

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA A EXECUÇÃO DO PROCESSO DE  
ACABAMENTO MAGNÉTICO ABRASIVO CILÍNDRICO INTERNO

por

Juliano Scheufler Jardim

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2012

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA A EXECUÇÃO DO PROCESSO DE  
ACABAMENTO MAGNÉTICO ABRASIVO CILÍNDRICO INTERNO

por

Juliano Scheufler Jardim

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Heraldo José de Amorim, Dr. Eng.

Comissão de Avaliação:

Prof. **Rodrigo Rossi, Dr. Eng.**

Prof. **Gilberto Dias da Cunha, Dr. Eng.**

Prof. **Cintia C. Petry Mazzaferro, Dr. Eng.**

Porto Alegre, 7 de Dezembro de 2012.

*Dedicatória*

Dedico este trabalho à Dulce, por todo o apoio em todos os momentos da minha vida e por estar sempre comigo.

Dedico à minha família, em especial à minha mãe, por acreditar sempre em mim.

Dedico à minha Avó, por todas as xícaras de café.

Dedico aos meus amigos de sempre Thor, Loli, Lili, Peter, Arisca e Bruce por todos os dias me receberem com carinho em casa.

## *Agradecimentos*

Agradeço a Felipe de Mello Kich, Tomás Hartfelder, André Javoni, Diego Fernandes e Breno de Freitas pela amizade e por toda a ajuda. Sempre.

Agradeço aos Engenheiros Heraldo Amorim, Régio Leal, Magnon Silva, Leandro Lerina Leandro Muller, e Márcio Fagundes por todos os ensinamentos passados e pela paciência.

Agradeço às equipes do LAMEC e do Laboratório de Usinagem da UFRGS que sempre prestaram auxílio para que este trabalho fosse desenvolvido.

Agradeço aos amigos que não me deixaram desistir nunca.

JARDIM, J. S. **DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA A EXECUÇÃO DO PROCESSO DE ACABAMENTO MAGNÉTICO ABRASIVO CILÍNDRICO INTERNO..** 2012. 22p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **RESUMO**

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de uma ferramenta para a execução do processo de acabamento magnético-abrasivo em superfícies cilíndricas internas. Para tal, foi construída uma bancada adaptável a tornos mecânicos sobre a qual foi instalada uma ferramenta constituída por um eletroímã e um sistema de aplicação de vibrações acionada por um motor elétrico. A validação experimental do dispositivo desenvolvido foi realizada através da variação do tempo de processamento e da rotação da peça, sendo avaliados como parâmetros de resposta o acabamento superficial obtido e a remoção de material. Os resultados da análise demonstraram que é possível atingir bons níveis de remoção de material e de redução da rugosidade em peças submetidas a este processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** rugosidade, processo de acabamento superficial, pó magnético-abrasivo

JARDIM, J. S. **EQUIPMENT DEVELOPMENT TO EXECUTE PROCESS OF INNER CYLINDRICAL MAGNETIC ABRASIVE FINISHING..** 2012. 22p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **ABSTRACT**

This work consists in the development of a tool to perform magnetic-abrasive finishing process in cylindrical inner surfaces. A adaptable bench for lathes was built and a tool composed by an electromagnet and a vibration system powered by an electric motor was installed. The experimental validation of the developed device was made through processing time and speed rotation analysis and the response parameters were the surface roughness and material removal. The results of analysis showed it is possible to achieve good rates of material removal and roughness reduction of parts submitted through this process.

**KEYWORDS:** roughness, surface finishing process, magnetic abrasive

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS .....	1
2.1	Objetivo geral.....	1
2.2	Objetivos específicos.....	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
3.1	Acabamento magnético abrasivo.....	2
3.2	Circuitos magnéticos.....	3
3.3	Rugosidade e acabamento superficial.....	4
4	PROJETO.....	5
4.1	Projeto eletromagnético do equipamento.....	5
4.2	Projeto mecânico do equipamento.....	6
5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	8
5.1	Preparação dos ensaios.....	8
5.2	Projeto de experimentos.....	9
6	RESULTADOS.....	9
6.1	Análise preliminar dos ensaios.....	9
6.2	Análise dos resultados.....	10
7	CONCLUSÕES.....	13
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	13
	Apêndice I .....	14
	Apêndice II .....	15

## 1. INTRODUÇÃO

A otimização de processos de usinagem é uma área de interesse constante da engenharia mecânica devido às demandas crescente das indústrias do ramo metal mecânico, que buscam os melhores resultados aliados ao menor custo possível. Enquanto o custo é relacionado a fatores tais como vida de ferramenta e produtividade, os principais resultados associados a estes processos se referem às dimensões e acabamento superficial dos componentes produzidos.

A importância do acabamento superficial é evidenciada através das suas relações com características como resistência à corrosão, fadiga e ao desgaste, entre outras. Os processos tradicionalmente utilizados para gerar acabamento superficial têm como características o valor elevado de suas máquinas operatrizes, no caso da retificação e do brunimento, ou a necessidade de movimentos manuais que os tornam dispendiosos e pouco produtivos. Operações de acabamento de superfícies internas exigem ferramentas ainda mais sofisticadas para sua realização e, devido às dificuldades impostas pelo processo, têm custos associados mais elevados.

O processo de acabamento magnético abrasivo é uma opção aos métodos tradicionais de usinagem. Neste método, uma mistura de partículas com propriedades magnéticas e abrasivas, sustentada pela ação de um campo magnético, é utilizada a fim de conferir acabamento a uma superfície.

Diversos autores já realizaram análises sobre tal processo, entretanto, o mesmo foi pouco estudado quanto à possibilidade de utilização em superfícies cilíndricas internas de materiais ferromagnéticos. Wang et al., 2004, estudaram a aplicação do acabamento magnético-abrasivo em superfícies internas de tubos cerâmicos, enquanto Mori et al., 2003, avaliaram sua eficiência no acabamento de aço inoxidável.

