

A quantidade  $X(i\omega)$  é a transformada de Fourier de uma função periódica  $x(t)$ , e as equações 24 e 25 são denominadas como par da transformada de Fourier.

$$X(i\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\varepsilon) \cdot e^{i\omega \cdot \varepsilon} d\varepsilon \quad (24)$$

$$x(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(i\omega) \cdot e^{i\omega \cdot \varepsilon} d\omega \quad (25)$$

Vibrações, geralmente variam de uma maneira aleatória e a característica de uma função aleatória é a de que não se pode fazer um prognóstico do seu valor instantâneo num sentido determinista. As vibrações aleatórias geralmente não são periódicas, de modo que a análise de frequência requer o uso da integral de Fourier. As transformadas de Fourier permitem um tratamento mais extensivo do problema da vibração aleatória (THOMSON, 1978).

A transformada de Fourier (ou “*Fast Fourier Transform*” – *FFT*) é um algoritmo computacional mais eficiente e mais rápido que a Transformada Discreta de Fourier (*DFT*), gerando espectros de frequência, a partir de sinais no tempo, através de um analisador espectral, conforme Figura 49 (NÓBREGA, 2004).

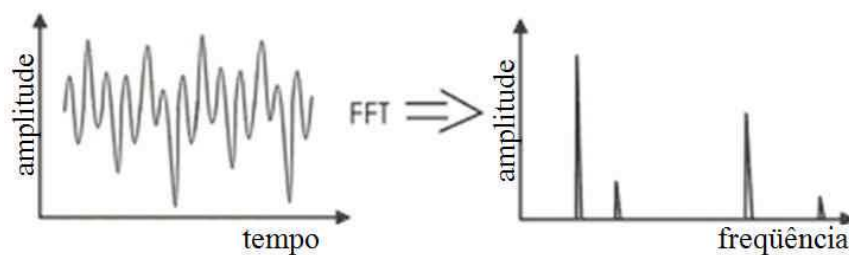


Figura 49 – Sinal do tempo e espectro de frequência obtido após *FFT* (NÓBREGA, 2004).

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Os experimentos realizados no presente trabalho foram desenvolvidos no laboratório de usinagem da Universidade de Taubaté e na unidade de produção UP9 da empresa Schaeffler Brasil Ltda. Nesse capítulo, são descritos os materiais e métodos empregados na execução dos ensaios, apresentando o detalhamento das condições e técnicas adotadas. Tais métodos tinham como objetivo, permitir a captação das variáveis de saída da melhor forma possível. As variáveis de saída analisadas foram os sinais de vibração, captados de maneira direta por meio da instalação de sensor piezo-elétrico na régua de apoio da máquina e a circularidade que exigiu medições nos corpos de peças retificadas, considerando como variável indireta.

Vale ressaltar que os ensaios foram realizados com finalidade de analisar a influência do ângulo de topo da régua de apoio, ângulo de tangência e frequência natural da máquina, na circularidade da peça. Antes de iniciar os ensaios propriamente ditos, foi elaborado um estudo com o objetivo de conhecer a frequência natural da máquina.

#### **3.1 Equipamentos utilizados**

Os ensaios para análise da frequência natural da máquina e suas influências na circularidade da peça foram conduzidos em uma retificadora centerless Mikrosa modelo SASL 125 x 250 (Figura 50) com rotação máxima do rebolo de corte 1.750 rpm e 400 rpm para o rebolo de arraste, instalada no laboratório de usinagem da Universidade de Taubaté. Para avaliar a influência do ângulo de topo e ângulo de tangência na circularidade da peça foi utilizada uma retificadora centerless de passagem, modelo Herminghausen SR4 com rotação máxima do rebolo de corte de 1.750 rpm e 400 rpm o arraste, instalada na unidade de produção UP9 da empresa Schaeffler Brasil Ltda, conforme apresentada na Figura 51.



Figura 50 – Retificadora centerless de passagem SASL



Figura 51 – Retificadora Centerless de passagem SR4

## 3.2 Ferramentas utilizadas nos experimentos

### 3.2.1 Rebolos de corte e arraste

Os rebolos de corte e arraste utilizados para a retificação dos corpos-de-prova, tanto para retificadora SR4 como a retificadora Mikrosa foram os seguintes:

Rebolos de corte convencional em carbeto de silício ( $SiC$ ) com granulação 120 e dureza T e rebolo de arraste AR120, ambos da empresa SIVAT Abrasivos.

### 3.2.2 Dressadores

As operações de dressagem dos rebolos foram mantidas constantes para todos os ensaios. Para tanto, utilizou-se um dressador do tipo conglomerado com dimensões 10x4x10mm para o rebole de corte e dressador natural de ponta única de diamante (20 quilates) para dressagem do rebole de arraste.

