



**JOAO VIVAS CISALPINO**

**CONTROLE DE VELOCIDADE EM IMPRESSORAS 3D  
UTILIZANDO O PRINCÍPIO DE FEEDFORWARD PARA  
OTIMIZAR A VELOCIDADE E QUALIDADE DE IMPRESSÃO.**

**LAVRAS - MG**

**2023**

**JOAO VIVAS CISALPINO**

**CONTROLE DE VELOCIDADE EM IMPRESSORAS 3D UTILIZANDO O  
PRINCÍPIO DE FEEDFORWARD PARA OTIMIZAR A VELOCIDADE E  
QUALIDADE DE IMPRESSÃO.**

Monografia apresentada à Universidade Federal  
de Lavras, como parte das exigências Curso de  
Engenharia Mecânica, para a obtenção do título  
de Bacharel.

Prof. Dr. Wander Gustavo Rocha Vieira  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Coordenadoria de Processos Técnicos  
da Biblioteca Universitária da UFLA**

Cisalpino, Joao Vivas Cisalpino

CONTROLE DE VELOCIDADE EM IMPRESSORAS  
3D UTILIZANDO O PRINCÍPIO DE FEEDFORWARD  
PARA OTIMIZAR A VELOCIDADE E QUALIDADE DE  
IMPRESSÃO. / Joao Vivas Cisalpino. 1<sup>a</sup> ed. rev., atual. e  
ampl. – Lavras : UFLA, 2023.

51 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso(Graduação)–Universidade  
Federal de Lavras, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Wander Gustavo Rocha Vieira.  
Bibliografia.

1. TCC

CDD-808.066

**JOAO VIVAS CISALPINO**

**CONTROLE DE VELOCIDADE EM IMPRESSORAS 3D UTILIZANDO O  
PRINCÍPIO DE FEEDFORWARD PARA OTIMIZAR A VELOCIDADE E  
QUALIDADE DE IMPRESSÃO.**

Monografia apresentada à Universidade Federal  
de Lavras, como parte das exigências Curso de  
Engenharia Mecânica, para a obtenção do título  
de Bacharel.

APROVADO em Data da defesa 2023.

Prof. Dr. Henrique UFLA  
Prof. Dr. Belisario UFLA

Prof. Dr. Wander Gustavo Rocha Vieira  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2023**

*Dedicatoria ....*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos



## RESUMO

Este trabalho aborda a geração de comandos em impressoras 3D utilizando o método de manufatura aditiva conhecido como Fused Deposition Modeling (FDM). O objetivo principal é otimizar a velocidade de movimentação e garantir a precisão dimensional das peças produzidas. O referencial teórico apresenta os fundamentos da manufatura aditiva, o FDM e técnicas de controle, trajetória e modelagem dinâmica do sistema. A metodologia envolve o uso do software Matlab e a função `fmincon` para a geração de comandos, incluindo a leitura do código G, definição da velocidade de curva e interpolação. Os resultados mostram correlações entre as variáveis de entrada, influências do modelo dinâmico e a performance computacional. Dificuldades como a função objetivo, restrição de aceleração da base e variáveis principais são discutidas. Possíveis abordagens, como combinação com outros algoritmos, são sugeridas. Conclui-se que a geração de comandos é crucial para a qualidade e eficiência da manufatura aditiva por FDM, e pesquisas futuras podem explorar soluções mais robustas. Este estudo contribui para o aprimoramento da manufatura aditiva, incentivando pesquisas adicionais e impulsionando sua aplicação em diversos setores industriais.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) Geração de comandos Impressão 3D Algoritmos de controle Modelagem dinâmica Matlab `fmincon`



## ABSTRACT

This work addresses the command generation in 3D printers using the additive manufacturing method known as Fused Deposition Modeling (FDM). The main objective is to optimize the speed of movement and ensure dimensional accuracy of the produced parts. The theoretical framework presents the fundamentals of additive manufacturing, FDM, and techniques for control, trajectory, and dynamic modeling of the system. The methodology involves the use of Matlab software and the `fmincon` function for command generation, including G-code reading, curve speed definition, and interpolation. The results show correlations between input variables, influences of the dynamic model, and computational performance. Challenges such as the objective function, base acceleration constraint, and key variables are discussed. Possible approaches, such as combining with other algorithms, are suggested. It is concluded that command generation is crucial for the quality and efficiency of FDM additive manufacturing, and future research can explore more robust solutions. This study contributes to the improvement of additive manufacturing, encouraging further research and promoting its application in various industrial sectors.

**Keywords:** Additive manufacturing Fused Deposition Modeling (FDM) Command generation 3D printing Control algorithms Dynamic modeling Matlab `fmincon`

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição de uso de MA nas indústrias . . . . .	15
Figura 2.2 – Número de artigos publicados sobre FDM ao longo do tempo . . . . .	16
Figura 2.3 – Distribuição das pesquisas sobre FDM . . . . .	17
Figura 2.4 – Comparação da resposta ao degrau e da resposta a escada . . . . .	18
Figura 2.5 – Fluxograma FBF . . . . .	19
Figura 2.6 – Resultados práticos da LPFBF . . . . .	19
Figura 2.7 – Fluxograma RFBF . . . . .	20
Figura 2.8 – Look ahead em uma grande mudança de direção . . . . .	21
Figura 2.9 – Look ahead em uma pequena mudança de direção . . . . .	22
Figura 2.10 – Curva de velocidades trapezoidal em uma sequência de movimentos . . . . .	22
Figura 3.1 – Visualização das posições do sistema . . . . .	29
Figura 4.1 – Teste base - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base . . . . .	33
Figura 4.2 – Teste base - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base . . . . .	34
Figura 4.3 – Teste base - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base . . . . .	34
Figura 4.4 – Teste base - Num de fun x Viabilidade . . . . .	35
Figura 4.5 – Teste 1A - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base . . . . .	35
Figura 4.6 – Teste 1B - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base . . . . .	35
Figura 4.7 – Teste 1C - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base . . . . .	36
Figura 4.8 – Teste 1A - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base . . . . .	36
Figura 4.9 – Teste 1C - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base . . . . .	37
Figura 4.10 – Teste 1A - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base . . . . .	37
Figura 4.11 – Teste 1C - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base . . . . .	38
Figura 4.12 – Teste 1 - Num de fun x Viabilidade . . . . .	38
Figura 4.13 – Teste 2B - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base . . . . .	39

Figura 4.14 – Teste 2C - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base . . . . .	39
Figura 4.15 – Teste 2 - Num de fun x Viabilidade . . . . .	40
Figura 4.16 – Teste 3A - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base . . . . .	40
Figura 4.17 – Teste 3 - Num de fun x Viabilidade . . . . .	41
Figura 4.18 – Teste 4B - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base . . . . .	41
Figura 4.19 – Teste 4B - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base . . . . .	42
Figura 4.20 – Teste 4 - Num de fun x Viabilidade . . . . .	42
Figura 4.21 – Teste 5A - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base . . . . .	43
Figura 4.22 – Teste 5B - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base . . . . .	43
Figura 4.23 – Teste 5C - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base . . . . .	44
Figura 4.24 – Teste 5A - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base . . . . .	44
Figura 4.25 – Teste 5B - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base . . . . .	45
Figura 4.26 – Teste 5C - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base . . . . .	45
Figura 4.27 – Teste 5 - Num de fun x Viabilidade . . . . .	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tabela de parâmetros opcionais da FMINCON . . . . .	30
Tabela 3.2 – Tabela de parâmetros base das simulações . . . . .	32
Tabela 3.3 – Tabela do parâmetro modificado das simulações . . . . .	32
Tabela 3.4 – Tabela de especificações do computador . . . . .	32

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Manufatura Aditiva . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b><i>Fused Deposition Modeling</i> . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Feedforward . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1.1</b>	<b><i>Input Shaper</i> . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1.2</b>	<b>filtered basis function (FBF) . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1.3</b>	<b><i>Limited-preview filtered B-splines</i> . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>2.2.1.4</b>	<b><i>Robust Filtered Basis Functions</i> . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Geração de comando . . . . .</b>	<b>20</b>
<b>2.3.1</b>	<b><i>Look ahead</i> . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Curvas de velocidade trapezoidal . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Espaço de Estados . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Integração implícita utilizando programação não linear e colocação . . . .</b>	<b>22</b>
<b>2.3.5</b>	<b><i>Objective Function Optimization</i> . . . . .</b>	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Matlab . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>3.1.1</b>	<b>fmincon . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Geração de Comando . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Leitura Gcode . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Velocidade de curva . . . . .</b>	<b>26</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Curva trapezoidal de velocidade . . . . .</b>	<b>26</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Interpolação . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelagem dinâmica de uma impressora 3D . . . . .</b>	<b>28</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Espaço de estados . . . . .</b>	<b>29</b>
<b>3.4</b>	<b>FMINCON . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Configurações da função . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Restrições lineares e limites de borda . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Restrições não lineares . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Função objetivo . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>3.5</b>	<b>Solução da trajetória da base . . . . .</b>	<b>31</b>

3.6	Descrição das simulações . . . . .	31
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	33
4.1	<b>Resultados . . . . .</b>	33
4.1.1	Teste Padrão . . . . .	33
4.1.2	Teste 1 . . . . .	34
4.1.3	Teste 2 . . . . .	37
4.1.4	Teste 3 . . . . .	38
4.1.5	Teste 4 . . . . .	40
4.1.6	Teste 5 . . . . .	41
4.2	Dificuldades . . . . .	43
4.3	Considerações futuras . . . . .	46
4.3.1	Combinação com outros algoritmos . . . . .	46
4.3.2	<i>Tuning</i> . . . . .	46
5	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	48
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	50

## 1 INTRODUÇÃO

### Introdução

Entretanto, uma das grandes limitações da impressão 3D, principalmente do tipo *Fused Deposition Modeling*, é o tempo de impressão, que ainda limita muito o tamanho de peças impressas em um tempo razoável, geralmente sendo necessário reduzir muito a resolução da impressão.

Existe hoje, dentro da academia e das comunidades "faça você mesmo", uma busca por impressoras capazes de imprimir cada vez mais rápido mantendo a qualidade de impressão. Além da possível diminuição do tempo de impressão, além disso a capacidade de imprimir velozmente acaba proporcionando uma capacidade de aumentar a qualidade de impressão proporcional à diferença entre a velocidade máxima e a velocidade de impressão.

Portanto, vê-se relevante à procura por técnicas que permitem capacidades superiores de qualidade e velocidade de impressão, que flexibilizam a tecnologia e aumentam a capacidade da utilização comercial viável da tecnologia.

A manufatura aditiva tem se mostrado uma tecnologia promissora para a fabricação de peças e componentes em diversas áreas, como engenharia, medicina e indústria aeroespacial. Entre os diferentes métodos de manufatura aditiva, destaca-se o Fused Deposition Modeling (FDM), que utiliza a deposição de material fundido para construir objetos camada por camada.

No entanto, a qualidade e a eficiência do processo de manufatura aditiva ainda são desafios a serem superados. Nesse sentido, é necessário um controle preciso da geração de comandos para a impressora 3D, visando otimizar a velocidade de movimentação e garantir a precisão dimensional das peças produzidas.

O presente trabalho tem como objetivo investigar e desenvolver metodologias para a geração de comandos em impressoras 3D utilizando o método FDM. Para isso, serão abordados conceitos teóricos fundamentais, como a utilização de algoritmos de controle, a análise de trajetórias e a modelagem dinâmica do sistema.

No capítulo 2, será apresentado o referencial teórico, que abrange desde os princípios básicos da manufatura aditiva até os conceitos específicos do Fused Deposition Modeling. Serão discutidos também os métodos de geração de comando, como o look ahead, as curvas de velocidade trapezoidal e a integração implícita utilizando programação não linear e colocação.

No capítulo 3, será descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho. Serão apresentadas as ferramentas utilizadas, como o software Matlab e a função `fmincon`, além das etapas para a geração de comandos e a modelagem dinâmica da impressora 3D.

No capítulo 4, serão apresentados os resultados obtidos e discutidos. Serão analisadas as correlações entre as variáveis de entrada, as influências do modelo dinâmico e a performance computacional do sistema. Serão abordadas também as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do trabalho e possíveis abordagens para superar essas dificuldades, como a combinação com outros algoritmos.

Por fim, no capítulo 5, serão apresentadas as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições e apontando possíveis direções para pesquisas futuras. O objetivo final é fornecer subsídios para o aprimoramento da geração de comandos em impressoras 3D, visando melhorar a qualidade e eficiência do processo de manufatura aditiva.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Manufatura Aditiva

O princípio básico da manufatura aditiva (MA) é a capacidade de fabricar um modelo tridimensional "diretamente", não sendo necessário o planejamento das operações de maneira individual e sim se preocupando com as configurações como um todo. O processo é calculado pelo fatiador com base em um modelo tridimensional digital, geralmente criado a partir de *Computer Aided Design* (CAD) e nas configurações do mesmo e resulta nas instruções necessárias para a máquina de manufatura aditiva construir o modelo físico. Uma das características principais da MA é a rapidez na qual é possível criar protótipo diretamente de modelos digitais, por conta disso, em um contexto de desenvolvimento de produto, o termo prototipagem rápida era utilizado. Entretanto, conforme a MA foi se aperfeiçoando era perceptível a capacidade dessas tecnologias não só se aterem à produção de protótipos, mas também de peças utilizadas em produtos finais. Além disso, o termo não considerava o princípio básico que unia essas tecnologias e assim o termo manufatura aditiva foi apresentado e adotado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) GIBSON *et al.* (2015).

