

Guilherme Mendes de Oliveira<sup>1</sup> e Prof. Dr. Eduardo Paiva Okabe<sup>2</sup>  
 Faculdade de Ciências Aplicadas – Universidade Estadual de Campinas

<sup>1</sup>Bolsista PIBIC/CNPQ – guilherme.oliveira@fca.unicamp.br

<sup>2</sup>Orientador – eduardo.okabe@fca.unicamp.br

Palavras-chave: Prototipagem – Análise de sensibilidade - Simulação

## Introdução

A expressão prototipagem rápida indica um conjunto de tecnologias utilizadas para criar um objeto tridimensional a partir de processos aditivos, onde o modelo físico é fabricado a partir da transposição de sucessivas camadas de material. Este projeto de pesquisa se fundamentou na análise paramétrica de uma máquina de prototipagem rápida.

Dois elementos fundamentais foram analisados sob diferentes condições: o raio da viga e a força do motor da máquina. Alterações nestes parâmetros foram simuladas por meio de modelos computacionais capazes de prever o comportamento dinâmico do equipamento, e conseqüentemente, foi possível estudar a sensibilidade da máquina às alterações e variações das características destes dois elementos.

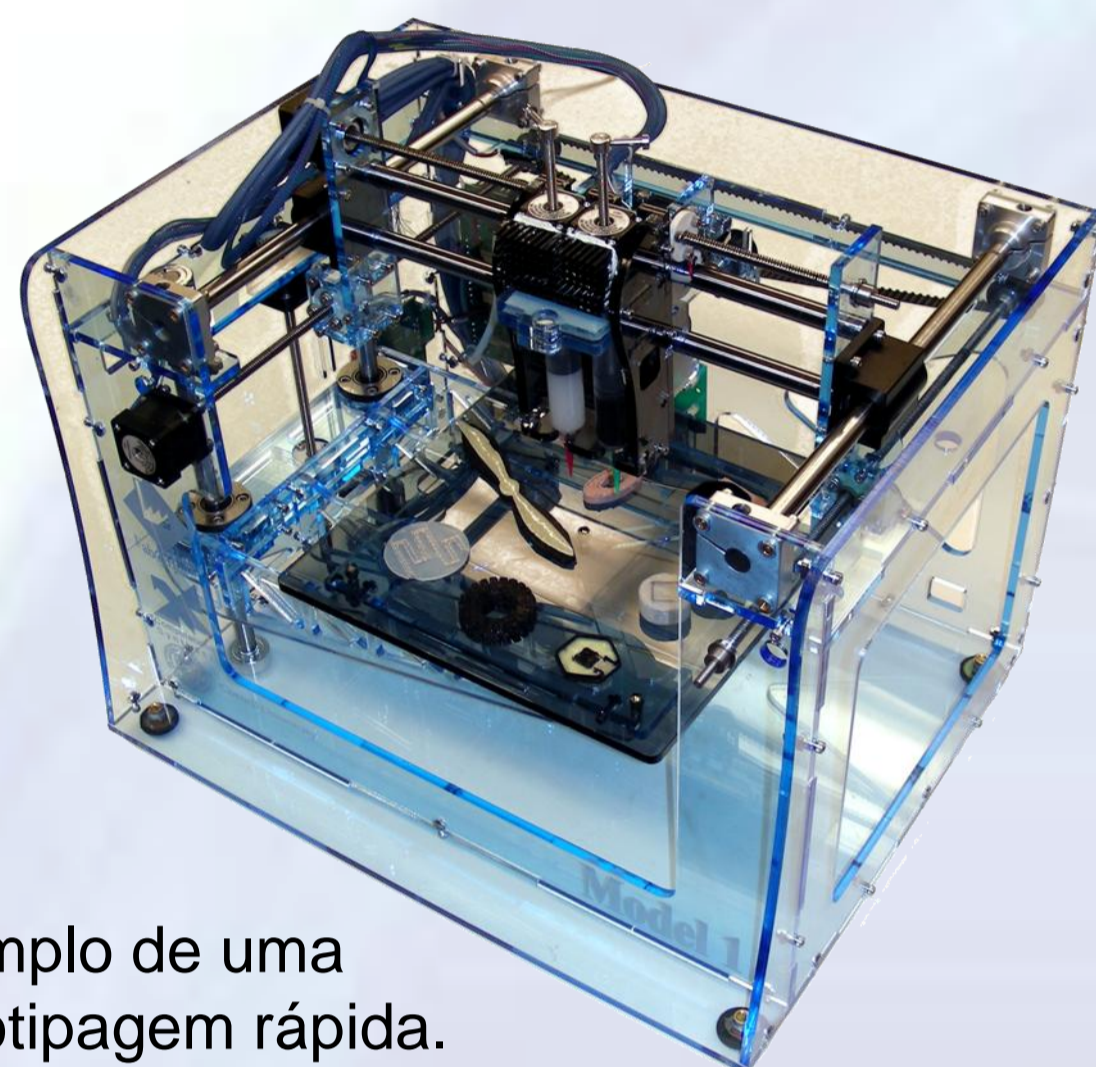


Figura 01 – Exemplo de uma máquina de prototipagem rápida.

