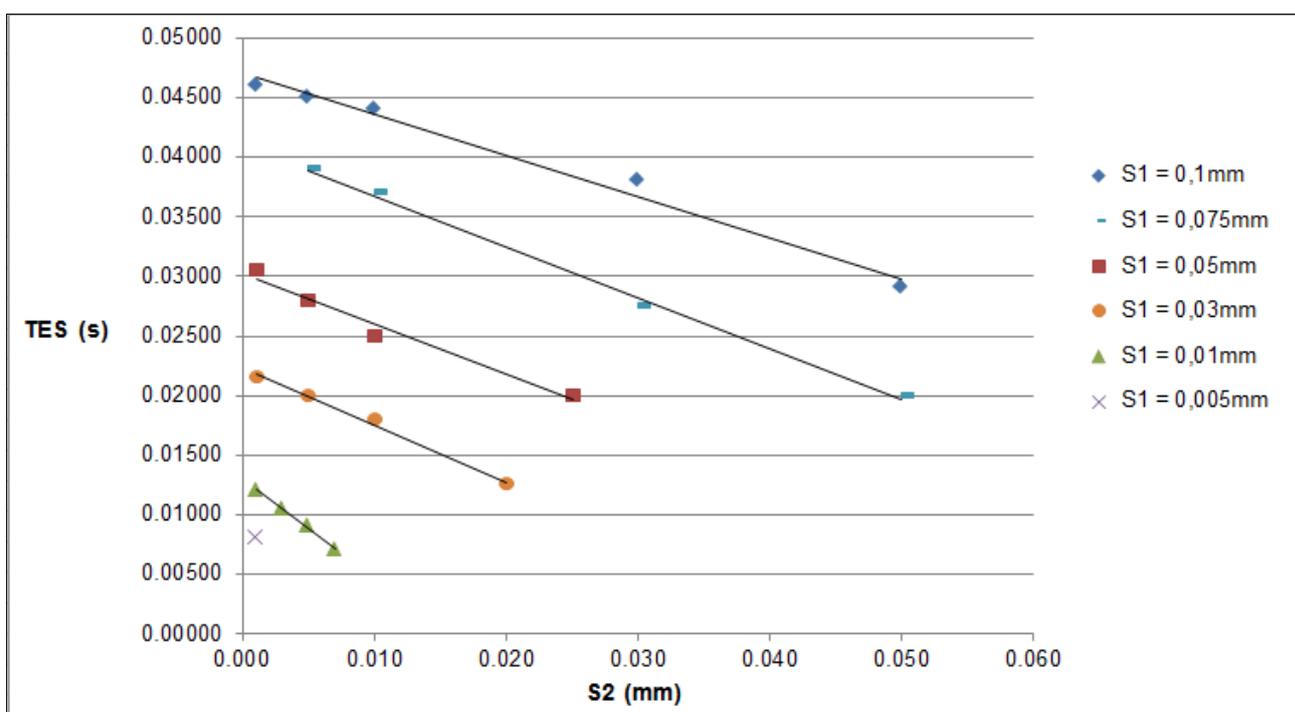
S1 (mm)	S2 (mm)	TES (s)
0,100	0,050	0,01550
0,100	0,030	0,01900
0,100	0,010	0,02150
0,100	0,005	0,02200
0,100	0,001	0,02250
0,050	0,025	0,01150
0,050	0,010	0,01450
0,050	0,005	0,01550
0,050	0,001	0,01600
0,010	0,007	0,00400
0,010	0,005	0,00525
0,010	0,003	0,00600
0,010	0,001	0,00700
0,005	0,001	0,00475

Fonte: Autor (2017).

Para duas medidas teoricamente iguais e que se apresentam diferentes por uma unidade de resolução, a faixa de incerteza do valor inferior se encontra entre as duas medidas. Desta forma, assumiu-se que um atraso no sistema de medição originou gerou um erro no valor inferior e admitiu-se o valor superior como o verdadeiro.

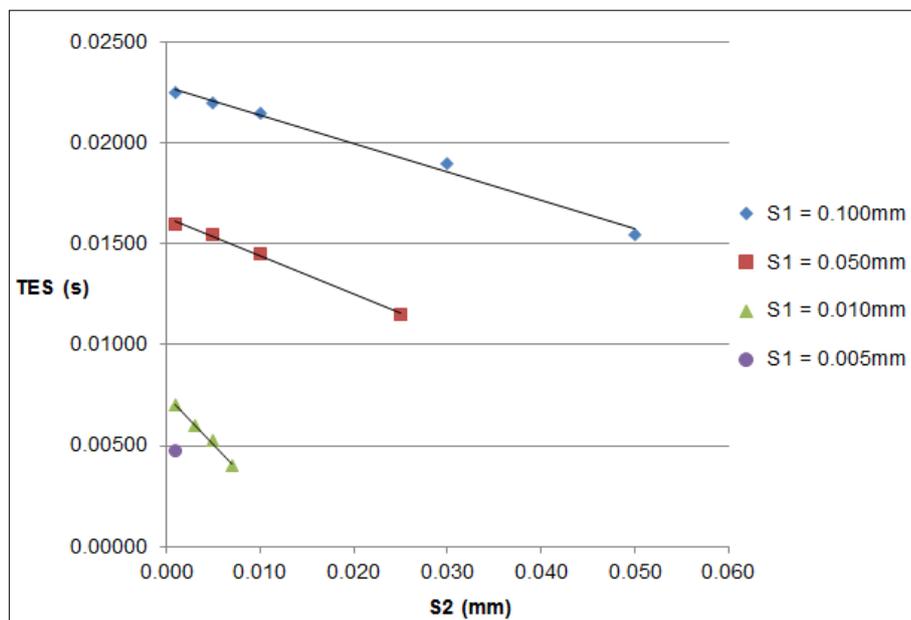
Ao plotar os dados de TES em função de S2 para cada valor de S1 constante observou-se um comportamento aproximadamente linear (Figuras 25 e 26). Assim sendo, atribuiu-se este fato à variação da velocidade de avanço entre o valor máximo previsto para S2 e a máxima atingida em S1.

Figura 25 – Comportamento do TES no CASO 2A para o eixo Y.



Fonte: Autor (2017).

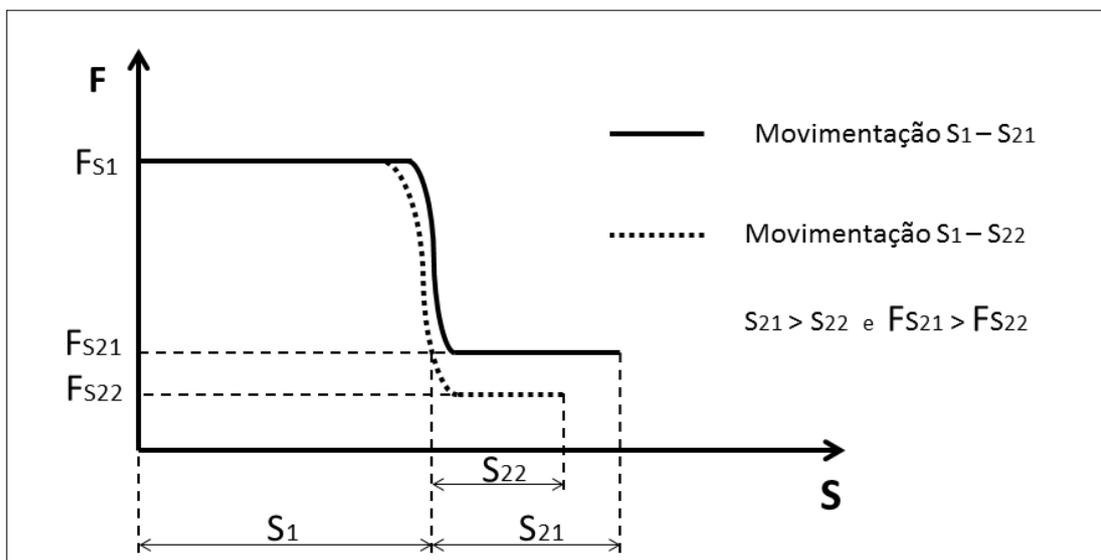
Figura 26 - Comportamento do TES no CASO 2A para os eixos X e Z.



Fonte: Autor (2017).

Para uma transição S1 para S2, conforme reduz-se o valor de S2, menor é a velocidade atingida no deslocamento S1 pois antes o eixo deve iniciar sua desaceleração para alcançar a velocidade prevista pelo MRT para S2. Um comportamento simétrico é observado em uma transição S2 para S1. A Figura 27 apresenta esse possível comportamento considerando S1 e S2 grandes o suficiente para apresentar uma estabilização em sua velocidade de avanço.

Figura 27 – Possível comportamento da velocidade de avanço para o CASO 2A.



Fonte: Autor (2017).

As curvas apresentadas nas Figuras 25 e 26 foram equacionadas pelo método de regressão linear já comentado. Os coeficientes angular e linear das equações obtidas, bem como o coeficiente de determinação (R^2) estão presentes nas Tabelas 4 e 5 e plotados nas Figuras 28 a 31 em função de S_1 , onde S_1 é o maior valor de deslocamento para o eixo em análise [mm], S_2 é o menor valor de deslocamento para o eixo em análise [mm] e o TES é o tempo de execução de segmento [s].

Tabela 4 – Equações geradas em função de S_1 para o CASO 2A no eixo Y.

S_1 (mm)	TES (s)	R^2
0,100	$-0,3431(S_2) + 0,0470$	0,9847
0,075	$-0,4281(S_2) + 0,0410$	0,9971
0,050	$-0,4244(S_2) + 0,0302$	0,9737
0,030	$-0,4777(S_2) + 0,0223$	0,9914
0,010	$-0,8250(S_2) + 0,0129$	0,9945

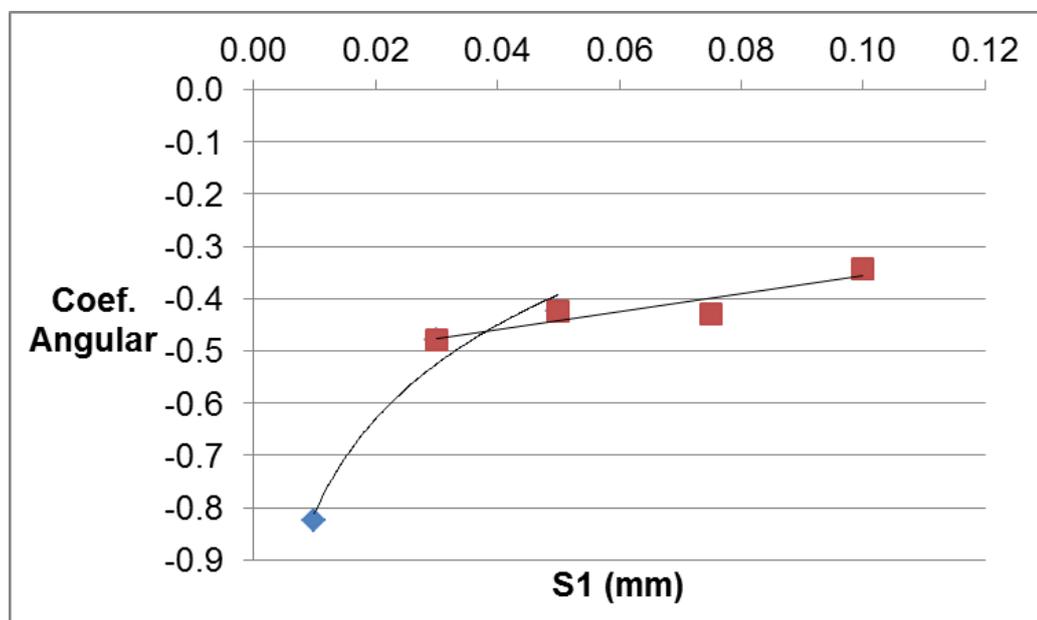
Fonte: Autor (2017).

Tabela 5 - Equações geradas em função de S1 para o CASO 2A nos eixos X e Z.