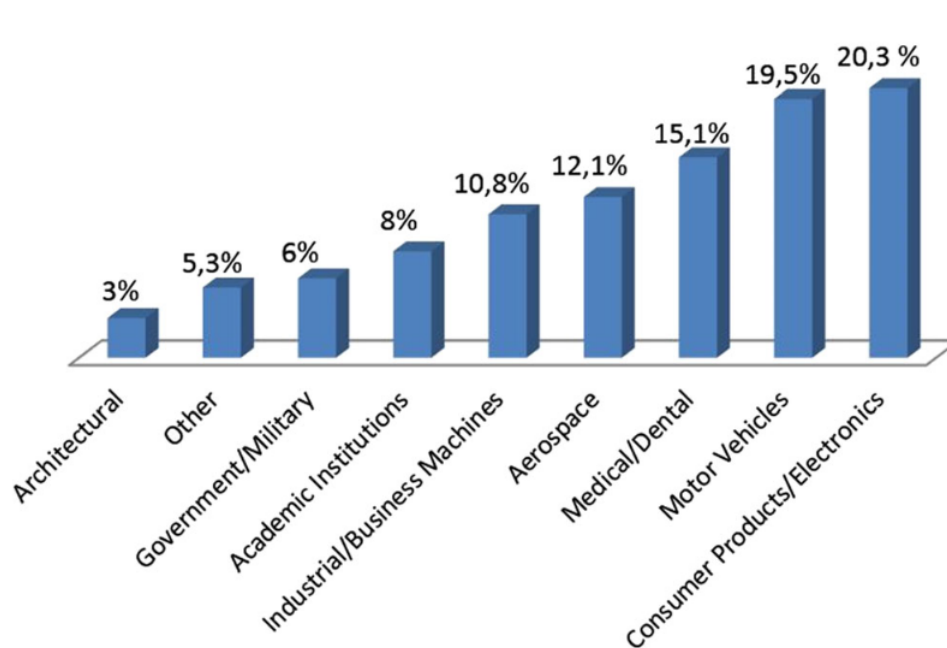
Apesar da manufatura aditiva ter sido criada a mais de 30 anos, apenas a partir de 2009, quando a última patente mais relevante de *Fused Deposition Modeling* (FDM) expirou. Com isso, vários entusiastas começaram a desenvolver essa tecnologia de uma maneira "caseira", com o forte movimento RepRap. Por conta dessa característica "caseira" e um senso de comunidade, os desenvolvimentos em sua maioria eram de caráter *Open Source* e com uma mentalidade de acessibilizar essa tecnologia para as pessoas. Com os avanços tecnológicos feitos pela comunidade, empresas, pessoas e a mídia começaram a se interessar cada vez mais, aumentando a popularidade das impressoras 3D e por consequência trazendo muita atenção para a manufatura aditiva, que a partir daí, mais pesquisas, mais empresas se interessavam em desenvolver esse tipo de tecnologia, não somente FDM (ATTARAN, 2017).

Atualmente, existe uma grande variedade de tecnologias e processos de manufatura aditiva. Estes variam na maneira com que depositam o material, nos princípios físicos que utilizam e nos materiais que podem ser utilizados. Como mencionado anteriormente, um dos métodos de manufatura aditiva mais populares é a tecnologia FDM, entretanto existem diversas outras tecnologias que tem crescido muito em popularidade como as tecnologias baseadas na cura seletiva de resinas, *stereolithography* (SLA) e *Masked stereolithography Apparatus* (MSLA),

alem de outras tecnologias menos acessíveis, mas com aplicações em diversas industrias, como por exemplo

*selective laser melting* (SLM) e *selective laser sintering* (SLS) (BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2016). Na figura 2.1 podemos observar a distribuição do uso de tecnologias MA por tipo de industria.

Figura 2.1 – Distribuição de uso de MA nas industrias



Fonte: BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2016

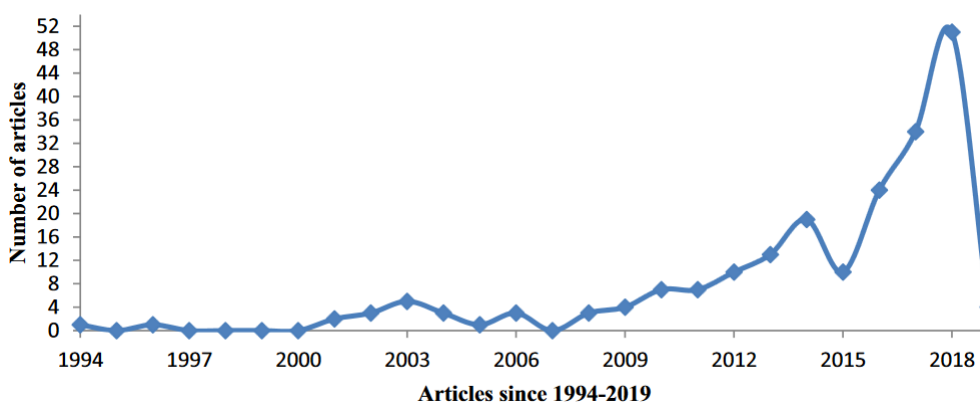
## 2.2 Fused Deposition Modeling

*Fused Deposition Modeling* (FDM) ou *Fused Filament Fabrication* (FFF) é uma das tecnologias MA mais populares como mencionado anteriormente. Ela se consiste por depositar material através de um processo onde um filamento de material é forçado dentro de uma câmara através, geralmente, de rolos dentados onde em uma região específica esse material é liquefeito. Por conta da pressão criada pelo filamento adentrando a câmara, ainda no estado sólido como um pistão, o material liquefeito é extrudado através de um bocal, comumente fabricado de bronze. Então, o filamento liquefeito é depositado em uma plataforma de forma a percorrer a trajetória desejada utilizando mecanismos movidos de forma controlada, geralmente por motores de passos. O processo é repetido camada por camada, de forma que elas estejam

apoiadas por camadas anteriores e a primeira camada continue fixa na plataforma ou cama, até que o processo finalize (TURNER et al., 2014) (TURNER; STRONG; GOLD, 2014).

O trabalho de (VYAVAHARE *et al.*, 2020) apresenta algumas características sobre o desenvolvimento científico sobre FDM ao longo dos anos, tendo como base 211 artigos diferentes de 1994 a 2020. É apresentado um grande salto no número de artigos publicados no tema em anos recentes (2015 a 2018) (figura 2.2), com 56% dos temas trabalhados em torno da otimização de parâmetros de impressão, acompanhado de 17% de trabalhos relacionados a aplicações utilizando o processo FDM, enquanto apenas x% são relacionados a outros temas, incluindo avanços tecnológicos relacionados a melhorias de *hardware* e *software* desses dispositivos. (Figura 2).

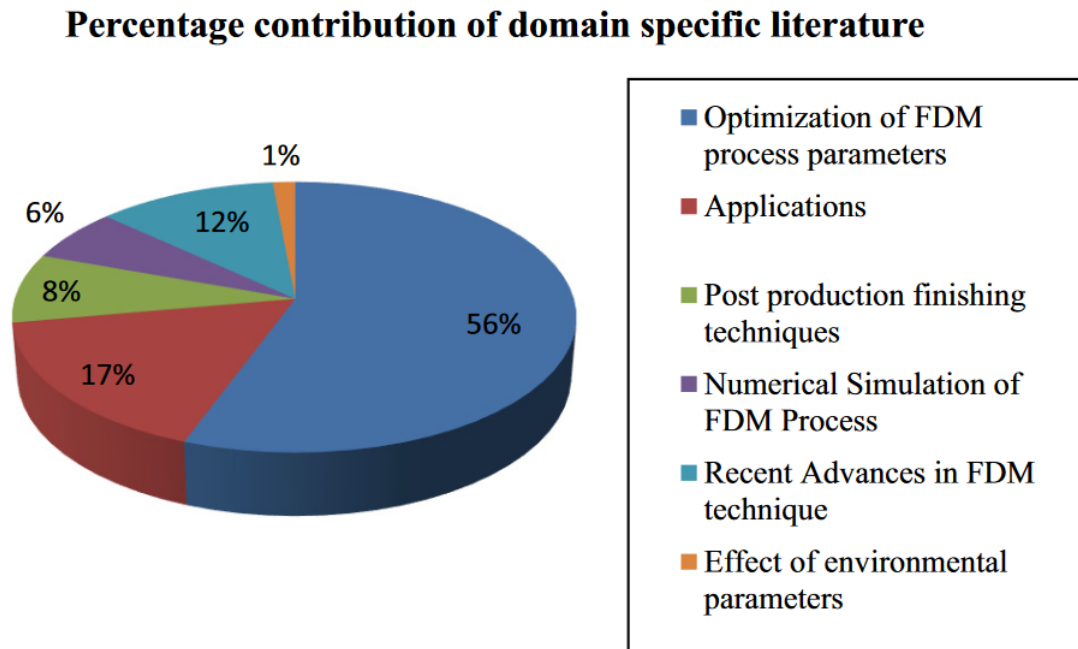
Figura 2.2 – Número de artigos publicados sobre FDM ao longo do tempo



Fonte: VYAVAHARE *et al.*, 2020

Podemos separar, de maneira simplificada, a porção de software de impressoras 3D FDM em três principais etapas: fatiamento (*slicing*), geração de comando e controle. A etapa de fatiamento envolve a topologia e a criação de instruções a partir do modelo, é nessa fase onde se decide a sequência de movimentos e outros eventos. Já na etapa de geração de comando, as instruções criadas pelo fatiador (*slicer*) na etapa anterior são interpretadas e os comandos detalhados são gerados, por exemplo as curvas de velocidade. Esses comandos são utilizados para movimentar os motores e outros equipamentos da impressora. Na etapa de controle, uma etapa relativamente nova nas impressoras 3D mais acessíveis, técnicas de controle são utilizadas para se diminuir vibrações e variações indesejadas em quaisquer parâmetros controlados, como a temperatura do bico. Um dos grandes avanços nessa etapa foi a implementação da técnica de *Input Shaping* por um *firmware Open Source* de impressora 3D chamado Klipper. Após a inclusão dessa etapa, principalmente no controle dinâmico da impressora, as capacidades

Figura 2.3 – Distribuição das pesquisas sobre FDM



Fonte: VYAVAHARE *et al.*, 2020

de velocidades e qualidade chegaram a outro patamar se comparados a impressoras que não implementam essa etapa (KLIPPER, 2017a).

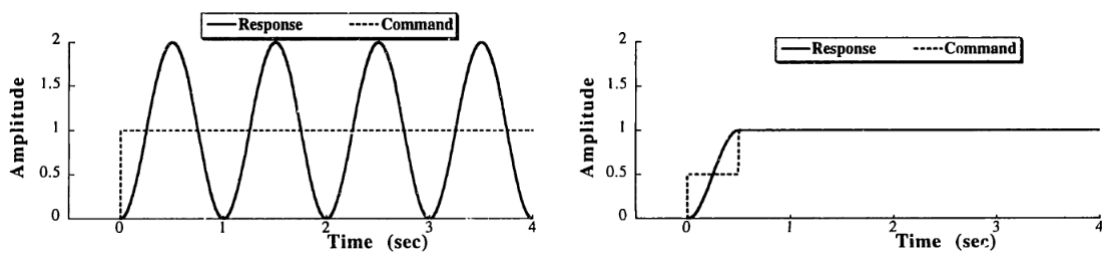
### 2.2.1 Feedforward

Dentre os métodos de controle em aplicações FDM o *Feedforward* é o mais eficiente dada as limitações de custo em impressoras 3D comuns e é capaz de ter um impacto maior em sistemas conhecidos e sensíveis ao erro, onde buscam corrigir o erro antes que ele aconteça. O método de *feedback* é mais eficiente em diminuir o impacto de excitações externas ou desconhecidas, entretanto não consegue prever os efeitos do sistema, se encaixando melhor em aplicações de usinagem utilizando CNCs (*Computer Numerical Control*), onde o valor dos equipamentos é maior e as forças envolvidas no corte influenciam mais do que as vibrações do próprio sistema. Já no caso das impressoras, quase 100% dos efeitos é causado pelo próprio sistema. As principais limitações da aplicação de técnicas Feedforward em impressoras 3D são a dificuldade de montar um modelo representativo, a exigência computacional elevada e por fim a necessidade da simulação se estender do início ao fim, pela dependência de se basear no estado inicial da impressão (RAMANI; EDOIMIOYA; OKWUDIRE, 2020; DUAN; YOON; OKWUDIRE, 2018).

### 2.2.1.1 *Input Shaper*

Conhecendo a trajetória desejada e conhecendo características do sistema é possível computar os comandos fornecidos para calcular uma série de comandos, levando em consideração as características do sistema para que o comando de referência seja modificado de forma à trajetória final ser o mais próximo possível do comando de referência. Entretanto, ao invés de computar todo o comando de referência, é possível obter um comando modificado em tempo real através de um filtro. Uma das abordagens desse tipo de filtro de comando é o *Input Shaper*, onde variados *Shapers* são construídos levando em consideração diferentes objetivos e restrições (SINGHOSE, 1997). Podemos ver na figura 2.4 um exemplo comparativo das respostas ao degrau e da função escada aplicada pelo shaper.

Figura 2.4 – Comparação da resposta ao degrau e da resposta a escada



Fonte: SINGHOSE, 1997

Essa abordagem vem sendo explorada na comunidade "faça você mesmo" a partir de 2017 quando a última patente desse método expirou, e tem aprimorado a área como um todo, empurrando os limites anteriores de velocidade e precisão, sendo popularizada pelo Klipper (KLIPPER, 2017b).