## Metodologia

Os principais métodos utilizados neste projeto foram duas importantes ferramentas de estatística: a análise de variância (one-way ANOVA e two-way-ANOVA) e o planejamento fatorial. O principal fator levado em consideração neste estudo foi a precisão. A partir do erro médio de posicionamento da máquina gerado em cada análise e, posteriormente, da geração de testes estatísticos foi possível avaliar se os elementos estudados apresentavam efeito significativo no desempenho da máquina e como o influenciavam. Python foi a linguagem computacional utilizada para desenvolver os modelos citados acima.

## Resultados

### Análise de variância com uma variável (One-way ANOVA) e gráficos para os testes do raio da viga

No total, foram realizados 25 testes e para cada teste houve alguma modificação para simular a sua reação na performance do equipamento. O raio foi simulado com valores de 0.004m a 0.006m, com passo de 0.0005m.

O teste ANOVA foi analisado segundo o valor-p resultado das interações. Para isso, foi definido como nível de significância 0.05 (5%). O valor-p para o raio da viga sob estas condições foi de **7.41779e-24**. Então, H<sub>0</sub> é rejeitada, e conseqüentemente, a alteração neste componente resulta em efeito significativo.

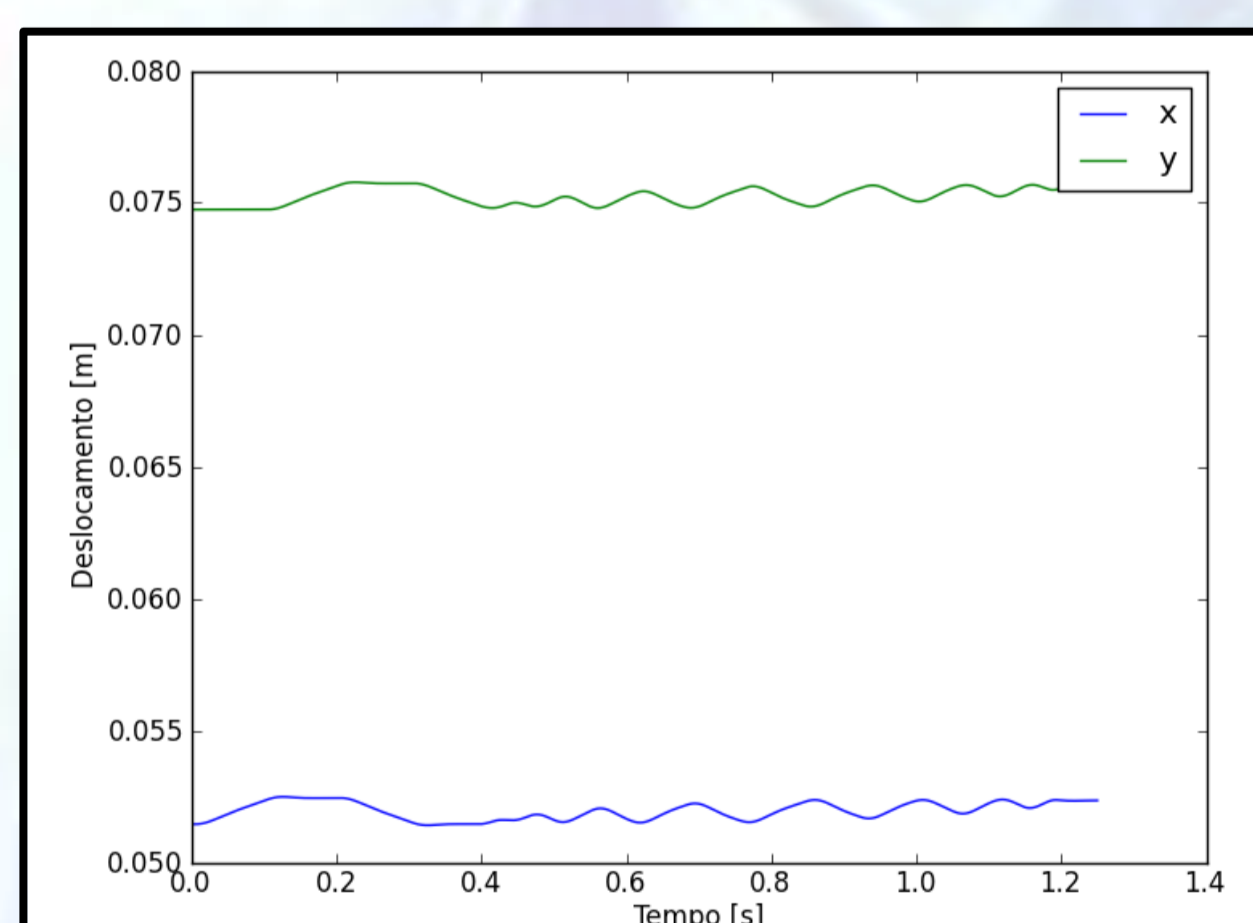


Figura 02 – Deslocamento x Tempo  
 Variação do raio da viga – Teste 01  
 Raio da Viga: 0.004m