Foram realizados estudos no GPFAl/UFRGS sobre o processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico externo [Leonhart, 2004; Amorim, 2006; Gomes, 2007]. Estes trabalhos utilizaram um eletroímã que permite a usinagem de superfícies cilíndricas externas o qual utiliza uma ferramenta também externa para realizar o processo de acabamento magnético-abrasivo. A ferramenta utiliza um enrolamento de fios de cobre onde é aplicada uma tensão para gerar o campo magnético que serve como elemento que realiza a atração entre a peça a ser usinada e o pó magnético-abrasivo.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a aplicabilidade do processo de acabamento magnético-abrasivo em superfícies internas de tubo de material ferromagnético. A utilização de polos magnéticos internos no tubo a ser usinado foi avaliada e, através dos resultados obtidos, avaliada experimentalmente. O procedimento experimental incluiu estabelecer controle sobre os parâmetros considerados relevantes ao processo, como velocidade angular e tempo de usinagem, visando avaliar o efeito sobre o acabamento superficial e a remoção de material, permitindo observar a relevância de tais parâmetros sobre o processo.

### 2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver uma bancada experimental adaptada a um torno mecânico, composta por eletroímã e sistema de aplicação de vibrações;
- Avaliar a possibilidade de aplicação do processo de acabamento magnético abrasivo em superfícies cilíndricas internas de materiais ferromagnéticos;
- Avaliar, através da execução de experimentos, a eficiência do processo e sua dependência em relação a alguns parâmetros de processo.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Acabamento magnético abrasivo

O processo de acabamento magnético-abrasivo é um método que utiliza como ferramenta para remoção de material uma mistura chamada de pó magnético-abrasivo, o qual, sob influência de um campo magnético e do movimento relativo entre este e a peça em usinagem realiza o acabamento superficial da peça. O princípio básico de funcionamento do método é a utilização de escovas magnéticas flexíveis formadas pela ação de um campo magnético sobre o pó magnético abrasivo, que por sua vez realiza remoção de rebarbas, melhoria do acabamento superficial e correções geométricas com baixa remoção de material. A figura 3.1 apresenta a ferramenta desenvolvida por Yamaguchi, 1999, como um exemplo de utilização do pó magnético abrasivo como ferramenta para acabamento superficial de superfície cilíndrica interna.

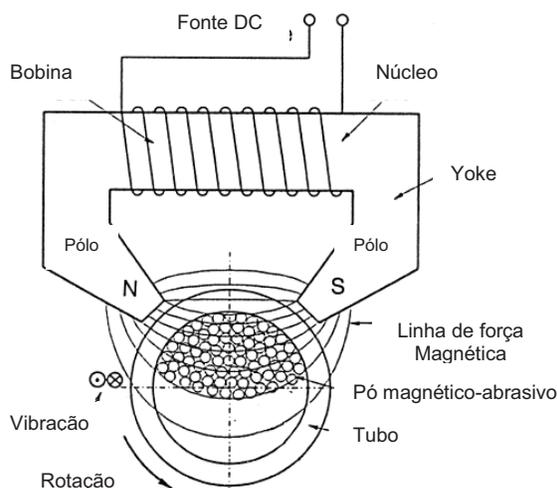


Figura 3.1 – Ferramenta utilizada para acabamento superficial interno [Adaptado de Yamaguchi, 1999].

A influência dos parâmetros de processo sobre os resultados obtidos utilizando tal processo é tema de diversos estudos. De acordo com Jain et al 2001, a velocidade circunferencial e o espaço entre peça e ferramenta, chamado de entreferro, são parâmetros que influenciam diretamente o valor de rugosidade superficial. O tempo de usinagem e o tipo de aglutinante utilizado também influenciam o processo de acabamento superficial segundo Amorim, 2009.

Yamaguchi e Shinmura, 1999, avaliaram a eficiência do processo utilizando mistura de  $Fe_2O_3$  e óxido de alumínio para realizar o acabamento da superfície de um disco de aço inoxidável SUS304. Através de uma análise microscópica da superfície do disco após o experimento, percebeu-se a capacidade de remoção de material pelo pó magnético abrasivo tanto dos picos quanto dos vales da superfície do disco. O resultado foi a redução da rugosidade ( $R_y$ ) de 2,0 para  $0,4 \mu m$  quando o disco foi submetido a 1200 rpm e sob uma densidade de fluxo magnético ( $B$ ) 1,04 T. No mesmo trabalho, quando utilizado um ímã permanente, o acabamento superficial resultante foi muito semelhante, sendo atingidas rugosidades na faixa de  $0,5 \mu m$  de rugosidade, porém, a taxa de remoção de material do primeiro experimento foi 2,5 vezes maior (10 contra 25 mg de material removido).

A importância do movimento axial da ferramenta durante o processo de acabamento com pó magnético abrasivo foi demonstrado no trabalho de Shinmura, 1984. Foram usinados externamente corpos de prova (fabricados em de aço estrutural KS SS41) com a mesma ferramenta utilizando diferentes valores de frequência de vibração axial da ferramenta (entre zero e 20 Hz), com relações significativas encontradas tanto com a quantidade de material removido quanto com a rugosidade dos corpos de prova. Com tais resultados, foi comprovada

a importância do movimento axial da ferramenta durante o processo, pois, com o aumento da frequência (principalmente na faixa entre 0 e 5 Hz), observou-se um aumento na capacidade de remoção de material da mesma, além da redução nos resultados da rugosidade superficial. Gomes, 2007, também observou a importância do movimento axial da ferramenta em relação ao corpo de prova. Seu experimento resultou em resultados mais expressivos nos valores de rugosidade superficial quando utilizou uma frequência de vibração da ferramenta de 5,25 Hz.

Shinmura, 1989, definiu a relação entre alguns parâmetros importantes do processo de acabamento magnético-abrasivo através da análise do acabamento de uma superfície de aço inoxidável (SUS 304) de 1,2 mm de espessura. Através dos dados coletados, ele chegou à conclusão de que há uma relação inversa entre a densidade de fluxo magnético ( $B$ ) e rugosidade superficial do corpo de prova.