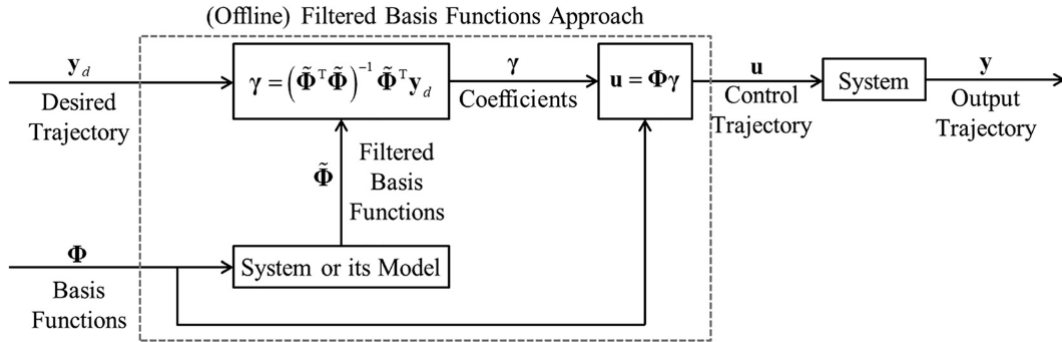
### 2.2.1.2 *filtered basis function (FBF)*

O método FBF necessita que a trajetória a ser rastreada seja totalmente conhecida e que a trajetória controlada possa ser expressa como uma combinação linear de funções base possuindo coeficientes desconhecidos. As funções base são utilizadas em um controle feedforward utilizando o modelo dinâmico do sistema e selecionando os coeficientes de maneira a minimizar os erros dada uma trajetória desejada (figura 2.5). (RAMANI *et al.*, 2017)

### 2.2.1.3 *Limited-preview filtered B-splines*

Uma das maiores dificuldades que os métodos avançados para o controle *feedforward* de trajetórias é a necessidade de se conhecer completamente a trajetória desejada, o que implica

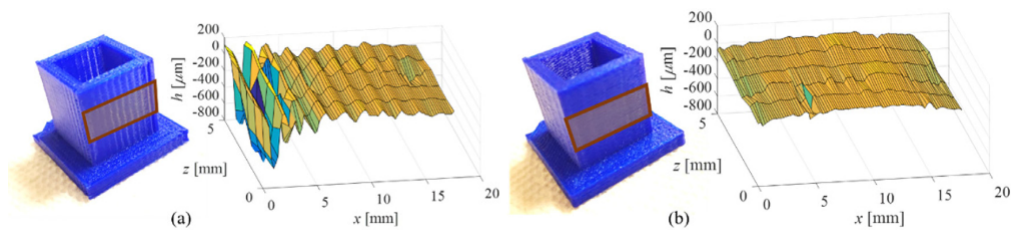
Figura 2.5 – Fluxograma FBF

Fonte: RAMANI *et al.*, 2017

em um grande custo computacional, principalmente em situações onde são necessárias uma grande quantidade de amostras da trajetória, por exemplo em casos de alta resolução e casos de longa duração. O *limited-preview filtered B-splines* divide a trajetória desejada em subgrupos com um número menor de amostras e utiliza um algoritmo de *receding horizon* para calcular recursivamente os coeficientes da função B-spline que minimizam os erros de trajetória (DUAN; YOON; OKWUDIRE, 2018).

A partir dessa otimização da divisão da trajetória em subgrupos, esse método conseguiu ser testado utilizando uma impressora 3D de verdade com modelos simples. Apresentando resultados promissores apresentados na figura 2.6.

Figura 2.6 – Resultados práticos da LPFBF



Fonte: DUAN; YOON; OKWUDIRE, 2018

#### 2.2.1.4 Robust Filtered Basis Functions

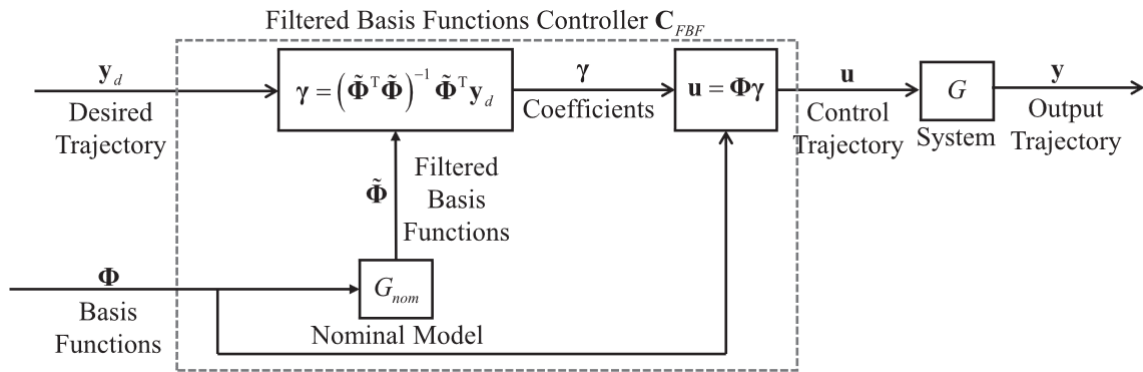
Com base nos desenvolvimentos nos trabalhos de (RAMANI *et al.*, 2017) e (DUAN; YOON; OKWUDIRE, 2018), comentados anteriormente, (RAMANI; EDOIMIOYA; OKWUDIRE, 2020) busca atacar um segundo desafio prático na implementação da FBF, sendo o primeiro desafio prático o custo computacional que foi endereçado pelo trabalho de (DUAN;

YOON; OKWUDIRE, 2018) através da LBFBF, permitindo a aplicação do algoritmo no mundo real.

Este segundo desafio se trata da degradação de precisão de rastreamento da abordagem FBF, causada por imprecisões no modelo ou incertezas na dinâmica da planta atrelado a característica do método de se utilizar puramente uma abordagem de *feedforward*. A não participação de *feedbacks* sensoriais do mundo real abre espaço para uma crescente divergência entre o modelo e a realidade.

Considerando o requisito de manter a performance computacional alcançada com o método LPFBF, (RAMANI; EDOIMIOYA; OKWUDIRE, 2020) propõe, também, a utilização de um filtro robusto em substituição à dinâmica nominal da planta para filtrar as funções de base. Esse filtro robusto é construído com base no inverso de um controlador feedforward ótimo, que minimiza uma função de custo de erro para lidar com a incerteza conhecida da planta como um filtro robusto. O esquema do método é apresentado na figura 2.7.

Figura 2.7 – Fluxograma RFBF



Fonte: RAMANI; EDOIMIOYA; OKWUDIRE, 2020

### 2.3 Geração de comando

A geração de comando é o processo que coordena a ativação dos atuadores, motores, dentre outros componentes de uma impressora. Ele recebe como base uma série de comandos que precisam ser interpretados e interpolados. Esse processo é responsável pelo controle de velocidade, aceleração dentre outras atividades que variam no tempo (YU *et al.*, 2020).

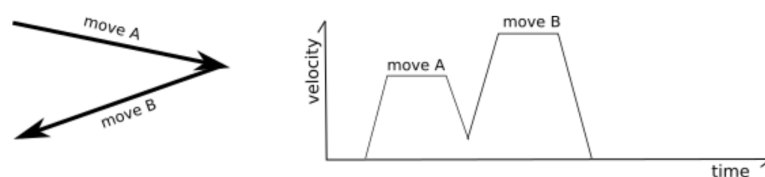
### 2.3.1 Look ahead

No processo de impressão 3D são fornecidos para a impressora uma sequência de pontos no espaço e limitações de velocidade entre os mesmos. A velocidade nos pontos é compartilhada entre trajetos em sequência, o que torna considerá-los independentemente ineficiente, introduzindo aceleração e desaceleração desnecessária impactando negativamente no tempo de impressão e na qualidade da peça impressa. O algoritmo *Look Ahead* procura manter o máximo de velocidade possível entre movimentos distintos, evitando acelerações e desacelerações desnecessárias, como podemos observar nas figuras 2.9 e 2.8, apesar de ser necessário um pré-processamento desses pontos que introduzem um custo computacional maior (YU et al. 2020) (YU et al., 2020; KLIPPER, 2017b).

### 2.3.2 Curvas de velocidade trapezoidal

As impressoras 3D entre outros equipamentos, como máquinas CNC, necessitam de um planejamento de velocidade, pois o Gcode fornece apenas as velocidades desejadas de cada movimento, enquanto o algoritmo de lookahead calcula as velocidades de junção entre os movimentos, portanto ainda se faz necessário planejar o comportamento da velocidade ao longo do tempo do trajeto entre a velocidade inicial e final do movimento (figura 2.10). Uma das maneiras mais simples para a criação dessa curva de velocidade é a criação de uma curva trapezoidal, onde podemos separar o setor em 3 segmentos de aceleração constante. Em um primeiro momento uma crescente de velocidade até a velocidade desejada, seguido de um segmento de velocidade constante e por fim um segmento de desaceleração constante até a velocidade final. Alguns ajustes são feitos para as diferentes condições de velocidade inicial, final e velocidade máxima atingida com uma determinada aceleração máxima, que pode fazer com que se diminua a quantidade de segmentos (YU et al., 2020; KLIPPER, 2017b).

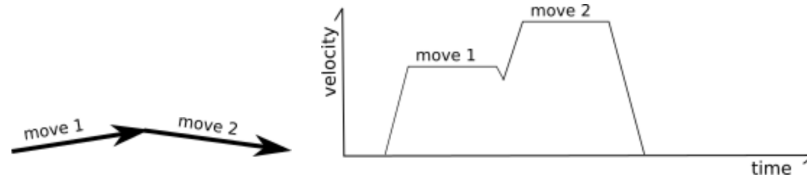
Figura 2.8 – Look ahead em uma grande mudança de direção



Fonte: KLIPPER, 2017b

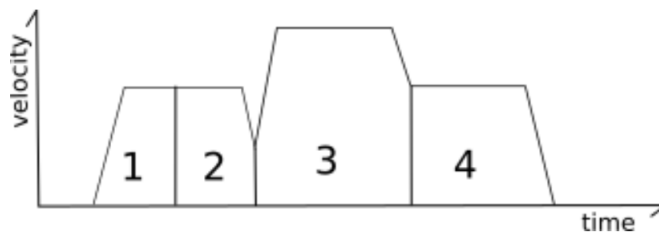


Figura 2.9 – Look ahead em uma pequena mudança de direção



Fonte: KLIPPER, 2017b

Figura 2.10 – Curva de velocidades trapezoidal em uma sequência de movimentos



Fonte: KLIPPER, 2017b

### 2.3.3 Espaço de Estados

A maioria dos sistemas dinâmicos pode ser escritos através de uma formulação chamada de espaço de estados, que tem como objetivo expressar modelos de equações diferenciais parciais (EDP) ou ordinárias (EDO) de ordem superior como um conjunto de EDPs ou EDOs de primeira ordem. Essa formulação é construída a partir de um princípio de autoregressão das equações. Na equação 2.1 podemos observar uma EDO de segunda ordem representando um sistema massa mola simples, logo abaixo (2.2) a mesma equação representada na formulação de espaço de estados (HAMILTON, 1994).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k/m & c/m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(t) \quad (2.2)$$

### 2.3.4 Integração implícita utilizando programação não linear e colocação

HARGRAVES; PARIS (1987) descreve um algoritmo para a solução numérica direta de problemas de controle ótimo (HARGRAVES; PARIS, 1987). O método utiliza polinômios cúbicos para representar as variáveis de estado, interpolação linear para as variáveis de controle e colocação para satisfazer as equações diferenciais. Essa representação transforma o problema

de controle ótimo em um problema de programação matemática, que é resolvido por meio de programação quadrática sequencial. Esse método tem a vantagem de ser fácil de programar e pode lidar com problemas gerais de otimização de trajetória, incluindo restrições de caminho, estados descontínuos e desigualdades de controle.

O método aproxima a solução das equações diferenciais subdividindo cada estado da matriz de espaço de estados em segmentos, estes sendo representados por polinômios de 3º, onde são utilizados os valores do estado no contorno e a derivada no tempo do estado, como definido pelas equações, no contorno. Os valores de estado são então selecionados de forma que as derivativas no centro do segmento concordem com as equações diferenciais.

O procedimento base pode ser aplicado pelos seguintes passos.

A equação 2.3 avalia o estado no centro do segmento, onde  $x$  representa o estado,  $T$  representa o comprimento do segmento e  $f_i$  representa o valor da função avaliado em  $x_i$ . O subscrito  $c$  representa o centro do segmento.

$$x_c = \frac{x_1 + x_2}{2} + T \frac{f_1 - f_2}{8} \quad (2.3)$$

Da mesma maneira sua derivada é apresentada na equação 2.4.

$$\dot{x}_c = -3 \frac{x_1 + x_2}{2T} + \frac{f_1 + f_2}{4} \quad (2.4)$$

A equação 2.5 define então o valor do defeito no centro do segmento.

$$\Delta = f_c - \dot{x}_c \quad (2.5)$$

Considerando também que a entrada do sistema pode ser avaliada de forma aproximada no centro do segmento através da equação 2.6.

$$u_c = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (2.6)$$

Os valores de estado agora podem ser alterados de maneira que o defeito tenda a zero.

### 2.3.5 Objective Function Optimization

Funções objetivo de otimização são elementos importantes na execução de algoritmos de otimização. Alguns estudos apontam que a qualidade e o número de variáveis de projeto cru-

ciais para o resultado da otimização, além disso outros sub-parâmetros também são relevantes como restrições, limites e valores iniciais. A coerência entre estes fatores depende habilidade e de uma visão abrangente de seu criador (ALBAGHDADI; BAHAROM; SULAIMAN, 2021).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Matlab

MATLAB é um software interativo para computação numérica que possui uma série de ferramentas, funções, visualisadores, ferramentas para debugging, estrutura de dados, entre outros auxílios que facilitam o desenvolvimento e o estudo de atividades que utilizam a computação numérica. Por conta desses facilitadores, o MATLAB é amplamente utilizado na indústria e no meio acadêmico.(HIGHAM; HIGHAM, 2016) Dada essa característica e a existência da função FMINCON a disposição no ambiente MATLAB, foi feita a escolha de se utilizá-lo para a construção do código presente neste trabalho.

##### 3.1.1 fmincon

Como o modelo matemático a ser otimizado é multivariável e possuindo restrições não-lineares, a função FMINCON do ambiente do MATLAB é utilizada para otimizar as variações de velocidade de forma a diminuir o erro de trajetória associado às flexibilidades do sistema que causam perturbações e vibrações indesejadas. É uma função baseada em gradientes que busca por todos os mínimos locais de uma região que satisfaz outras restrições estipuladas (ALBAGHDADI; BAHAROM; SULAIMAN, 2021). Ela utiliza um conjunto de restrições superiores e inferiores para cada ponto e otimiza a função considerando as restrições estabelecidas pela função não linear, utilizando as equações de movimento para encontrar a solução da EDO de maneira a otimizar os parâmetros. Também permite uma série de configurações incluindo a escolha de diferentes algoritmos de otimização entre outros parâmetros sobre a função.

#### 3.2 Geração de Comando

##### 3.2.1 Leitura Gcode

Foi considerado no mapeamento do Gcode apenas comandos G1, extraíndo as informações dos eixos X, Y e do *feedrate* (F). Com base nesses valores uma matriz 3 por n é criada, n sendo o número de comandos lidos do arquivo Gcode. Em geral a unidade de F em arquivos Gcode gerados pelos fatiadores se dão em milímetros por minuto, mas é convertida para milímetros por segundo na construção da matriz de entrada.