S1 (mm)	TES (s)	R ²
0,100	$-0,1409(S2) + 0,0228$	0,9913
0,050	$-0,1916(S2) + 0,0163$	0,9964
0,010	$-0,4875(S2) + 0,0075$	0,9909

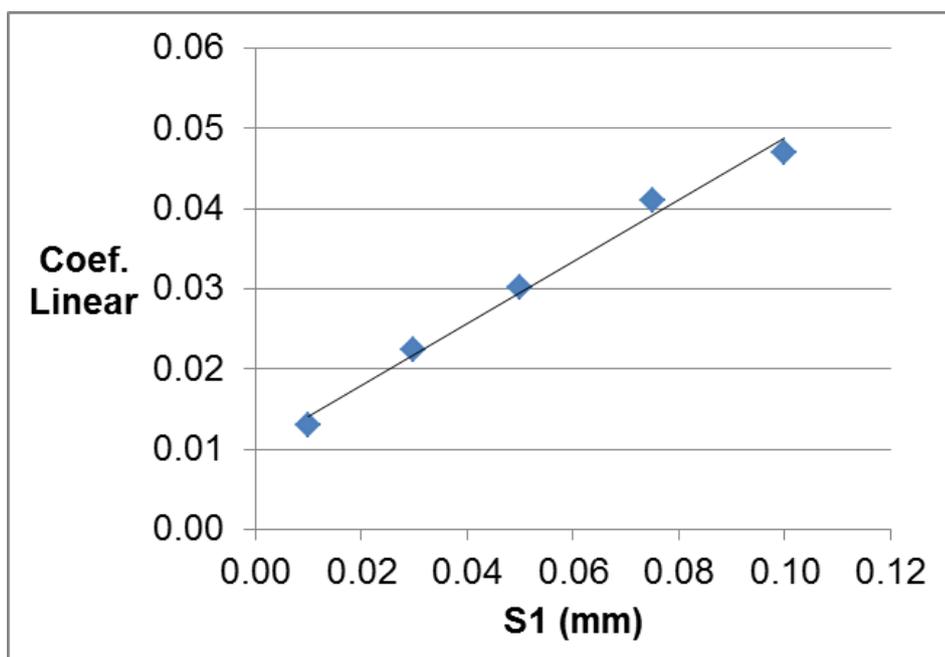
Fonte: Autor (2017).

Figura 28 – Comportamento do coeficiente angular do CASO 2A no eixo Y.



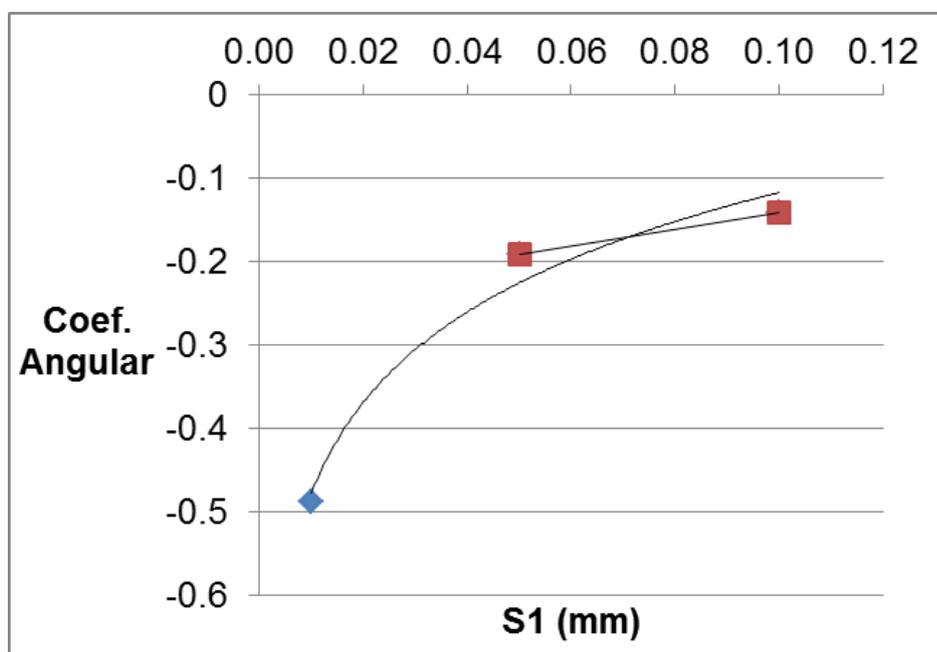
Fonte: Autor (2017).

Figura 29 - Comportamento do coeficiente linear do CASO 2A no eixo Y.



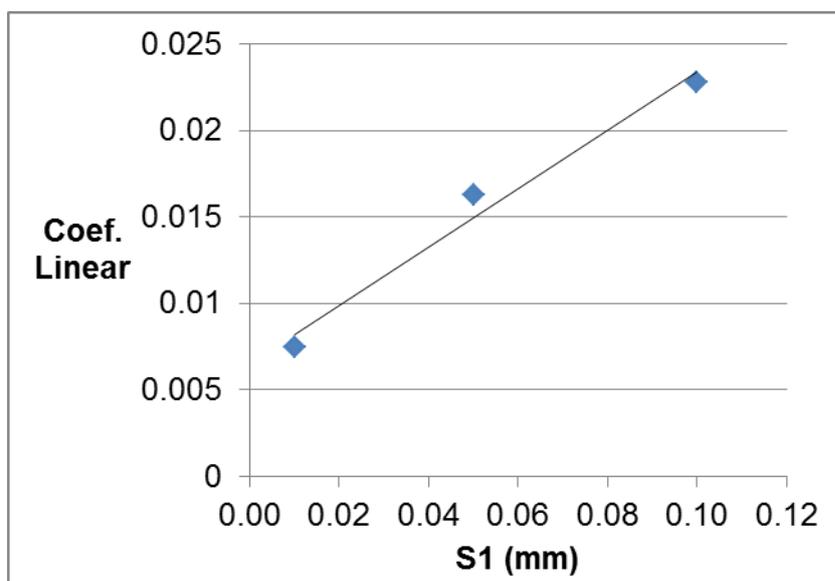
Fonte: Autor (2017).

Figura 30 - Comportamento do coeficiente angular do CASO 2A no eixo X/Z.



Fonte: Autor (2017).

Figura 31 - Comportamento do coeficiente linear do CASO 2A no eixo X/Z.



Fonte: Autor (2017).

Com a análise gráfica dos dados dos coeficientes foi possível inferir sobre os seus comportamentos. O coeficiente angular apresenta inicialmente uma alta taxa de crescimento com posterior estabilização. De fato, com o aumento de S1, menos a sua velocidade atingida será influenciada pela aceleração/desaceleração ocasionada pela velocidade de S2.

No limite desta tendência (Coeficiente angular nulo), a zona de transição com a velocidade de S2 é desprezível no valor de TES. Neste caso, o TES pode ser aproximado pela média aritmética dos MRTs dos deslocamentos S1 e S2 (CASO1), pois já não há presença significativa das limitações cinemáticas.

Observando as Figuras 28 e 30, o padrão descrito pelos coeficientes angulares seria bem representado por uma equação logarítmica neperiana. Porém, ao aplicar esta equação utilizando todos os dados, as curvas geradas não representavam a região de estabilização satisfatoriamente.

Para resolver este problema e melhorar a correspondência entre a curva gerada e os dados experimentais, aplicou-se uma equação logarítmica neperiana com base nas três primeiras coordenadas e uma equação linear nas coordenadas excluindo-se a primeira. A utilização destas equações em conjunto gerou uma curva com continuidade e extrapolação dos dados satisfatória.

A separação das regiões de utilização das duas equações é dada pelo valor de intersecção das mesmas. O coeficiente linear apresentou um comportamento linear crescente em função de S1 (Figuras 29 e 31). Este representa o patamar do seu TES quando o seu deslocamento não é afetado pela desaceleração exigida pela variação de deslocamento. Este padrão segue o raciocínio anteriormente apresentado de Coelho et al. (2009).

As Equações 48 a 53 apresentam as equações finais obtidas, seus domínios e coeficientes de determinação, onde S1 é o maior valor de deslocamento para o eixo em análise [mm].

$$\text{CASO 2A (Y) (S1 < 0,038mm) Coef. Ang.} = 0,2596 \ln(S1) + 0,3855 \quad R^2 = 0,9632 \quad (48)$$

$$\text{CASO 2A (Y) (S1} \geq 0,038\text{mm) Coef. Ang.} = 1,6991(S1) - 0,5266 \quad R^2 = 0,8579 \quad (49)$$

$$\text{CASO 2A (Y) Coef. Linear} = 0,3844(S1) + 0,0103 \quad R^2 = 0,9885 \quad (50)$$

$$\text{CASO 2A (X/Z) (S1 < 0,071mm) Coef. Ang.} = 0,1564 \ln(S1) + 0,2430 \quad R^2 = 0,974 \quad (51)$$

$$\text{CASO 2A (X/Z) (S1} \geq 0,071\text{mm) Coef. Ang.} = 1,014(S1) - 0,2423 \quad R^2 = 1 \quad (52)$$

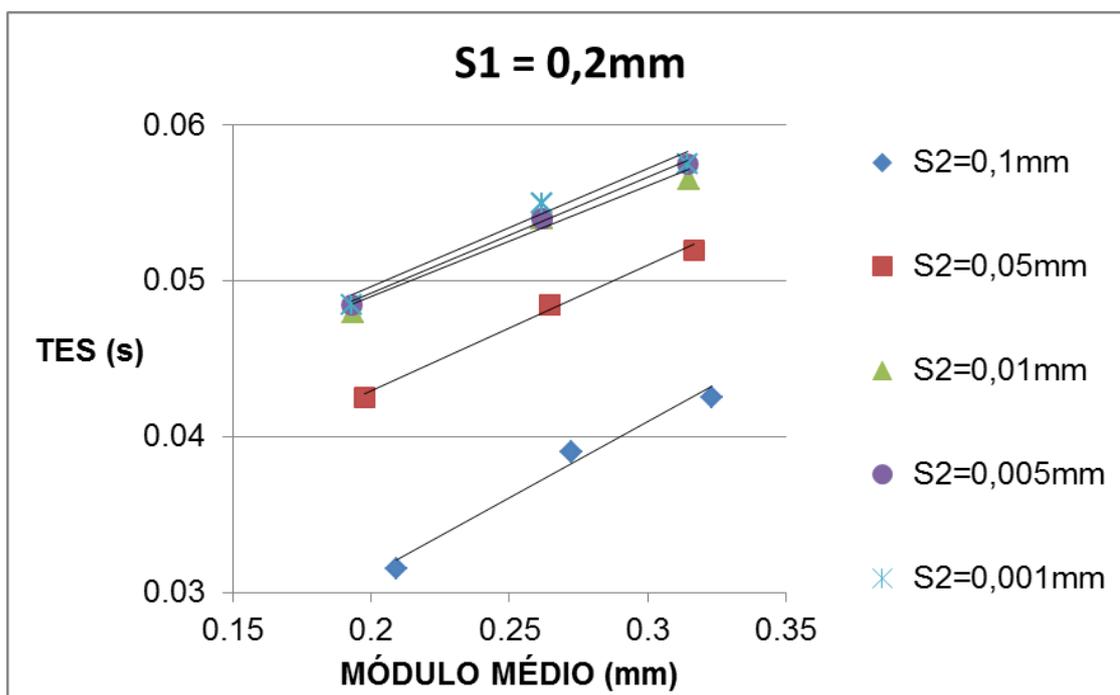
$$\text{CASO 2A (X/Z) Coef. Linear} = 0,1684(S1) + 0,0066 \quad R^2 = 0,9775 \quad (53)$$

4.2.2. *Investigação do comportamento e equacionamento do CASO 2B*

Dos testes realizados acerca deste caso foi possível observar que os valores de TES são variáveis para uma mesma combinação de deslocamentos (S1-S2) do eixo limitante. Neste caso, pode-se concluir que a variação do deslocamento presente no eixo limitante não é absoluta na determinação do TES.