### 3.2 Circuitos magnéticos

Um campo magnético é produzido quando ocorre a passagem de corrente elétrica em um condutor. Circuitos magnéticos são usados para avaliar o efeito magnético de uma corrente em uma região particular do espaço. O circuito magnético pode ser construído a partir de uma variedade de seções com diferentes comprimentos, e diferentes propriedades magnéticas, análogo a um circuito elétrico. Uma aplicação comum do conceito seria a determinação da corrente requerida em um enrolamento para produzir uma dada densidade de fluxo em um componente ferromagnético. De modo simplificado Wentworth, 2006, definiu um circuito magnético como na figura 3.2 como:

$$N.i = B.A.R_{eq} \quad (3.1)$$

onde:

$i$ : corrente elétrica do circuito;

$N$ : número de espiras do enrolamento;

$B$ : densidade de fluxo magnético, em Tesla (T);

$A$ : área da seção transversal do núcleo, em  $\text{mm}^2$ ;

$R_{eq}$ : relutância equivalente do circuito magnético, em  $\text{Arev/Wb}$

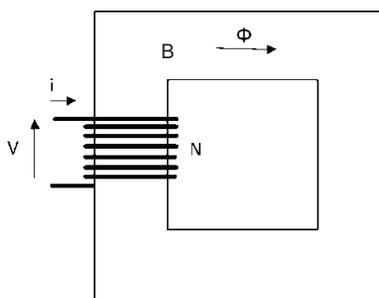


Figura 3.2 Diagrama de Funcionamento de Circuito Magnético [Wentworth, 2006].

O circuito magnético desenvolvido no presente trabalho está demonstrado em forma de esquema na figura 3.2 onde:

$R_1$ : relutância da peça a ser usinada, em  $\text{Arev/Wb}$ ;

$R_2$ : relutância dos entreferros, em  $\text{Arev/Wb}$ ;

$R_3$ : relutância da ferramenta, em  $\text{Arev/Wb}$ .

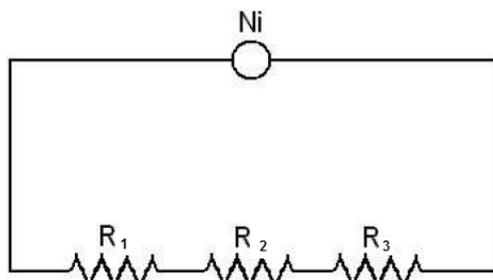


Figura 3.3 Circuito Magnético Desenvolvido

### 3.3 Rugosidade e acabamento superficial

As irregularidades que existem em uma superfície real tendem a formar um padrão ou textura característica. Este perfil não-uniforme é herança do método utilizado na obtenção da superfície. O acabamento superficial, que em geral é especificado em projetos mecânicos como rugosidade, é utilizada para definir a qualidade de uma superfície. Para sua medição, é utilizado um rugosímetro, que avalia os desvios da superfície real em relação a uma referência.

A rugosidade é uma característica relevante de um componente mecânico, pois está ligado a diversas propriedades da superfície, tais como resistência à corrosão, resistência à fadiga, lubrificação e transmissão de calor. Diversos dispositivos mecânicos, eletrônicos e ópticos estão disponíveis para a medição destes desvios, através da amostragem do contorno da peça a ser analisada.

No Brasil, segundo as normas ABNT NBR 8404 - Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos e ABNT NBR ISO 4287, a rugosidade de uma superfície pode ser avaliada pelo valor do desvio médio aritmético - Ra. Este valor é representado pela média das distâncias absolutas do perfil efetivo em relação à linha de centro, ao longo de um determinado comprimento de amostragem, conforme mostra a figura 3.4:

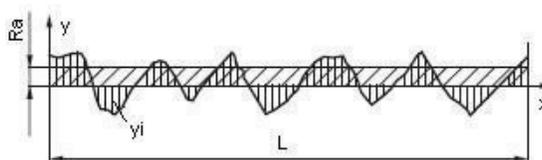


Figura 3.4: Dados necessários para o cálculo do parâmetro de rugosidade Ra

O Valor de Ra é dado por:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.2)$$

onde:

$y_i$ : distância da linha média de centro até a posição medida para dado ponto;

O acabamento superficial representa uma herança do método empregado em sua obtenção. A figura 3.5 expressa a variação de Ra em função de diversos processos de fabricação. Percebe-se que a escolha do processo de fabricação influencia diretamente o valor da rugosidade que se deseja obter.

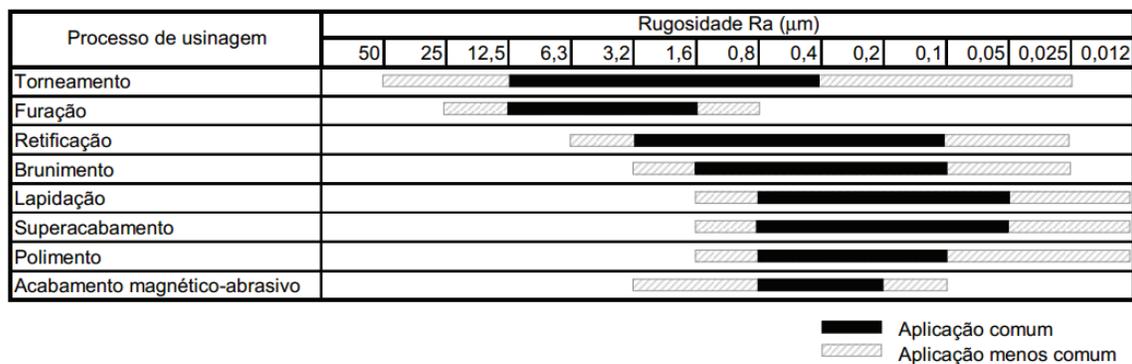


Figura 3.5 Variação da rugosidade Ra obtida por diferentes processos de fabricação. [Amorim, 2009].

## 4 PROJETO

### 4.1 Projeto eletromagnético do equipamento

O desenvolvimento de uma ferramenta para realização de acabamento superficial interno de tubos ferromagnéticos apresenta um problema inicial que deve ser analisado para a sua aplicabilidade ser viabilizada. O experimento chamado gaiola de Faraday demonstrou que uma superfície condutora eletrizada possui campo elétrico nulo em seu interior dado que as cargas se distribuem na parte mais externa da superfície condutora. De forma análoga, um tubo de material ferromagnético possui densidade de fluxo magnético nula em seu interior quando sujeito a um campo magnético. Desta forma, o pó magnético abrasivo no interior do tubo não seria submetido à ação de campo magnético e, conseqüentemente, não realizaria o processo de acabamento. Este problema foi solucionado utilizando-se uma ferramenta interna ao tubo, eliminando o efeito citado. A figura 4.1 apresenta as distribuições das linhas de fluxo magnético para materiais paramagnéticos (a), ferromagnéticos (b) e ferromagnéticos com ferramenta interna (c).