### 3.2.2 Velocidade de curva

Por conta de alguns problemas de implementação de algoritmos de *lookahead*, a velocidade de junção, ou seja, a velocidade de transição desejada entre um movimento e outro, foi fixada como 0. Essa condição representa bem trajetórias que possuem ângulos entre os vetores de velocidade dos movimentos maiores ou iguais a 90°. Portanto, limitando os trajetos testados a esse tipo de trajetória o comando gerado se manteria próximo da realidade das impressoras 3D.

### 3.2.3 Curva rapezoidal de velocidade

A partir da matriz de entrada e das velocidades finais e iniciais dos movimentos estabelecida pelo *lookahead*, nos casos apresentados neste trabalho fixadas ambas em zero, utilizamos a função responsável por gerar a curva trapezoidal de velocidades.

Essa função separa o deslocamento total do movimento em 3 fases de aceleração constante. Na primeira fase a velocidade trazida da velocidade inicial até a velocidade desejada a aceleração constante, na segunda fase a velocidade é mantida constante na velocidade desejada e por fim na terceira fase a velocidade é levada da velocidade desejada até a velocidade final. Entretanto, em algumas situações pode não ser possível alcançar a velocidade desejada e o perfil se limitar a duas fases, outras condições onde alguma das velocidades é igual a velocidade desejada faz com que a quantidade de fases visíveis seja reduzida.

Para identificar se a velocidade desejada será alcançada é calculado a velocidade pico ( $v_p$ ) que é obtida extrapolando retas com as inclinações da aceleração na velocidade inicial e final. É possível obter a velocidade de pico através da equação 3.1.

$$v_p = \sqrt{\frac{(v_i^2 + v_f^2)}{2} + acc * des_{tot}} \quad (3.1)$$

A partir da comparação da velocidade pico com a velocidade desejada, indicada pelo *feedrate* disponibilizado no Gcode, é possível determinar o padrão da curva de velocidade deste movimento. Caso a velocidade de pico for maior do que a velocidade desejada, temos 3 fases de deslocamento que podem ser calculadas pelas equações 3.2 e 3.3. Caso a velocidade de pico seja igual ou menor do que a velocidade desejada, teremos 2 fases de deslocamento que são calculadas a partir da equação 3.2.

$$des_{segment} = \frac{(v_f^2 - v_i^2)}{(2 * acc_{segment})} \quad (3.2)$$

$$des_{middle} = des_{total} - (des_{up} + des_{down}) \quad (3.3)$$

É possível calcular também os intervalos de tempo dessas fases, através das equações 3.4 e 3.5.

$$dt_{segment} = \frac{(v_f - v_i)}{acc_{segment}} \quad (3.4)$$

$$dt_d = \frac{des_d}{v_d} \quad (3.5)$$

Além disso é calculado a variação de velocidade nos intervalos pela equação 3.6.

$$\Delta vel = v_f - v_i \quad (3.6)$$

Esses passos resultam em uma nova matriz contendo informações sobre o a variação da posição, do tempo, da velocidade e sobre a aceleração e direção de deslocamento nos pontos iniciais e finais do Gcode e também nos pontos onde existe uma alteração na aceleração.

### 3.2.4 Interpolação

A partir dessa matriz, é utilizada uma função de interpolação para dividir cada intervalo dessa matriz em intervalos menores baseados em um passo de tempo definido para esta interpolação. Assim criando-se uma nova matriz dos dados interpolados. Para se dividir esses intervalos é possível utilizar a equação 3.7 calculando o número de passos neste intervalo, anexando à matriz os passos de tempo e por fim o restante do intervalo, calculado pela equação 3.8. Com base nestes passos de tempo, é possível calcular o deslocamento para cada um destes passos através da equação 3.9.

$$N_{steps} = \lceil \frac{\Delta t_i}{\Delta t_{stepsize}} - 1 \rceil \quad (3.7)$$

$$\Delta t_{laststep} = \Delta t_i - \Delta t_{stepsize} * N_{steps} \quad (3.8)$$

$$\Delta des_i = \Delta v_i * \Delta t_i + \frac{acc_{segment} * \Delta t_i^2}{2} \quad (3.9)$$

A partir dos vetores de direção e da função acumuladora que se consite em acumular os valores de um vetor. Obtemos uma matriz de posições, velocidades e tempo.

$$\begin{aligned} v_0 &= init_{value} + v_0 \\ v_k &= v_k + v_{k-1} \end{aligned} \quad (3.10)$$

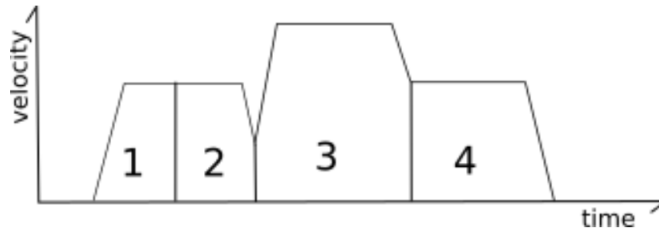
### 3.3 Modelagem dinâmica de uma impressora 3D

Para a modelagem do sistema mecânico são consideradas as seguintes simplificações:

- Não existe escorregamento nem perda de potência na interação entre a polia e a correia
- A correia apresenta um comportamento equivalente à uma mola e um amortecedor em paralelo
- O bico injetor é um corpo rígido uniforme de geometria simples
- A correia está acoplada nos dois lados da peça que se movimenta nos trilhos, entretanto como a correia só permite o tensionamento ela será considerada como um conjunto mola amortecedor simples

Para a modelagem dinâmica dos eixos X e Y da impressora 3D, é considerado que os eixos são completamente independentes, a flexibilidade da correia é aproximada utilizando um conjunto mola amortecedor e a transmissão de movimento e torque dos motores é considerada como ideal e não será abordada. Assim duas posições de estudo surgem para cada eixo, uma delas representa a posição ideal, caso o sistema não possuísse nenhuma flexibilidade ou perda, que também é a posição desejada pelo usuário ( $px_b$ ). A segunda posição considera as forças inerciais e a flexibilidade introduzida pela correia, ou seja, a posição real simulada pelo modelo e no caso empírico a posição real ( $px$ ) como na figura 3.1.

Figura 3.1 – Visualização das posições do sistema



$$m\ddot{p}x + c(\dot{p}x - \dot{p}x_b) + k(px - px_b) = 0$$

$$\ddot{p}x = -\frac{c}{m}(\dot{p}x - \dot{p}x_b) - \frac{k}{m}(px - px_b)$$

$$\ddot{p}x = -\frac{c}{m}\dot{p}x + \frac{c}{m}\dot{p}x_b - \frac{k}{m}px + \frac{k}{m}px_b$$

$$\ddot{p}x = -\frac{c}{m}\dot{p}x - \frac{k}{m}px + \frac{c}{m}\dot{p}x_b + \frac{k}{m}px_b \quad (3.11)$$

### 3.3.1 Espaço de estados

A formulação de espaço de estados foi utilizada com intuito de facilitar as operações e a a solução do sistema, dado sua característica de dividir uma equação diferencial de ordem superior em um sistema de equações diferenciais de ordem 1. O modelo dinâmico do sistema é apresentado na formulação de espaço de estados na equação 3.12, baseado na equação 3.11, utilizando a mesma equação para a base do eixo y.

$$\begin{bmatrix} \dot{p}x \\ \ddot{p}x \\ \dot{p}y \\ \ddot{p}y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_x}{m_x} & -\frac{c_x}{m_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{k_x}{m_x} & -\frac{c_x}{m_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} px \\ \dot{p}x \\ py \\ \dot{p}y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_x}{m_x} & \frac{c_x}{m_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_x}{m_x} & \frac{c_x}{m_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} px_b \\ \dot{p}x_b \\ py_b \\ \dot{p}y_b \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Em uma notação simplificada temos a equação 3.13

$$\dot{x} = A * x + B * u \quad (3.13)$$



### 3.4 FMINCON

#### 3.4.1 Configurações da função

Foi utilizado o seguinte conjunto de configurações opcionais da função (tabela 3.1). As configurações não indicadas se mantem na configuração padrão, que pode ser encontrada nos manuais da mesma.

Tabela 3.1 – Tabela de parâmetros opcionais da FMINCON

Opção	Valor
TolFun	0.000000001
MaxIter	100000
Display	iter
DiffMinChange	0.0001
Algorithm	interior-point
StepTolerance	1e-12
MaxFunEvals	700000

#### 3.4.2 Restrições lineares e limites de borda

Não foi utilizado nenhuma restrição linear nessa otimização. Os limites superiores (*upperbound*) e inferiores (*lowerbound*) foram definidos baseados nos limites físicos da impressora (0 a 200 milímetros) para as posições  $x_b$  e  $y_b$ .

#### 3.4.3 Restrições não lineares

A função para as restrições não lineares foi implementada com base nas equações 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 de maneira a popular a variável de restrições de igualdades com os valores do defeito dos segmentos ( $\Delta$ ) e também com os valores iniciais. Além disso, foi utilizado também como restrição de igualdade a arrancada, atrelado a um condicional para que se comporte como uma desigualdade. A variável de restrições de desigualdades não foi populada, os motivos são apresentados na seção de resultados e discussão.

#### 3.4.4 Função objetivo

Foram realizados alguns testes com funções objetivo e seus resultados são apresentados na seção de resultados e discussão, entretanto a função objetiva foi definida como zero, ou seja, pra qualquer valor ela retornara zero nas chamadas da FMINCON.

### 3.5 Solução da trajetória da base

É considerada como trajetória desejada a trajetória obtida através da função de geração de comando apresentada anteriormente e são utilizados os vetores de tempo e posição como variáveis globais, para serem acessados dentro da função das restrições não lineares, chamada pela FMINCON. Além disso, esses mesmos vetores de posição também são considerados como o chute inicial e variável principal na FMINCON, sendo adaptados em forma de matriz.

A variável principal inserida na FMINCON é a matriz contendo os vetores de posição da base ( $x_b$  e  $y_b$ ), enquanto os vetores de posição da ponta é fixado pela trajetória desejada presente na forma de variáveis globais.

Para conseguir realizar os cálculos necessários dentro da função de restrições não lineares é utilizado o seguinte conjunto de equações básicas (3.14) para se derivar a curva posição-tempo considerando aceleração constante, sendo  $dt$  a variação do tempo no intervalo,  $des_n$  o deslocamento final do intervalo,  $des_i$  o deslocamento inicial no intervalo,  $acc_n$  a aceleração do intervalo,  $vel_n$  a velocidade final do intervalo e  $vel_i$  a velocidade inicial do intervalo. Assim construindo o vetor de velocidade a partir da condição inicial de deslocamento e velocidade zero, para ambos os eixos ( $x$  e  $y$ ).

$$acc_n = 2 \frac{\left( \frac{des_n - des_i}{dt} \right) - vel_i}{dt} \quad (3.14)$$

$$vel_n = vel_i + acc_n dt$$

### 3.6 Descrição das simulações

Foi realizado uma série de simulações utilizando como base uma sequência de dois movimentos em 90 graus, 10 milímetros ao longo do eixo x e depois 10 milímetros ao longo do eixo y, através de um arquivo Gcode de teste. Em cada uma dessas simulações um dos parâmetros é alterado, enquanto o restante permanece em uma configuração base, apresentada na tabela 3.2. Além disso, em cada teste foram separados algumas variações do mesmo parâmetro em questão e as versões do teste são identificadas por uma letra de A a C. Assim, as configurações para as diferentes simulações adicionais segue a tabela 3.3.

Além das curvas de posição, deslocamento e velocidade, algumas variáveis também foram explicitadas para análise. São elas o tamanho dos vetores, o tempo de simulação e a

Tabela 3.2 – Tabela de parâmetros base das simulações

Parâmetro	Valor	Unidade
Frequência	100	$rad/s$
Coefficiente de amortecimento	0,5	-
Aceleração base	5000	$mm/s^2$
Velocidade desejada	100	$mm/s$
Resolução de interpolação	0,005	$s$

Tabela 3.3 – Tabela do parâmetro modificado das simulações

Teste	Parâmetro	Valor A	Valor B	Valor C	Unidade
1	Frequência	50	200	500	$rad/s$
2	Coefficiente de amortecimento	0	1	2	-
3	Aceleração base	1000	10000	-	$mm/s^2$
4	Velocidade desejada	50	200	-	$mm/s$
5	Resolução de interpolação	0,01	0,001	0,0002	$s$

viabilidade ao longo . O tamanho dos vetores é definido na fase de geração de comando e tem influência direta da resolução de interpolação definida e do tempo necessário para percorrer o caminho dada as definições de velocidades na geração de comando. O tempo de simulação começa a ser contado logo depois da geração de comando e para quando a função FMINCON termina de ser executada. A viabilidade é um dos resultados da função FMINCON e este representa o valor da maior restrição não cumprida.

A máquina utilizada para a realização das simulações foi um notebook acer com as configurações apresentadas na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Tabela de especificações do computador

Processador	Intel I7-5500U 2.40GHz
Memoria	8,00 GB
Placa de vídeo	Nvide Geforce 920M
Sistema	64 bits

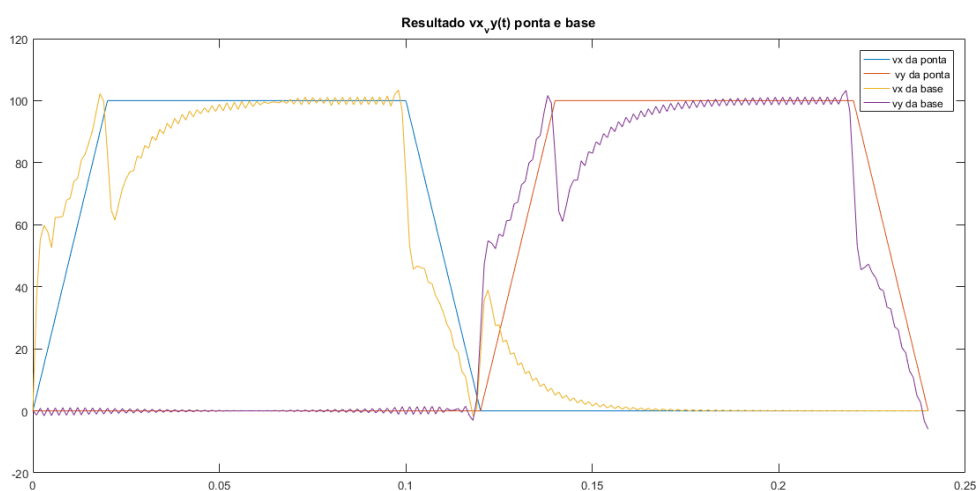
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados

#### 4.1.1 Teste Padrão

Podemos observar os resultados das curvas geradas pelo teste utilizando os parâmetros base nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3. Nelas temos o comportamento compensador, especialmente nas curvas que tem o tempo como abscissa. Notamos também, principalmente na figura 4.1 uma oscilação de alta frequência que é um artefato da resposta da FMINCON, essa oscilação se encontrava em amplitude muito maior e foi controlada através de restrições quanto ao arranque, ou seja, a mudança da aceleração no tempo. Entretanto, essa restrição apresentou problemas de priorização de restrições que será comentado na seção de dificuldades. Notou-se também que a amplitude dessas oscilações tende a ser menor conforme exista uma maior resolução na interpolação do tempo, ou seja, apresente  $dt$  menor.