### 3.2.3 Régua de apoio

Para análise da influência do ângulo de topo da régua no erro de forma geométrica e valor da circularidade da peça, foram utilizadas 04 régua de apoio com diferentes ângulos,  $\beta = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$  e  $30^\circ$ , Figura 52.



Figura 52 - Régua de apoio

### 3.3 Material dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova com dimensões de 4,9 mm x 16,4 mm; 10,0 mm x 16,8 mm e 16,0mm x 24,0 mm (Figuras 53 a-c), material 100 Cr6 temperado e revenido com dureza de 60 HRC foram utilizados para realizar os experimentos.

Para análise da influência do ângulo de tangência e ângulo de topo da régua de apoio na circularidade da peça, foram utilizados 100 corpos-de-prova para cada experimento. Para análise de vibração, onde determinou a frequência natural e influência desta no erro de forma

geométrica, foram utilizados 50 corpos-de-prova para cada ensaio. Em todos os ensaios o sobremetal para retificação do corpo-de-prova foi de 0,1mm no diâmetro.

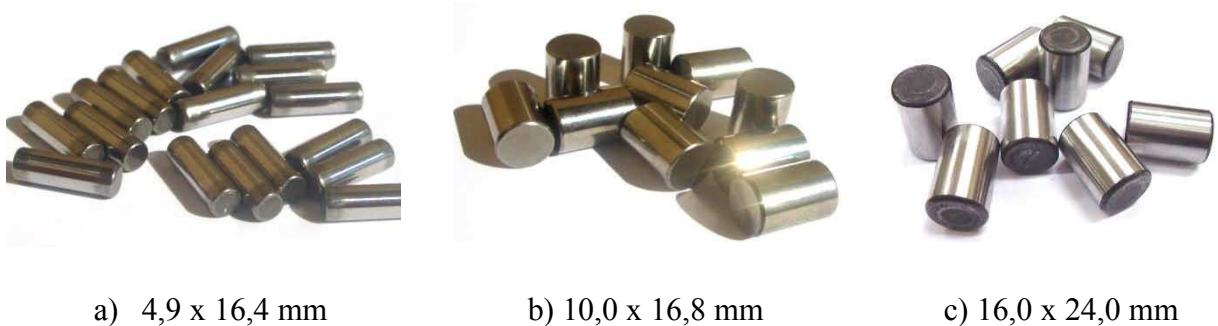


Figura 53 – Corpos-de-prova utilizados nos experimentos

### 3.4 Instrumentos de Medição

As medições da circularidade dos corpos-de-prova foram realizadas no laboratório de qualidade da Unidade de Produção UP9 da Schaeffler Brasil Ltda, utilizando-se um circularímetro, modelo MWA 100 B desenvolvido pelo centro de tecnologia da SKF, aferido e calibrado antes do início das medições, conforme apresentados na Figura 54. Para cada ensaio realizado, 5 amostras foram retiradas para medir o valor da circularidade e verificar o formato da seção transversal.

As amostras foram limpas com álcool antes de cada medição, para evitar que pequenas partículas abrasivas influenciassem na medição desta variável.



Figura 54 – Circularímetro *MWA 100B*

Para medição da circularidade, foi convencionado posicionar a ponta de medição no centro da peça, conforme a Figura 55.



Figura 55 – Medição da circularidade

### 3.5 Parâmetros de ajustagem da máquina

Para cada tipo de ensaio realizado utilizou-se diferentes parâmetros de entrada. A seguir, são apresentados e caracterizados todos os parâmetros de entrada utilizados nesse trabalho.

#### 3.5.1 Influência do ângulo de tangência

Na Tabela 07 são apresentadas a ordem de condução dos ensaios e valores do ângulo de tangência para análise da influência deste na circularidade do material retificado.

Para estes ensaios, as seguintes condições de usinagem foram utilizadas para retificar o produto 4,9 x 16,4 mm:

- Velocidade periférica do rebolo de corte: 45 m/s;
- Rotação do rebolo de arraste: 200 rpm;
- Inclinação do rebolo de arraste: 2,6°;
- Ângulo de dressagem: 2,54°;
- Ângulo de topo da régua de apoio: 20°;
- Diâmetro do rebolo de corte: 400 mm;

- Diâmetro do rebolo de arraste: 350 mm;
- Diâmetro inicial do corpo-de-prova: 5,0 mm.

