
**JOAO VIVAS CISALPINO**

# CONTROLE DE TRAJETÓRIA DE IMPRESSORAS 3D UTILIZANDO ALGORITIMO ITERATIVO E PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

**LAVRAS - MG**

**2023**

**JOAO VIVAS CISALPINO**

# CONTROLE DE TRAJETÓRIA DE IMPRESSORAS 3D UTILIZANDO ALGORITIMO ITERATIVO E PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

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 TRAJETÓRIA DE IMPRESSORAS 3D UTILIZANDO ALGORITIMO ITERATIVO E PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR / Joao Vivas Cisalpino. $1^a$ ed. rev., atual. e ampl. – Lavras : UFLA, 2023.
48 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 TRAJETÓRIA DE IMPRESSORAS 3D UTILIZANDO ALGORITIMO ITERATIVO E PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

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

APROVADO em 21 de Julho de 2023.

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

Prof. Dr. Wander Gustavo Rocha Vieira
Orientador

**LAVRAS - MG**
**2023**

# 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 investigar e desenvolver metodologias para atuação de controle na geração de comandos em impressoras 3D de forma a possibilitar maiores velocidades e garantindo 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. Os resultados mostram correlações entre as variáveis de entrada, influências do modelo dinâmico e a performance computacional. Dificuldades como a função objetivo, restrições não lineares da base e variáveis principais são discutidas. Possíveis abordagens, como divisão de etapas de solução, 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 investigate and develop control methodologies for command generation in 3D printers, enabling higher speeds while ensuring dimensional accuracy of the produced parts. The theoretical framework presents the fundamentals of additive manufacturing, FDM, and control techniques, trajectory analysis, and dynamic modeling of the system. The methodology involves the use of Matlab software and the fmincon function for command generation. The results demonstrate correlations between input variables, influences of the dynamic model, and computational performance. Difficulties such as the objective function, nonlinear constraints of the base, and main variables are discussed. Possible approaches, such as stage division for problem solving, 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

## LISTA DE TABELAS

**SUMÁRIO**

# 1 INTRODUÇÃO

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. Com a crise global logística causada pela pandemia, a manufatura aditiva ganhou destaque devido à sua capacidade de produção flexível e descentralizada. Nesse contexto, a impressão 3D, em particular o método *Fused Deposition Modeling* (FDM), tem se tornado cada vez mais relevante, encontrando aplicações variadas em setores como aeroespacial, automobilístico e prototipagem rápida, tornando-se mais acessível.

No entanto, uma das limitações significativas da impressão 3D, especialmente do tipo FDM, é o tempo de impressão, que ainda restringe o tamanho das peças produzidas em um período razoável. Frequentemente, é necessário reduzir drasticamente a resolução da impressão para compensar esse aspecto. Diante disso, a academia e as comunidades maker têm buscado impressoras capazes de imprimir mais rapidamente, sem comprometer a qualidade. Além da possível redução no tempo de impressão, a capacidade de imprimir em alta velocidade proporciona um aumento proporcional na qualidade de impressão, em relação à diferença entre a velocidade máxima e a velocidade de impressão.

Portanto, é relevante explorar técnicas que permitam alcançar capacidades superiores de qualidade e velocidade de impressão, flexibilizando a tecnologia e ampliando sua aplicação comercial viável. Nesse sentido, a modelagem digital, por exemplo *Computer Aided Design* (CAD), desempenha um papel fundamental no processo de criação, permitindo a concepção de modelos tridimensionais precisos. Posteriormente, os modelos são preparados para impressão por meio de um software de fatiamento (*slicer*), que divide o modelo em camadas e gera os comandos necessários para a impressora 3D. A partir destes comandos a impressora interpreta os passos que deverão ser tomados e quando cada um deles deve ser realizado. Entre a interpretação e execução destes comandos existe uma diversidade de processos intermediarios que tem impacto direto na qualidade e na velocidade de impressão.

Este trabalho tem como objetivo investigar e desenvolver metodologias para atuação de controle na geração de comandos em impressoras 3D utilizando o método FDM. Será abordado o referencial teórico, contemplando os princípios básicos da manufatura aditiva, os conceitos específicos do *Fused Deposition Modeling*, os métodos de geração de comando, como *look ahead*, curvas de velocidade trapezoidal e o estado da arte quanto ao desenvolvimento de meto-

dos de controle que buscam aprimorar a qualidade e diminuir o tempo necessário para imprimir uma peça, como *InputShaping*.

Será descrita a metodologia utilizada, incluindo o *software* Matlab e a função fmincon, além das etapas para a geração de comandos e a modelagem dinâmica da impressora 3D. Os resultados obtidos serão apresentados e discutidos, analisando as correlações entre as variáveis de entrada, as influências do modelo dinâmico e a performance computacional. Serão abordadas as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do trabalho e possíveis abordagens para superá-las, como a combinação com outros algoritmos.

Por fim, serão apresentadas as conclusões, destacando as contribuições principais e apontando possíveis direções para pesquisas futuras. A proposta é fornecer subsídios para aprimorar a 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 intruções 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).

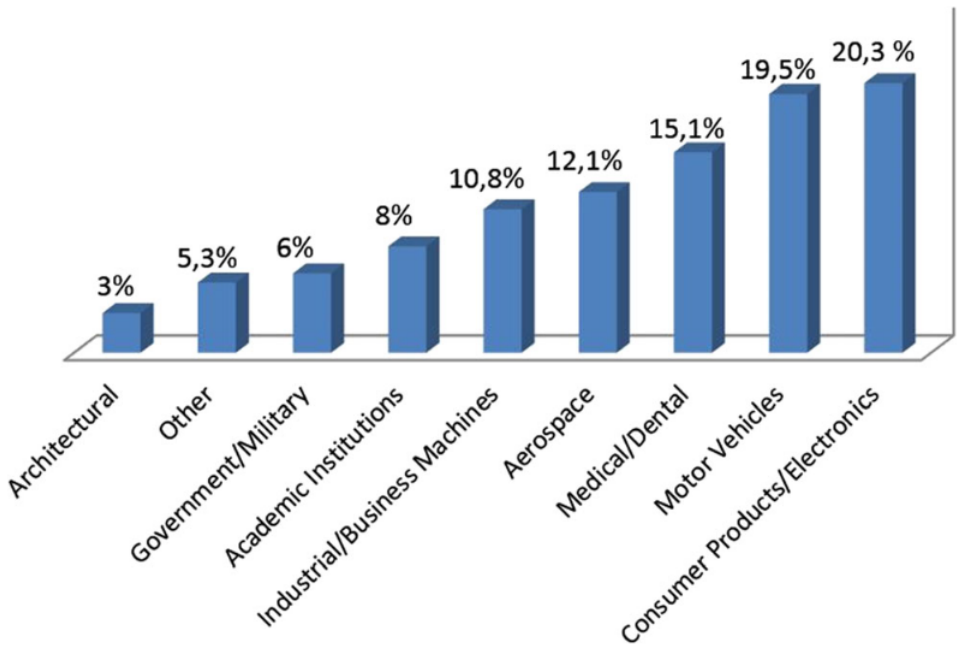
Apesar da manufatura aditiva ter sido criada a mais de 30 anos, apenas a partir de 2009, quando a última patente mais relevante de *Fused Deposition Modeling* (FDM) expirou. Com isso, vários entusiastas começaram a desenvolver essa tecnologia de uma maneira "caseira", com o forte movimento RepRap. Por 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 tecnologicos 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 dai, 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 principios físicos que utilizam e nos materias 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 distruibuição do uso de tecnologias MA por tipo de industria.

Figura 2.1 – Distribuição de uso de MA nas industrias




Fonte: BIKAS; STAVROPOULOS; CHRYSSOLOURIS, 2016

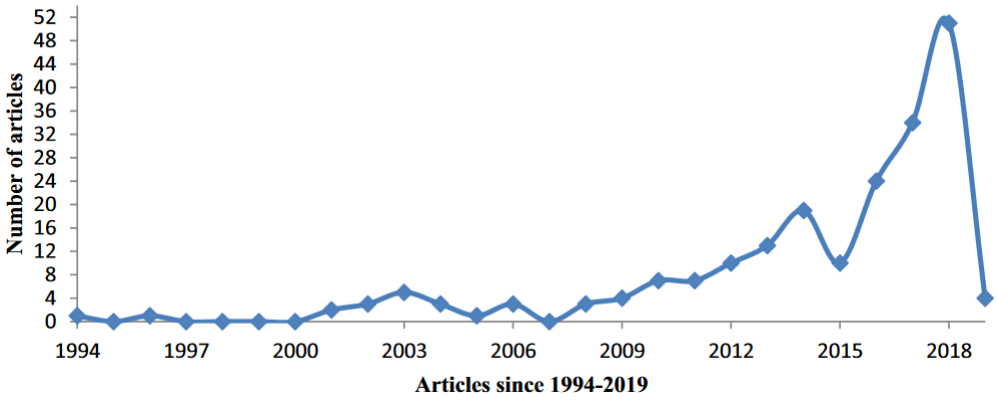
## 2.2 *Fused Deposition Modeling*

*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 tecnologicos relacionados a melhorias de *hardware* e *software* desses dispositivos. (Figura 2).