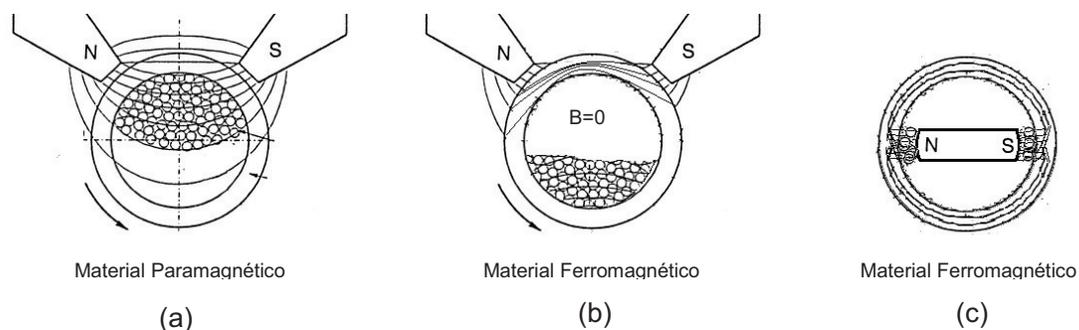


Figura 4.1 Distribuição das linhas de fluxo.

Os parâmetros eletromagnéticos calculados para a realização do experimento foram baseados em alguns valores iniciais de projetos realizados anteriormente. Os valores de densidade de fluxo magnético utilizados em outros projetos variam. Shinmura et al., 1984, sugere um valor para B igual a 1,2 T enquanto Kim et al., 2003 utilizaram um valor de 0,4 T para realizar seus experimentos. Como o projeto deste trabalho tem uma restrição devido espaço limitado para a colocação de espiras dentro do tubo a ser usinado, projetou-se todo o equipamento baseando-se na possibilidade de ter o máximo de espiras que pode ser acoplada à ferramenta sem tocar a superfície interna do tubo. Após verificado que o valor máximo de

espiras (N) é de 400, todos os demais dados foram calculados. A tabela 4.1 apresenta as características do eletroímã desenvolvido.

Tabela 4.1 – Parâmetros eletromagnéticos do eletroímã projetado.

Parâmetro	Valor
Resistência total do enrolamento (400 espiras)	2.0 $\Omega$
Corrente máxima aplicada no fio AWG 21 esmaltado	1.65 A
Tensão aplicada no fio	3.3 V DC
Força magnetomotriz	660 A.rev
Densidade de fluxo magnético B	0.41 T

#### 4.2 Projeto mecânico do equipamento

Um parâmetro importante do processo do acabamento magnético-abrasivo cilíndrico é a vibração axial. Desse modo, uma exigência do processo é a possibilidade de aplicação desta vibração, sendo essencial a definição do mecanismo utilizado para tanto. A solução encontrada foi a utilização de uma guia linear onde a ferramenta é acoplada e a utilização de um sistema manivela-biela, acionado por um eixo excêntrico movido por um motor elétrico.

O equipamento para realizar o processo de acabamento de superfícies internas de tubos foi desenvolvido visando obter duas características principais: bons resultados em relação à rugosidade e remoção de massa dos corpos de prova e fácil utilização do equipamento. A figura 4.2 ilustra o núcleo do eletroímã desenvolvido e sua montagem sobre uma guia linear. O equipamento teve seus componentes confeccionados e montados no laboratório de usinagem da UFRGS. Os parâmetros principais da ferramenta e do processo estão descritos na tabela 4.2

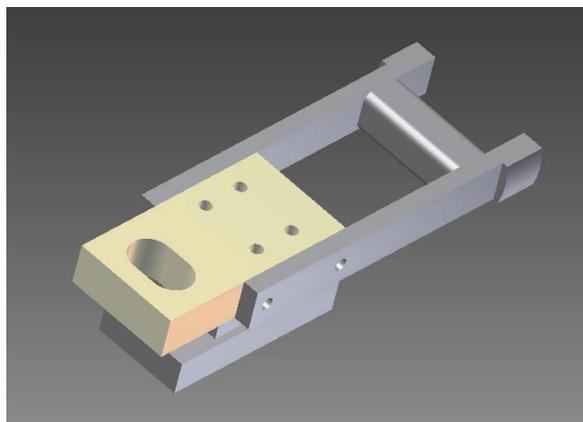


Figura 4.2 Projeto desenvolvido da ferramenta.

Tabela 4.2 – Parâmetros mecânicos e de processo do eletroímã projetado.

Parâmetro	Valor
Frequência do movimento axial da ferramenta	6 Hz
Tensão de alimentação do motor	1,9 V

Amplitude do movimento axial da ferramenta	1,1 mm
Entreferro	1 mm
Distância média $l_c$ na ferramenta	38 mm
Distância média $l_c$ no tubo (CP)	65,97 mm
Área de seção de curto entre ferramenta e pó magnético	100 mm

Para o desenvolvimento do projeto, foi privilegiado o uso de uniões parafusadas e de materiais de fácil obtenção no mercado para facilitar a montagem do equipamento.

Para a realização do movimento alternativo da ferramenta, foi desenvolvido um sistema manivela com eixo excêntrico movido por motor elétrico que permite um movimento com curso de 1,1 mm de amplitude.

A ferramenta responsável pela execução do processo foi confeccionada em aço SAE 1020 e possui um enrolamento de espiras de fio de cobre esmaltado AWG 21. Esta ferramenta é montada sobre um patim para garantir a rigidez do sistema. O suporte que liga o eletroímã ao patim foi confeccionado em alumínio, assim como o eixo excêntrico fixado ao motor elétrico. A biela que realiza o movimento alternativo do equipamento foi fabricada em nylon. Foram escolhidos tais materiais para evitar perda de fluxo magnético em componentes externos ao circuito magnético projetado. As figuras 4.3 e 4.4 apresentam o equipamento montado no torno onde se realiza o experimento.