Tabela 07 – Ordem de realização dos ensaios

<b>Ordem dos ensaios</b>	<b>Ensaio</b>	$\gamma$ [°]	$h_w$ [mm]	$h_d$ [mm]
5°	1°	0°	0,00	0,00
1°	2°	1°	1,57	1,57
6°	3°	2°	3,13	3,04
9°	4°	3°	4,70	4,61
3°	5°	4°	6,27	6,18
10°	6°	5°	7,84	7,65
12°	7°	6°	9,40	9,22
4°	8°	7°	10,97	10,79
2°	9°	8°	12,54	12,27
7°	10°	9°	14,11	13,84
8°	11°	10°	15,67	15,41
11°	12°	10,5°	16,45	16,88

Foram realizados 12 ensaios, variando o ângulo de tangência e a altura do corpo-de-prova em relação ao centro do rebolo de corte e altura do dressador de ponta única. A cada variação da altura do dressador foi necessária a dressagem do rebolo de arraste para manter a geometria desejada e garantir a trajetória retilínea da peça ao longo do vão de retificação. Para manter a mesma ação do corte, o rebolo de corte foi dressado a cada ensaio.

### 3.5.2 Influência do ângulo de topo da régua de apoio

Para estes ensaios, as seguintes condições de usinagem foram utilizadas:

- Velocidade periférica do rebolo de corte: 45 m/s;
- Rotação do rebolo de arraste: 200 rpm;
- Inclinação do rebolo de arraste: 2,6°;
- Ângulo de dressagem: 2,54°;
- Ângulo de tangência: 10,5°;
- Altura do dressador: 16,2 mm;
- Diâmetro inicial da peça: 5,0 mm;
- Diâmetro do rebolo de corte: 400 mm;
- Diâmetro do rebolo de arraste: 350 mm;
- Ferramenta de dressagem: dressador conglomerado (seção retangular),  $b_d = 10\text{mm}$ .

Foram realizados 4 ensaios, utilizando réguas de apoio com os seguintes ângulos de topo: 15°, 20°, 25° e 30°.

Para estes ensaios, o rebolo de arraste foi dressado somente durante ajustagem da máquina e o rebolo de corte dressado a cada ensaio.

### 3.5.3 Influência da frequência natural da máquina

Com finalidade de verificar a influência da frequência natural da máquina no formato circular (contorno) dos corpos-de-prova, foram realizados experimentos com diversas rotações do rebolo de arraste, fazendo com que o produto entre velocidade angular dos corpos-de-prova e um determinado valor do número de ondulações coincidissem com a faixa da frequência natural da máquina. Foram utilizados dois tipos de corpos-de-prova, com as seguintes dimensões 10,0 x 16,8 mm e 16,0 x 24,0 mm.

As seguintes condições de usinagem foram adotadas:

- Velocidade periférica do rebolo de corte: 45 m/s;
- Inclinação do rebolo de arraste: 2°;



- Ângulo de dressagem: 1,9°;
- Ângulo de tangência: 10°;
- Altura do dressador: 17 mm;
- Ferramenta de dressagem: dressador conglomerado (seção retangular),  $b_d = 10$  mm.

### 3.6 Aquisição e processamento dos sinais

A aquisição de dados deu-se com intuito de determinar a frequência natural do sistema a fim de avaliar a influência desta no formato circular da peça. A emissão acústica gerada foi medida por intermédio de um sensor piezo-elétrico do fabricante PCP conectado na lateral da régua de apoio (Figura 56) de uma retificadora centerless de passagem do fabricante MIKROSA, modelo SASL 125x250, instalada no laboratório de Usinagem da Universidade de Taubaté.

A Figura 57 apresenta o banco de ensaios com os instrumentos utilizados para aquisição de sinais. Os dispositivos utilizados para o sistema de aquisição de dados foram:

- (1) Sensor Piezo-elétrico PCB;
- (2) Computador com *software* LAB VIEW 7.1;
- (3) Amplificador de sinal PCB Piezotronics, modelo 482A 16;
- (4) Placa de aquisição de dados, modelo 16-Bit, 400 kS/s M Series MIO DAQ, Bus-Powered da National Instruments.