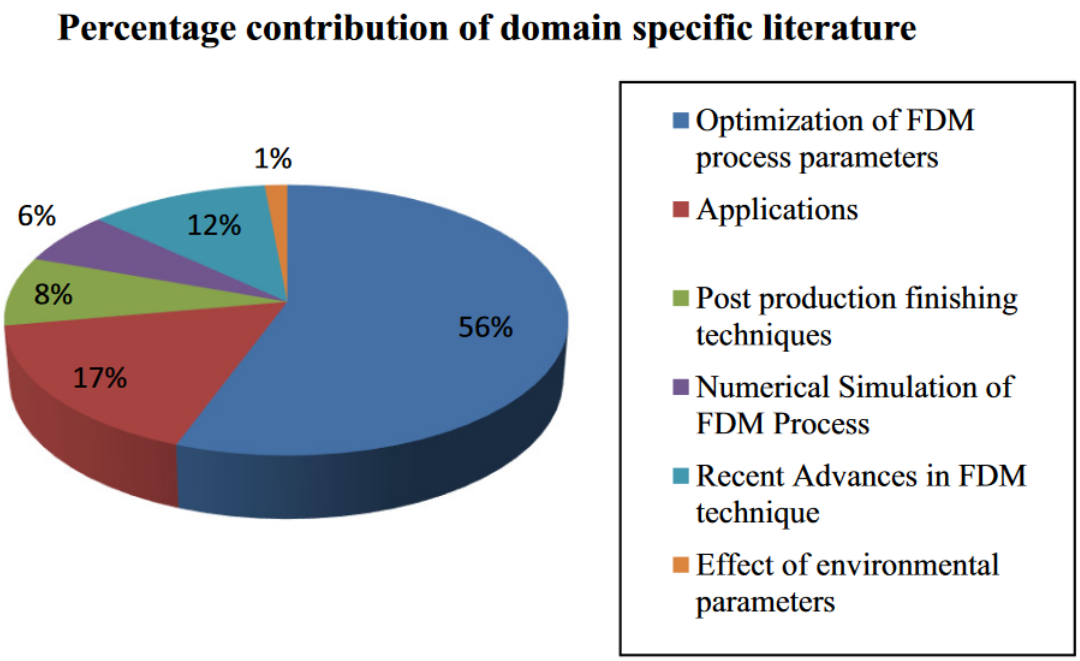
Figura 2.2 – Número de aritos publicados sobre FDM ao longo do tempo




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 involve 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, tecnicas 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).

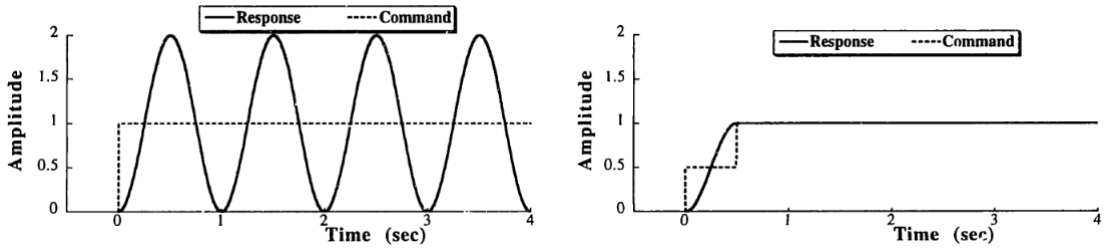
### 2.2.1 *Feedforward*

Dentre os métodos de controle em aplicações FDM o *Feedforward* é o mais eficiênte 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, entratanto 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 influênciam 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 extender do incio ao fim, pela dependência de se basear no estado incial 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).

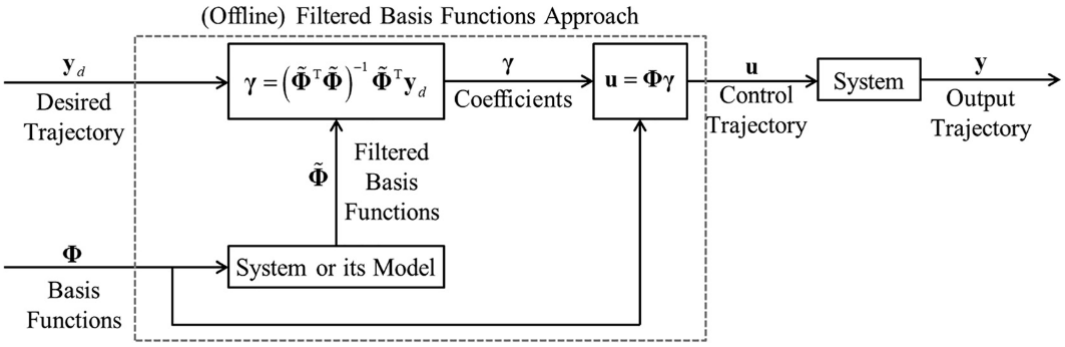
#### 2.2.1.2 *Filtered basis function (FBF)*

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 necesidade de se conhecer completamente a trajetória desejada, o que implica

Figura 2.5 – Fluxograma FBF

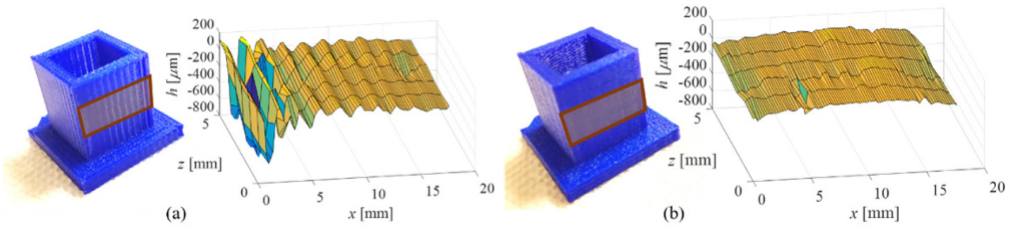



Fonte: RAMANI *et al.*, 2017

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 algorítmo de *receiding 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*

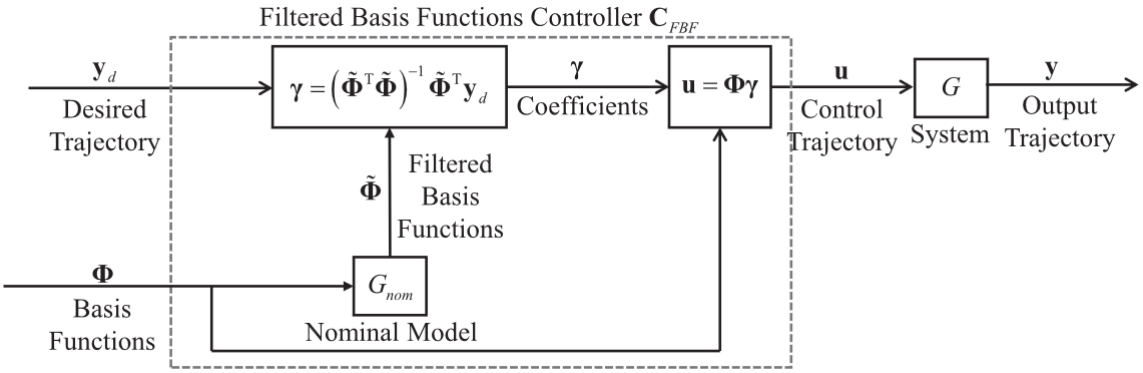
Com base nos desenvolvimentos nos trabalhos de (RAMANI *et al.*, 2017) e (DUAN; YOON; OKWUDIRE, 2018), comentados anteriormente, (RAMANI; EDOIMIOYA; OKWUDIRE, 2020) busca atacar um segundo desafio pratico na implementação da FBF, sendo o primeiro desafio prático o custo computacional que foi endereçado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