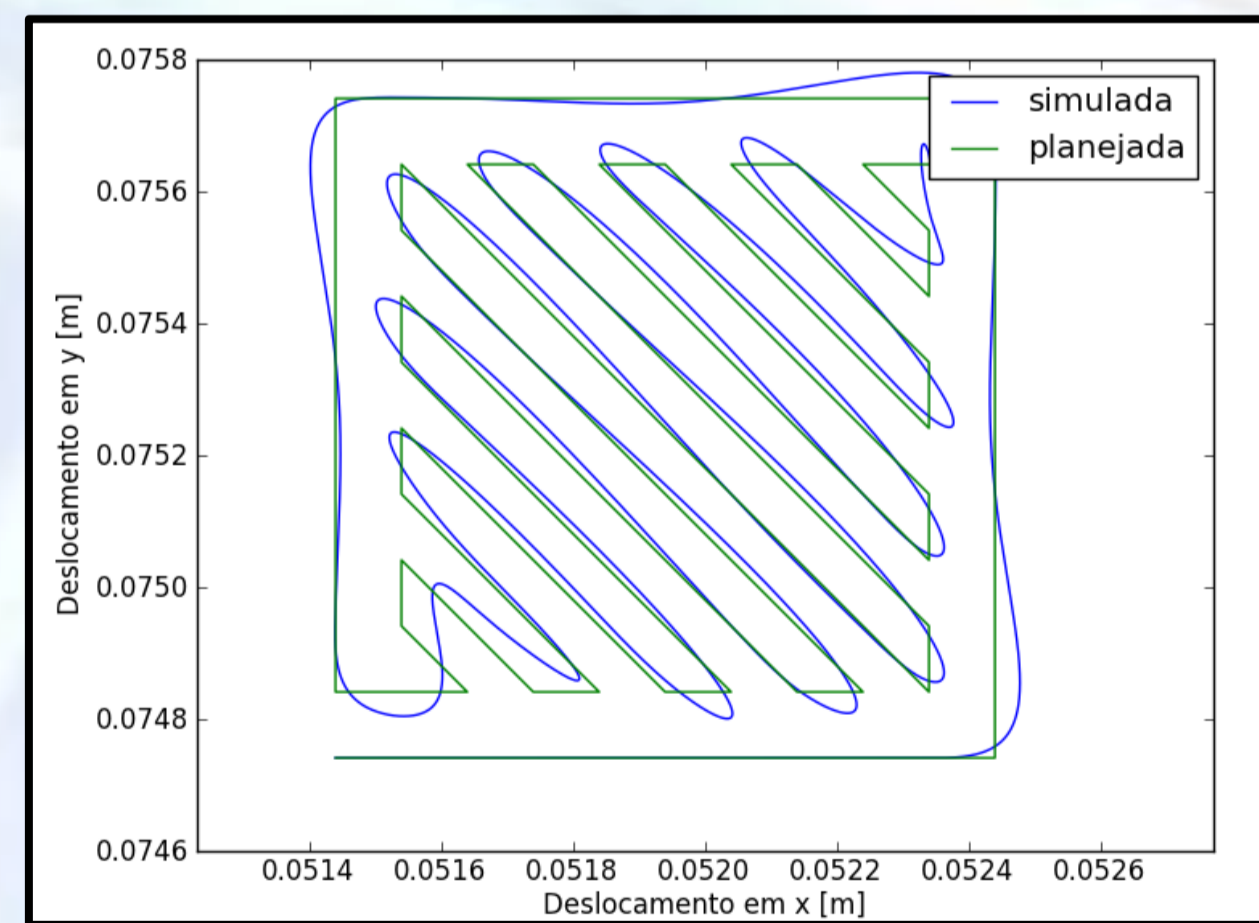


Figura 03 – Deslocamento em Y x Deslocamento em X  
 Variação do raio da viga – Teste 01  
 Raio da Viga: 0.004m