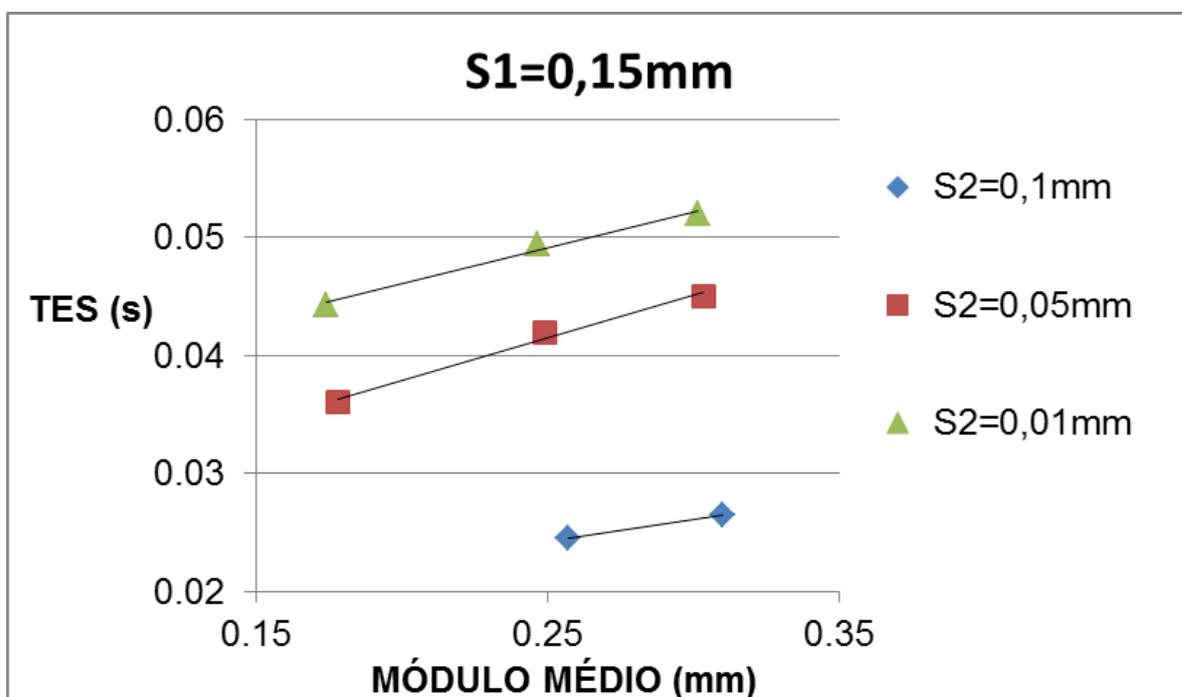
Ao analisar os valores de TES do eixo Y para cada combinação S1-S2 do eixo limitante, notou-se que os mesmos apresentam uma relação aproximadamente constante com o módulo médio. As Figuras 32 a 34 exibem os dados plotados sendo S1 constante para cada gráfico e S2 constante para cada curva. As curvas são equações lineares aproximadas a partir dos dados.

Figura 32 – Comportamento do TES no CASO 2B para $S1=0,2\text{mm}$.



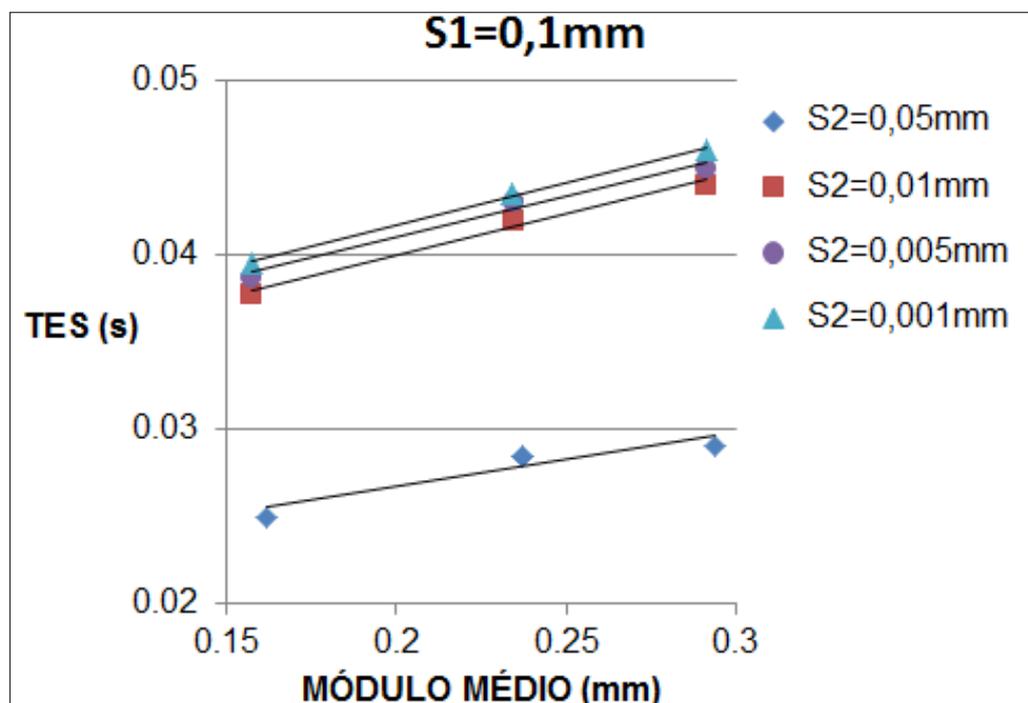
Fonte: Autor (2017).

Figura 33 - Comportamento do TES no CASO 2B para $S1=0,15\text{mm}$.



Fonte: Autor (2017).

Figura 34 - Comportamento do TES no CASO 2B para S1=0,1mm.



Fonte: Autor (2017).

O comportamento linear do TES em função do módulo médio indica que neste caso a velocidade de avanço consegue estabilizar em um valor, como ocorre no CASO 1 ao se superar o módulo mínimo. Esse possível padrão da velocidade de avanço é apresentado na Figura 24. A Tabela 6 apresenta as equações lineares de TES em função do módulo médio (l_{med} [mm]), onde S1 é o maior valor de deslocamento para o eixo em análise [mm], S2 é o menor valor de deslocamento para o eixo em análise [mm] e o TES é o tempo de execução de segmento [s].

Tabela 6 – Equações de TES para o CASO 2B.

S1 (mm)	S2 (mm)	TES (s)	R ²
0,200	0,100	$0,0977(l_{med}) + 0,0117$	0,9700
0,200	0,050	$0,0803(l_{med}) + 0,0269$	0,9910
0,200	0,010	$0,0713(l_{med}) + 0,0347$	0,9640
0,200	0,005	$0,0746(l_{med}) + 0,0343$	0,9960
0,200	0,001	$0,0756(l_{med}) + 0,0345$	0,9550
0,100	0,050	$0,0316(l_{med}) + 0,0204$	0,8580
0,100	0,010	$0,0474(l_{med}) + 0,0306$	0,9790

Fonte: Autor (2017).

Tabela 6 – Equações de TES para o CASO 2B (Conclusão).

S1 (mm)	S2 (mm)	TES (s)	R ²
0,100	0,005	0,0473(lmed) + 0,0316	0,9790
0,100	0,001	0,0488(lmed) + 0,0319	0,9970
0,150	0,010	0,0378(lmed) + 0,0148	1,0000
0,150	0,005	0,0723(lmed) + 0,0234	0,9870
0,150	0,001	0,0613(lmed) + 0,0338	0,9850

Fonte: Autor (2017).

Das equações geradas, notou-se que o valor do coeficiente angular das curvas varia em função de S2, mas sem apresentar um padrão possível de equacionar. Este fato foi atribuído às limitações de resolução dos testes que adicionam uma margem de erro aos dados.

Contudo, para cada valor de S1 as variações são pouco significativas, visto que neste caso a velocidade de avanço média é muito mais afetada por S1 pelo seu maior valor de deslocamento em comparação a S2. Desta forma, optou-se por utilizar um valor médio entre a amostra de dados para cada valor de S1 (Tabela 7).

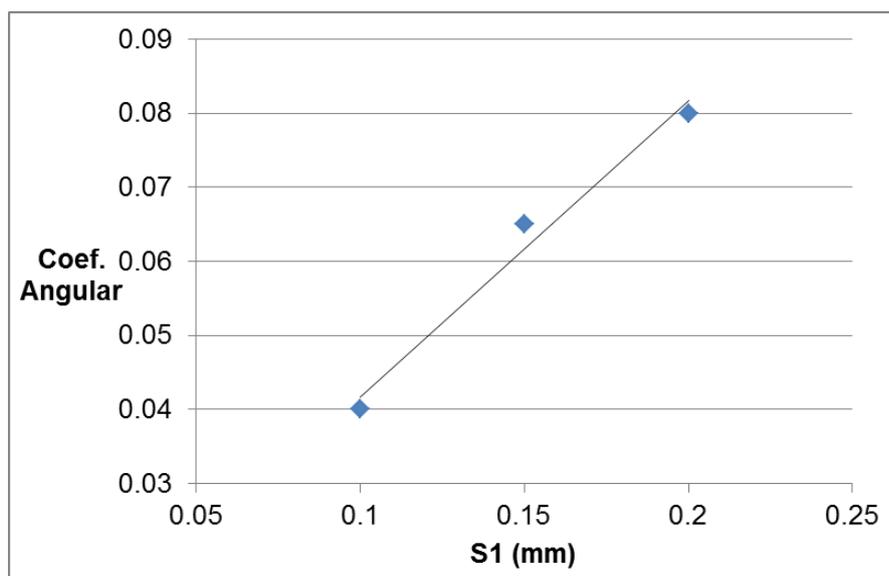
Tabela 7 – Média dos coeficientes angulares em função de S1.

S1 (mm)	Coeficiente angular de TES – CASO 2B
0,20	0,080
0,15	0,065
0,10	0,040

Fonte: Autor (2017).

A Figura 35 exibe os valores médios do coeficiente angular em função de S1. O padrão linear constatado é resultado da limitação de processamento já apresentada que define a velocidade atingida por S1. Quanto maior o valor de S1 maior a sua constante de proporcionalidade visto que para um mesmo valor do módulo médio, maior será a distância percorrida no eixo mais lento (S1). Com isso, obteve-se a Equação 54 final do coeficiente angular em função de S1, onde S1 é o maior valor de deslocamento para o eixo em análise [mm].

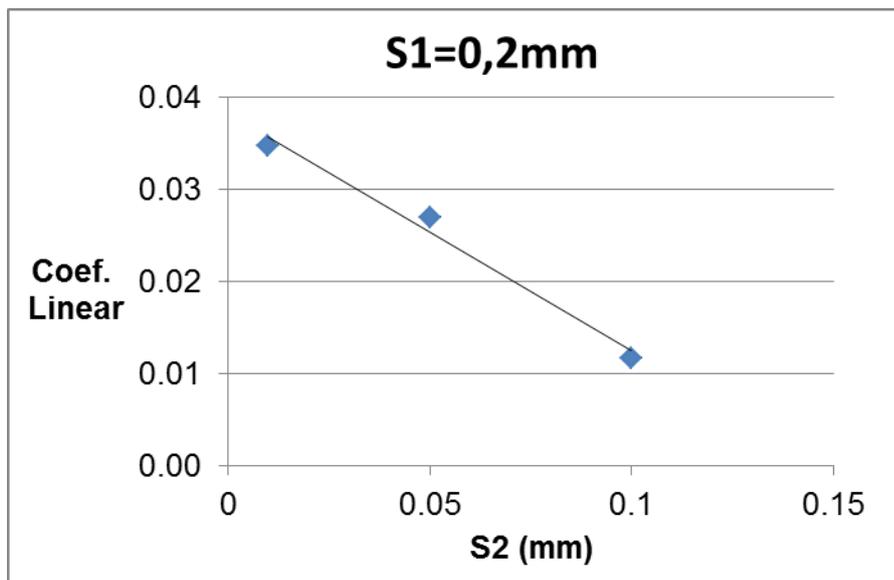
Figura 35 – Coeficiente angular de TES para CASO 2B.