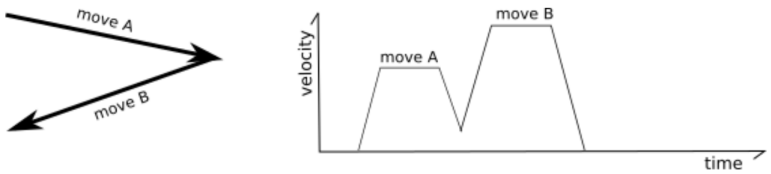
### 2.3.1 *Look ahead*

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

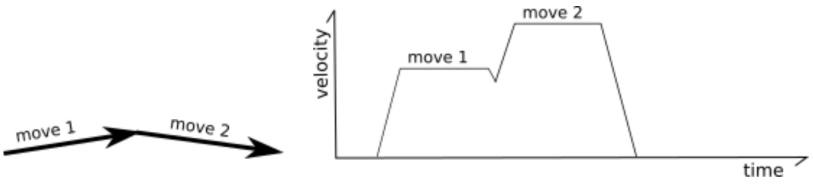
As impressoras 3D entre outros equipamentos, como máquinas CNC, necessitam de um planejamento de velocidade, pois o Gcode fornece apenas as velocidades desejadas de cada movimento, enquanto o algorítmo de *lookahead* calcula as velocidades de junção entre os movimentos, portanto ainda se faz necessário planejar o comportamento da velocidade ao longo do tempo do trajeto entre a velocidade incial 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



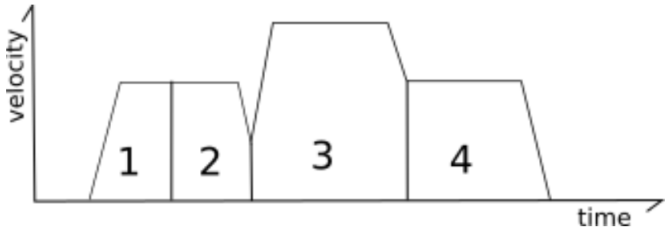

Fonte: KLIPPER, 2017b

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 diferencias parciais (EDP) ou ordinárias (EDO) de ordem superior como um conjunto de EDPs ou EDOs de primeira ordem. Essa formulação é construida a partir de um principio 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 mesmsa equação representada na formulação de espaço de estados (HAMILTON, 1994).

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

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

### 2.3.4 Integração implicita 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 3°, onde o 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.

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

Da mesma maneira sua derivada é apresentada na equalção 2.4.

$$\dot{x_c} = -3\frac{x_1 + x_2}{2T} + \frac{f_1 + f_2}{4} \tag{2.4}$$

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

$$\Delta = f_c - \dot{x_c} \tag{2.5}$$

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

$$u_c = \frac{u_1 + u_2}{2} \tag{2.6}$$

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 algoritimos 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 abilidade 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 auxilios 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 MATBLAB, foi feita a escolha de se utiliza-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 algorítimos 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, extraindo 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 angulos 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 amabas 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 incial 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 visiveis 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 incial e final. É possível obter a velocidade de pico através da equação 3.1.

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

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.

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

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

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

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

$$dt_d = \frac{des_d}{v_d} \tag{3.5}$$

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

$$\Delta vel = v_f - v_i \tag{3.6}$$

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.

$$N_{steps} = \lceil \frac{\Delta t_i}{\Delta t_{step_{size}}} - 1 \rceil \tag{3.7}$$

$$\Delta t_{last_{step}} = \Delta t_i - \Delta t_{step_{size}} * N_{steps} \tag{3.8}$$

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

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.

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

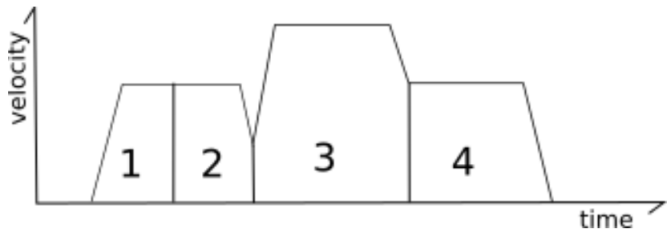
## 3.3 Modelagem dinâmica de uma impressora 3D

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 possuiesse 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




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

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

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

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

### 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.

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

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 equaqções 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 equalidade a arrancada, atrelado a um condicional para que se comporte como uma inequalidade. A variável de restrições de inequalidades 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 resultaods 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 basicas (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 $y$).

$$\begin{aligned} acc_n &= 2\frac{(\frac{des_n - des_i}{dt}) - vel_i)}{dt} \\ vel_n &= vel_i + acc_n dt \end{aligned} \tag{3.14}$$

## 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 adcionais segue a tabela 3.3.

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

Tabela 3.2 – Tabela de parâmetros base das simulações

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|---|---|---|
| Frequência | 100 | $rad/s$ |
| Coeficiente 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 | Coeficiente 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 |

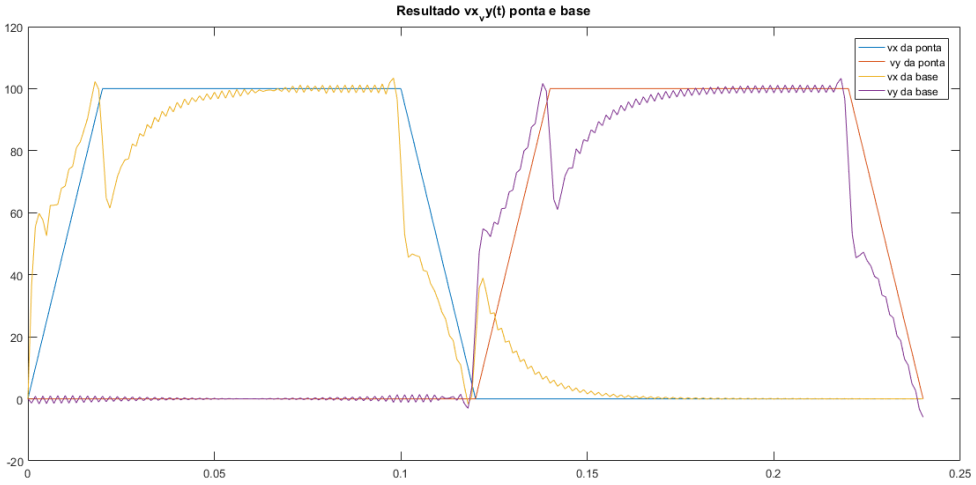
# 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 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 abicissa. Notamos também, principalmente na figura 4.1 uma ocilação de alta frequência que é um artefato da resposta da FMINCON, essa ocilação 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 ocilações 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 progressção das iterações da FMINCON, sendo cada ponto uma iteração diferente, possuindo um valor correspondete 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 inicias da viabilidade ficam próximos de $7,5x10^3$, que foram niveis 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

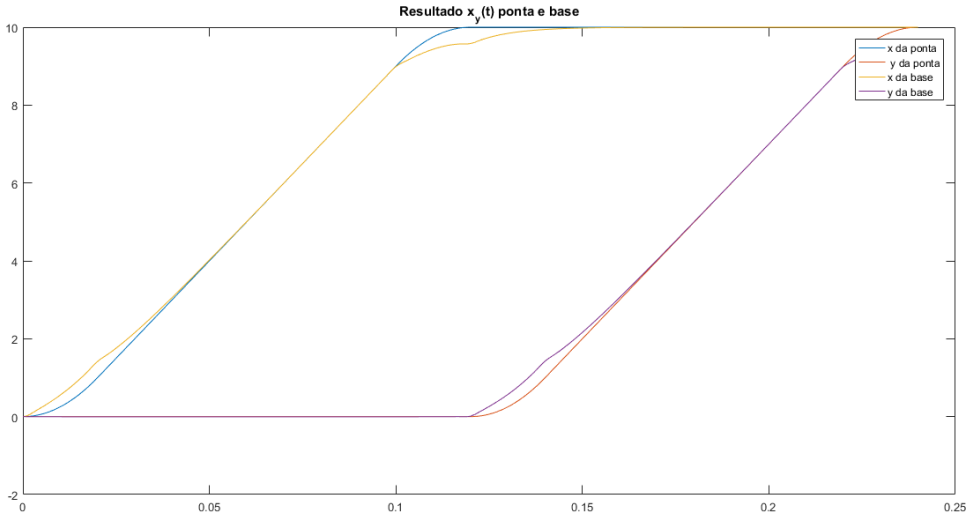
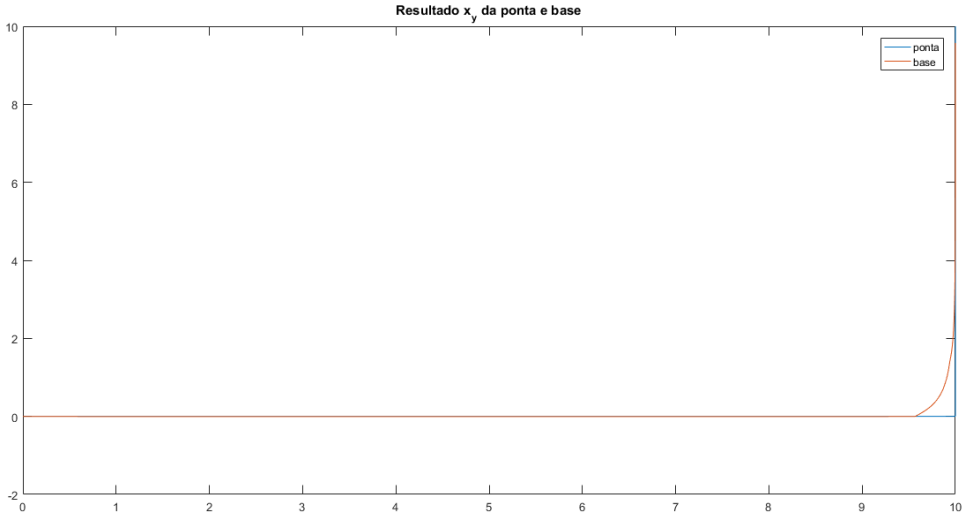