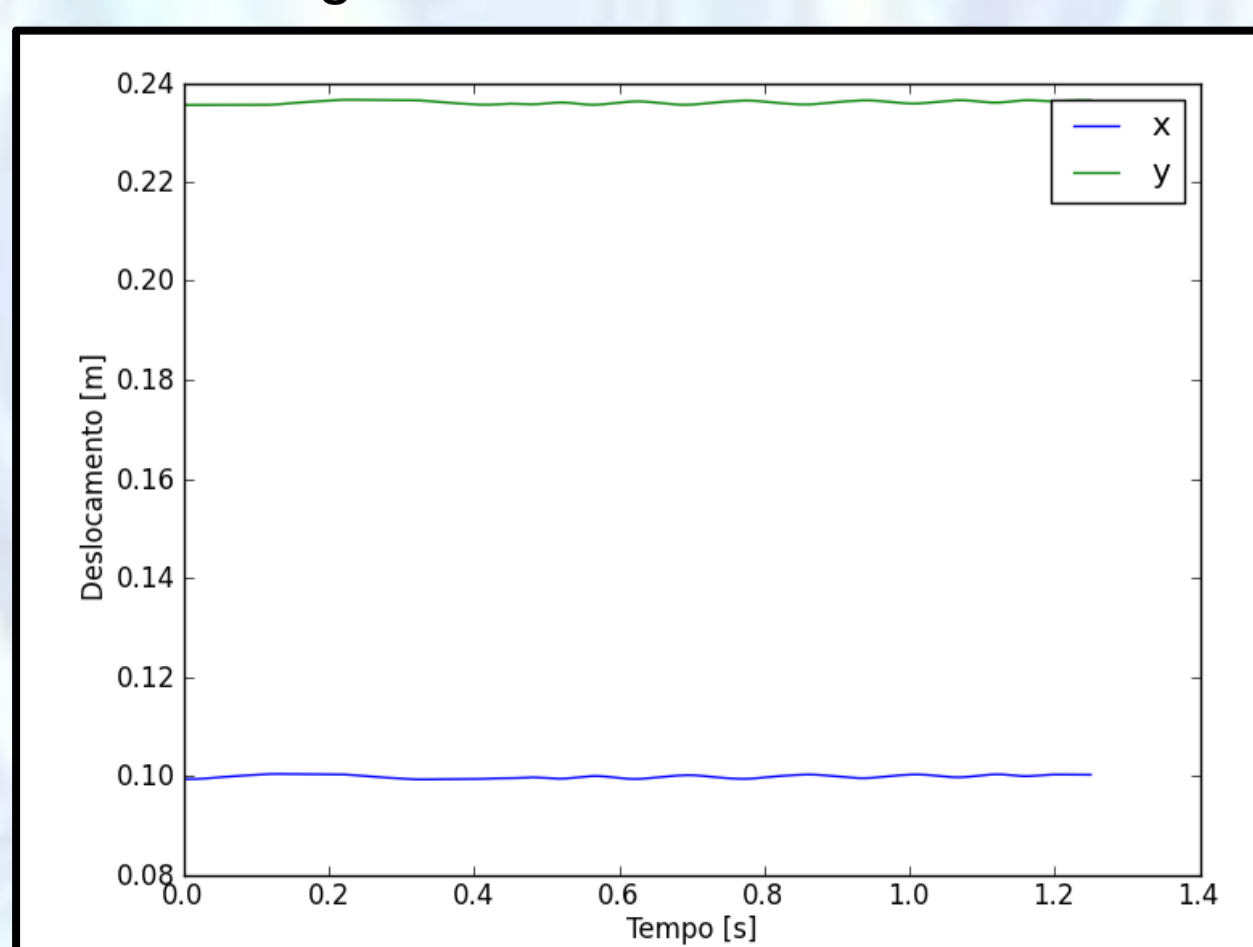


Figura 04 – Deslocamento x Tempo  
 Variação do raio da viga – Teste 25  
 Raio da Viga: 0.006m