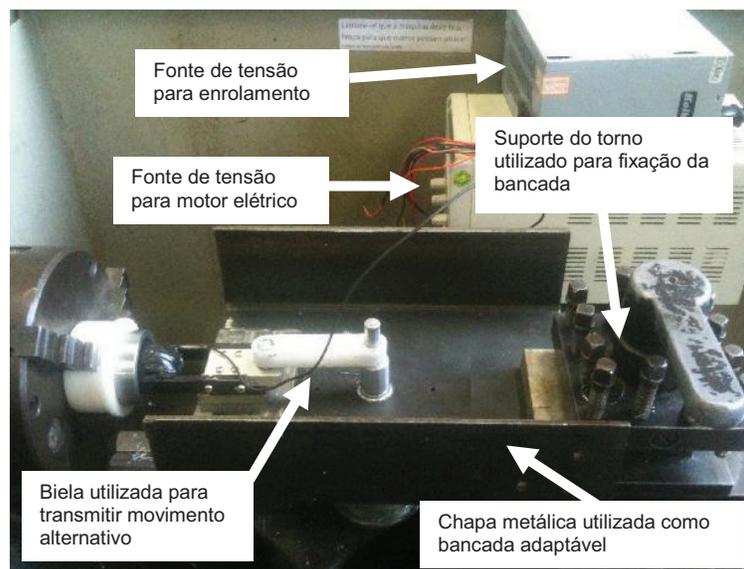


Figura 4.3 Bancada instalada no torno mecânico

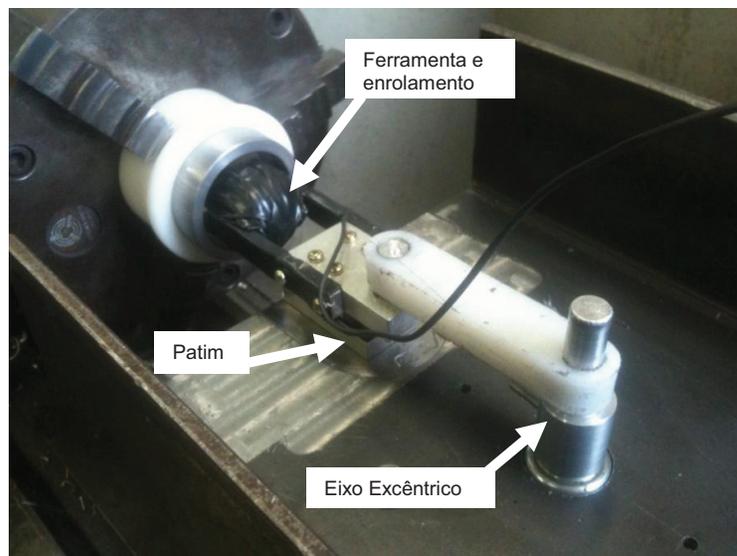


Figura 4.4 Detalhe da ferramenta

## 5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 5.1 Preparação dos ensaios

Para a realização dos ensaios foi utilizado uma mistura de pó de ferro, óxido de alumínio e óleo básico parafínico na proporção 4:1:0,4 em massa, cujas características principais estão descritas na tabela 5.1. A escolha de um óleo de viscosidade elevada foi devido à falta de coesão da mistura durante os testes preliminares do experimento, onde um óleo de menor viscosidade foi testado. A cada experimento, utilizou-se uma quantidade aproximada de 1,1 g da mistura. Ao término de cada ensaio, o pó magnético abrasivo é removido e descartado.

Tabela 5.1 – Características do pó magnético-abrasivo.

Parâmetro	Quantidade
Elemento Abrasivo	Óxido de Alumínio
Diâmetro médio das partículas abrasivas	88,32 $\mu\text{m}$
Elemento ferromagnético	Ferro fundido cinzento
Diâmetro médio das partículas ferromagnéticas	180,58 $\mu\text{m}$
Tipo de óleo Utilizado	PBS33
Viscosidade Cinemática do Óleo 40°C	487,4 cSt

Os corpos de prova foram confeccionados a partir de um tubo de aço SAE 1020, cortados, faceados e usinados em sua superfície interna. O acabamento superficial interno dos corpos de prova foi avaliado através da rugosidade da superfície, expressa através dos parâmetros Ra, Ry, Rz e Rt, utilizando rugosímetro digital *Mitutoyo* modelo *Surftest SJ-201*. Foram realizadas 3 medições da rugosidade em sua superfície em regiões equidistantes 120° no corpo de prova. Também foi medida no ensaio a variação da massa dos mesmos. O instrumento utilizado é uma balança de precisão calibrada com resolução de  $10^{-4}$  g.

## 5.2 Projeto de experimentos

Para a realização dos ensaios, utilizou-se um projeto de experimentos fatorial, com dois parâmetros avaliados em dois níveis, e três repetições para cada condição. Foram utilizados 12 corpos de prova ao todo no experimento. Os parâmetros de processos avaliados são a rotação da peça e o tempo de processamento. A tabela 5.2 apresenta as condições adotadas, onde  $R_{ab}$  o qual “a” é o número do corpo de prova e “b” o número da medição do mesmo e  $M_a$  é a massa medida do corpo de prova “a”:

Tabela 5.2: Parâmetros adotados durante os ensaios.

Tempo (s)	Rotação (RPM)	
	400	800
150	R11, R12, R13, M1	R71, R72, R73, M7
	R21, R22, R23, M2	R81, R82, R83, M8
	R31, R32, R33, M3	R91, R92, R93, M9
300	R41, R42, R43, M4	R101, R102, R103, M10
	R51, R52, R53, M5	R111, R112, R113, M11
	R61, R62, R63, M6	R121, R122, R123, M12

A preparação do corpo de prova no torno é realizada posicionando o mesmo em uma flange de nylon usinada especificamente para este trabalho, que é fixada na placa de castanhas do torno para evitar o fluxo magnético entre o corpo de prova e o mesmo. O pó magnético-abrasivo é posicionado na parte inferior interna da peça ensaiada e então se posiciona a ferramenta até a parte interna da mesma. O alinhamento da ferramenta em relação ao CP é realizado antes de se ligar a máquina, com auxílio de relógio comparador. A fonte de tensão do enrolamento é acionada, seguida pelo motor elétrico responsável pelo movimento axial e, por último, liga-se o torno mecânico.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Análise preliminar dos ensaios

Os ensaios realizados atingiram níveis de acabamento perceptíveis visualmente ao verificar-se diferença entre a região usinada e a que não foi realizada o acabamento superficial. A figura 6.1 demonstra esta diferença.