Figura 4.3 – Teste base - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base

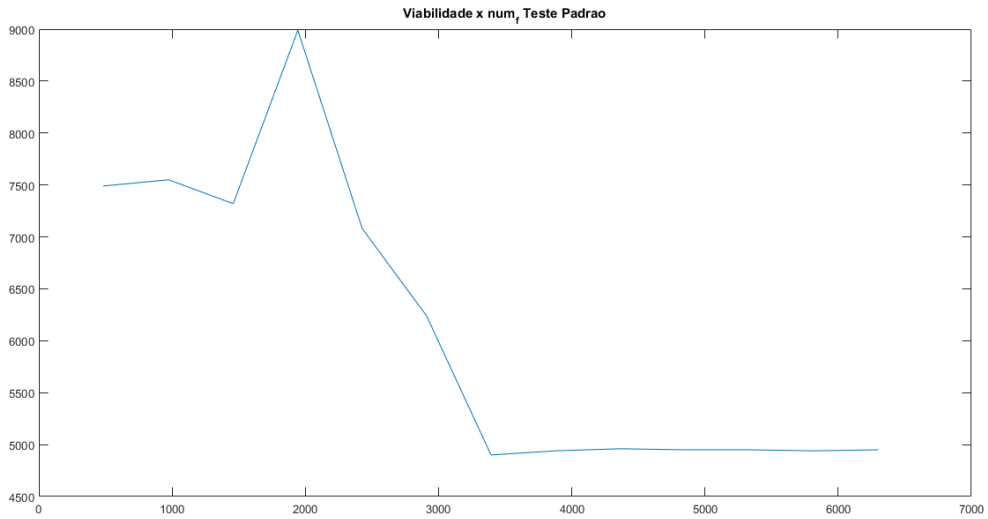



de simulação para este teste foi de 89,8 segundos, com os vetores de posição possuindo um tamanho de 241 elementos.

### 4.1.2 Teste 1

Os resultados da variação da variavel 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 estremos 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

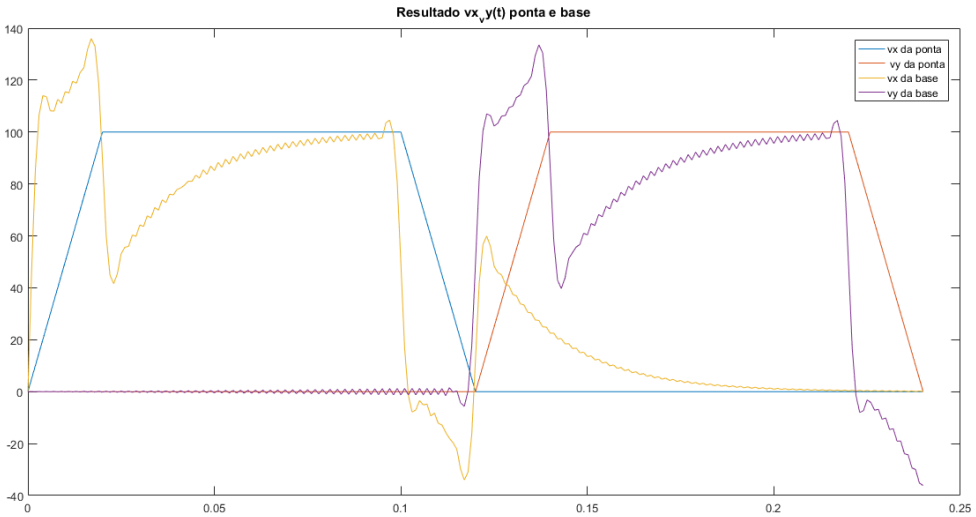



Figura 4.6 – Teste 1B - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base

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

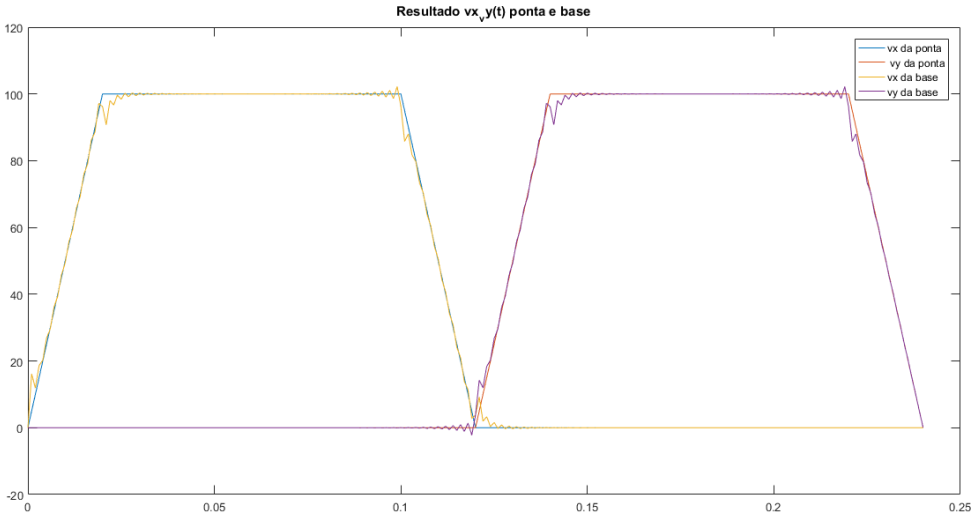
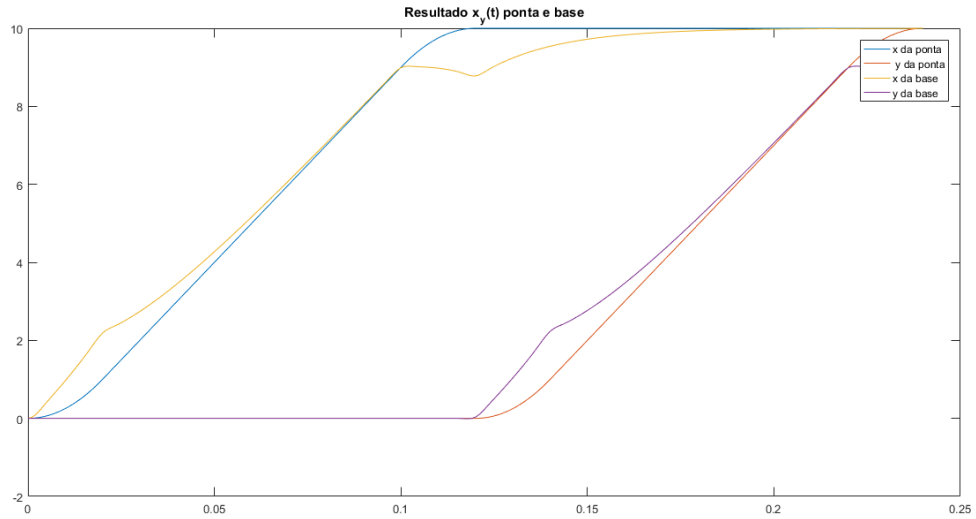



Figura 4.8 – Teste 1A - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base




Já na figura 4.12 é possivel 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