Figura 4.1 – Teste base - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base



No gráfico da figura 4.4 nos indica a progressão das iterações da FMINCON, sendo cada ponto uma iteração diferente, possuindo um valor correspondente ao número de vezes em que a função objetivo e as restrições foi avaliada no eixo x e o valor da viabilidade, que como comentado na seção de metodologia, indica o maior valor de restrição não cumprido. Podemos perceber o processo de convergência no decorrer das iterações, o que costuma indicar uma rodada de sucessos. Percebe-se também que os níveis iniciais da viabilidade ficam próximos de  $7,5 \times 10^3$ , que foram níveis próximos na maioria dos testes. Por fim, temos que o tempo elapsado

Figura 4.2 – Teste base - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base

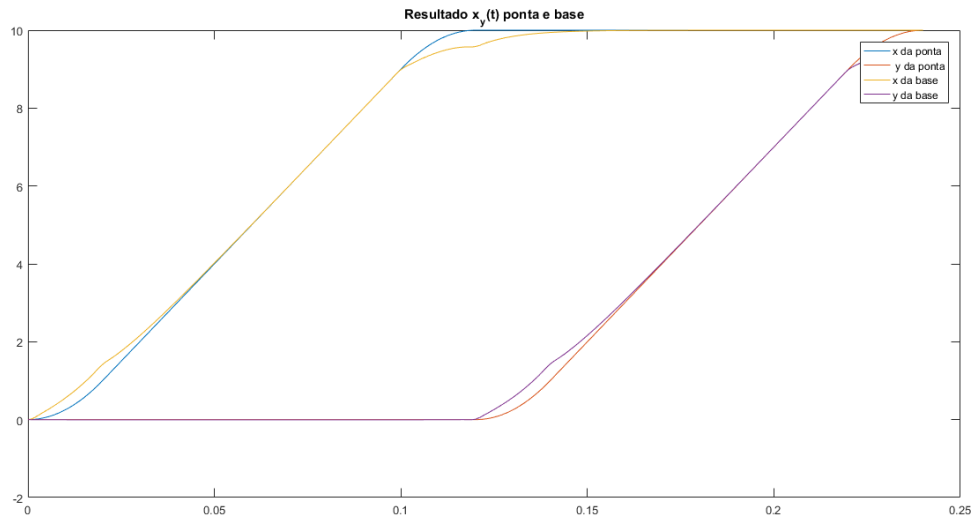
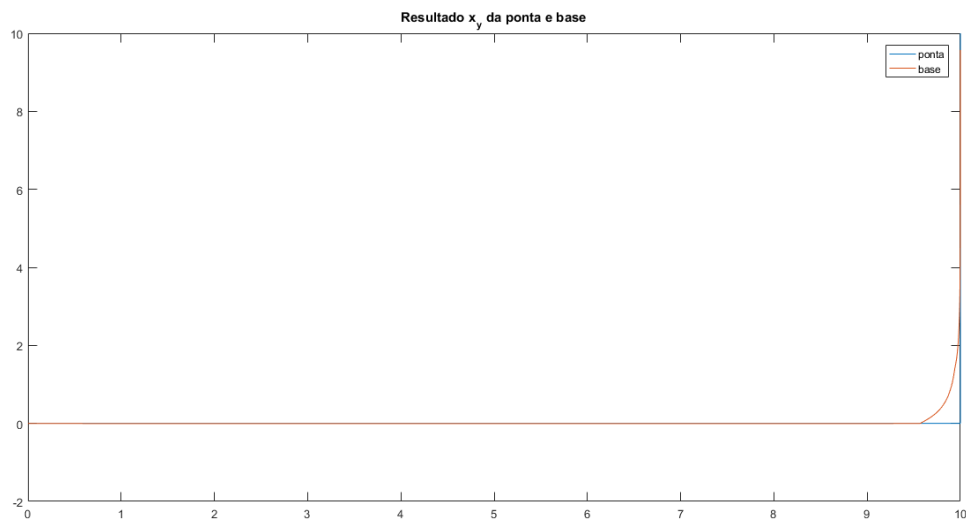


Figura 4.3 – Teste base - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base

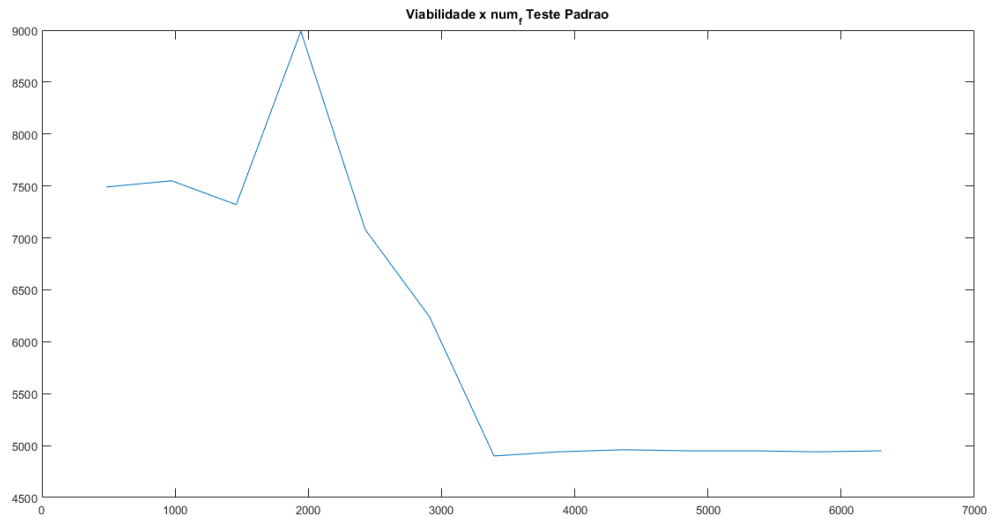


de simulação para este teste foi de 89,8 segundos, com os vetores de posição possuindo um tamanho de 241 elementos.

#### 4.1.2 Teste 1

Os resultados da variação da variável de entrada frequência natural, que varia basicamente o comportamento da planta do modelo dinâmico, exemplifica as diferenças nas amplitudes dos desvios entre a ponta e a base e uma menor necessidade de compensação, assim como

Figura 4.4 – Teste base - Num de fun x Viabilidade



previsto de um sistema de rigidez maior. As diferenças podem ser observadas de forma clara se compadas as figuras 4.5, 4.6 e 4.7, comparando também as diferenças entre o comportamento do deslocamento e do caminho tomado entre os dois extremos do teste (A e C) nas figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11.

Figura 4.5 – Teste 1A - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base

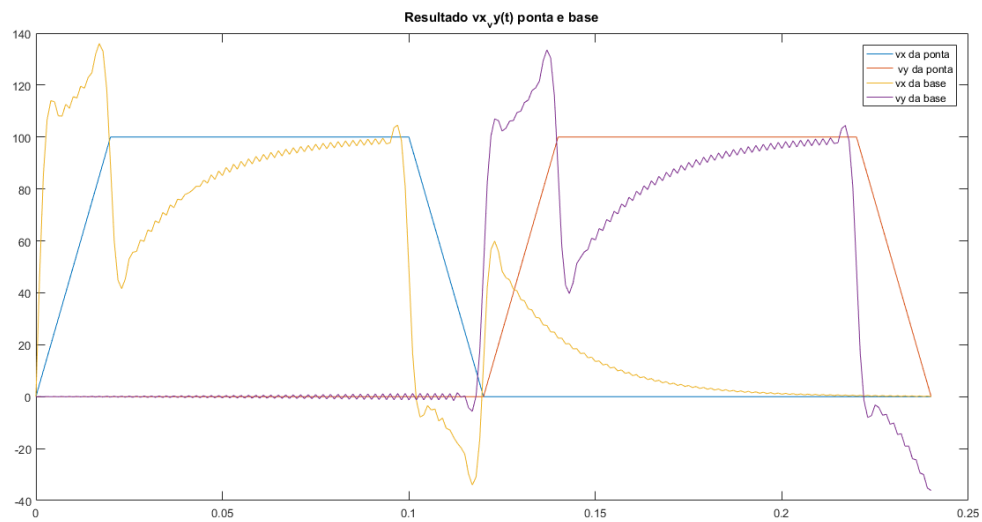


Figura 4.6 – Teste 1B - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base

Figura 4.7 – Teste 1C - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base

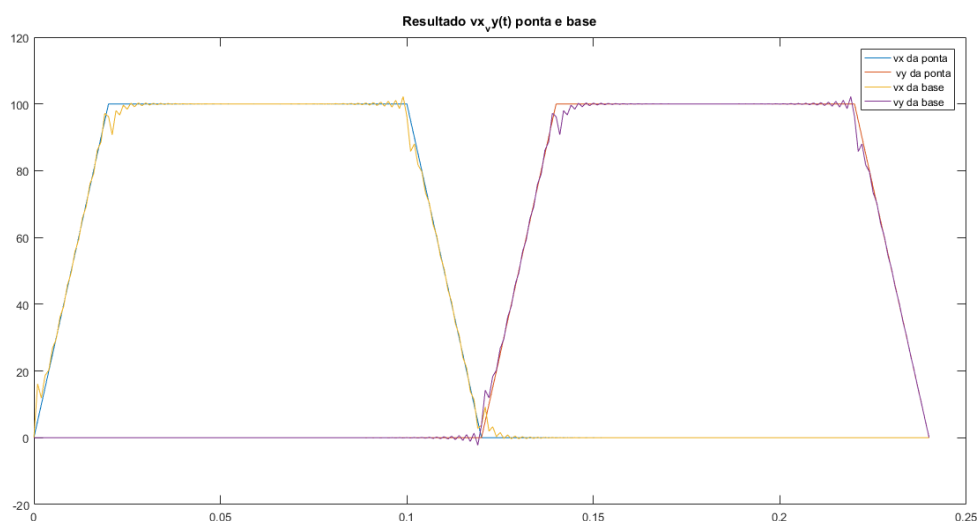
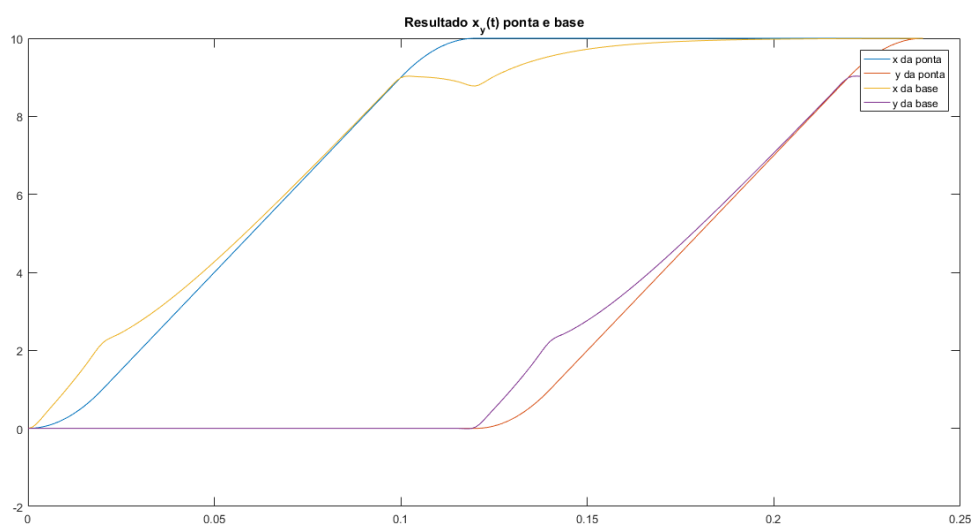


Figura 4.8 – Teste 1A - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base



Já na figura 4.12 é possível notar um comportamento semelhante de convergência, mas nota-se que nos testes de maior rigidez a viabilidade alcançada foi menor, ou seja, menores violações das restrições impostas, dados primordialmente pelos menores desvios e menor necessidade de compensação. Essa característica pode ser observada também nos tempos de simulação que foram reduzindo de 96,76s (teste A) até 80,77s (teste C), com o teste B ficando entre os dois com 89,04s, todos esses com vetores de posição de 241 elementos.