Figura 6.1 Detalhe da peça após usinagem

## 6.2 Análise dos Resultados

A figura 6.1 demonstra a variação média nos valores da massa removida em função do tempo de usinagem e rotação:

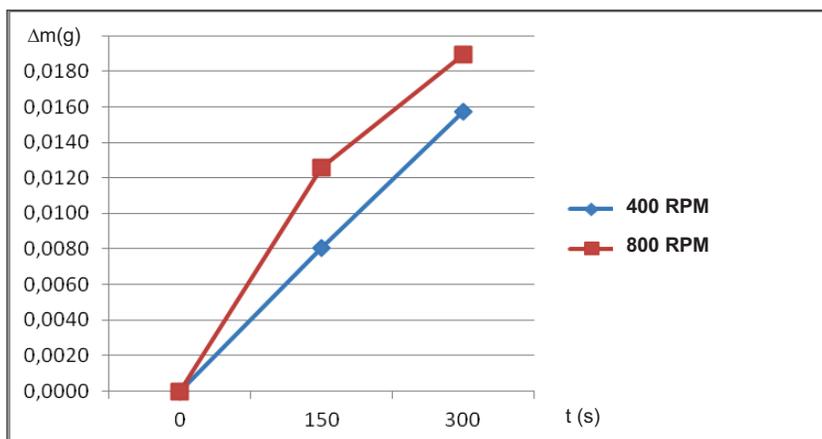


Figura 6.1 Gráfico de Variação da massa (g) x tempo (s).

A relação direta entre tempo de processamento e remoção de material é verificada através da análise da figura 6.1 e comprovada através da análise de variância dos dados obtidos. O experimento realizado permite definir como significativo o parâmetro tempo em relação a quantidade de material removido.

O estudo de Wang, 2004, demonstra a relação direta entre a velocidade rotacional e a taxa de remoção de material e a análise dos dados reforça os resultados do autor. Entretanto, devido a alta dispersão dos dados obtidos, não foi possível validar a significância da rotação nos resultados da variação da massa.

O processo, entretanto, é eficaz quanto aos resultados, pois atingiu uma média de 0,014 g de material removido nas 4 condições ensaiadas. A tabela 6.1 apresenta os valores encontrados de variação de massa durante a realização dos experimentos para todas as condições ensaiadas.

Tabela 6.1: Variação da massa  $\Delta m$  (g) dos corpos de prova durante os ensaios.

Tempo (s)	Rotação (RPM)	
	400	800
150	0,0008	0,0192
	0,0123	0,0087
	0,0111	0,0099
300	0,0104	0,0164
	0,0193	0,0228
	0,0174	0,0176

A figura 6.2 apresenta a relação entre rotação, tempo de usinagem utilizados nos experimentos e variação na rugosidade superficial  $R_a$  obtida:

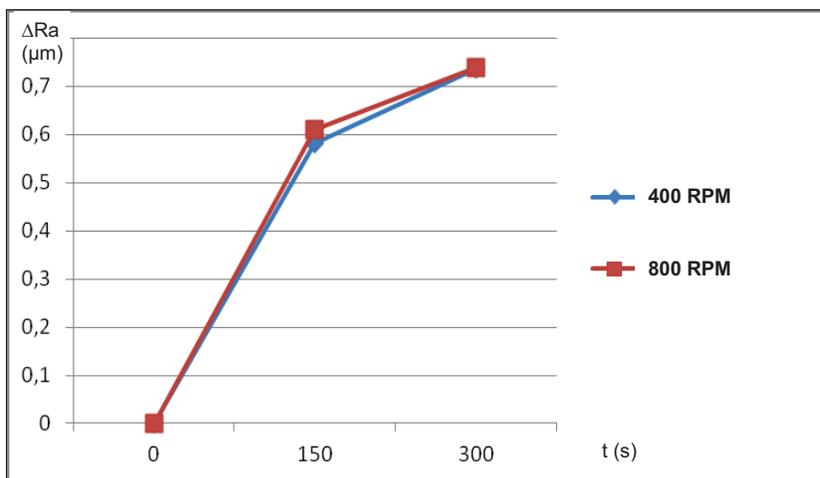


Figura 6.2 Gráfico de Variação da rugosidade ( $\mu m$ ) x tempo (s).

A maior redução de rugosidade foi observada nos primeiros 150 segundos de experimento. Além disso, a curva demonstra uma tendência à saturação do processo com o aumento do tempo. Esse resultado concorda com o encontrado por Shinmura, 1989, que observou que o valor da rugosidade se reduz até 300 segundos de operação e, posteriormente, estabiliza. Também pode ser verificado que a rotação utilizada influenciou pouco no resultado, pois tanto com 400 quanto 800 RPM foram atingidos valores similares de redução de rugosidade no mesmo período de usinagem.

A análise da variação da rugosidade para os parâmetros  $Ra$ ,  $Ry$ ,  $Rz$  e  $Rt$  não permitiu definir como significativo nenhum dos parâmetros devido a variação dos resultados de rugosidade encontrados para as condições em que foram realizados os ensaios. Singh, 2004, entretanto, identificou influência significativa da velocidade rotacional sobre a rugosidade. Novamente, a dispersão dos resultados encontrados não permitiu atribuir significância dos parâmetros tempo ou rotação ao processo quanto à rugosidade superficial.

A alta dispersão dos resultados encontrados, que pode ser verificado nos apêndices I e II do presente trabalho, pode ser atribuída a diversos fatores como falta de controle quanto à quantidade ou posicionamento do pó magnético abrasivo na ferramenta, ou ainda às condições iniciais em que foram preparados os corpos de prova.