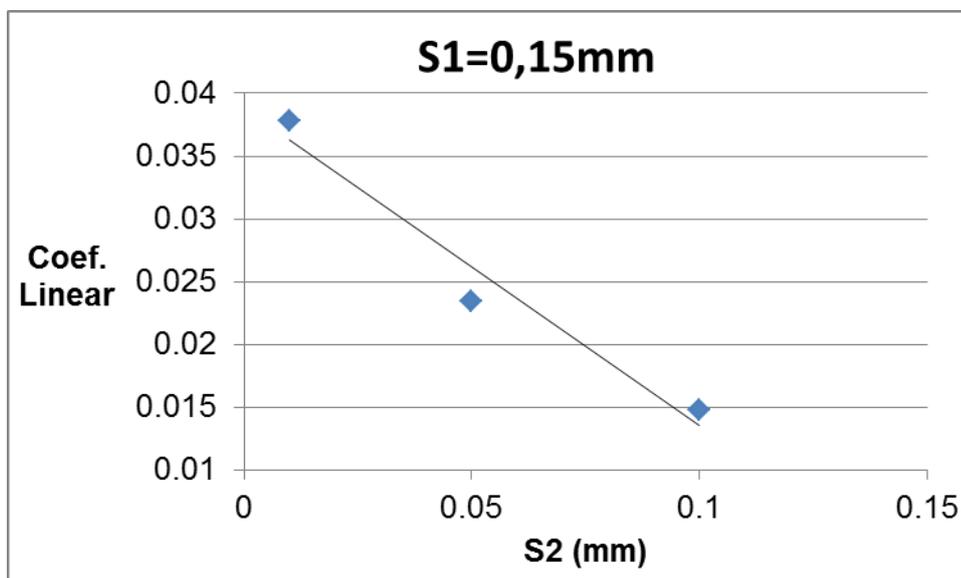
Fonte: Autor (2017).

$$\text{CASO 2B (Y)} \quad \text{Coef. Ang.} = 0,4(S1) + 0,0017 \quad R^2=0,9796 \quad (54)$$

Os coeficientes lineares das equações da Tabela 6 foram plotados em função de S2 para cada valor de S1 (Figuras 36 a 38). Estes dados foram aproximados por funções lineares apresentadas na Tabela 8. O padrão linear decrescente em função de S2 indicou que quanto maior o seu valor, menor será a redução da velocidade de avanço entre S1 e S2, e conseqüentemente menor o TES.

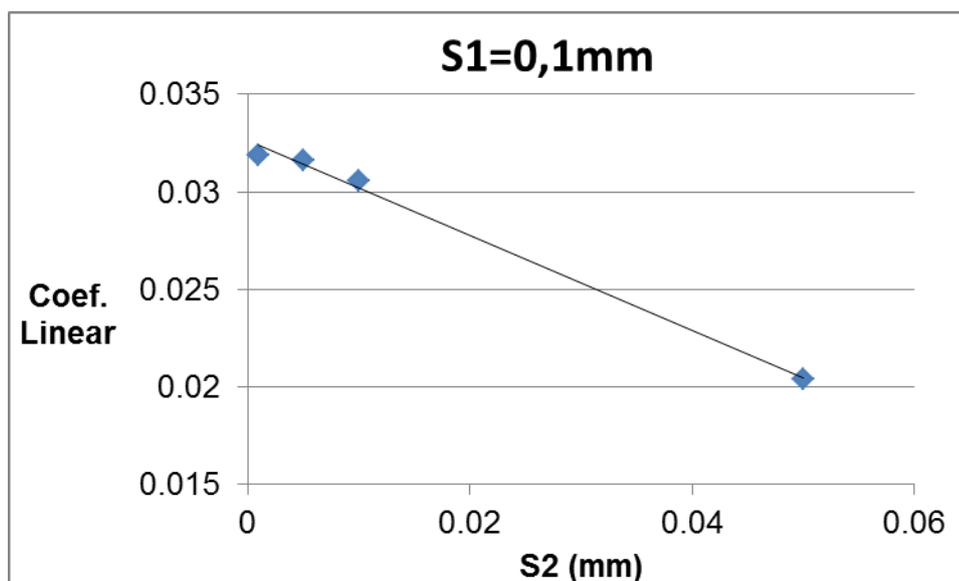
Figura 36 - Coeficiente linear de TES para CASO 2B e $S1=0,2\text{mm}$.

Fonte: Autor (2017).

Figura 37 - Coeficiente linear de TES para CASO 2B e $S1=0,15\text{mm}$.

Fonte: Autor (2017).

Figura 38 - Coeficiente linear de TES para CASO 2B e S1=0,1mm.



Fonte: Autor (2017).

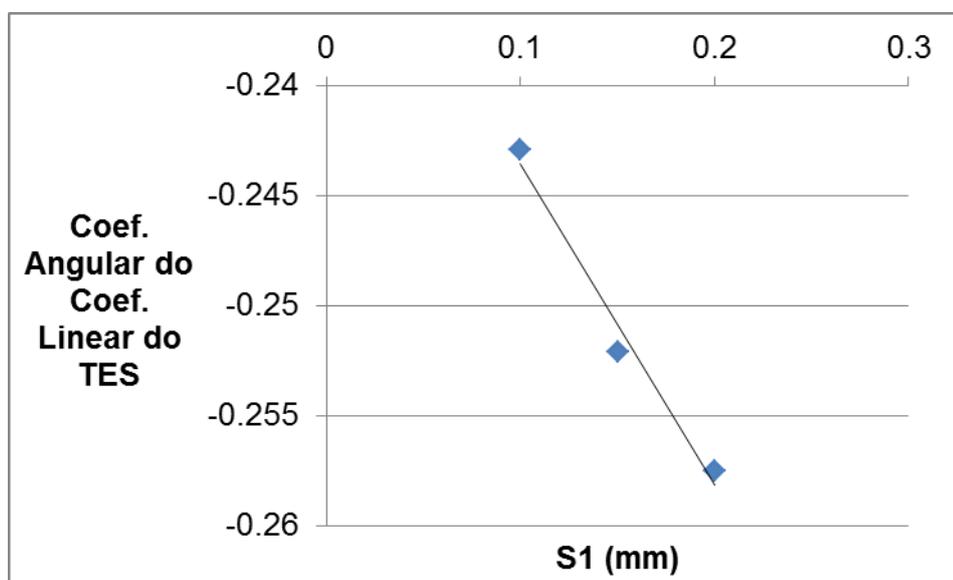
Tabela 8 – Equações para o coeficiente linear de TES do CASO 2B.

S1 (mm)	Coeficiente Linear de TES	R ²
0,20	$-0,2575(S2) + 0,0382$	0,9858
0,15	$-0,2521(S2) + 0,0388$	0,9571
0,10	$-0,2429(S2) + 0,0326$	0,9952

Fonte: Autor (2017).

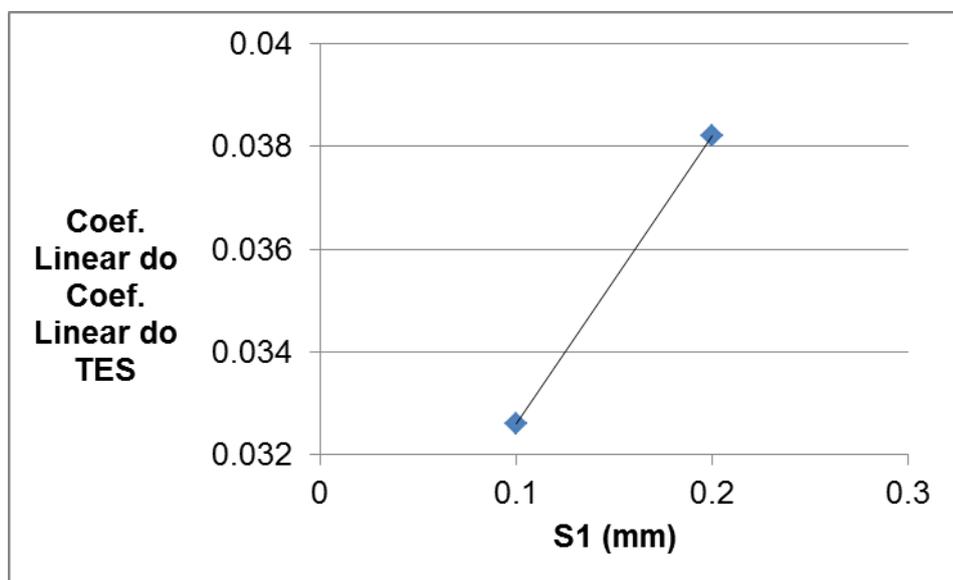
Os valores dos coeficientes angulares e lineares das equações da Tabela 8 foram plotados em função de S1 e são exibidas nas Figuras 39 e 40. O coeficiente angular neste caso aponta a relação existente entre os valores de S1 e S2. A redução do coeficiente angular com o aumento de S1 apontou uma maior sensibilidade da velocidade de S1 com a variação de S2, pois quanto maior a diferença entre os deslocamentos maior a redução da velocidade de avanço e mais relevante será a limitação cinemática.

Figura 39 - Coeficiente angular do coeficiente linear de TES para CASO 2B.



Fonte: Autor (2017).

Figura 40 - Coeficiente linear do coeficiente linear de TES para CASO 2B.



Fonte: Autor (2017).

O aumento do coeficiente linear com S1 novamente se deve ao fato de que com o aumento de S1 deve-se percorrer uma maior distância no eixo mais lento e assim aumenta-se o valor do TES. Desta forma, as Equações 55 e 56 a seguir definem os valores dos coeficientes angular e linear em função de S1 das equações

da Tabela 8. A Equação 57, por sua vez, apresenta o valor de TES do CASO 2B para o eixo Y em função de S1, S2 e do módulo médio.

Nestas equações, S1 é o maior valor de deslocamento para o eixo em análise [mm], S2 é o menor valor de deslocamento para o eixo em análise [mm], l_{med} é o módulo médio de dois segmentos consecutivos [mm] e o TES é o tempo de execução de segmento [s].

$$\text{CASO 2B (Y) - Coef. Ang. do Coef. Linear} = -0,146(S1) - 0,2289 \quad R^2=0,9779 \quad (55)$$

$$\text{CASO 2B (Y) - Coef. Linear. do Coef. Linear} = -0,056(S1) + 0,027 \quad R^2=1 \quad (56)$$

$$\text{C. 2B (Y) TES} = (0.4*S1+0.0017)*l_{med}+(-0.146*S1-0.2289)*S2+0.056*S1+0.027 \quad (57)$$

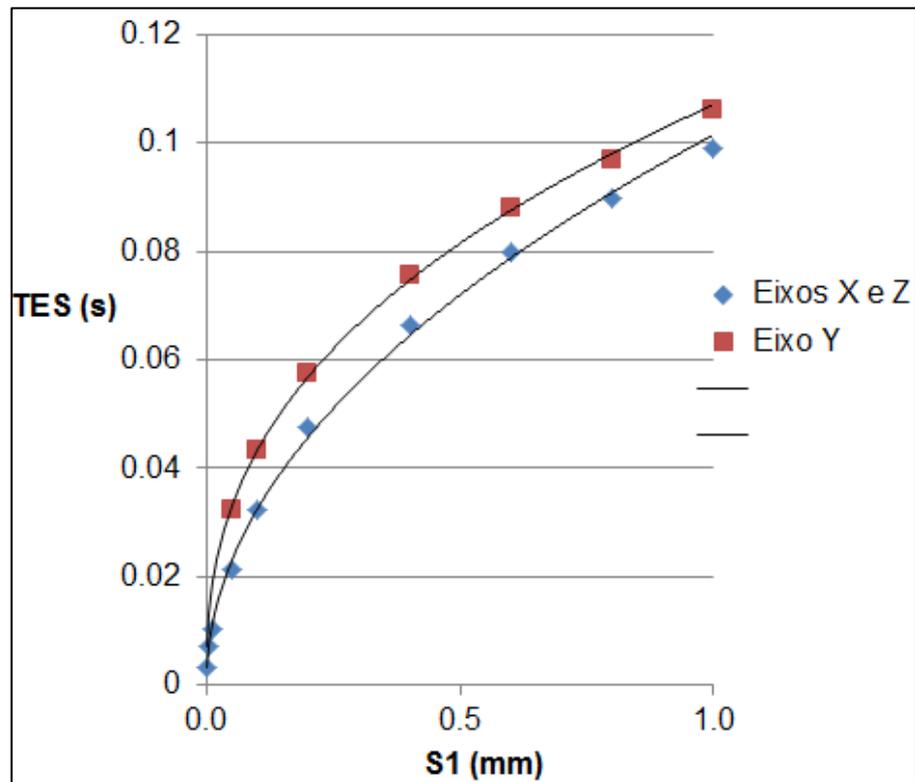
Os dados do CASO 2B referentes aos eixos X e Z não apresentaram o mesmo comportamento linear em função do módulo médio observado no eixo Y. Notou-se um comportamento divergente dos valores de TES possivelmente gerado pela atuação conjunta da limitação cinemática de Y (eixo mais lento) nestes testes.

Com isso, optou-se por utilizar a equação de TES do eixo Y nos eixos X e Z no CASO 2B por ser este o eixo com maior limitação cinemática. Obviamente, esta definição atribuiu um erro relativo positivo no modelo gerado.