Figura 4.9 – Teste 1C - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base

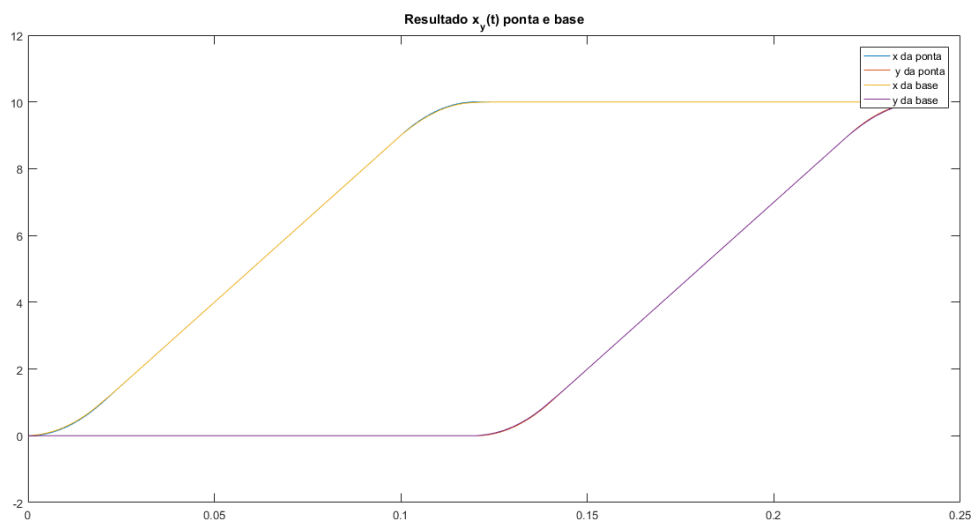
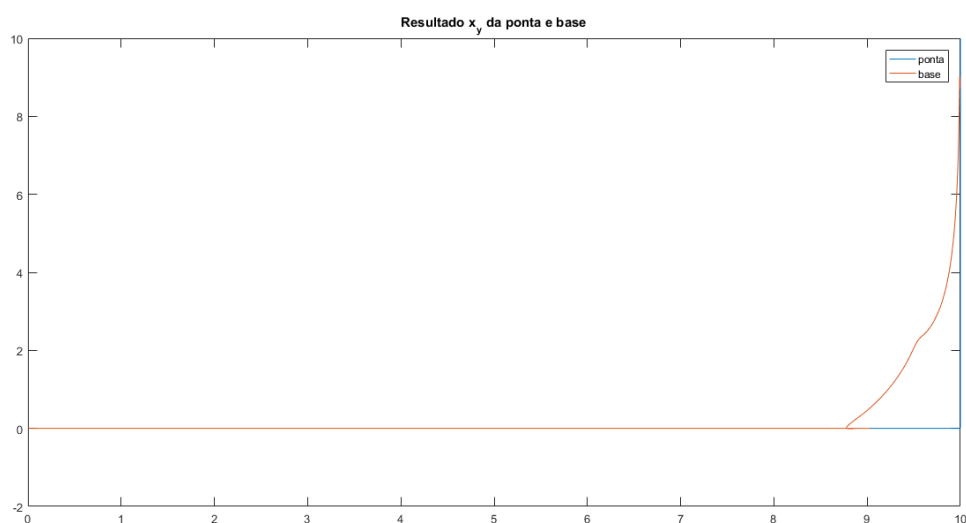


Figura 4.10 – Teste 1A - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base



### 4.1.3 Teste 2

No teste 2, que varia o coeficiente de amortecimento, podemos avaliar de forma mais clara as diferenças através das figuras 4.13 e 4.14 que mostram as curvas dos caminhos do teste b e c respectivamente, podemos comparar também com a figura 4.3 que possui um coeficiente intermediário entre os testes A e B. Sendo o teste A não apresentado, por não ter convergido, apresentando praticamente o mesmos valores de entrada, esse comportamento é identificado na figura 4.15, onde podemos observar também um padrão convergência para valores de via-



Figura 4.11 – Teste 1C - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base

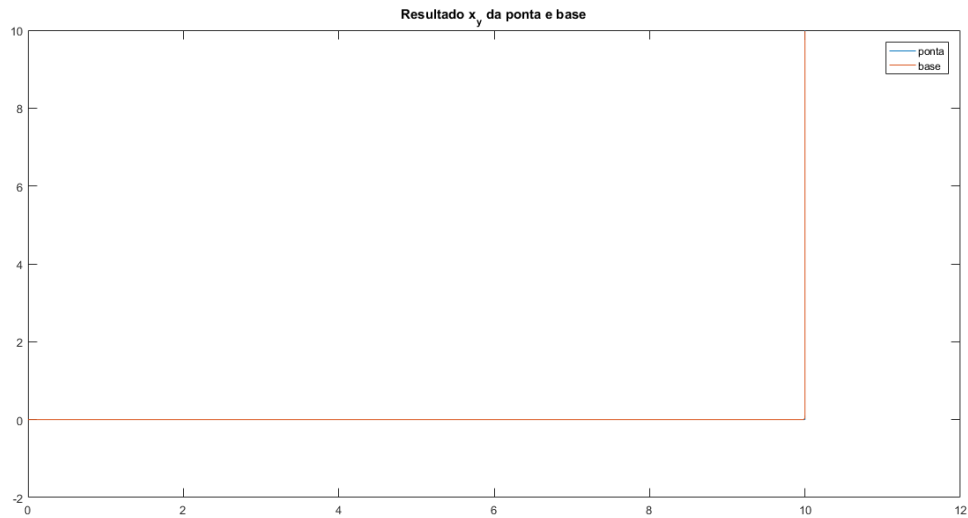
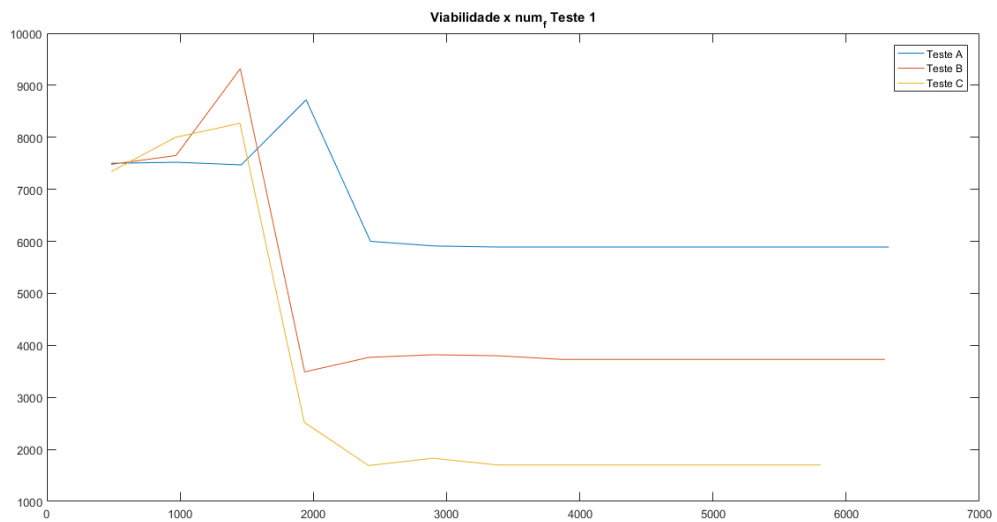


Figura 4.12 – Teste 1 - Num de fun x Viabilidade



bilidade menor conforme coeficiente de amortecimento também aumenta, ou seja, uma maior facilidade de compensar os desvios. Todos se mantiveram com 241 elementos nos vetores de posição e tempos de simulação de  $69,89e52s$  para os testes 2A, 2B e 2C respectivamente.

#### 4.1.4 Teste 3

Podemos observar na figura 4.16 uma curva de velocidade diferente, dado que reduzimos a aceleração na geração de comando, a velocidade não conseguiu alcançar o nível de velocidade

Figura 4.13 – Teste 2B - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base

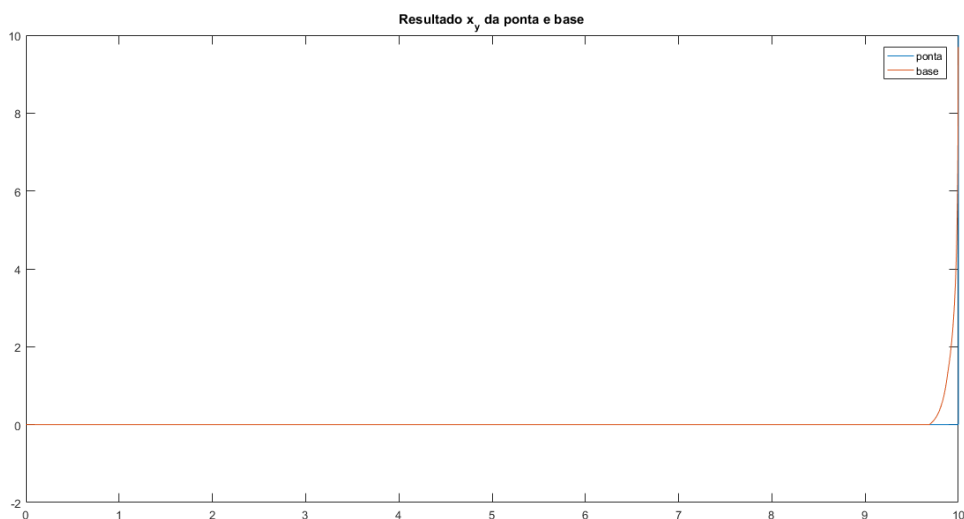
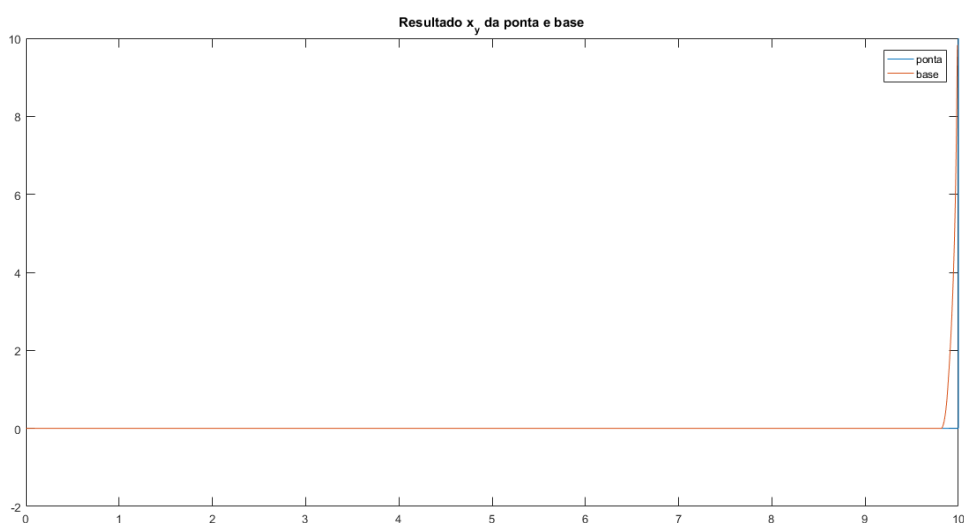


Figura 4.14 – Teste 2C - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base



desejada e assim toma-se a forma de um triângulo. Já pela figura 4.17, podemos observar que a função teve dificuldades para solucionar o teste A, enquanto para o teste B teve um comportamento semelhante aos testes anteriores, com um aumento nos valores de viabilidade. Um dos motivos possíveis para essa dificuldade se da no tamanho dos vetores trabalhados, no teste A o vetor de posições possuía 401 elementos, e levou 195s para realizar a simulação, enquanto para o teste B o vetor de posição possuía 221 elementos e levou 78s, valores bem mais próximos aos testes base assim como suas curvas.

Figura 4.15 – Teste 2 - Num de fun x Viabilidade

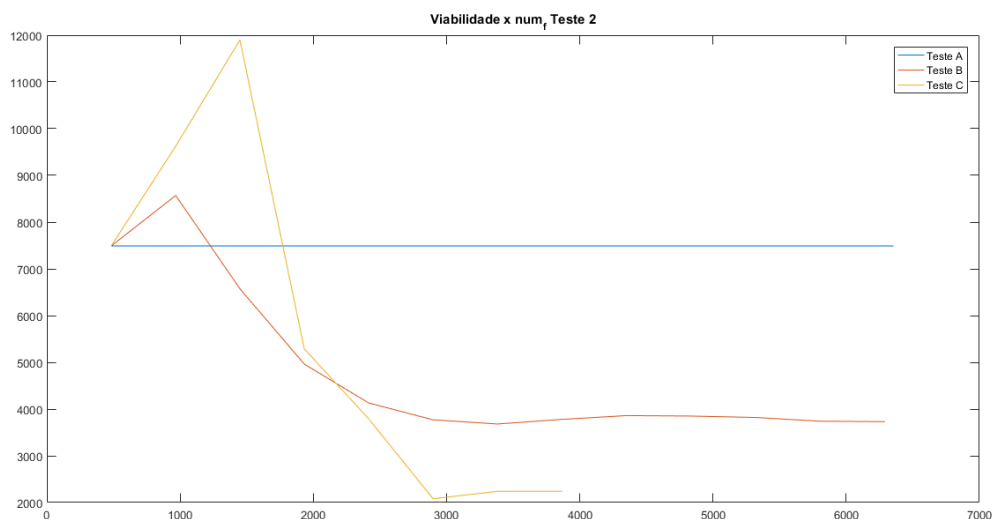
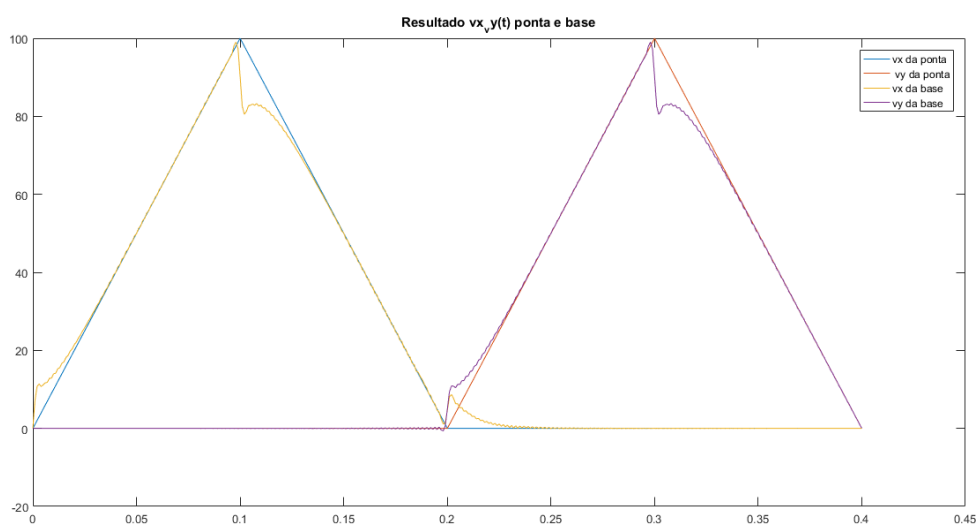