Figura 56– Sensor conectado à régua de apoio

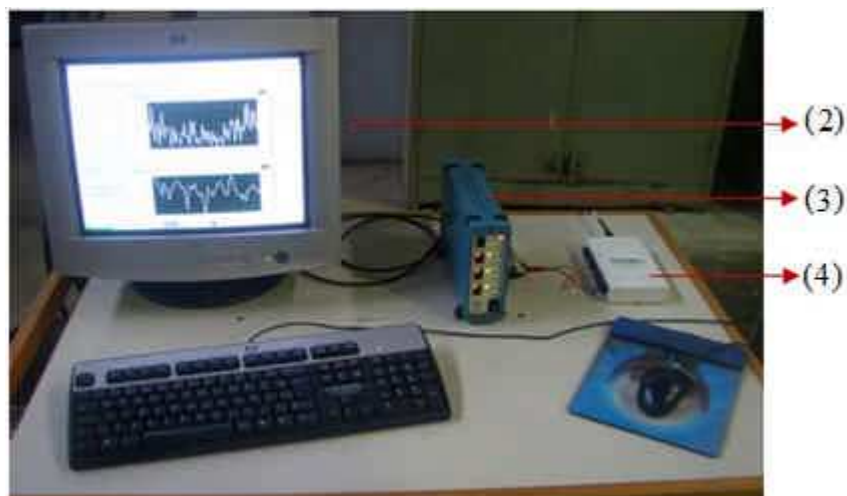


Figura 57 – Sistema de aquisição de dados

Para aquisição do sinal bruto de vibração desenvolveu-se um programa utilizando o *software* Labview 7.1, conforme apresentado no apêndice A. Neste trabalho, utilizou-se um programa bastante simples que lia o sinal adquirido e apresentava-o em uma janela, com armazenamento no computador. A placa de aquisição foi configurada via *software*, utilizando-se o *NIDAQ Channel Wizard da National Instruments*. Nos ensaios, utilizou-se entrada analógica com campo de trabalho bipolar  $\pm 5$  V. Do sinal puro de emissão acústica, foram extraídos valores de frequência utilizando-se rotinas com auxílio do *software* Scilab-4.1.2, conforme apêndice B.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, será exposto o *software* desenvolvido para determinar os parâmetros que envolvem a ajustagem de uma retificadora centerless de passagem, o valor da frequência natural da retificadora centerless, obtido a partir da aquisição de dados e os resultados obtidos nos ensaios experimentais para verificação da circularidade em função da variação dos ângulos de topo da régua inferior, ângulo de tangência e frequência natural da máquina.

Ressalta-se que nas Figuras estão representados os valores médios do erro de circularidade obtidos para cada ensaio.

### 4.1 *Software paramétrico*

A principal dificuldade na regulagem de uma retificadora centerless de passagem está definição de uma estratégia para dressagem do rebolo de arraste e de corte, determinação dos valores ideais do ângulo de topo da régua de apoio e ângulo de tangência, que define a altura “hw” da peça no vão de retífica e as características de circularidade (MEIS, 1980; REEKA, 1967). É nesse contexto que se destaca a necessidade da utilização de um *software* para determinar os parâmetros que envolvem o processo.

O *software* paramétrico foi desenvolvido com objetivo de facilitar a compreensão de fenômenos que ocorrem no processo de retificação centerless de passagem, determinar todos os parâmetros necessários para ajustagem da máquina, gerar perfis dos rebolos de corte e arraste. O *software* contém catálogo com informações úteis para solucionar possíveis falhas e melhorar o processo, recomendações para dressagem dos rebolos de corte e arraste e dados de controle do processo.

Conforme Gonçalves e Miranda (2007), o *software* possibilita verificar o número de ondulações obtido pela peça após a retificação, através de um gráfico bidimensional de contorno gerado a partir do teorema da estabilidade, conforme mostrado na Figura 41. A

Figura indica regiões estáveis e instáveis para cada combinação do ângulo de tangência e ângulo de topo da régua de apoio. As áreas no mapa de estabilidade que apresentam maior número de ondulações “Z” são consideradas como estáveis, ou seja, é possível escolher valor de “ $\gamma$ ” para uma régua de apoio com um determinado ângulo de topo em que a peça obtém após retificação melhor circularidade

Parâmetros como altura entre centros, ângulo de dressagem, altura do dressador, velocidade de passagem, além de dados de controle do processo, como taxa de remoção de material, velocidade de passagem, ângulos de tangência dos rebolos de corte e arraste são determinados pelo *software*.

A primeira parte do *software*, Figura 58, constitui o ambiente para entrada de dados: diâmetro dos rebolos, ângulo do rebolo de arraste, comprimento do produto a ser retificado, sobremetal e rotação dos rebolos de corte e arraste.