4.3. Análise do comportamento do TES em movimentações com alteração do sentido de movimentação (CASO 3)

Os dados referentes aos testes do CASO 3 são apresentados na Tabela 14 do Apêndice A. Novamente os eixos X e Z indicaram sua semelhança neste experimento. A Figura 41 exibe os valores de TES em função do tamanho do deslocamento. Observou-se que todos os eixos retrataram o mesmo padrão de comportamento, o qual foi aproximada para o eixo Y pela Equação 58 e para os eixos X e Z pela Equação 59.

Figura 41 - Comportamento de TES para o CASO 3.



Fonte: Autor (2017).

$$\text{CASO 3 (Y)} \quad \text{TES} = 0,107((S1)^{0,394}) \quad R^2=0,9994 \quad (58)$$

$$\text{CASO 3 (X e Z)} \quad \text{TES} = 0,1015((S1)^{0,4966}) \quad R^2=0,9992 \quad (59)$$

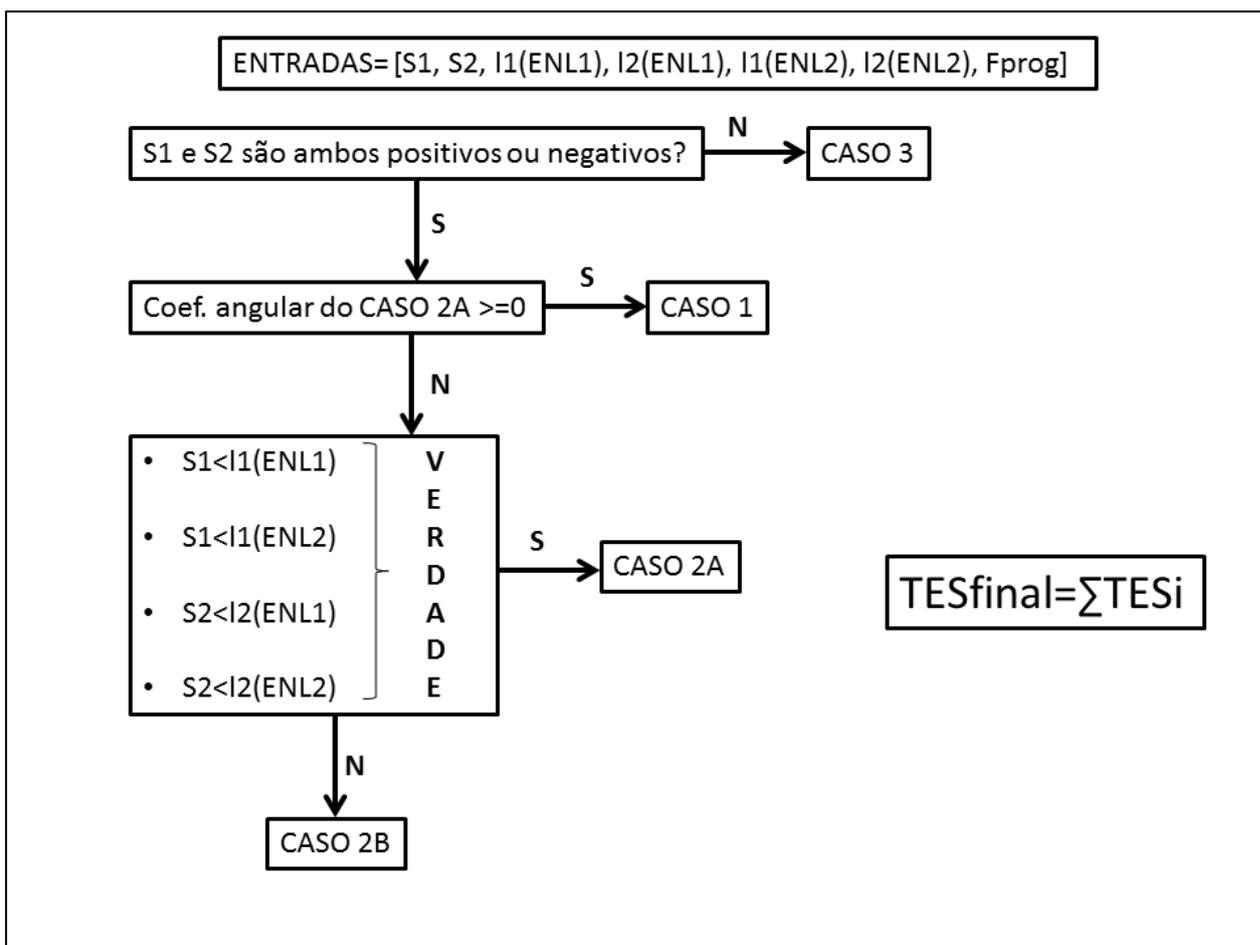
O aumento do deslocamento naturalmente eleva o valor de TES pela maior distância a ser percorrida. Porém, neste caso o formato de equação geométrica revela que com o aumento de S1 o valor do TES tende a ser menos afetado pela redução de velocidade inerente deste caso. Isto se deve ao fato de que um deslocamento maior é mais demorado e o tempo de aceleração/desaceleração passa a ser menos significativo.

No CASO 3, o valor de TES é um valor médio entre o TES de S1 e o TES de S2 visto que cada deslocamento contribui com metade do valor de seu TES na transição entre 2 deslocamentos consecutivos.

4.4. Esquema de funcionamento do modelo proposto através dos casos apresentados

Os itens antecedentes forneceram os critérios de cálculo de cada caso e subcaso e seus respectivos equacionamentos deduzidos. De modo geral, as equações obtidas por regressão linear apresentaram uma correspondência satisfatória com os dados experimentais segundo os valores do coeficiente de determinação. A Figura 42 apresenta um esquema ilustrativo de funcionamento do modelo proposto implementado com as suas variáveis de entrada e saída e condições de ingresso em cada caso.

Figura 42 – Esquema de funcionamento do modelo proposto.



Fonte: Autor (2017).

O modelo calcula o TES_i por eixo separadamente e considera o TES_i final daqueles segmentos o maior entre todos os eixos. O valor final de tempo (TES_{final}) é obtido pelo somatório dos TES_i.

4.5. Testes de validação do modelo proposto e análise de seus resultados perante modelo anterior de Coelho et al. (2009) e simulação oferecida pelo CAM

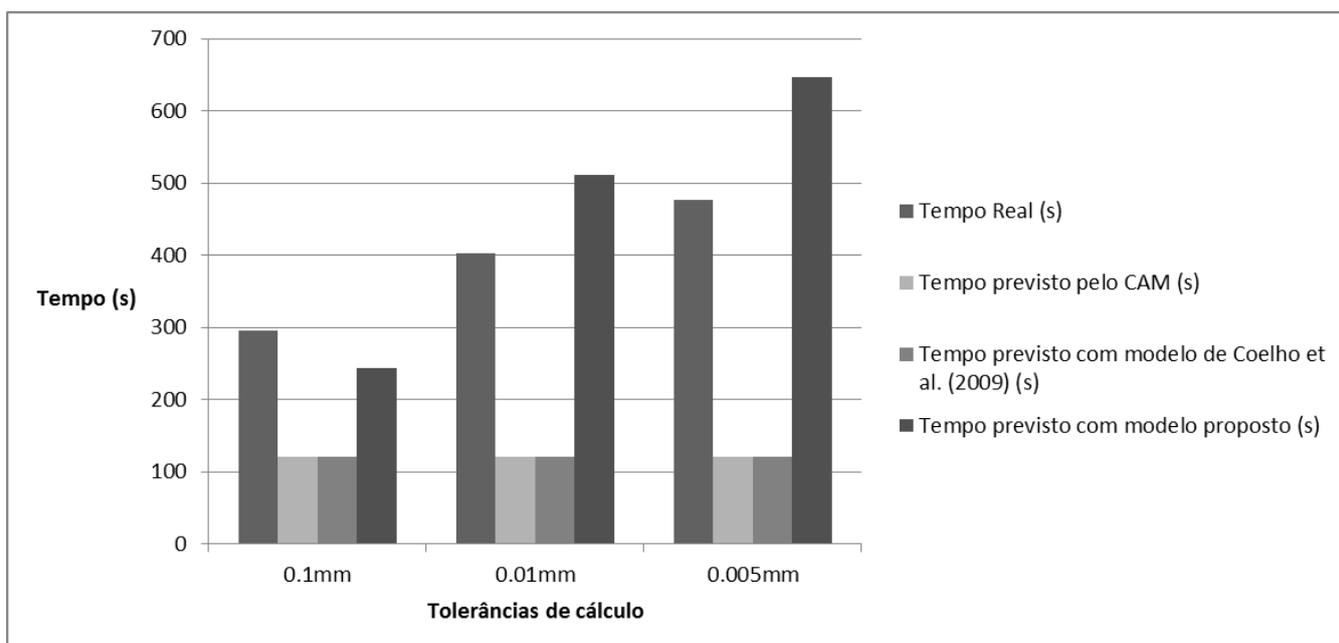
Os tempos dos testes de validação descritos no item 3.4 previstos pelo modelo proposto, bem como os valores previstos pelos demais modelos e os valores reais de execução em máquina são apresentados na Tabela 9. As Figuras 43 e 44 exibem os valores absolutos da Tabela 9 e a comparação entre o erro relativo dos modelos estudados, respectivamente.

Tabela 9 – Resultados dos testes de validação: valores reais e previstos pelos diferentes modelos.

Tolerância	0,1mm	0,01mm	0,005mm
Tempo Real	296 s	402 s	476 s
Tempo previsto pelo CAM	120 s	120 s	120 s
Tempo previsto com modelo de Coelho et al. (2009)	121,19 s	121,30 s	121,30 s
Tempo previsto com modelo proposto	243,55 s	511,91 s	647,41 s
Erro relativo - Coelho et al. (2009)	-59,06%	-69,83%	-74,53%
Erro relativo do modelo proposto	-17,72%	27,34%	36,01%

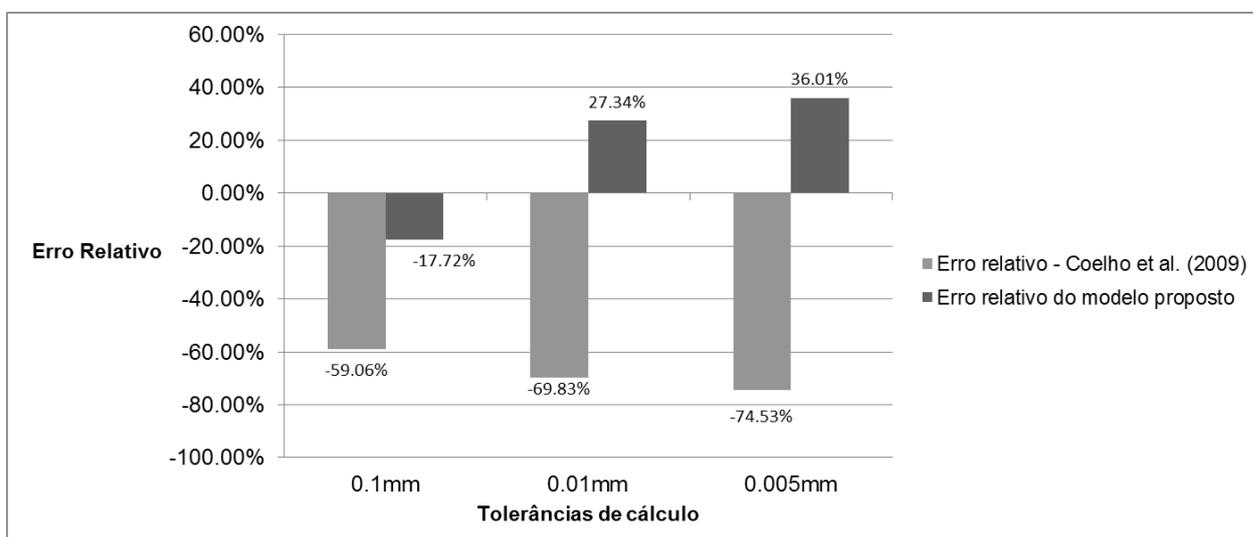
Fonte: Autor (2017).

Figura 43 – Comparativo entre os modelos analisados nos testes de validação.



Fonte: Autor (2017).

Figura 44 - Comparativo do erro relativo apresentado pelos modelos de previsão nos testes de validação.