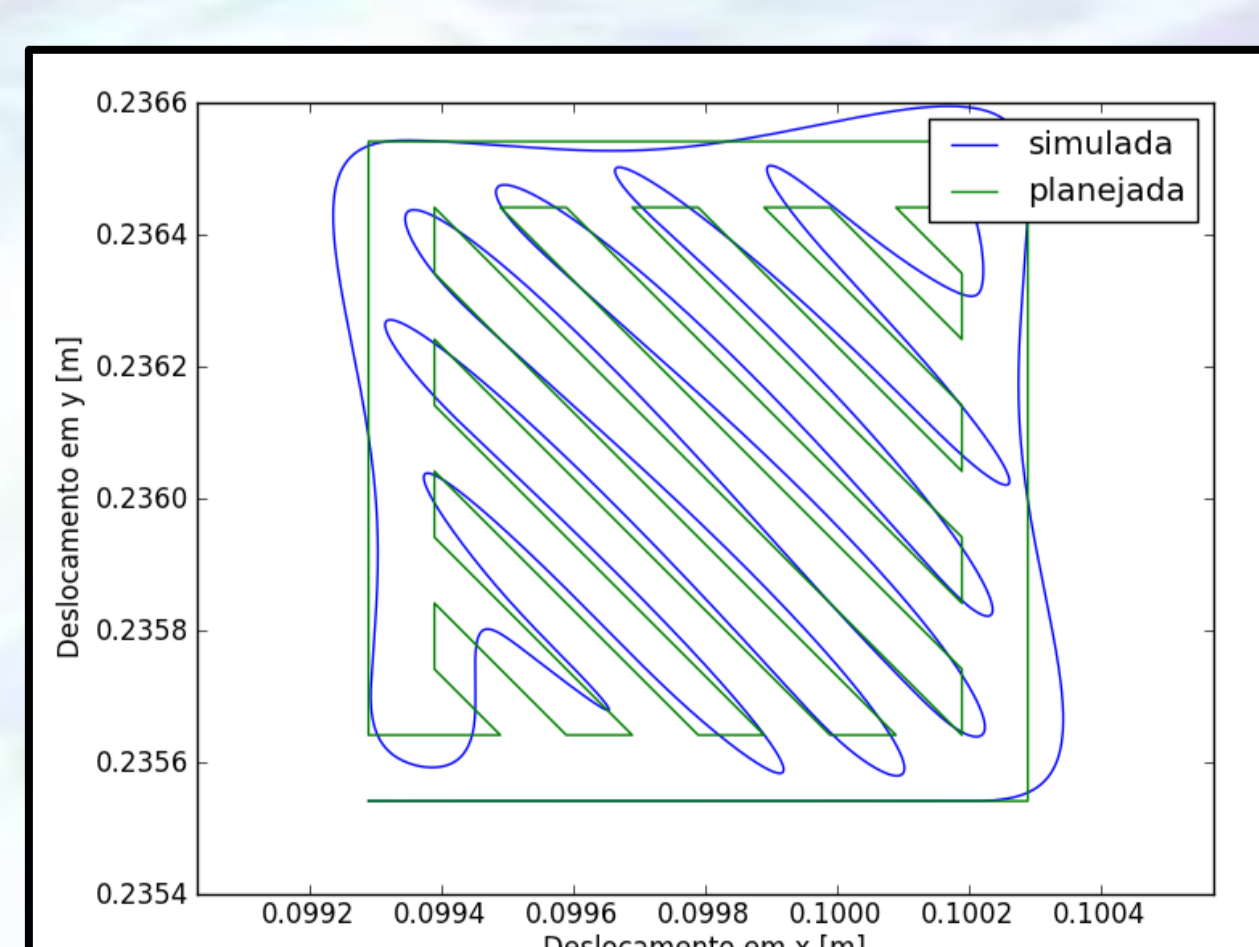


Figura 05 – Deslocamento em Y x Deslocamento em X  
 Variação do raio da viga – Teste 25  
 Raio da viga 0.006m

### Análise de variância com uma variável (One-way ANOVA) e gráficos para os testes da força do motor

Também foram realizados 25 testes, desta vez, variando a força entre 80N e 120N, com uma diferença de 10N entre cada conjunto de análises. Este teste nos forneceu o valor-p de **9.45776e-29**, indicando que a força do motor de passe é um elemento que apresenta mudanças significativas no comportamento da máquina.