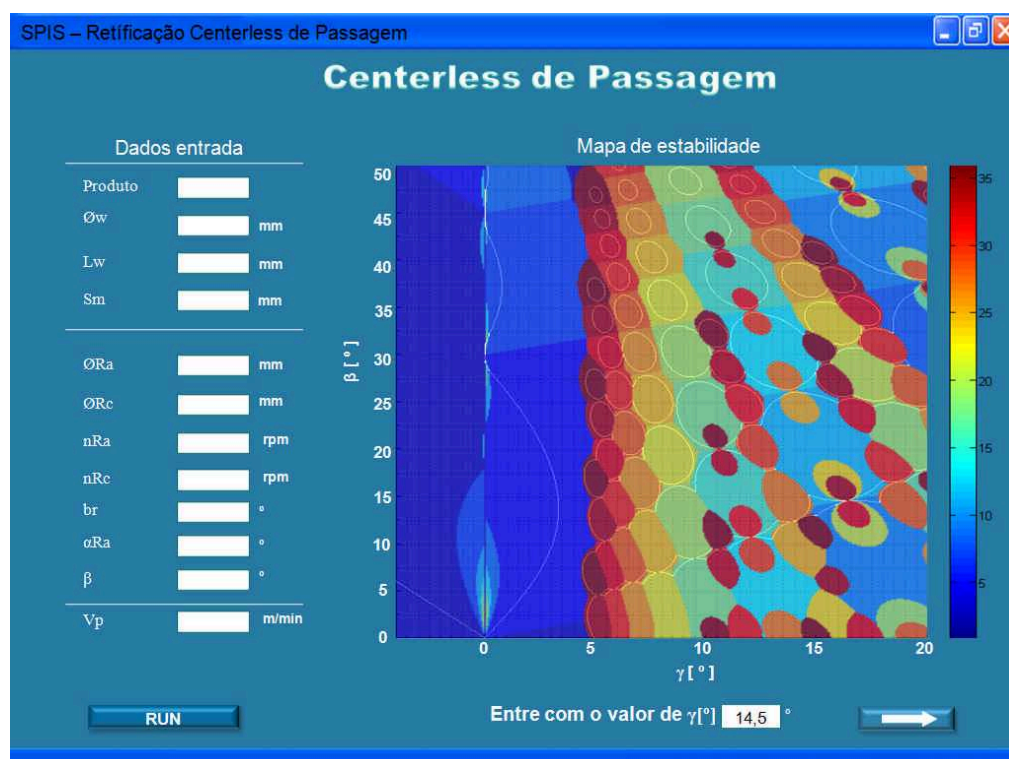


Figura 58 – Entrada de dados do *software* e mapa de estabilidade

Após definição dos dados de entrada gera-se o mapa de estabilidade que define regiões em que é caracterizada a estabilidade do processo. Permite, assim, escolher o valor ideal do ângulo de tangência em função do ângulo de topo da régua a ser utilizada. Esse mapeamento foi baseado nos estudos realizados por Reeka (1967), apresentando-o como “teoria da estabilidade”.

A segunda parte do *software*, Figura 59, determina todos os outros parâmetros necessários para ajustagem do processo de retificação, isto é: altura entre centros, altura do dressador do rebolo de arraste, ângulo de dressagem, os dados para controle do processo, permitindo visualizar o perfil dos rebolos de arraste e corte e por meio do botão “help” acessar o catálogo contendo informações e recomendações para aperfeiçoar o processo.

Antes de utilizar o *software* para cálculo dos parâmetros de usinagem, o processo de retificação centerless de passagem deve ser compreendido para que possa ser produtivo, lucrativo e garanta as qualidades superficiais e dimensionais das peças.

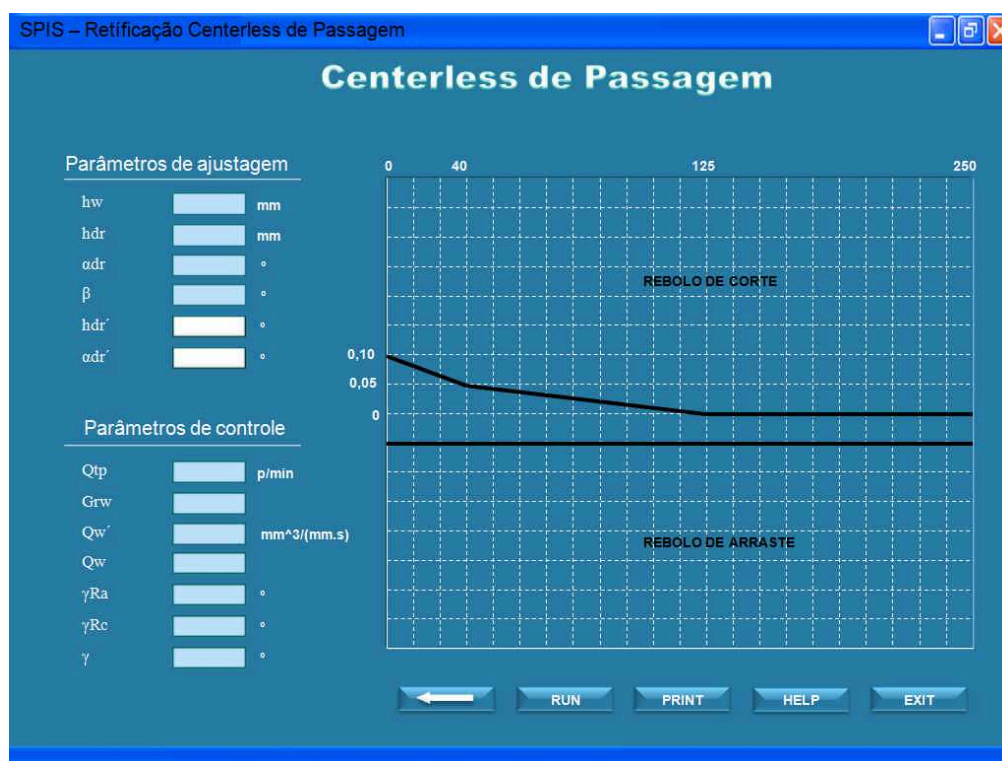


Figura 59 – Dados de saída do *software*

#### 4.1.1 Utilizando o *SPIS* “passo-a-passo”

O “*SPIS*”, *software* paramétrico para retífica centerless de passagem, desenvolvido em *Java* e associado ao *Matlab*, provém de inúmeras possibilidades para otimização do processo de retificação centerless de passagem. Ao ser executado, o “*SPIS*” abre a janela principal que permite ao usuário inserir os dados do processo e gerar mapa de estabilidade.