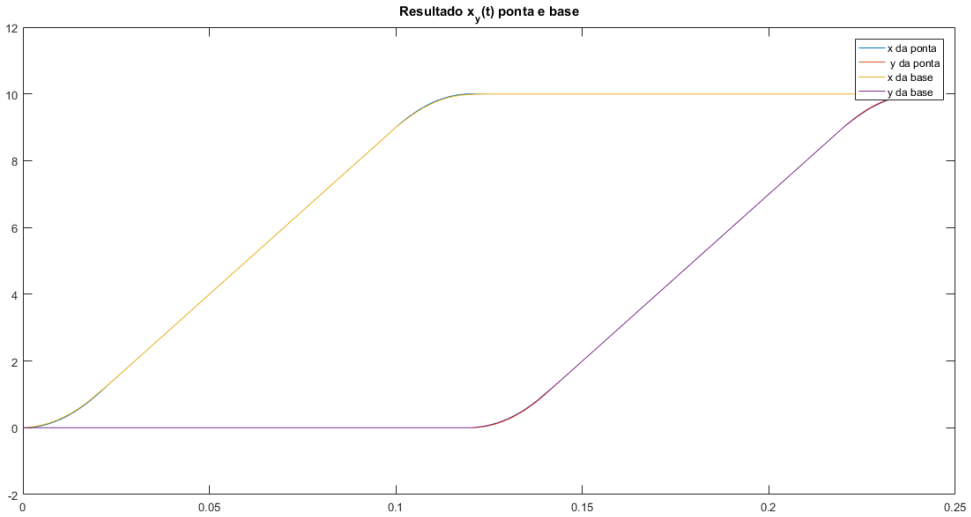
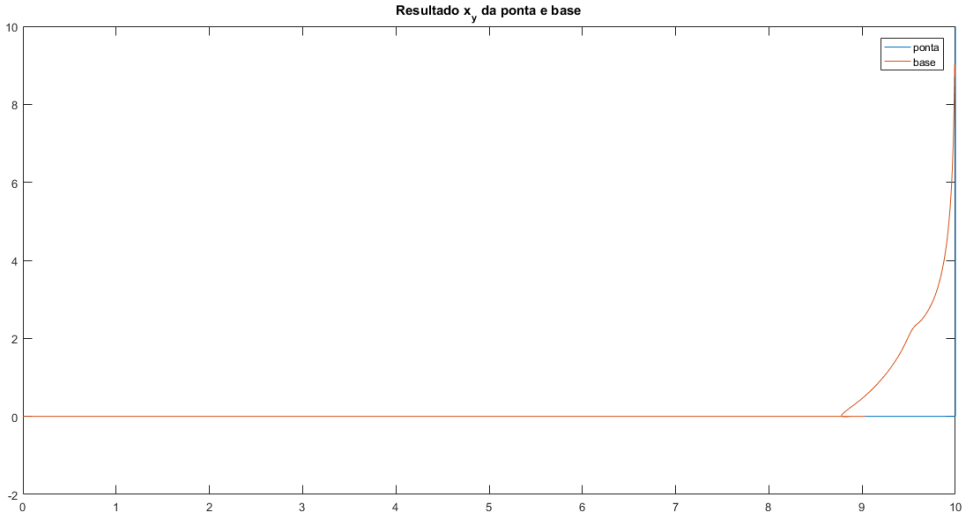



Figura 4.10 – Teste 1A - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base




### 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 intermediario 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

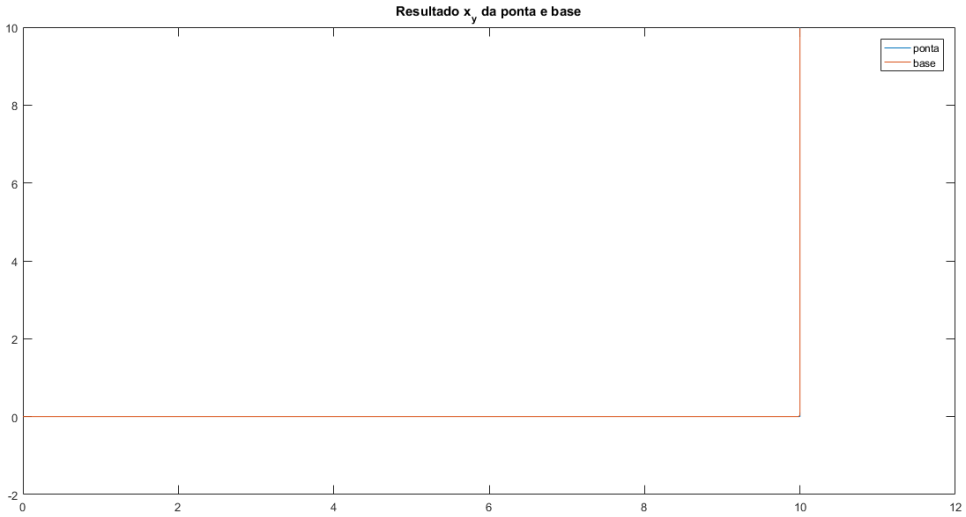
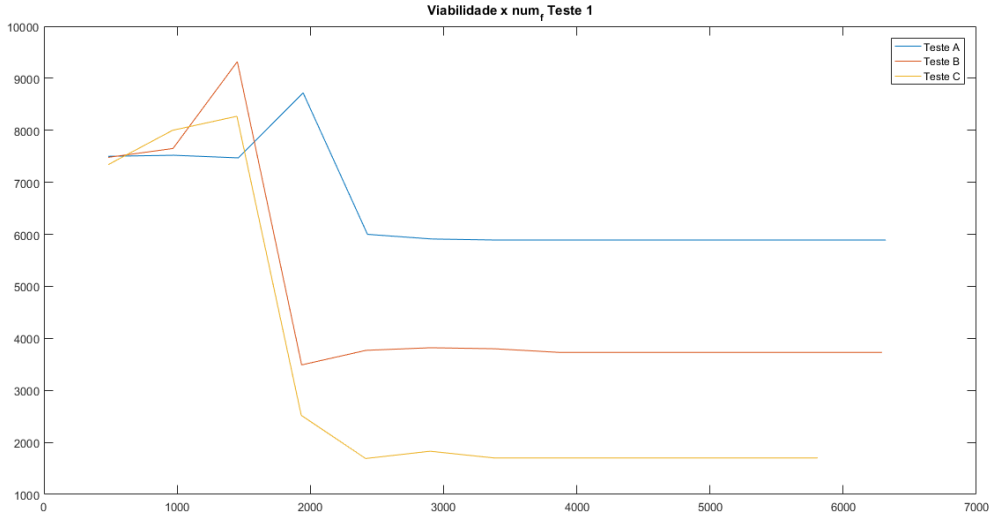



Figura 4.12 – Teste 1 - Num de fun x Viabilidade




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 nivel de velocidade

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

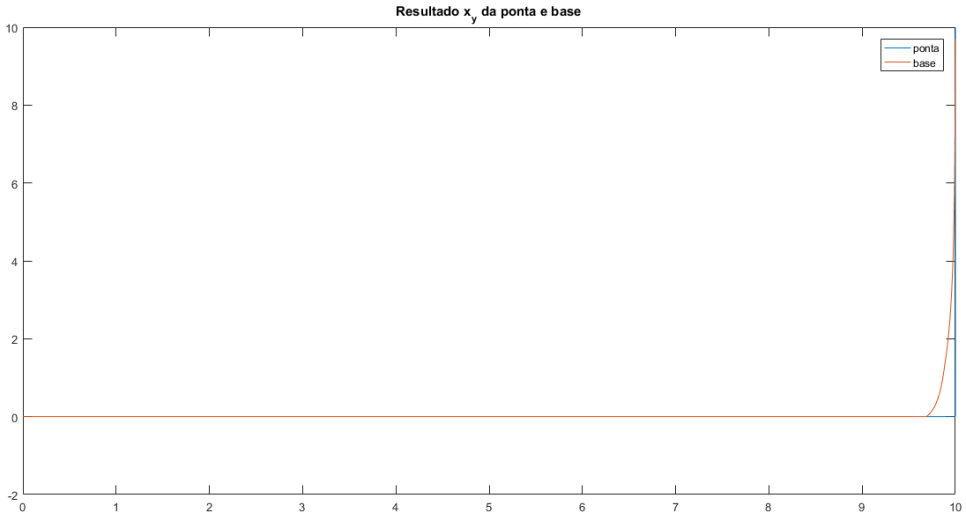
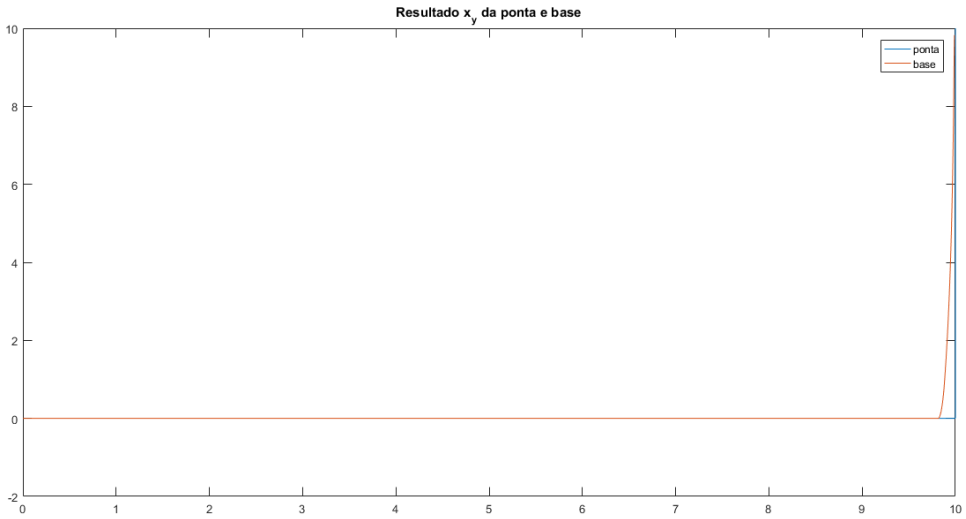