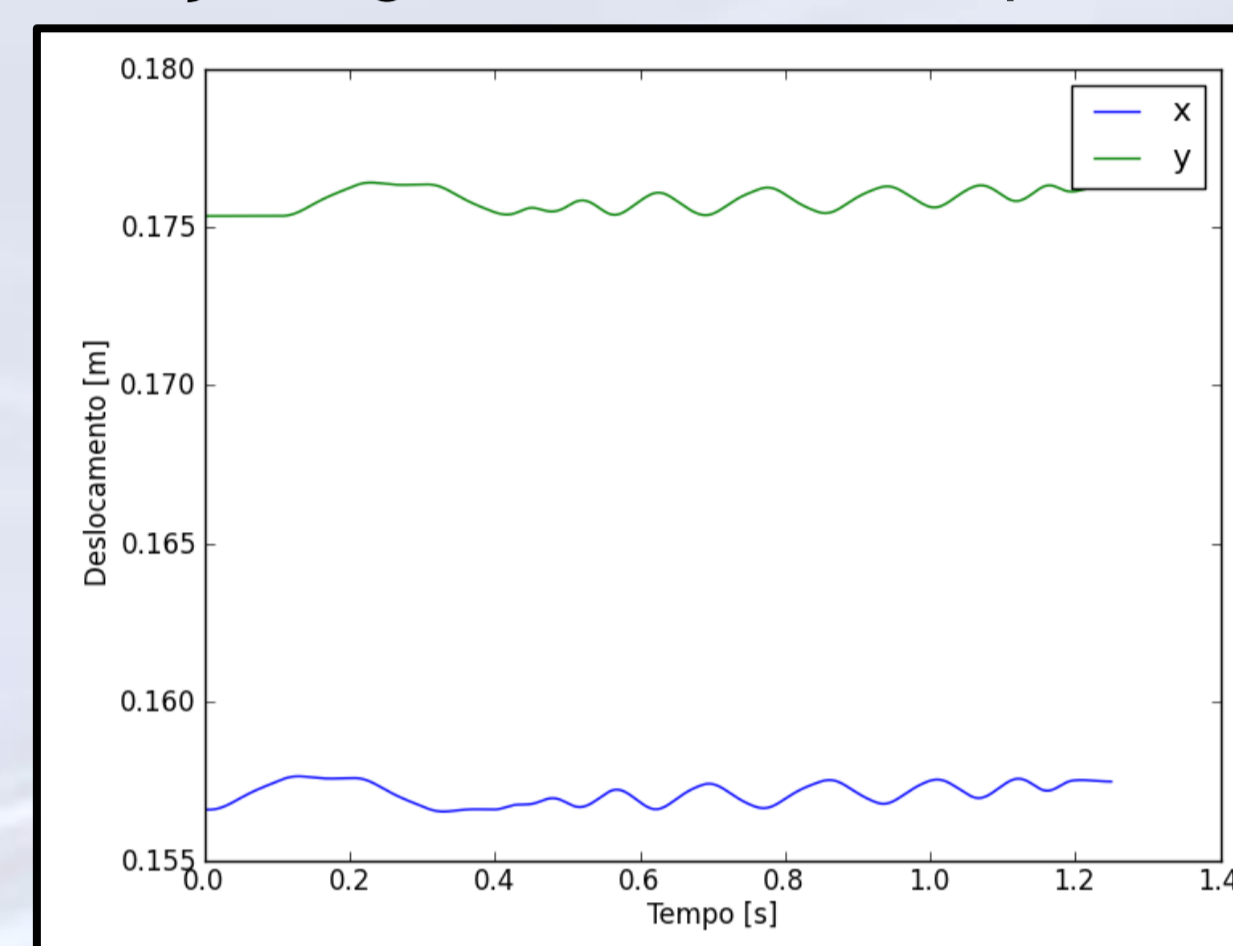


Figura 06 – Deslocamento x Tempo  
 Variação da força do motor – Teste 01  
 Força do Motor: 80N

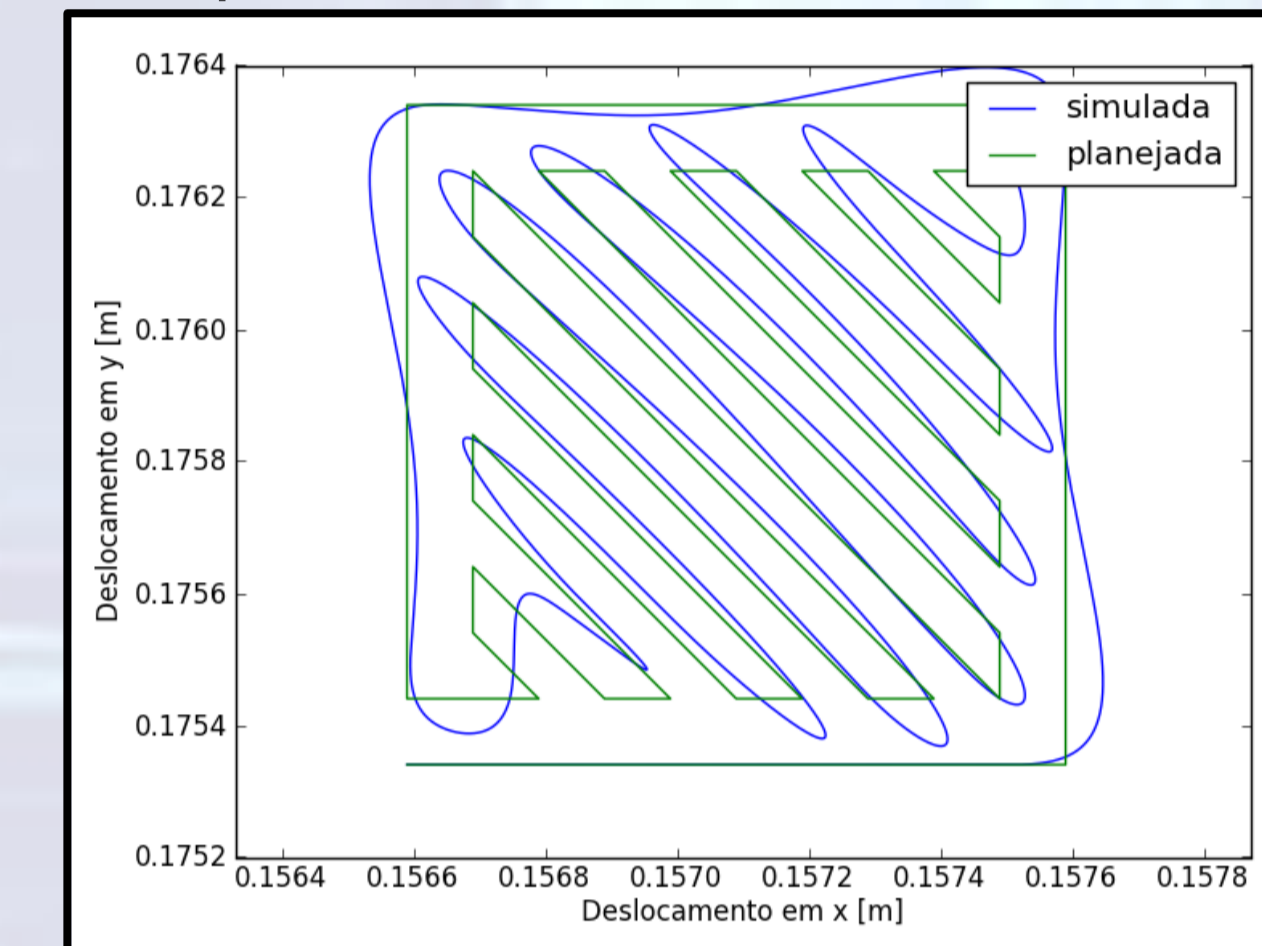


Figura 07 – Deslocamento em Y x Deslocamento em X  
 Variação da força do motor – Teste 01  
 Força do Motor: 80N