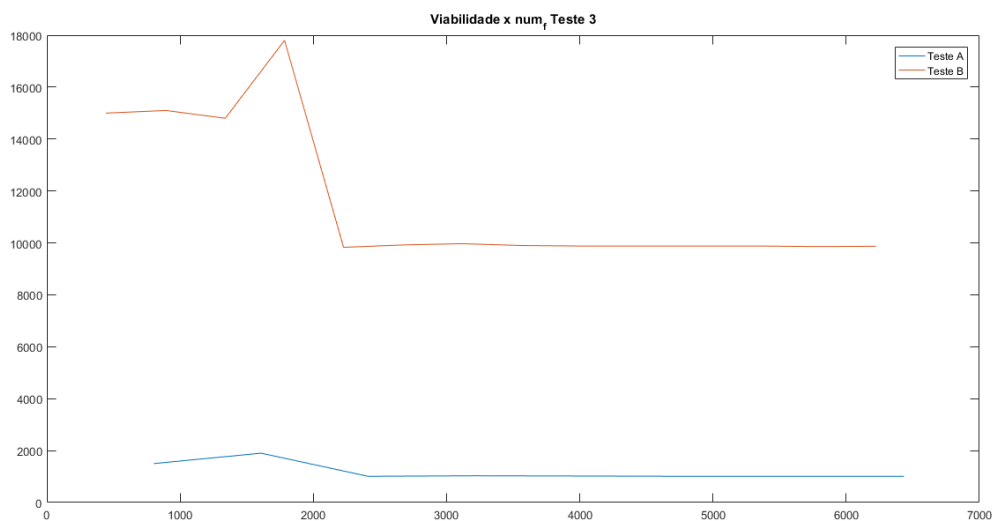
Figura 4.16 – Teste 3A - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base



#### 4.1.5 Teste 4

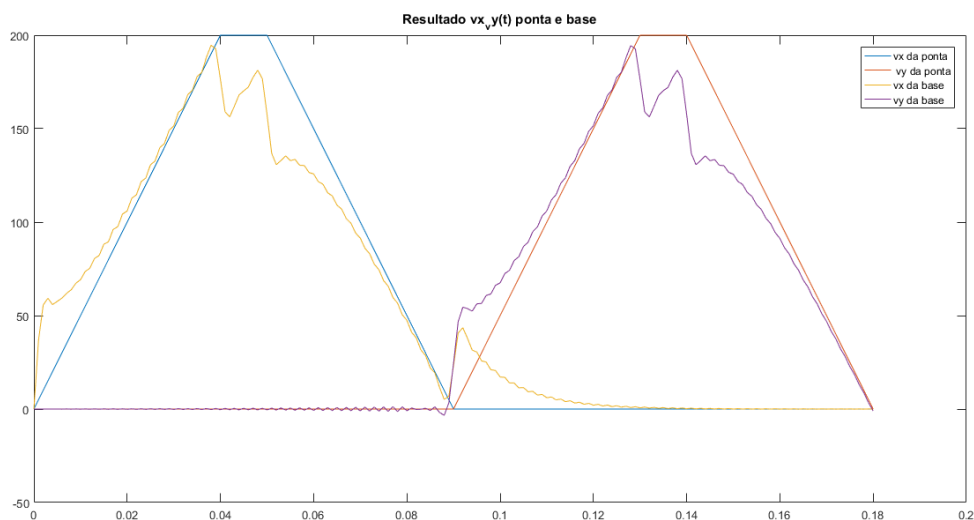
Variando a velocidade desejada, através do Gcode de entrada, analisamos os impactos de velocidades desajadas mais baixas e mais altas. As mais baixas (teste A) tem seu maior impacto no tamanho dos vetores e no tempo de simulação, já que percorre o percurso em mais tempo, gerando uma malha com mais pontos, dada a resolução de  $dt$  como fixa. Ficando assim com um tempo de simulação de 219s e 421 elementos nos vetores de posição. Enquanto para o teste B, o tempo de simulação ficou em 60s e com 181 elementos, mas dada a velocidade desejada maior

Figura 4.17 – Teste 3 - Num de fun x Viabilidade



e uma mesma aceleração máxima na geração de comando, a curva de velocidade se assemelha a do teste 3A exposta na figura 4.18 e com a curva de deslocamentos apresentada na figura 4.19. Podemos comparar também o padrão de convergência na figura 4.20

Figura 4.18 – Teste 4B - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base



#### 4.1.6 Teste 5

Por fim, evidenciamos as diferenças nos resultados com resoluções diferentes para a malha de tempo e seu impacto nas respostas. As figuras 4.21, 4.22 e 4.23 revelam principalmente

Figura 4.19 – Teste 4B - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base

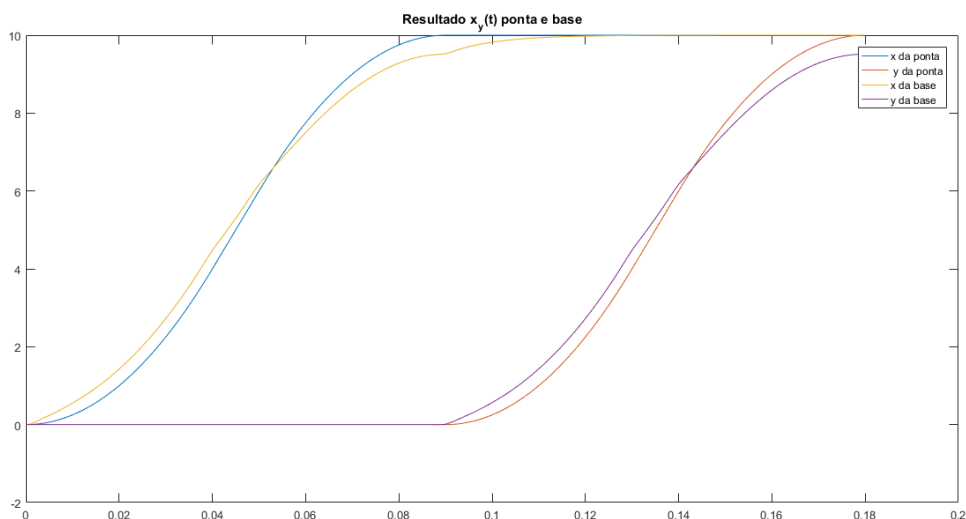
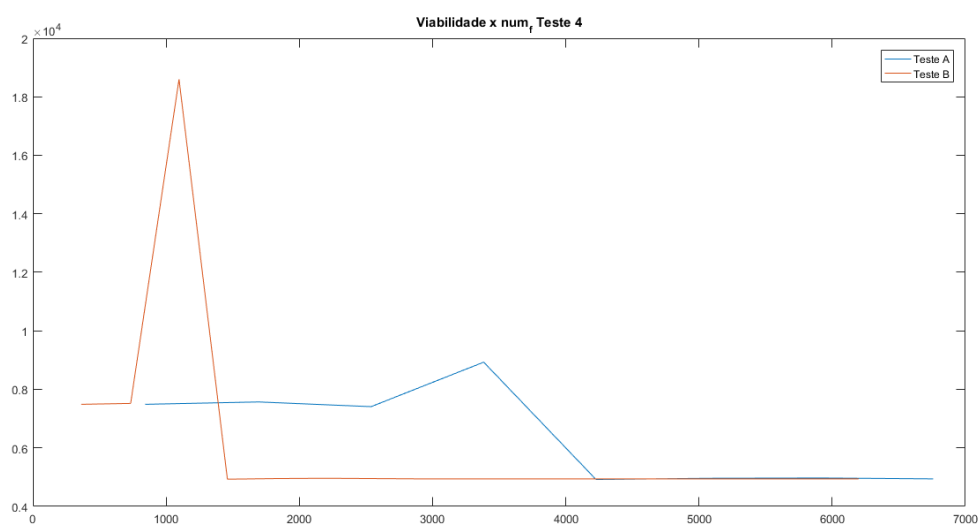


Figura 4.20 – Teste 4 - Num de fun x Viabilidade



a influência desse parâmetro nas oscilações nos gráficos de velocidade, entretanto a diferença é menos nítida se avaliados os gráficos de deslocamento das figuras 4.24, 4.25 e 4.26.

Podemos notar também o impacto na velocidade e facilidade de se convergir, podendo ser observado na figura 4.27, assim como os tempos de simulação 0,7s, 3s e 279s para os testes A, B e C respectivamente. Além do tamanho dos vetores que está diretamente relacionado, respectivamente em 25, 49 e 481 para os testes A, B e C.

Figura 4.21 – Teste 5A - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base

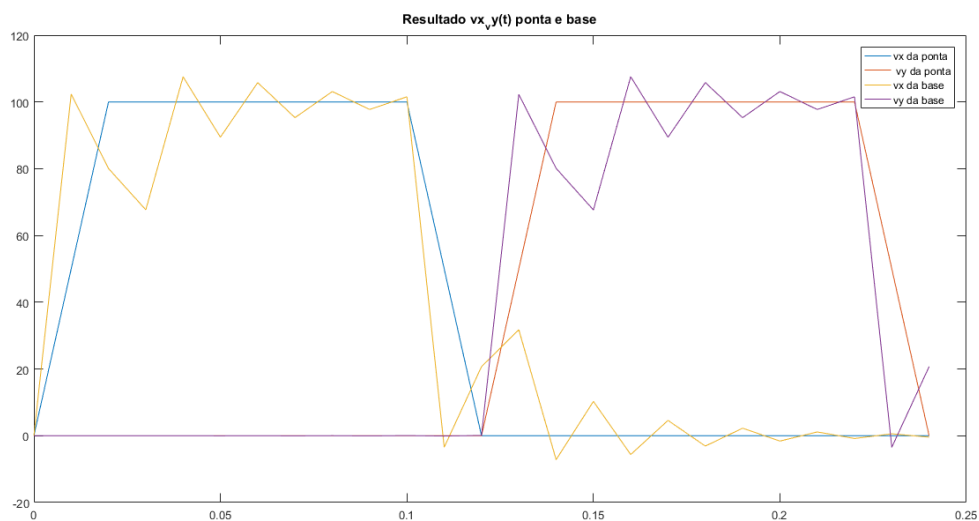
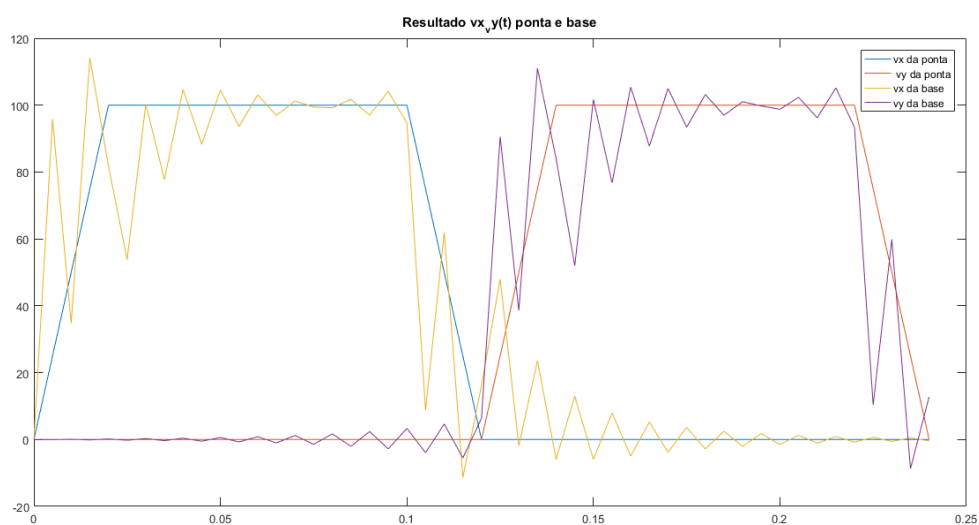


Figura 4.22 – Teste 5B - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base



## 4.2 Dificuldades

Inicialmente tinha-se a ideia de utilizar a otimização da função objetivo da FMINCON, para conseguir encontrar a trajetória que possuísse o menor erro entre o caminho percorrido pela ponta e o caminho desejado estabelecido pelo Gcode. Entretanto, se mostrou uma abordagem difícil por conta do custo computacional maior e da falta de previsibilidade no comportamento da FMINCON, principalmente na priorização entre função objetivo e as restrições. Foram feitas algumas tentativas também na utilização da função objetivo em minimizar o tempo

Figura 4.23 – Teste 5C - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base

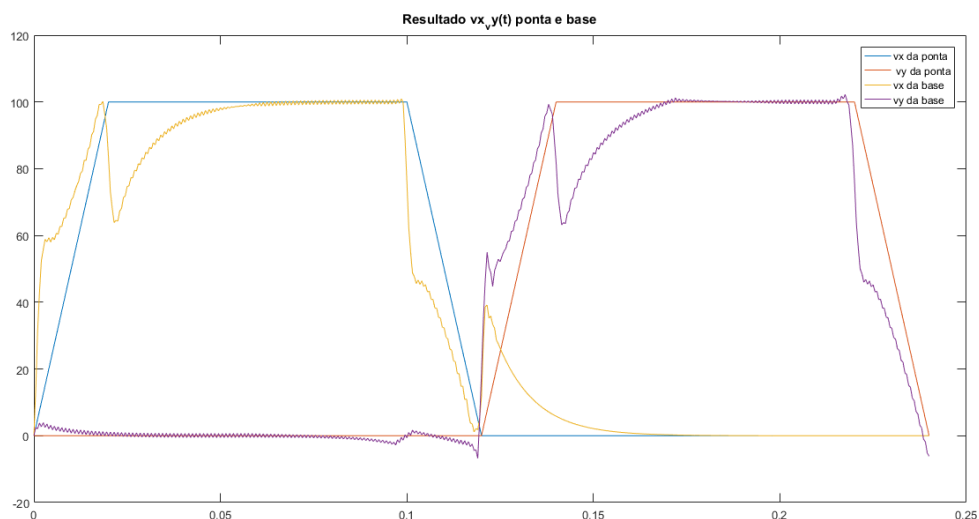
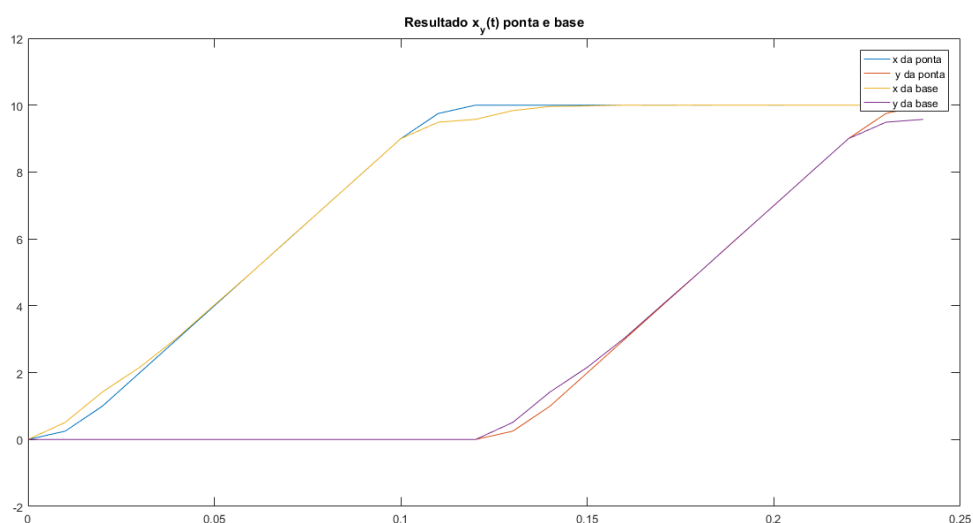


Figura 4.24 – Teste 5A - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base



total gasto pelos movimentos, dado um caminho fixo da ponta, mas os resultados foram tempos totais extremamente longos, além de um tempo de simulação maior.