Tabela 6.2: Variação da rugosidade  $\Delta Ra$  ( $\mu m$ ) dos corpos de prova durante os ensaios.

Tempo (s)	Rotação (RPM)	
	400	800
150	0,12	1,44
	1,43	0,20
	0,19	0,19
300	0,15	0,19
	1,04	1,46
	1,02	0,56

## 7 CONCLUSÕES

No presente trabalho, um aparato experimental foi desenvolvido visando a aplicação do processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico a superfícies internas de tubos ferromagnéticos. Através do procedimento experimental executado, é possível concluir que o processo realizado utilizando ferramenta interna para a execução do processo de acabamento magnético-abrasivo cilíndrico interno em materiais ferromagnéticos é aplicável.

Através de uma ferramenta de baixo custo e de simples fabricação foi possível realizar a usinagem dos corpos de prova com resultados satisfatórios, conforme o objetivo do projeto.

A validação da significância do tempo de usinagem quanto a remoção de material está de acordo com a literatura existente.

A importância de parâmetros não controlados como a distribuição do pó na superfície da peça é sugerida no projeto devido a alternância de altos e baixos valores de variação da rugosidade e massa encontrados. O controle destes parâmetros poderá permitir ao processo a validação da significância dos parâmetros tempo e rotação da peça no processo estudado.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar o experimento com corpos de prova com valores menores e menos dispersos de Ra para verificar a sua eficiência em faixas mais próximas aos processos de retificação e polimento e reduzir efeitos de ondulação da superfície.
- Realizar experimentos com tempos de usinagem mais longos para evidenciar as curvas de saturação de  $\Delta Ra$  e da  $\Delta m$ .
- Realizar novos experimentos controlando a dispersão do pó durante o processo de acabamento. Avaliar métodos de alimentação do pó com maior possibilidade de controle.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorim, H.J.; Cândido, L.H.A.; Lorini, F.J.; **“Influência da granulometria do pó de ferro e de alumina, da rotação e do tempo de processamento no acabamento magnético abrasivo cilíndrico de aços médio carbono”**, Anais do CONEM, 2006.

Amorim, H. J.; Lorini, Flávio J.; **“Estudo da influência da frequência de vibração no processo de acabamento magnético abrasivo cilíndrico externo”**. Anais do COBEM, 2009.

Gomes, M.S. **“Desenvolvimento de um dispositivo para a execução do processo de acabamento magnético abrasivo cilíndrico externo auxiliado por vibração”**, Trabalho de diplomação, DEMEC/UFRGS, 2007.

Jain, V.K., Prashant Kumar, Behera, P.K., Jayswal S. C. **“Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process”**, Wear 250, 2001.

Kim, J., **“Polishing of Ultra-clean Inner Surface Using Magnetic Force”**, Journal of Advanced manufacturing Technology, 2003.

Leonhardt, C. "**Desenvolvimento e estudo do processo de acabamento por abrasão eletromagnética**". Trabalho de Diplomação, DEMEC/UFRGS, 2004.

Mori, T., Hirota, K., Kawashima, Y., "**Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism**", Journal of Materials Processing Technology, 2003.

Olivieri, J.C, "**Incerteza de medição**" <http://jcolivieri.sites.uol.com.br/incerteza.htm#1>, acessado em 22/11/12.

Shinmura, T., Aizawa, T. "**Study on internal finishing of a non-ferromagnetic tubing by abrasive machining process**", Bull Japan Society of Precision Engineering, 1989.

Shinmura, T., Takazawa, K., Hatano, E., Aizawa, T. "**Study on Magnetic-Abrasive Process**", Bull Japan Society of Precision Engineering, 1984.

Singh, Dharendra K., Jain, V.K., Raghuram, V., "**Parametric study of magnetic abrasive finishing process**", Wear 259, 2004.

Wang, D., Shinmura, T., Yamagushi, H., "**Study of magnetic field assisted mechanochemical polishing process for inner surface of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic components Finishing characteristics under wet finishing using distilled water**", Journal of Machine tools and Manufacture, 2004.

Wentworth, Stuart M., "**Fundamentos de eletromagnetismo com aplicações em engenharia**", LTC, 1ª edição, 2006.

Wikipedia, "**Gaiola de Faraday**", [http://pt.wikipedia.org/wiki/Gaiola\\_de\\_Faraday](http://pt.wikipedia.org/wiki/Gaiola_de_Faraday), acessado em 05/12/12.

Yamaguchi, H., Shinmura, T. "**Study of the surface modification resulting from an international magnetic abrasive finishing process**", Journal of the international Societies for Precision engineering and Nanotechnology, 1999.