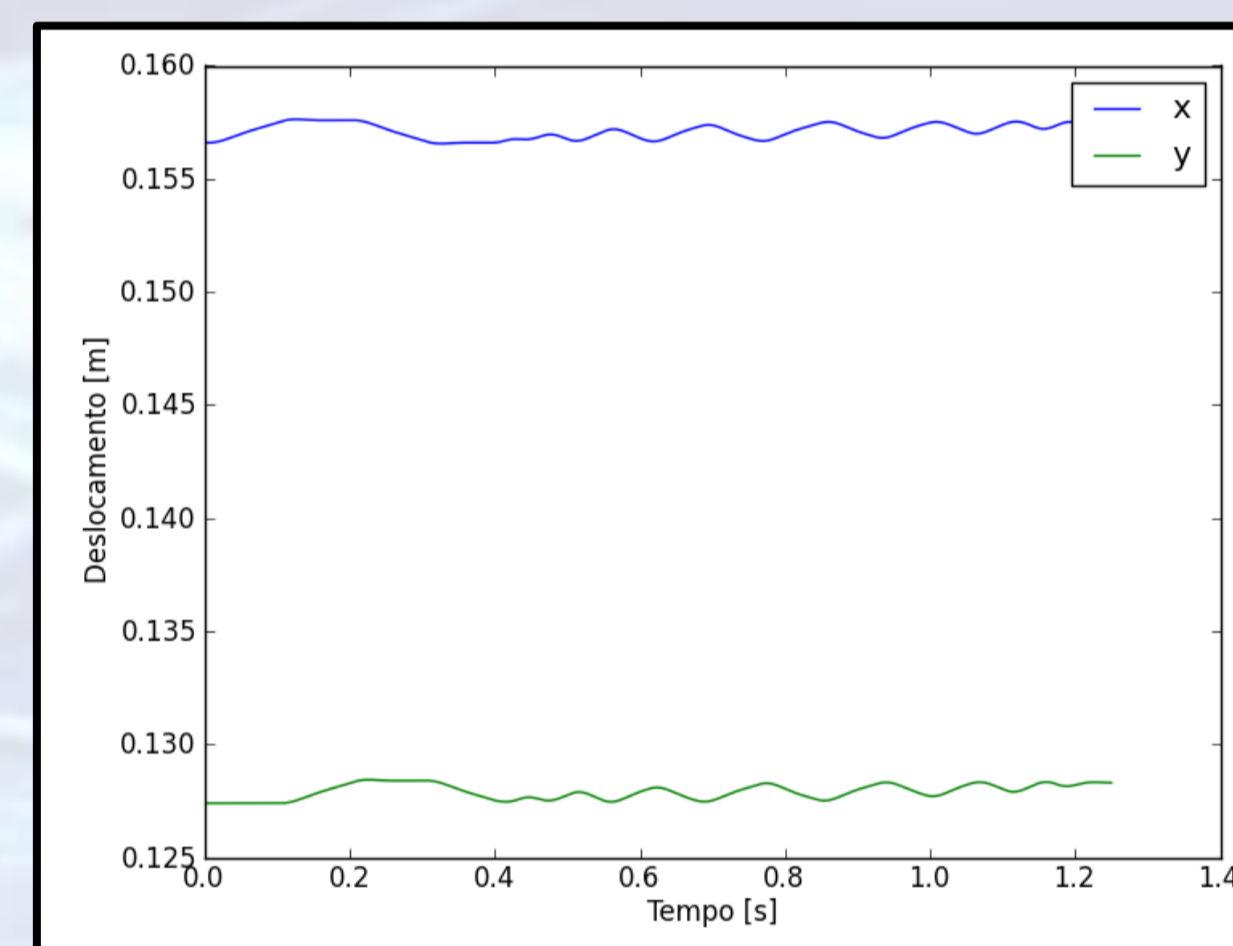


Figura 08 – Deslocamento x Tempo –  
 Variação da força do motor – Teste 25  
 Força do Motor: 120N