Existiram dificuldades também, de forma semelhante, no controle de grandes oscilações de velocidade. Foi utilizado uma restrição de arranque para minimiza-las, mas a utilização dessas restrições de maneira a utilizar as desigualdades disponíveis pela FMINCON não foi possível. A função não conseguia mais se enquadrar nas restrições de igualdade não linear e, portanto, foi utilizado uma função condicional para atribuir a característica de desigualdade dentro da restrição de igualdade, resultando em convergências das restrições.

Figura 4.25 – Teste 5B - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base

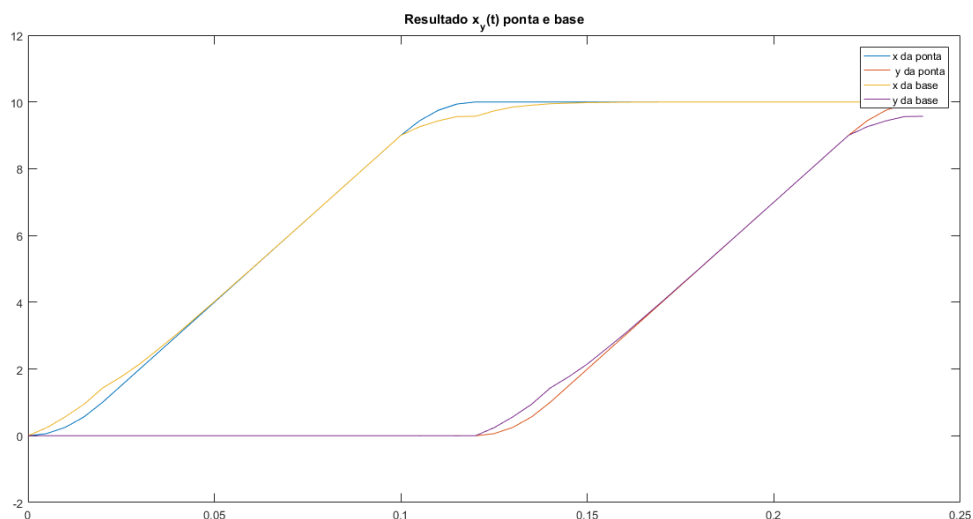
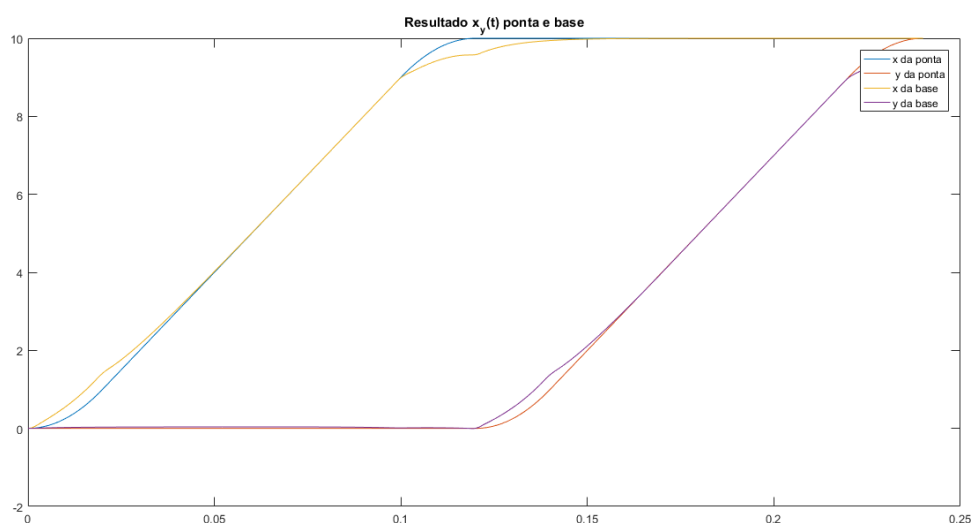


Figura 4.26 – Teste 5C - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base



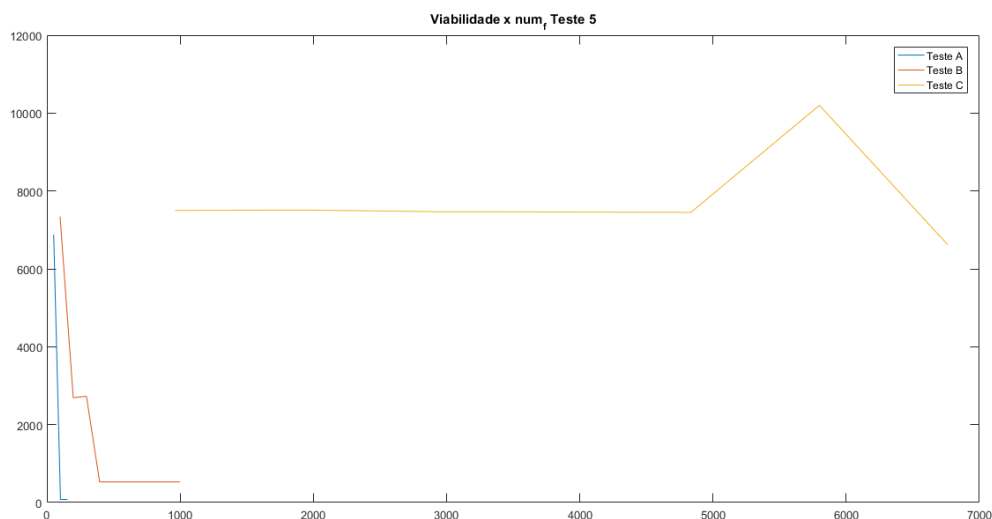
Outro ponto que foi utilizado para de certa forma controlar a prioridade de cada uma das restrições, foi a utilização de fatores que multiplicavam ou dividiam os valores das restrições, para que as mesmas fossem mais restritas ou menos restritas.

Esses pontos indicam que o desenvolvimento, utilização de funções mais específicas ou até mesmo a solução em etapas facilite na convergência das soluções e no cumprimento das restrições estabelecidas, além de possivelmente mais eficientes computacionalmente.

Uma questão a ser considerada quando avaliado a geração de comando exemplificada neste trabalho é a consideração de sua simplicidade. Não endereçando diversos fatores rele-



Figura 4.27 – Teste 5 - Num de fun x Viabilidade



vantes e complexos que incluem a mudança de velocidade em mudanças de direção de ângulo menor que  $90^\circ$  e situações de frenagens impossíveis, que necessitam de uma abordagem iterativa para serem resolvidas. Assim, os exemplos abordados fogem dessas situações para que o escopo da geração de comando não interfira nas análises da solução proposta utilizando a FMINCON.

### 4.3 Considerações futuras

#### 4.3.1 Combinação com outros algoritmos

Uma possível abordagem a ser explorada utilizando a ideia do método deste trabalho é a sobreposição de algoritmos, onde um método baseado em uma planta do sistema poderia buscar remover uma parcela das vibrações, atuando de forma estagiada, com a participação de um método como *InputShaping* para atacar as vibrações remanescentes.

#### 4.3.2 Tuning

Uma possibilidade que o tipo de método abordado neste trabalho oferece é a capacidade de otimizar, de maneira semelhante aos mapas de injeção eletrônica para carros, os parâmetros da planta para uma determinada posição. Assim, oferecendo a capacidade de se ajustar em grande nível de detalhe as peculiaridades do sistema, podendo até construir a malha utilizando sensores, semelhantemente a rotinas de configuração de *InputShaping* que amostram o comportamento

em frequência no ponto central da impressora. Considerando também que a utilização desse tipo de malha, teria pouco impacto computacional.

## 5 CONCLUSÃO

### Conclusão

Nesta monografia, foi abordada a geração de comandos em impressoras 3D utilizando o método de manufatura aditiva conhecido como Fused Deposition Modeling (FDM). O objetivo principal do trabalho foi investigar e desenvolver metodologias para otimizar a velocidade de movimentação e garantir a precisão dimensional das peças produzidas.

No referencial teórico (Capítulo 2), foram apresentados os conceitos fundamentais da manufatura aditiva e do FDM, incluindo o uso de algoritmos de controle, análise de trajetórias e modelagem dinâmica do sistema. Dentre as técnicas abordadas, destacam-se o look ahead, as curvas de velocidade trapezoidal, a integração implícita utilizando programação não linear e colocação, e a otimização da função objetivo.

A metodologia utilizada (Capítulo 3) envolveu o uso do software Matlab, em particular a função `fmincon`, para a geração de comandos. Foram descritas as etapas para a leitura do código G, a definição da velocidade de curva, a utilização de curvas trapezoidais de velocidade e a interpolação para otimizar a trajetória da impressora 3D. Além disso, foi realizada a modelagem dinâmica da impressora 3D, considerando o espaço de estados.

No Capítulo 4, foram apresentados os resultados e discussões. Correlações entre as variáveis de entrada foram analisadas, bem como as influências do modelo dinâmico no processo de manufatura aditiva. A performance computacional foi avaliada, levando em consideração as dificuldades encontradas, como a definição da função objetivo, a restrição de aceleração da base e as variáveis principais envolvidas na geração de comandos. Possíveis abordagens, como a combinação com outros algoritmos, foram sugeridas para aprimorar o processo.

Com base nos resultados obtidos e nas discussões realizadas, conclui-se que a geração de comandos é um aspecto fundamental para a qualidade e eficiência da manufatura aditiva por FDM. As metodologias e técnicas abordadas neste trabalho fornecem uma base sólida para a melhoria contínua do processo, possibilitando a produção de peças com maior precisão dimensional e redução de tempo de fabricação.

No entanto, é importante ressaltar que há desafios a serem superados, como a complexidade do problema e a necessidade de encontrar soluções mais robustas. Nesse sentido, são sugeridas pesquisas futuras para explorar a combinação com outros algoritmos e a aplicação de abordagens inovadoras que possam contribuir para avanços significativos na geração de comandos em impressoras 3D.

Em suma, este estudo representa um passo importante para o aprimoramento da manufatura aditiva por FDM, fornecendo subsídios teóricos e metodológicos para a geração de comandos mais eficientes e precisos. Espera-se que as contribuições deste trabalho incentivem pesquisas adicionais e promovam avanços na área, impulsionando a utilização da manufatura aditiva em diversos setores industriais.

## REFERÊNCIAS

ALBAGHDADI, A. M.; BAHAROM, M. B.; SULAIMAN, S. A. bin. Parameter design optimization of the crank-rocker engine using the fmincon function in matlab. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S.l.], 2021. v. 1088, n. 1, p. 012072.

ATTARAN, M. The rise of 3-d printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. **Business horizons**, Elsevier, v. 60, n. 5, p. 677–688, 2017.

BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 83, p. 389–405, 2016.

DUAN, M.; YOON, D.; OKWUDIRE, C. E. A limited-preview filtered b-spline approach to tracking control—with application to vibration-induced error compensation of a 3d printer. **Mechatronics**, Elsevier, v. 56, p. 287–296, 2018.

GIBSON, I. *et al.* Applications for additive manufacture. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**, Springer, p. 451–474, 2015.

HAMILTON, J. D. State-space models. **Handbook of econometrics**, Elsevier, v. 4, p. 3039–3080, 1994.

HARGRAVES, C. R.; PARIS, S. W. Direct trajectory optimization using nonlinear programming and collocation. **Journal of guidance, control, and dynamics**, v. 10, n. 4, p. 338–342, 1987.

HIGHAM, D. J.; HIGHAM, N. J. **MATLAB guide**. [S.l.]: SIAM, 2016.

KLIPPER. **Klipper Documentation**. 2017. Disponível em: <<https://www.klipper3d.org/>>.

KLIPPER. **Klipper Kinematics Documentation**. 2017. Disponível em: <<https://www.klipper3d.org/Kinematics.html>>.

RAMANI, K. S. *et al.* Tracking control of linear time-invariant nonminimum phase systems using filtered basis functions. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 139, n. 1, 2017.

RAMANI, K. S.; EDOIMIOYA, N.; OKWUDIRE, C. E. A robust filtered basis functions approach for feedforward tracking control—with application to a vibration-prone 3-d printer. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, IEEE, v. 25, n. 5, p. 2556–2564, 2020.

SINGHOSE, W. E. **Command generation for flexible systems**. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 1997.

TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modeling. **Rapid prototyping journal**, Emerald Group Publishing Limited, v. 20, n. 3, p. 192–204, 2014.

VYAVAHARE, S. *et al.* Fused deposition modelling: a review. **Rapid Prototyping Journal**, Emerald Publishing Limited, v. 26, n. 1, p. 176–201, 2020.

YU, K. *et al.* Application of the five-phase s-curve velocity model on fdm three-dimensional printer. In: IEEE. **2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)**. [S.l.], 2020. p. 1365–1371.