Fonte: Autor (2017).

Notou-se inicialmente a proximidade entre os valores previstos pelo CAM e pelo modelo de Coelho et al. (2009). Isto se deve ao fato de que como o processamento do centro de usinagem em questão é muito alto, o modelo de Coelho et al. (2009) considera que a máquina irá atingir a velocidade de avanço programada

em praticamente todo o percurso. Com isso, os seus valores previstos são sempre inferiores aos reais. Deve-se considerar nesta comparação a velocidade de avanço programada nos testes.

Visto isso, o modelo de Coelho et al. não considera as limitações cinemáticas que ocorrem e tem seu erro relativo aumentado com a redução da tolerância. Como já comentado, a redução da tolerância diminui o tamanho dos segmentos e conseqüentemente amplia o efeito das limitações.

O modelo proposto, por outro lado, consegue abranger as limitações cinemáticas e acompanhar o crescimento do tempo real de fresamento. Para a tolerância de 0,1mm, o modelo apresentou maior ocorrência do CASO 1 devido ao maior valor dos tamanhos dos deslocamentos e segmentos. Isto faz com que o modelo proposto se aproxime do modelo de Coelho et al. (2009) e forneça um valor previsto inferior ao real.

Para as tolerâncias de 0,01mm e 0,005mm, diminuiu-se a ocorrência do CASO 1 e aumentou-se a ocorrência do CASO 2A e do CASO 2B principalmente. Conforme observado nos dados experimentais de X e Z, no CASO 2B podem ocorrer a contribuição simultânea das limitações de mais de um eixo, o que, ao contrário do que se espera, pode reduzir o valor do TES.

Além disso, a equação utilizada para descrever o eixo X e Z no CASO 2B é obtida dos dados de Y, o qual é o eixo mais lento de movimentação. Outras possíveis fontes de erro são a admissão que as limitações uniaxiais possam ser expandidas para o movimento tridimensional e a extrapolação das equações obtidas para valores fora dos dados experimentais. Apesar destes fatos, o modelo apresentou um valor de erro relativo abaixo de 30% para a tolerância mais utilizada na operação de acabamento de moldes e matrizes (0,01mm).

Visto isso, o modelo atual apresentou-se como um estudo inicial para geração de resultados mais aproximados dos tempos de fresamento reais em centros de usinagem HSM. Em comparação com os métodos disponíveis atualmente, o modelo proposto foi capaz de reduzir o erro relativo para menos da metade, sendo que o erro relativo médio do modelo proposto foi de 15,21%.

De modo geral, o modelo apresentou resultados satisfatórios e deve apresentar alto nível de aplicabilidade, visto que, após a total compreensão do comportamento do centro de usinagem, o modelo pode ser ajustado com um

número muito reduzido de experimentos e a um custo insignificante perto do investimento em sensores.

Experimentos preliminares indicaram que o modelo não se aplica para movimentos biaxiais, sendo necessário o seu equacionamento para este caso.

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas deste trabalho são apresentadas a seguir:

- A limitação de processamento é precisamente descrita pelo modelo de Coelho et al. (2009) e é totalmente satisfatório para centros de usinagem CNC convencionais, nos quais as limitações cinemáticas são insignificantes em relação à de processamento;
- A variação dos valores de deslocamento entre dois segmentos para um eixo é um fator determinante na ocorrência das limitações cinemáticas dos centros de usinagem CNC;
- Quando os valores de deslocamento do eixo assumido como limitante forem menores que os valores de deslocamento dos demais eixos a limitação apresentada por este eixo é dominante no tempo de execução daqueles segmentos.
- Quando os valores de deslocamento do eixo assumido como limitante forem maiores ou iguais aos valores de deslocamento dos demais eixos a limitação apresentada por este eixo é dependente do tamanho dos segmentos em questão, além dos valores de deslocamento do eixo limitante;
- A influência da aceleração/desaceleração na velocidade de avanço de um deslocamento por conta de uma velocidade reduzida do segmento anterior ou posterior tende a ser nula com o aumento do deslocamento atual;
- Os modelos de previsão de tempo de fresamento três eixos aplicáveis e disponíveis atualmente não são capazes de atender os centros de usinagem CNC HSM. Para estas máquinas, estes modelos assumem que a velocidade de avanço será atingida em todo o percurso e tem o seu erro relativo crescente com a redução da tolerância, chegando a 74,5% nos casos estudados;

- O modelo proposto foi capaz de considerar as limitações cinemáticas e de processamento do centro de usinagem CNC. Os seus resultados foram mais precisos que os modelos atuais, reduzindo o erro para menos da metade em todos os casos estudados. A média do erro relativo do modelo proposto foi de 15,21%, o que se considerou satisfatório no âmbito do estudo;
- Visto isso, este trabalho forneceu um modelo mecanístico inicial para previsão do tempo de fresamento três eixos de formas complexas em centros de usinagem CNC HSM. O seu método contempla todas as variáveis do programa CNC, todas as limitações da máquina CNC e apresenta maior aplicabilidade que os métodos já desenvolvidos neste escopo;

Estudos futuros podem melhorar a precisão do modelo apresentado pela:

- Realização dos mesmos testes com maiores valores de segmento para reduzir os erros gerados pela extrapolação das equações;
- Investigação do comportamento dos eixos quando atuam em conjunto com suas limitações;
- Preparação do modelo para movimentos biaxiais.

REFERÊNCIAS

- BOUJELBENE, M. et al. Productivity enhancement in dies and molds manufacturing by the use of C1 continuous tool path. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [s.l.], v. 44, n. 1, p.101-107, jan. 2004.
- BARBETTA, Pedro Alberto; REIS, Marcelo Menezes. **Estatística para cursos de engenharia e informática**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009. 410 p.
- CAMARGO, Lucas Gomes et al. Influência das trajetórias de usinagem e da tolerância de cálculo no tempo real de fresamento de formas complexas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 8., 2015, Salvador. **Anais**. Rio de Janeiro: ABCM, 2015. p. 562 - 572.
- CAMARGO, Lucas Gomes. **Programação e simulação de usinagem CNC para o fresamento de formas complexas**. Joinville: Pibic, 2016.
- CAMARGO, Lucas Gomes; PODDA, Leandro; SOUZA, Adriano Fagali de. Estudo dos métodos de trabalho em sistemas CAM para a geração de programas CNC com foco no pós-processamento. **Ferramental**, Joinville, v. 1, n. 55, p.19-25, set. 2014.
- CHOI, Byoung K; JERARD, Robert B. **Sculptured surface machining**. London: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- COELHO, Reginaldo Teixeira et al. Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 46, n. 9-12, p.1103-1111, 8 jul. 2009.
- FALLBOHMER, P. et al. Survey of the die and mold manufacturing industry. **Journal Of Materials Processing Technology**, London, v. 59, n. 1, p.158-168, nov. 1996.
- FRANCO, Neide Bertoldi. **Cálculo Numérico**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2011. 505 p.
- LASEMI, Ali; XUE, Deyi; GU, Peihua. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. **Computer-aided Design**, [s.l.], v. 42, n. 7, p.641-654, jul. 2010.
- LIU, Changqing et al. A feature-based method for NC machining time estimation. **Robotics And Computer-integrated Manufacturing**, [s.l.], v. 29, n. 4, p.8-14, ago. 2013.
- MONREAL, Manuel; RODRIGUEZ, Ciro Antonio. Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling. **Computer Aided Design**, London, v. 35, n. 1, p.395-401, nov. 2001.

MOREIRA, Flávio Camarinho. **Influência do ângulo entre trajetórias lineares no tempo de execução de blocos em usinagem CNC de superfícies**. 2010. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PESSOLES, Xavier; LANDON, Yann; RUBIO, Walter. Kinematic modelling of a 3-axis NC machine tool in linear and circular interpolation. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 47, n. 5-8, p.639-655, 21 ago. 2009.

ROMI. **Manual de Programação e Operação Linha Romi D - CNC FANUC 0i Mc**. Santa Bárbara do Oeste: Romi, 2011.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2007.

SIEMENS. **Technical Online Documentation**. Disponível em: <<https://support.industry.siemens.com/cs/document/109476679/technical-online-documentation-for-sinumerik-sinamics-simotion-and-simotics?dti=0&lc=en-WW>>. Acesso em: 15 out. 2016.

SILLER, Hector; RODRIGUEZ, Ciro A.; AHUETT, Horacio. Cycle time prediction in high-speed milling operations for sculptured surface finishing. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 174, n. 1-3, p.355-362, maio 2006.

SO, B.s. et al. Five-axis machining time estimation algorithm based on machine characteristics. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 187-188, p.37-40, jun. 2007.

SOUZA, Adriano Fagali de. **Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades**. 2004. 186 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SOUZA, Adriano Fagali de; COELHO, Reginaldo Teixeira. Experimental investigation of feed rate limitations on high speed milling aimed at industrial applications. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 32, n. 11-12, p.1104-1114, 6 maio 2006.

SOUZA, Adriano Fagali de; ULBRICH, Cristiane Brasil Lima. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

TULSYAN, Sneha. **Prediction and reduction of cycle time for five-axis CNC machine tools**. 2014. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mechanical Engineering, The University Of British Columbia, Vancouver, 2014.

APÊNDICE A - Resultados dos experimentos e tratamento de dados.

Tabela 10 – Dados do experimento 1 para tamanho do deslocamento constante.

	IX (mm)	IY (mm)	IZ (mm)	Modulo (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)
E1V1P1	0.100	0.000	0.000	0.1000	4000	2	0.0005
E1V1P2	0.000	0.100	0.000	0.1000	4000	2	0.0005
E1V1P3	0.000	0.000	0.100	0.1000	4000	2	0.0005
E1V1P4	0.010	0.000	0.000	0.0100	40000	18	0.00045
E1V1P5	0.000	0.010	0.000	0.0100	40000	18	0.00045
E1V1P6	0.000	0.000	0.010	0.0100	40000	18	0.00045
E1V1P7	0.001	0.000	0.000	0.0010	400000	180	0.00045
E1V1P8	0.000	0.001	0.000	0.0010	400000	180	0.00045
E1V1P9	0.000	0.000	0.001	0.0010	400000	180	0.00045
E1V2P1	0.100	0.100	0.100	0.1732	4000	3	0.00075
E1V2P2	0.010	0.010	0.010	0.0173	40000	18	0.00045
E1V2P3	0.001	0.001	0.001	0.0017	400000	180	0.00045
E1V3P1	0.010	0.100	0.100	0.1418	4000	3	0.00075
E1V3P2	0.100	0.010	0.100	0.1418	4000	3	0.00075
E1V3P3	0.100	0.100	0.010	0.1418	4000	3	0.00075
E1V3P4	0.001	0.100	0.100	0.1414	4000	3	0.00075
E1V3P5	0.100	0.001	0.100	0.1414	4000	3	0.00075
E1V3P6	0.100	0.100	0.001	0.1414	4000	3	0.00075
E1V3P7	0.001	0.010	0.010	0.0142	40000	18	0.00045
E1V3P8	0.010	0.001	0.010	0.0142	40000	18	0.00045
E1V3P9	0.010	0.010	0.001	0.0142	40000	18	0.00045
E1V3P10	0.001	0.005	0.005	0.0071	40000	18	0.00045
E1V3P11	0.005	0.001	0.005	0.0071	40000	18	0.00045
E1V3P12	0.005	0.005	0.001	0.0071	40000	18	0.00045

Fonte: Autor (2017).