Para facilitar a utilização do *software* é importante mostrar “passo-a-passo” como trabalhar em cada janela.

A janela principal possui campos de entrada de dados, onde estes são inseridos as unidades de medida, indicadas em frente ao campo de preenchimento de cada dado, conforme mostrado na Figura 60.

Produto	50x100	
Øw	50	mm → Diâmetro da peça
Lw	100	mm → Comprimento da peça
Sm	0,05	mm → Sobremetal
<hr/>		
ØRa	700	mm → Diâmetro do rebolo de arraste
ØRc	200	mm → Diâmetro do rebolo de corte
nRa	150	rpm → Rotação do rebolo de arraste
nRc	1750	rpm → Rotação do rebolo de corte
br	300	° → Comprimento do rebolo de arraste
αRa	3	° → Inclinação do rebolo de arraste
β	20	° → Ângulo de topo da régua de apoio
Vp	23	m/min → Velocidade de passagem
<input type="button" value="RUN"/>		

Figura 60 – Entrada de dados no “*SPIS*”

Em seguida, mova o cursor do *mouse* e clique em “*RUN*”. Após executar essa função, será feito o cálculo pelo software do valor da velocidade de passagem da peça e apresentará o mapa de estabilidade geométrica, conforme indicado na Figura 61.

O mapa de estabilidade fornece ao usuário informações úteis, permitindo escolher o melhor ângulo de tangência de acordo com o ângulo de topo da régua de apoio da máquina.



Para o exemplo dado, sendo  $\beta = 40^\circ$  os valores ideais de “ $\gamma$ ” são  $10,5^\circ$  e  $14,5^\circ$ , onde estes valores representam regiões com valores de “ $Z$ ” maiores que 30. É importante salientar que o processo é considerado estável para valores de “ $Z$ ” maiores que 22 e  $G = -1$  (contornos brancos dos círculos).

A barra de cores ao lado direito do mapa, auxilia o usuário na escolha das regiões estáveis para cada combinação de “ $\beta$ ” e “ $\gamma$ ”, ou seja, regiões vermelhas.

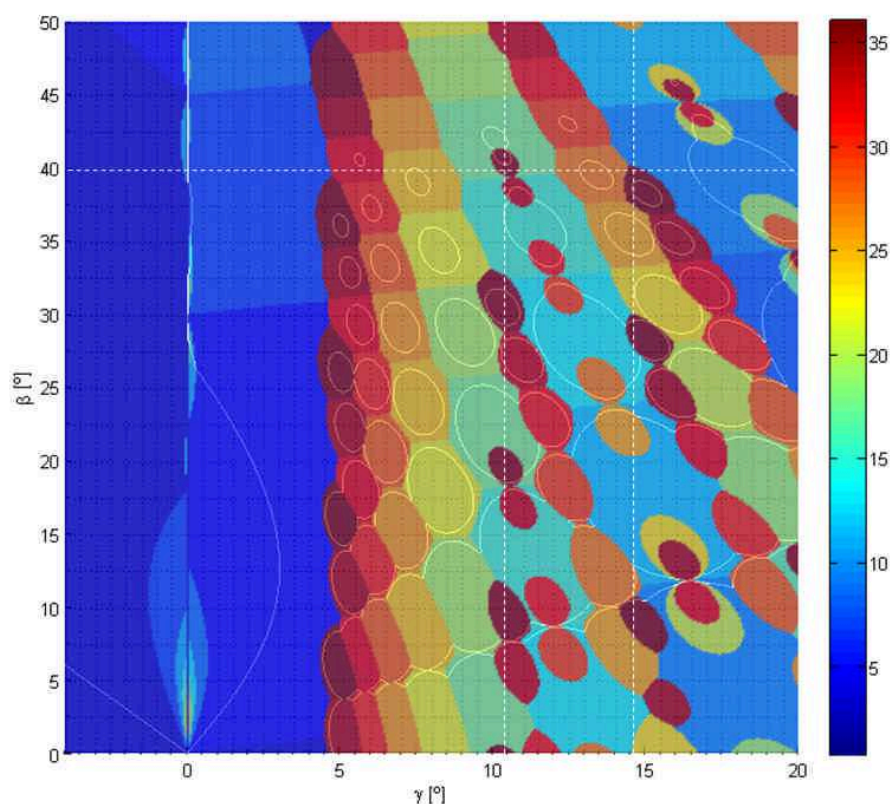


Figura 61 – Mapa de estabilidade,  $\beta = 40^\circ$ ,  $\gamma = 10,5^\circ$  e  $\gamma = 14,5^\circ$