Figura 4.14 – Teste 2C - Caminho percorrido x vs y da ponta e da base




desejada e assim toma-se a forma de um triangulo. Já pela figura 4.17, podemos observar que a função teve dificuldades para solucionar o teste A, enquanto para o teste B teve um comporamento 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 possuia 401 elementos, e levou 195$s$ para realizar a simulção, enquanto para o teste B o vetor de posição possuia 221 elementos e levou 78$s$, valores bem mais próximos aos testes base assim como suas curvas.

Figura 4.15 – Teste 2 - Num de fun x Viabilidade

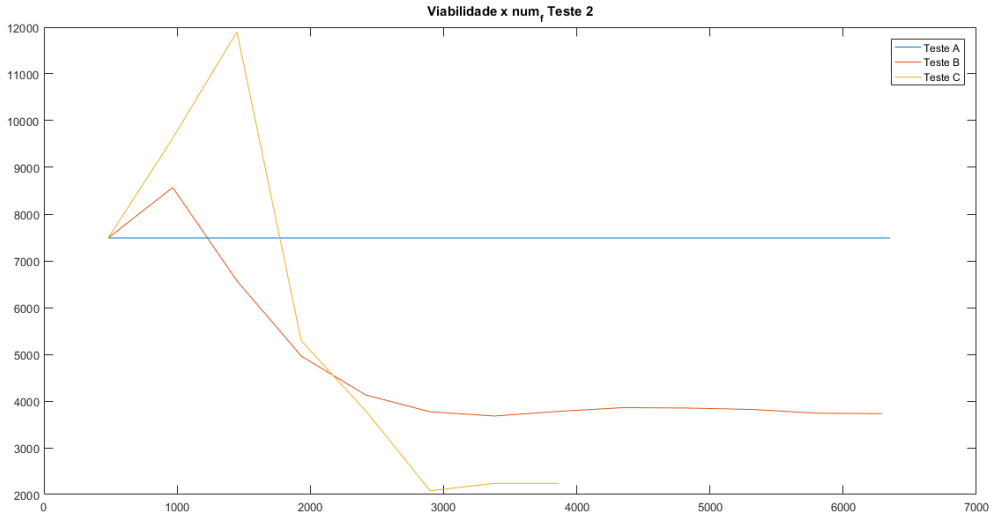
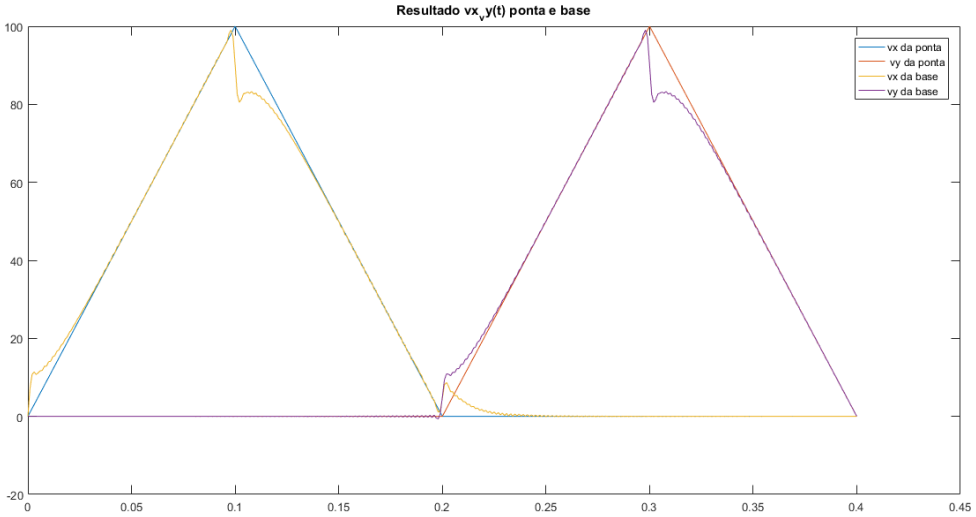


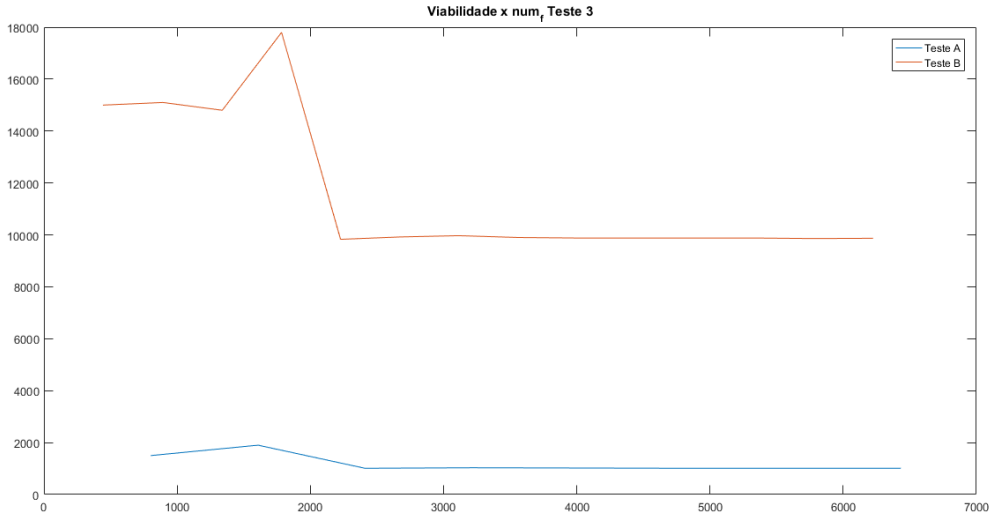

Figura 4.16 – Teste 3A - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base




### 4.1.5 Teste 4

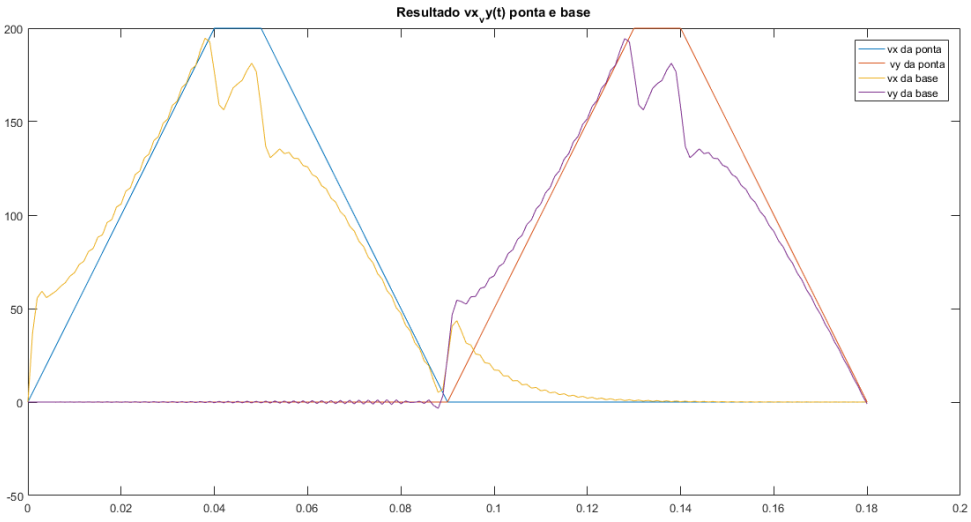
Variando a velocidade desejada, através do Gcode de entrada, analisamos os impactos de velocidades desajadas mais baixas e mais altas. As mais baixas (teste A) tem seu maior impacto no tamanho dos vetores e no tempo de simulção, já que percorre o percurso em mais tempo, gerando uma malha com mais pontos,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