Tabela 11 - Dados do experimento 1 para tamanho do deslocamento variável.

	lx (mm)	ly (mm)	lz (mm)	Módulo (mm)	Módulo Médio (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)
E1V4P1	0.100	0.000	0.000	0.1000	0.0550	4000	2	0.0005
	0.010	0.000	0.000	0.0100				
E1V4P2	0.000	0.100	0.000	0.1000	0.0550	4000	2	0.0005
	0.000	0.010	0.000	0.0100				
E1V4P3	0.000	0.000	0.100	0.1000	0.0550	4000	2	0.0005
	0.000	0.000	0.010	0.0100				
E1V4P4	0.010	0.000	0.000	0.0100	0.0075	40000	18	0.00045
	0.005	0.000	0.000	0.0050				
E1V4P5	0.000	0.010	0.000	0.0100	0.0075	40000	18	0.00045
	0.000	0.005	0.000	0.0050				
E1V4P6	0.000	0.000	0.010	0.0100	0.0075	40000	18	0.00045
	0.000	0.000	0.005	0.0050				
E1V4P7	0.005	0.000	0.000	0.0050	0.0030	80000	36	0.00045
	0.001	0.000	0.000	0.0010				
E1V4P8	0.000	0.005	0.000	0.0050	0.0030	80000	36	0.00045
	0.000	0.001	0.000	0.0010				
E1V4P9	0.000	0.000	0.005	0.0050	0.0030	80000	36	0.00045
	0.000	0.000	0.001	0.0010				
E1V5P1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.0875	4000	2	0.0005
	0.001	0.001	0.001	0.0017				
E1V5P2	0.010	0.010	0.010	0.0173	0.0095	40000	18	0.00045
	0.001	0.001	0.001	0.0017				
E1V6P1	0.100	0.000	-	0.1000	0.1000	4000	2	0.0005
	0.100	0.000	-	0.1000				
E1V6P2	0.001	0.000	-	0.0010	0.0010	400000	180	0.00045
	0.001	0.000	-	0.0010				

Fonte: Autor (2017).

Tabela 12 - Dados do experimento 2 para o eixo Y.

	ENL1 (mm)	ENL2 (mm)	EL (mm)	Módulo (mm)	Módulo Médio (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)																																																																																																																																																																																		
S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3232	2000	85	0.04250																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.100	0.3000					S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2725	2000	78	0.03900	S2	0.200	0.100	0.100	0.2449	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2725	2000	78	0.03900	S2	0.100	0.200	0.100	0.2449	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.2091	2000	63	0.03150	S2	0.100	0.100	0.100	0.1732	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3168	2000	104	0.05200	S2	0.200	0.200	0.050	0.2872	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850	S2	0.200	0.100	0.050	0.2291	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850	S2	0.100	0.200	0.050	0.2291	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	85	0.04250	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	113	0.05650	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	96	0.04800	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2
S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2725	2000	78	0.03900																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.100	0.2449					S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2725	2000	78	0.03900	S2	0.100	0.200	0.100	0.2449	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.2091	2000	63	0.03150	S2	0.100	0.100	0.100	0.1732	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3168	2000	104	0.05200	S2	0.200	0.200	0.050	0.2872	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850	S2	0.200	0.100	0.050	0.2291	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850	S2	0.100	0.200	0.050	0.2291	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	85	0.04250	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	113	0.05650	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	96	0.04800	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237										
S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2725	2000	78	0.03900																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.100	0.2449					S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.2091	2000	63	0.03150	S2	0.100	0.100	0.100	0.1732	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3168	2000	104	0.05200	S2	0.200	0.200	0.050	0.2872	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850	S2	0.200	0.100	0.050	0.2291	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850	S2	0.100	0.200	0.050	0.2291	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	85	0.04250	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	113	0.05650	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	96	0.04800	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																								
S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.2091	2000	63	0.03150																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.100	0.1732					S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3168	2000	104	0.05200	S2	0.200	0.200	0.050	0.2872	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850	S2	0.200	0.100	0.050	0.2291	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850	S2	0.100	0.200	0.050	0.2291	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	85	0.04250	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	113	0.05650	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	96	0.04800	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																						
S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3168	2000	104	0.05200																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.050	0.2872					S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850	S2	0.200	0.100	0.050	0.2291	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850	S2	0.100	0.200	0.050	0.2291	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	85	0.04250	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	113	0.05650	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	96	0.04800	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																				
S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.050	0.2291					S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850	S2	0.100	0.200	0.050	0.2291	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	85	0.04250	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	113	0.05650	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	96	0.04800	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																		
S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	97	0.04850																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.050	0.2291					S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	85	0.04250	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	113	0.05650	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	96	0.04800	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																
S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	85	0.04250																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.050	0.1500					S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	113	0.05650	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	96	0.04800	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																														
S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	113	0.05650																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.010	0.2830					S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	96	0.04800	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																												
S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.010	0.2238					S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	96	0.04800	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																										
S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	108	0.05400																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.010	0.2238					S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	96	0.04800	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																																								
S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	96	0.04800																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.010	0.1418					S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																																																						
S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.005	0.2829					S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																																																																				
S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																																																																																						

Tabela 12 - Dados do experimento 2 para o eixo Y (continuação).

	ENL1 (mm)	ENL2 (mm)	EL (mm)	Módulo (mm)	Módulo Médio (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)
S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2618	2000	108	0.05400
S2	0.100	0.200	0.005	0.2237				
S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1932	2000	97	0.04850
S2	0.100	0.100	0.005	0.1415				
S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	115	0.05750
S2	0.200	0.200	0.001	0.2828				
S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	110	0.05500
S2	0.200	0.100	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2618	2000	110	0.05500
S2	0.100	0.200	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1932	2000	97	0.04850
S2	0.100	0.100	0.001	0.1414				
S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2936	2000	58	0.02900
S2	0.200	0.200	0.050	0.2872				
S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2370	2000	57	0.02850
S2	0.200	0.100	0.050	0.2291				
S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2370	2000	57	0.02850
S2	0.100	0.200	0.050	0.2291				
S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1616	4000	100	0.02500
S2	0.100	0.100	0.050	0.1500				
S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2915	2000	88	0.04400
S2	0.200	0.200	0.010	0.2830				
S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2344	2000	84	0.04200
S2	0.200	0.100	0.010	0.2238				
S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2344	2000	84	0.04200
S2	0.100	0.200	0.010	0.2238				
S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1575	4000	151	0.03775
S2	0.100	0.100	0.010	0.1418				

Tabela 12 - Dados do experimento 2 para o eixo Y (continuação).

	ENL1 (mm)	ENL2 (mm)	EL (mm)	Módulo (mm)	Módulo Médio (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)																																																																																																																																																																																		
S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2914	2000	90	0.04500																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.005	0.2829					S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2343	2000	86	0.04300	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237	S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2343	2000	86	0.04300	S2	0.100	0.200	0.005	0.2237	S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1574	4000	155	0.03875	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2914	2000	92	0.04600	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1573	4000	158	0.03950	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	99	0.02475	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2
S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2343	2000	86	0.04300																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.005	0.2237					S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2343	2000	86	0.04300	S2	0.100	0.200	0.005	0.2237	S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1574	4000	155	0.03875	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2914	2000	92	0.04600	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1573	4000	158	0.03950	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	99	0.02475	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237										
S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2343	2000	86	0.04300																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.005	0.2237					S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1574	4000	155	0.03875	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2914	2000	92	0.04600	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1573	4000	158	0.03950	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	99	0.02475	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																								
S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1574	4000	155	0.03875																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.005	0.1415					S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2914	2000	92	0.04600	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1573	4000	158	0.03950	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	99	0.02475	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																						
S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2914	2000	92	0.04600																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.001	0.2828					S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1573	4000	158	0.03950	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	99	0.02475	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																				
S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.001	0.2236					S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1573	4000	158	0.03950	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	99	0.02475	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																		
S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2343	2000	87	0.04350																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.001	0.2236					S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1573	4000	158	0.03950	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	99	0.02475	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																
S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1573	4000	158	0.03950																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.001	0.1414					S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	99	0.02475	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																														
S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	50	0.02500																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.010	0.2830					S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	99	0.02475	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																												
S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.010	0.2238					S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	99	0.02475	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																										
S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2265	2000	50	0.02500																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.010	0.2238					S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	99	0.02475	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																																								
S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	99	0.02475																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.010	0.1418					S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																																																						
S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	56	0.02800																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.005	0.2829					S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																																																																				
S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																																																																																						

Tabela 12 - Dados do experimento 2 para o eixo Y (continuação).

	ENL1 (mm)	ENL2 (mm)	EL (mm)	Módulo (mm)	Módulo Médio (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)
S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2264	2000	56	0.02800
S2	0.100	0.200	0.005	0.2237				
S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1458	4000	109	0.02725
S2	0.100	0.100	0.005	0.1415				
S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2850	2000	60	0.03000
S2	0.200	0.200	0.001	0.2828				
S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	61	0.03050
S2	0.200	0.100	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2264	2000	61	0.03050
S2	0.100	0.200	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1457	4000	120	0.03000
S2	0.100	0.100	0.001	0.1414				
S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2830	2000	18	0.00900
S2	0.200	0.200	0.005	0.2829				
S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	18	0.00900
S2	0.200	0.100	0.005	0.2237				
S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	18	0.00900
S2	0.100	0.200	0.005	0.2237				
S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	36	0.00900
S2	0.100	0.100	0.005	0.1415				
S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2829	2000	24	0.01200
S2	0.200	0.200	0.001	0.2828				
S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	24	0.01200
S2	0.200	0.100	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	24	0.01200
S2	0.100	0.200	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	48	0.01200
S2	0.100	0.100	0.001	0.1414				

Tabela 12 - Dados do experimento 2 para o eixo Y (continuação).

	ENL1 (mm)	ENL2 (mm)	EL (mm)	Módulo (mm)	Módulo Médio (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)
S1	0.200	0.200	0.005	0.2829	0.2829	2000	16	0.00800
S2	0.200	0.200	0.001	0.2828				
S1	0.200	0.100	0.005	0.2237	0.2236	2000	16	0.00800
S2	0.200	0.100	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.200	0.005	0.2237	0.2236	2000	16	0.00800
S2	0.100	0.200	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.100	0.005	0.1415	0.1415	4000	32	0.00800
S2	0.100	0.100	0.001	0.1414				
S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	42	0.01050
S2	0.100	0.100	0.003	0.1415				
S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1417	4000	28	0.00700
S2	0.100	0.100	0.007	0.1416				
S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2856	2000	40	0.02000
S2	0.200	0.200	0.025	0.2839				
S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2922	2000	76	0.03800
S2	0.200	0.200	0.030	0.2844				
S1	0.200	0.200	0.075	0.2926	0.2899	2000	40	0.02000
S2	0.200	0.200	0.050	0.2872				
S1	0.200	0.200	0.075	0.2926	0.2885	2000	55	0.02750
S2	0.200	0.200	0.030	0.2844				
S1	0.200	0.200	0.075	0.2926	0.2878	2000	74	0.03700
S2	0.200	0.200	0.010	0.2830				
S1	0.200	0.200	0.075	0.2926	0.2878	2000	78	0.03900
S2	0.200	0.200	0.005	0.2829				
S1	0.200	0.200	0.030	0.2844	0.2837	2000	36	0.01800
S2	0.200	0.200	0.010	0.2830				
S1	0.200	0.200	0.030	0.2844	0.2840	2000	25	0.01250
S2	0.200	0.200	0.020	0.2835				

Tabela 12- Dados do experimento 2 para o eixo Y (conclusão).

	ENL1 (mm)	ENL2 (mm)	EL (mm)	Módulo (mm)	Módulo Médio (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)
S1	0.200	0.200	0.030	0.2844	0.2837	2000	40	0.02000
S2	0.200	0.200	0.005	0.2829				
S1	0.200	0.200	0.030	0.2844	0.2836	2000	43	0.02150
S2	0.200	0.200	0.001	0.2828				
S1	0.200	0.200	0.150	0.3202	0.3101	2000	53	0.02650
S2	0.200	0.200	0.100	0.3000				
S1	0.200	0.100	0.150	0.2693	0.2571	2000	49	0.02450
S2	0.200	0.100	0.100	0.2449				
S1	0.100	0.100	0.150	0.2062	0.1897	4000	209	0.05225
S2	0.100	0.100	0.100	0.1732				
S1	0.200	0.200	0.150	0.3202	0.3037	2000	90	0.04500
S2	0.200	0.200	0.050	0.2872				
S1	0.200	0.100	0.150	0.2693	0.2492	2000	84	0.04200
S2	0.200	0.100	0.050	0.2291				
S1	0.100	0.100	0.150	0.2062	0.1781	4000	144	0.03600
S2	0.100	0.100	0.050	0.1500				
S1	0.200	0.200	0.150	0.3202	0.3016	2000	104	0.05200
S2	0.200	0.200	0.010	0.2830				
S1	0.200	0.100	0.150	0.2693	0.2465	2000	99	0.04950
S2	0.200	0.100	0.010	0.2238				
S1	0.100	0.100	0.150	0.2062	0.1740	4000	177	0.04425
S2	0.100	0.100	0.010	0.1418				

Fonte: Autor (2017).

Tabela 13 - Dados do experimento 2 para o eixo X e Z.