Após escolha, entre com o valor de “ $\gamma$ ” no campo indicado, conforme Figura 62 e clique na seta para ir para próxima janela do *software*. Para este exemplo, foi escolhido  $\gamma = 14,5^\circ$

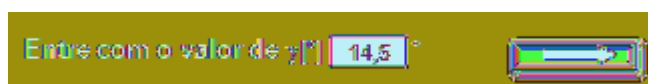


Figura 62 – Campo para inserir “ $\gamma$ ”

A segunda janela do *software* apresenta os parâmetros para ajustagem da retificadora centerless, parâmetro de controle do processo e mostra o gráfico com perfis dos rebolos de arraste e corte.

O *software* permite alterar os perfis dos rebolos alterando os valores da altura de dressagem " $h_{dr}$ " e ângulo de dressagem " $\alpha_{dr}$ ". Com estas alterações é possível definir o vão de retificação gerando os perfis desejados em cada reboło. O *software* sempre gera o valor de " $h_{dr}$ " de modo que a peça percorra uma trajetória paralela ao eixo do reboło de corte. A cada alteração de " $h_{dr}$ " e " $\alpha_{dr}$ " é necessário clicar o botão "*RUN*" (Figura 59), para obter nova configuração dos perfis dos rebolos.

Por meio do botão "*help*", acessa-se todas as informações referentes a cada variável apresentada no *software* (Figura 59).

#### **4.2 Freqüência natural da máquina**

Para coletar os sinais de vibração da retificadora o acelerômetro, localizado na lateral da régua de apoio, estava conectado a um amplificador com uma placa de aquisição de dados da National Instruments que ligado ao computador armazenava os sinais. Com essa montagem experimental foram realizados 4 ensaios. A cada ensaio, variou-se a rotação do reboło de arraste fazendo-se a alteração da velocidade de passagem dos corpos-de-prova, aumentando os esforços sobre a máquina.

Os sinais adquiridos foram processados utilizando-se o *software Scilab-4.1.2* para gerar os gráficos com os espectros de freqüência. A freqüência captada pelo sensor que apresentou a maior amplitude e que se repetiu nos quatro ensaios é definida como freqüência natural da máquina. As Figuras 63, 64, 65 e 66, mostram a parte real da "*FFT*" da emissão acústica calculada a partir do sinal puro de vibração.



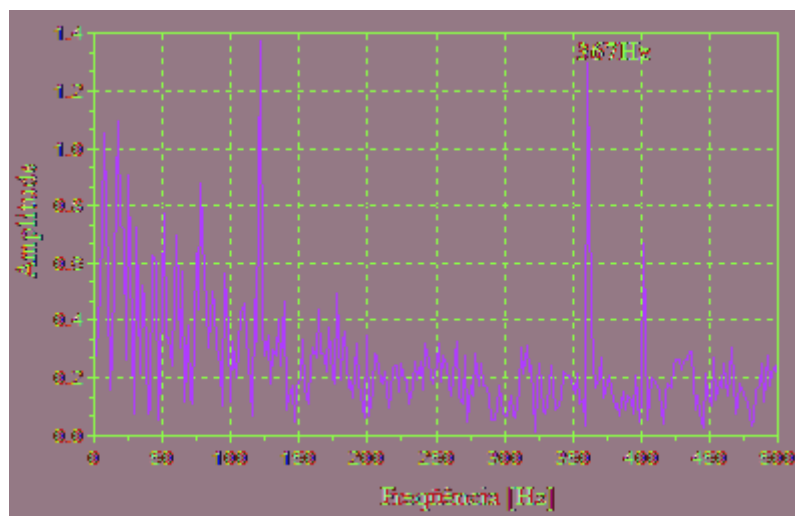


Figura 63 – Espectro de frequência - rotação do rebolo de arraste de 22 rpm.

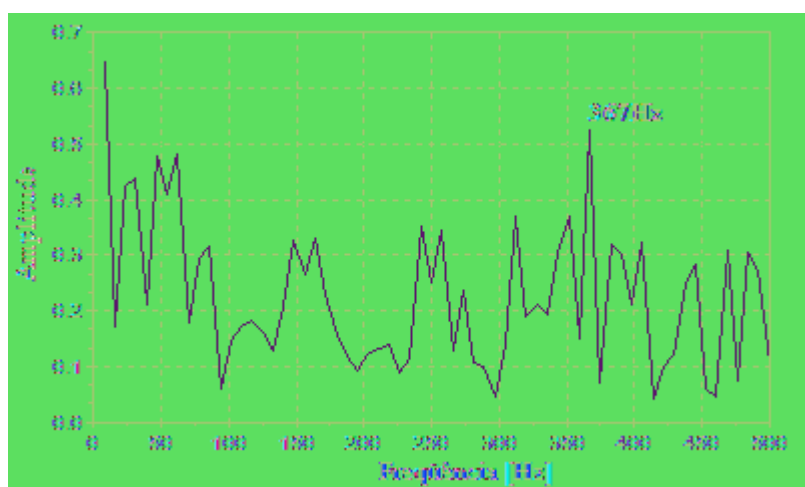


Figura 64 – Espectro de frequência - rotação do rebolo de arraste de 56 rpm.