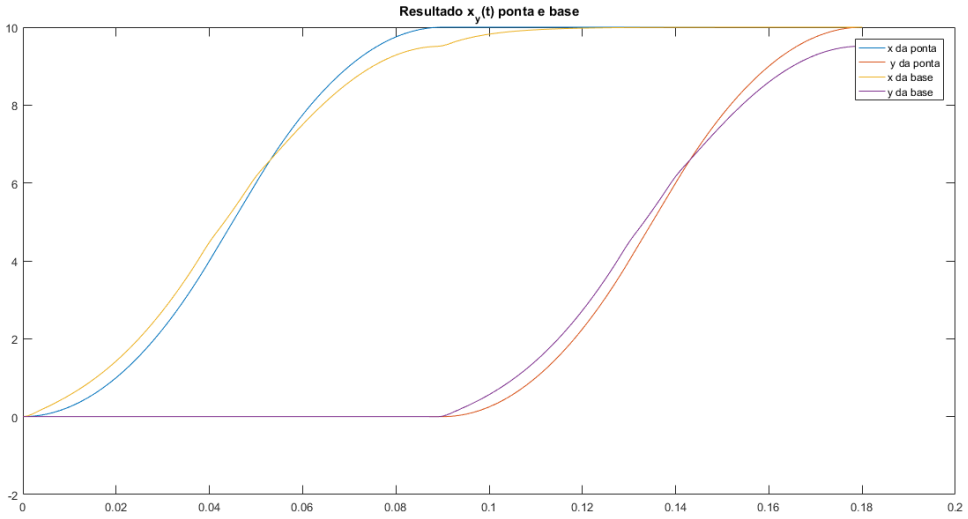
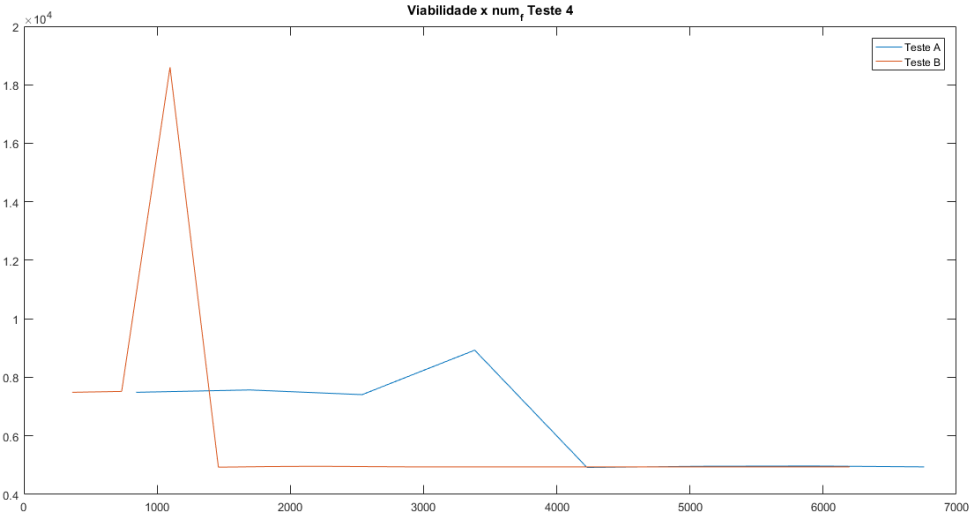



Figura 4.20 – Teste 4 - Num de fun x Viabilidade




a influência desse parâmetro nas ocilações nos graficos 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 extá 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

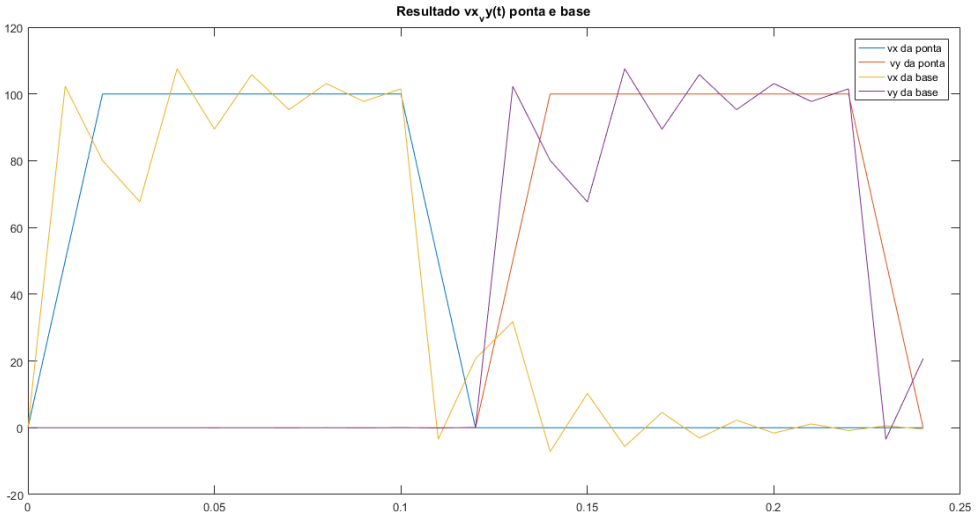
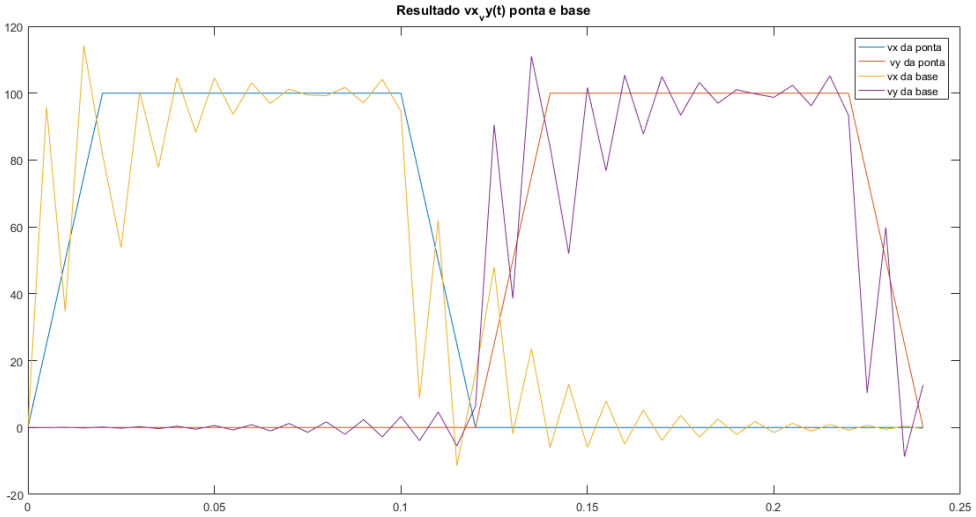



Figura 4.22 – Teste 5B - Comportamento no tempo das velocidades em x e y da ponta e da base




## 4.2 Dificuldades

Inicialmente tinha-se a ideia de utilizar a otimização da função objetivo da FMINCON, para conseguir encontrar a trajetória que possuiesse 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 comporamento 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

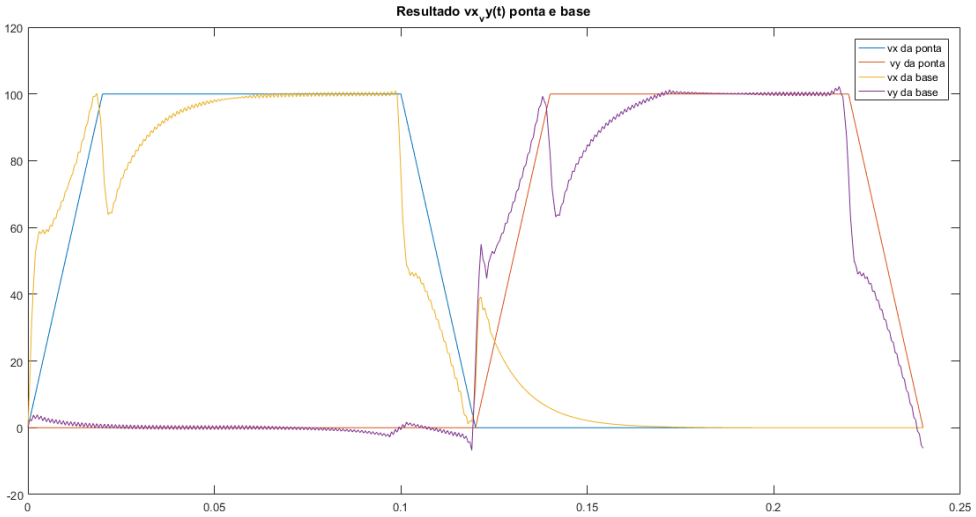
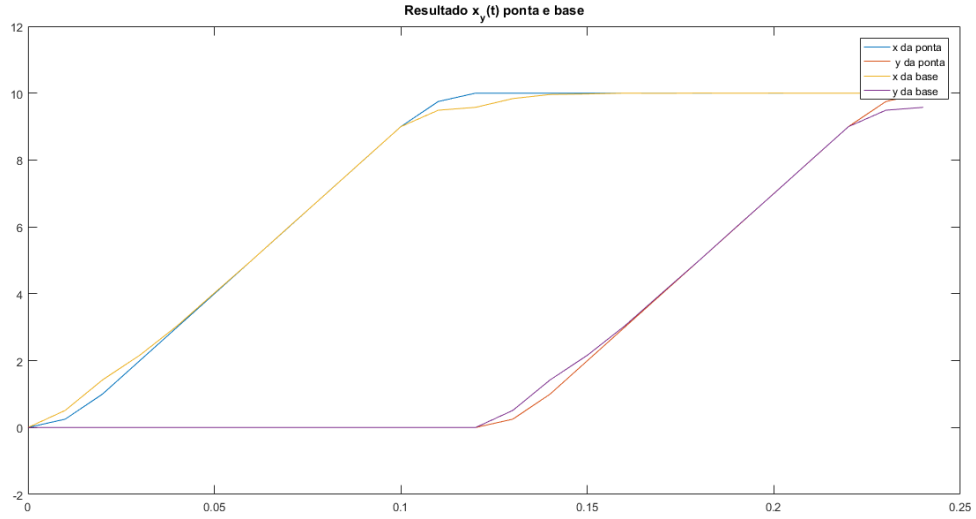