	ENL1 (mm)	ENL2 (mm)	EL (mm)	Módulo (mm)	Módulo Médio (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)																																																																																																																																																																																		
S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3232	2000	43	0.02150																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.100	0.3000					S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2725	2000	39	0.01950	S2	0.200	0.100	0.100	0.2449	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2725	2000	52	0.02600	S2	0.100	0.200	0.100	0.2449	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.2091	2000	48	0.02400	S2	0.100	0.100	0.100	0.1732	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3168	2000	57	0.02850	S2	0.200	0.200	0.050	0.2872	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2646	2000	55	0.02750	S2	0.200	0.100	0.050	0.2291	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	69	0.03450	S2	0.100	0.200	0.050	0.2291	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	60	0.03000	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	74	0.03700	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	69	0.03450	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	70	0.03500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	65	0.03250	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2
S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2725	2000	39	0.01950																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.100	0.2449					S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2725	2000	52	0.02600	S2	0.100	0.200	0.100	0.2449	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.2091	2000	48	0.02400	S2	0.100	0.100	0.100	0.1732	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3168	2000	57	0.02850	S2	0.200	0.200	0.050	0.2872	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2646	2000	55	0.02750	S2	0.200	0.100	0.050	0.2291	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	69	0.03450	S2	0.100	0.200	0.050	0.2291	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	60	0.03000	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	74	0.03700	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	69	0.03450	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	70	0.03500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	65	0.03250	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237										
S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2725	2000	52	0.02600																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.100	0.2449					S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.2091	2000	48	0.02400	S2	0.100	0.100	0.100	0.1732	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3168	2000	57	0.02850	S2	0.200	0.200	0.050	0.2872	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2646	2000	55	0.02750	S2	0.200	0.100	0.050	0.2291	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	69	0.03450	S2	0.100	0.200	0.050	0.2291	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	60	0.03000	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	74	0.03700	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	69	0.03450	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	70	0.03500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	65	0.03250	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																								
S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.2091	2000	48	0.02400																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.100	0.1732					S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3168	2000	57	0.02850	S2	0.200	0.200	0.050	0.2872	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2646	2000	55	0.02750	S2	0.200	0.100	0.050	0.2291	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	69	0.03450	S2	0.100	0.200	0.050	0.2291	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	60	0.03000	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	74	0.03700	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	69	0.03450	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	70	0.03500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	65	0.03250	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																						
S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3168	2000	57	0.02850																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.050	0.2872					S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2646	2000	55	0.02750	S2	0.200	0.100	0.050	0.2291	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	69	0.03450	S2	0.100	0.200	0.050	0.2291	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	60	0.03000	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	74	0.03700	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	69	0.03450	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	70	0.03500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	65	0.03250	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																				
S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2646	2000	55	0.02750																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.050	0.2291					S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	69	0.03450	S2	0.100	0.200	0.050	0.2291	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	60	0.03000	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	74	0.03700	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	69	0.03450	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	70	0.03500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	65	0.03250	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																		
S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2646	2000	69	0.03450																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.050	0.2291					S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	60	0.03000	S2	0.100	0.100	0.050	0.1500	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	74	0.03700	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	69	0.03450	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	70	0.03500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	65	0.03250	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																
S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1975	2000	60	0.03000																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.050	0.1500					S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	74	0.03700	S2	0.200	0.200	0.010	0.2830	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	69	0.03450	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	70	0.03500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	65	0.03250	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																														
S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3147	2000	74	0.03700																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.010	0.2830					S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	69	0.03450	S2	0.200	0.100	0.010	0.2238	S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	70	0.03500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	65	0.03250	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																												
S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2619	2000	69	0.03450																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.010	0.2238					S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	70	0.03500	S2	0.100	0.200	0.010	0.2238	S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	65	0.03250	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																										
S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2619	2000	70	0.03500																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.010	0.2238					S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	65	0.03250	S2	0.100	0.100	0.010	0.1418	S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																																								
S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1934	2000	65	0.03250																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.010	0.1418					S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																																																						
S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	73	0.03650																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.005	0.2829					S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																																																																				
S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.005	0.2237																																																																																																																																																																																						

Tabela 13 - Dados do experimento 2 para o eixo X e Z (continuação).

	ENL1 (mm)	ENL2 (mm)	EL (mm)	Módulo (mm)	Módulo Médio (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)
S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550
S2	0.100	0.200	0.005	0.2237				
S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1932	2000	65	0.03250
S2	0.100	0.100	0.005	0.1415				
S1	0.200	0.200	0.200	0.3464	0.3146	2000	76	0.03800
S2	0.200	0.200	0.001	0.2828				
S1	0.200	0.100	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550
S2	0.200	0.100	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.200	0.200	0.3000	0.2618	2000	71	0.03550
S2	0.100	0.200	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.100	0.200	0.2449	0.1932	2000	65	0.03250
S2	0.100	0.100	0.001	0.1414				
S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2936	2000	32	0.01600
S2	0.200	0.200	0.050	0.2872				
S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2370	2000	31	0.01550
S2	0.200	0.100	0.050	0.2291				
S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2370	2000	31	0.01550
S2	0.100	0.200	0.050	0.2291				
S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1616	4000	61	0.01525
S2	0.100	0.100	0.050	0.1500				
S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2915	2000	43	0.02150
S2	0.200	0.200	0.010	0.2830				
S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2344	2000	43	0.02150
S2	0.200	0.100	0.010	0.2238				
S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2344	2000	43	0.02150
S2	0.100	0.200	0.010	0.2238				
S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1575	4000	83	0.02075
S2	0.100	0.100	0.010	0.1418				

Tabela 13 - Dados do experimento 2 para o eixo X e Z (continuação).

	ENL1 (mm)	ENL2 (mm)	EL (mm)	Módulo (mm)	Módulo Médio (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)
S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2914	2000	44	0.02200
S2	0.200	0.200	0.005	0.2829				
S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2343	2000	44	0.02200
S2	0.200	0.100	0.005	0.2237				
S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2343	2000	44	0.02200
S2	0.100	0.200	0.005	0.2237				
S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1574	4000	85	0.02125
S2	0.100	0.100	0.005	0.1415				
S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2914	2000	45	0.02250
S2	0.200	0.200	0.001	0.2828				
S1	0.200	0.100	0.100	0.2449	0.2343	2000	45	0.02250
S2	0.200	0.100	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.200	0.100	0.2449	0.2343	2000	45	0.02250
S2	0.100	0.200	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.100	0.100	0.1732	0.1573	4000	87	0.02175
S2	0.100	0.100	0.001	0.1414				
S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	29	0.01450
S2	0.200	0.200	0.010	0.2830				
S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2265	2000	29	0.01450
S2	0.200	0.100	0.010	0.2238				
S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2265	2000	29	0.01450
S2	0.100	0.200	0.010	0.2238				
S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1459	4000	57	0.01425
S2	0.100	0.100	0.010	0.1418				
S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2851	2000	31	0.01550
S2	0.200	0.200	0.005	0.2829				
S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	31	0.01550
S2	0.200	0.100	0.005	0.2237				

Tabela 13 - Dados do experimento 2 para o eixo X e Z (continuação).

	ENL1 (mm)	ENL2 (mm)	EL (mm)	Módulo (mm)	Módulo Médio (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)																																																																																																																																																																																		
S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2264	2000	31	0.01550																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.005	0.2237					S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1458	4000	61	0.01525	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2850	2000	32	0.01600	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	32	0.01600	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2264	2000	32	0.01600	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1457	4000	64	0.01600	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2830	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.100	0.200	0.005	0.2237	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	21	0.00525	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2829	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2
S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1458	4000	61	0.01525																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.005	0.1415					S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2850	2000	32	0.01600	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	32	0.01600	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2264	2000	32	0.01600	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1457	4000	64	0.01600	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2830	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.100	0.200	0.005	0.2237	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	21	0.00525	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2829	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414										
S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2850	2000	32	0.01600																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.001	0.2828					S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	32	0.01600	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2264	2000	32	0.01600	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1457	4000	64	0.01600	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2830	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.100	0.200	0.005	0.2237	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	21	0.00525	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2829	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414																								
S1	0.200	0.100	0.050	0.2291	0.2264	2000	32	0.01600																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.001	0.2236					S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2264	2000	32	0.01600	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1457	4000	64	0.01600	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2830	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.100	0.200	0.005	0.2237	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	21	0.00525	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2829	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414																																						
S1	0.100	0.200	0.050	0.2291	0.2264	2000	32	0.01600																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.001	0.2236					S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1457	4000	64	0.01600	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2830	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.100	0.200	0.005	0.2237	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	21	0.00525	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2829	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414																																																				
S1	0.100	0.100	0.050	0.1500	0.1457	4000	64	0.01600																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.001	0.1414					S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2830	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.200	0.005	0.2829	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.100	0.200	0.005	0.2237	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	21	0.00525	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2829	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414																																																																		
S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2830	2000	10	0.00500																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.005	0.2829					S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.200	0.100	0.005	0.2237	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.100	0.200	0.005	0.2237	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	21	0.00525	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2829	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414																																																																																
S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.005	0.2237					S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500	S2	0.100	0.200	0.005	0.2237	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	21	0.00525	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2829	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414																																																																																														
S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	10	0.00500																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.005	0.2237					S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	21	0.00525	S2	0.100	0.100	0.005	0.1415	S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2829	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414																																																																																																												
S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	21	0.00525																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.005	0.1415					S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2829	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.200	0.001	0.2828	S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414																																																																																																																										
S1	0.200	0.200	0.010	0.2830	0.2829	2000	14	0.00700																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.200	0.001	0.2828					S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.200	0.100	0.001	0.2236	S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414																																																																																																																																								
S1	0.200	0.100	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700																																																																																																																																																																																		
S2	0.200	0.100	0.001	0.2236					S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700	S2	0.100	0.200	0.001	0.2236	S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414																																																																																																																																																						
S1	0.100	0.200	0.010	0.2238	0.2237	2000	14	0.00700																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.200	0.001	0.2236					S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700	S2	0.100	0.100	0.001	0.1414																																																																																																																																																																				
S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	28	0.00700																																																																																																																																																																																		
S2	0.100	0.100	0.001	0.1414																																																																																																																																																																																						

Tabela 13 - Dados do experimento 2 para o eixo X e Z (conclusão).

	ENL1 (mm)	ENL2 (mm)	EL (mm)	Módulo (mm)	Módulo Médio (mm)	Nº Linhas	Tempo (s)	TES (s)
S1	0.200	0.200	0.005	0.2829	0.2829	2000	9	0.00450
S2	0.200	0.200	0.001	0.2828				
S1	0.200	0.100	0.005	0.2237	0.2236	2000	9	0.00450
S2	0.200	0.100	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.200	0.005	0.2237	0.2236	2000	9	0.00450
S2	0.100	0.200	0.001	0.2236				
S1	0.100	0.100	0.005	0.1415	0.1415	4000	19	0.00475
S2	0.100	0.100	0.001	0.1414				
S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1416	4000	24	0.00600
S2	0.100	0.100	0.003	0.1415				
S1	0.100	0.100	0.010	0.1418	0.1417	4000	16	0.00400
S2	0.100	0.100	0.007	0.1416				
S1	0.200	0.200	0.050	0.2872	0.2856	2000	23	0.01150
S2	0.200	0.200	0.025	0.2839				
S1	0.200	0.200	0.100	0.3000	0.2922	2000	38	0.01900
S2	0.200	0.200	0.030	0.2844				

Fonte: Autor (2017).

Tabela 14 - Dados do experimento 3.

S1 (mm)	Nº Linhas	Tempo eixo X (s)	Tempo eixo Y (s)	Tempo eixo Z (s)	TES eixo X (s)	TES eixo Y (s)	TES eixo Z (s)
0.001	40000	134	225	134	0.00335	0.00563	0.00335
0.005	4000	29	43	29	0.00725	0.01075	0.00725
0.010	40000	414	576	414	0.01035	0.01440	0.01035
0.050	4000	85	130	85	0.02125	0.03250	0.02125
0.100	4000	130	173	130	0.03250	0.04325	0.03250
0.200	2000	95	115	95	0.04750	0.05750	0.04750
0.400	2000	133	151	133	0.06650	0.07550	0.06650
0.600	2000	160	176	160	0.08000	0.08800	0.08000
0.800	2000	180	194	180	0.09000	0.09700	0.09000
1.000	2000	198	212	198	0.09900	0.10600	0.09900

Fonte: Autor (2017).