## Apêndice I – Tabela das medições realizadas

CP	Massa (g)	Ra (µm) 1	Ra (µm) 2	Ra (µm) 3	Ra (µm) médio	Ry (µm) 1	Ry (µm) 2	Ry (µm) 3	Ry (µm) médio	Rz (µm) 1	Rz (µm) 2	Rz (µm) 3	Rz (µm) médio	Rt (µm) 1	Rt (µm) 2	Rt (µm) 3	Rt (µm) médio
1	112,2424	5,6700	6,1900	6,4900	6,1167	33,6400	43,3100	39,8100	38,9200	29,8000	36,2700	38,9300	35,0000	33,6400	43,4100	46,2000	41,0833
2	109,3854	6,8900	6,9000	6,6900	6,8267	51,4900	42,6500	50,1500	48,0967	40,2400	38,9000	42,4400	40,5267	51,4900	44,6300	53,1200	49,7467
3	109,3092	6,6700	6,7600	6,6700	6,7000	31,7900	32,0600	32,6900	32,1800	31,0900	31,0000	30,9800	31,0233	32,3900	32,9800	32,6900	32,6867
4	109,0139	7,0800	5,5000	5,7100	6,0967	44,6300	32,7300	35,7500	37,7033	42,4200	30,3700	34,1400	35,6433	45,8500	33,4000	35,9400	38,3967
5	108,2847	5,6000	5,3200	5,8000	5,5733	32,1200	30,2300	34,5300	32,2933	31,0600	29,9200	32,7300	31,2367	33,4000	30,6500	37,7100	33,9200
6	110,5940	7,4900	6,1500	6,7600	6,8000	49,2600	35,9500	45,8600	43,6900	46,2400	34,2700	38,2200	39,5767	49,95	36,2300	45,8600	41,0450
7	109,4369	6,5900	6,2800	6,4900	6,4533	36,6600	32,3900	34,5200	34,5233	34,7700	31,2300	32,6600	32,8867	36,6600	32,3900	34,5200	34,5233
8	111,4206	6,9700	7,1600	7,7800	7,3033	31,8300	31,9500	32,4100	32,0633	29,7000	30,1700	32,1100	30,6600	32,1200	32,2400	33,7700	32,7100
9	108,9470	6,2400	7,3400	7,3800	6,9867	34,3700	39,6500	37,6000	37,2067	30,0000	34,1200	32,8100	32,3100	35,1200	39,6500	37,6000	37,4567
10	109,1980	6,4500	7,3500	6,8200	6,8733	32,6100	32,3200	30,8400	31,9233	29,0500	31,1200	29,5400	29,9033	32,6100	32,3600	32,3400	32,4367
11	110,6816	5,7900	5,8400	5,9600	5,8633	33,1000	33,7400	32,8700	33,2367	32,6600	33,5700	31,1300	32,4533	34,6900	36,0400	33,8500	34,8600
12	108,7293	8,0500	7,6800	7,3700	7,7000	59,8400	44,3000	55,4500	53,1967	50,5000	43,4100	48,4600	47,4567	59,8400	48,5900	55,4500	54,6267
CP	Massa (g)	Ra (µm) 1	Ra (µm) 2	Ra (µm) 3	Ra (µm) médio	Ry (µm) 1	Ry (µm) 2	Ry (µm) 3	Ry (µm) médio	Rz (µm) 1	Rz (µm) 2	Rz (µm) 3	Rz (µm) médio	Rt (µm) 1	Rt (µm) 2	Rt (µm) 3	Rt (µm) médio
1	112,2416	6,3900	6,2700	5,3300	5,9967	44,8600	39,5400	31,2400	38,5467	37,2200	35,2700	26,6400	33,0433	44,8600	43,3500	31,2400	39,8167
2	109,3731	5,5500	4,9700	5,6800	5,4000	31,1900	25,5000	36,0000	30,8967	27,6200	25,1900	31,6000	28,1367	31,1900	25,5000	37,5900	31,4267
3	109,2981	6,4700	6,6100	6,4400	6,5067	32,8500	37,0000	28,9300	32,9267	29,3200	31,4900	28,0200	29,6100	32,8500	37,6500	29,4500	33,3167
4	109,0035	5,4200	5,8000	6,6300	5,9500	28,5200	34,6800	40,6100	34,6033	27,1800	33,0100	36,3100	32,1667	29,8300	34,9000	41,0000	35,2433
5	108,2654	4,1900	4,7700	4,9400	4,5333	21,4500	24,4600	27,3300	24,4133	20,9400	22,3900	24,8100	22,7133	22,3800	24,4600	26,8800	24,5733
6	110,5766	5,9400	6,0100	5,3800	5,7767	37,7500	41,6400	36,4200	38,6033	32,6100	33,6400	28,7500	31,6667	37,7500	41,6400	36,4200	38,6033
7	109,4177	4,8100	5,1700	5,0500	5,0100	24,2700	30,4000	22,3200	25,6633	20,8200	25,2100	20,8600	22,2967	24,2700	30,4000	22,3200	25,6633
8	111,4119	7,3200	6,8100	7,1800	7,1033	31,7400	28,7900	33,4100	31,3133	30,9600	28,1300	31,5000	30,1967	32,1100	28,7900	33,4400	31,4467
9	108,9371	7,6000	6,2400	6,5600	6,8000	31,4600	32,1100	31,4100	31,6600	29,1400	29,5100	29,9600	29,5367	31,4600	33,2600	31,4100	32,0433
10	109,1816	6,7300	6,9400	6,3800	6,6833	35,1800	31,8400	30,1200	32,3800	30,8500	30,3200	28,5100	29,8933	35,1800	31,8400	30,1200	32,3800
11	110,6588	4,4100	4,4800	4,3100	4,4000	27,0600	25,0900	22,9100	25,0200	20,9100	21,0000	20,1900	20,7000	27,0600	25,0900	23,1400	25,0967
12	108,7117	7,2900	6,7100	7,4100	7,1367	42,9000	46,7500	51,8300	47,1600	42,3700	43,0400	42,4400	42,6167	43,6600	54,1200	51,8300	49,8700

Estado Inicial

Estado Final

Apêndice II – Tabela dos dados calculados

CP	Tempo	RPM	$\Delta m$ (g)	$\Delta Ra$ ( $\mu m$ )	$\Delta Ry$ ( $\mu m$ )	$\Delta Rz$ ( $\mu m$ )	$\Delta Rt$ ( $\mu m$ )
1	150,0000	400,0000	0,0008	0,1200	0,3733	1,9567	1,2667
2	150,0000	400,0000	0,0123	1,4267	17,2000	12,3900	18,3200
3	150,0000	400,0000	0,0111	0,1933	-0,7467	1,4133	-0,6300
4	300,0000	400,0000	0,0104	0,1467	3,1000	3,4767	3,1533
5	300,0000	400,0000	0,0193	1,0400	7,8800	8,5233	9,3467
6	300,0000	400,0000	0,0174	1,0233	5,0867	7,9100	2,4417
7	150,0000	800,0000	0,0192	1,4433	8,8600	10,5900	8,8600
8	150,0000	800,0000	0,0087	0,2000	0,7500	0,4633	1,2633
9	150,0000	800,0000	0,0099	0,1867	5,5467	2,7733	5,4133
10	300,0000	800,0000	0,0164	0,1900	-0,4567	0,0100	0,0567
11	300,0000	800,0000	0,0228	1,4633	8,2167	11,7533	9,7633
12	300,0000	800,0000	0,0176	0,5633	6,0367	4,8400	4,7567
Média			0,0138	0,6664	5,1539	5,5083	5,3343