Figura 4.24 – Teste 5A - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base




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 ocilações de velocidade. Foi utilizado uma restrição de arranque para minimiza-las, mas a utilização dessas restrições de maneira a utilizar as inequalidades disponiveis pela FMINCON não foi possível. A função não conseguia mais se enquadrar nas restrições de equalidade não linear e, portanto, foi utilizado uma função condicional para atribuir a característica de inequalidade dentro da restrição de equalidade, resultando em convergências das restrições.

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

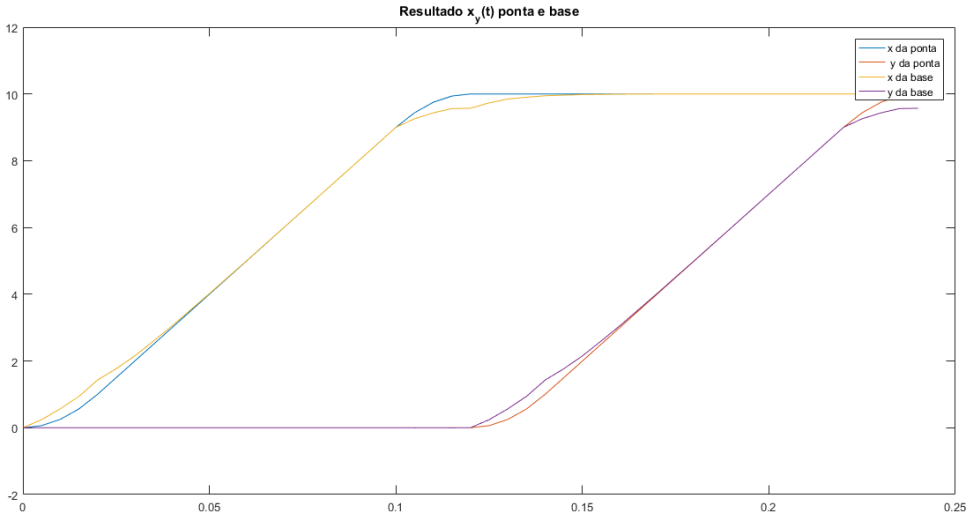
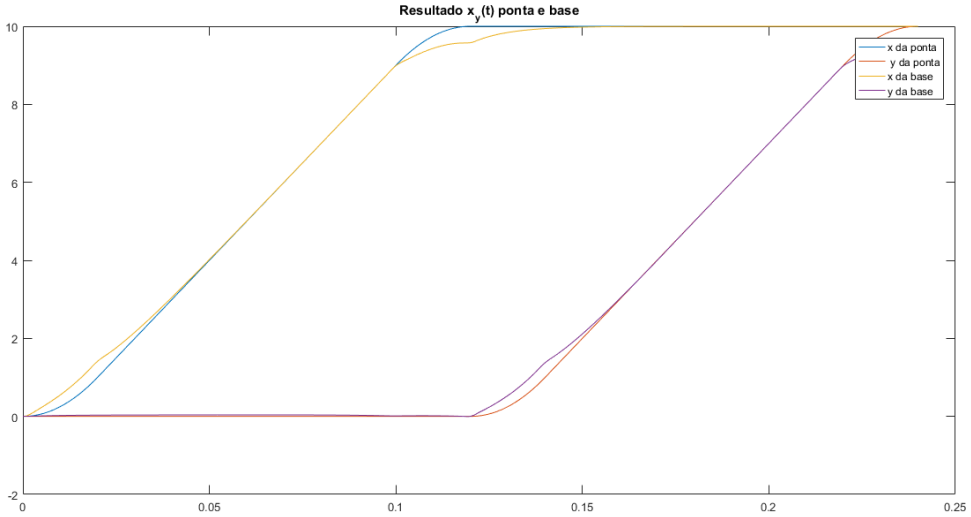



Figura 4.26 – Teste 5C - Comportamento no tempo dos deslocamentos em x e y da ponta e da base

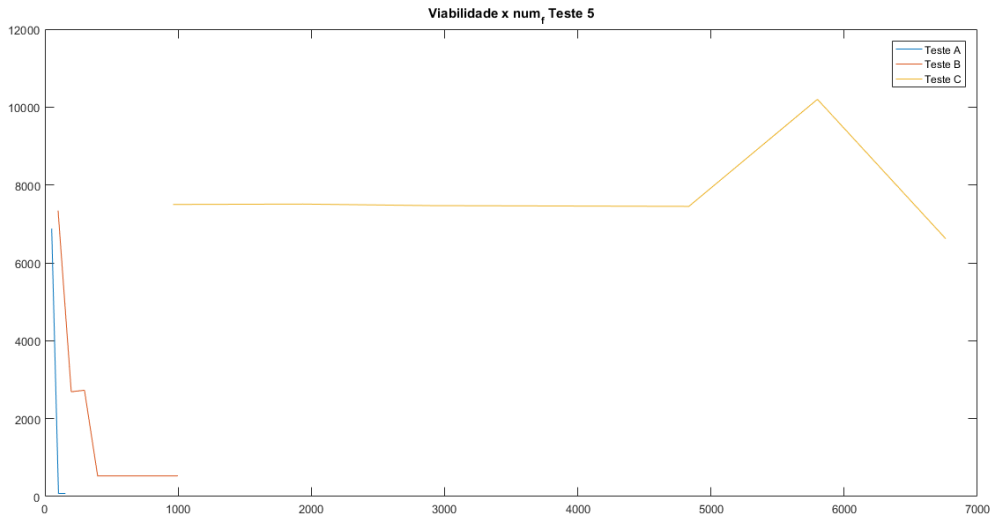



Outro ponto que foi utilizado para de certa forma controlar a prioridade de cada uma das restrições, foi a utilização de fatores que multiplicavam ou dividiam os valores das restrições, para que as mesmas fossem mais restritas ou menos restritas.

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 mundanças de direção de angulo menor que 90° 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 possivel abordagem a ser explorada utilizando a ideia do metodo 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 metodo 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 determinda posição. Assim, oferecendo a capacidade de se ajustar em grande nivel 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 malhra, 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 possibilitar velocidades de movimentação maiores 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.

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 *Gcode*, a geração de comandos base, incluindo as curvas trapezoidais de velocidade, a interpolação. Além disso, foram descritas as etapas de implementação do método desenvolvido neste trabalho, incluindo a modelagem dinâmica necessária, as funções de suporte como a integração implícita não linear e o uso da função FMINCON do Matlab.

No Capítulo 4, foram apresentados os resultados e discussões. Correlações entre as variáveis de entrada foram analisadas, bem como as influências do modelo dinâmico nas simulações e seus impactos na peformace computacional. As dificuldades encontradas foram discutidas de maneira explicar a abordagem trilhada pelo presente trabalho, bem como discussões referentes a possiveis maneiras de lidar com os mesmos. Por fim, foi discutido abordagens para trabalhos futuros, como a implementação de uma modelagem do sistema dinâmico para regiões específicas da impressora.

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 um avanço nas tecnicas disponíveis para serem exploradas com objetivo de permitir uma produção de peças com maior precisão dimensional e redução de tempo de fabricação.

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.