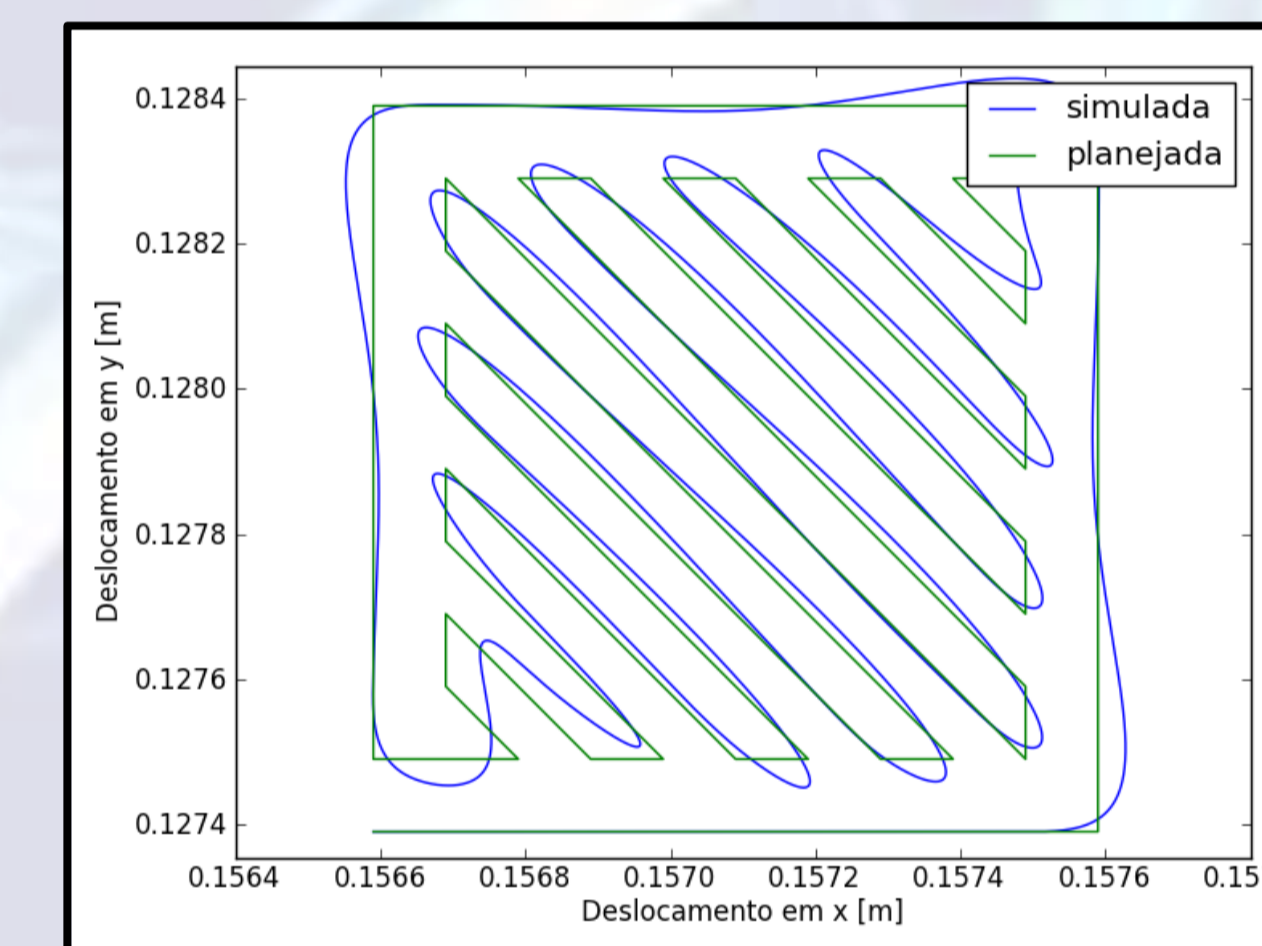


Figura 09 – Deslocamento em Y x Deslocamento em X  
 Variação da força do motor – Teste 25  
 Força do Motor: 120N

### Análise de variância com duas variáveis (Two-way ANOVA)

Esta nova análise verifica não apenas o efeito de cada variável, mas também a interação entre elas. O valor-p, referente à interação dos elementos, apresentou valor de **1.11022e-16**. Este índice é muito inferior ao que foi definido como parâmetro de análise (0.05), por isso, é possível concluir que a interação entre o raio da viga e a força do motor possui elevada contribuição na performance do equipamento.

Varição	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média da soma dos quadrados	Valor-F	Valor-p
Linhas (Força do motor)	9570.38941	4	2392.59735	16191.47873	1.11022e-16
Colunas (Raio da viga)	5297.81064	4	1324.45266	8962.99875	1.11022e-16
Interação	220.46337	16	13.77896	93.24667	1.11022e-16
Subtotais	15088.66343	24			
Resíduos	14.77689	100	0.147769		
Totais	15103.44032	124			

Tabela 01 - Resultados do ANOVA com duas variáveis (Two-way ANOVA).

## Conclusões

Resumindo a atuação dos dois parâmetros estudados: um decréscimo no valor do raio da viga influencia positivamente na precisão da máquina, enquanto que, em relação à força do motor, quanto mais elevada, menor será o erro médio de posicionamento da máquina. Os resultados mostrados neste projeto foram capazes de nos indicar que os elementos da máquina escolhidos para serem analisados são peças fundamentais no comportamento do modelo. O raio das vigas de sustentação do cabeçote de deposição e a força do motor de passo da máquina apresentaram efeitos significativos no desempenho da máquina, tanto individualmente quanto analisados em conjunto.