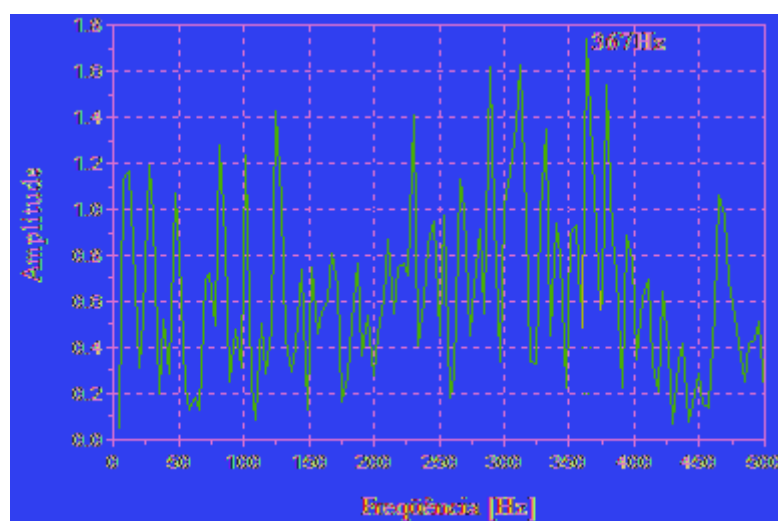


Figura 65– Espectro de frequência - rotação do rebolo de arraste de 112 rpm.

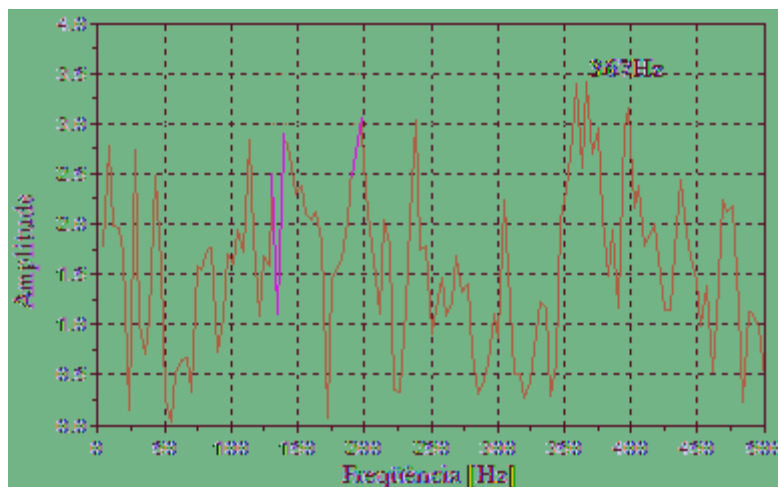


Figura 66 – Espectro de frequência - rotação do rebolo de arraste de 120 rpm.

Pode-se observar nos gráficos 63-66 que os sinais processados provenientes do sensor conectado à régua de apoio para os quatro ensaios possuem maior amplitude próxima à frequência de 367 Hz, definido-a com frequência natural da máquina.

### 4.3 Influência do ângulo de topo da régua de apoio na circularidade da peça

Um dos fatores que influenciam a circularidade no processo de retificação centerless, é a variação do ângulo de topo da régua inferior. Esse efeito pode ser visualizado no mapa de estabilidade, onde o número de ondulação define a estabilidade do processo para cada combinação do ângulo de tangência com o ângulo de topo da régua de apoio, isso considerando os diâmetros do rebolo de arraste e rebolo de corte constantes. Para cada variação destas grandezas, varia-se o número teórico de ondulações “Z” apresentado no mapa de estabilidade.

As combinações dos ângulos de topo da régua de apoio em 15°, 20°, 25° e 30° com o ângulo de tangência constante de 10,5° indica no mapa de estabilidade (Figura 67) regiões com diferentes valores de “Z”. Para  $\beta = 15^\circ$  e  $25^\circ$ , representa região de instabilidade, pois os valores de Z são menores de 22. Para  $\beta = 20^\circ$  e  $30^\circ$ , indica no mapa de estabilidade um processo estável, ou seja, apresentando valores de “Z” maiores que 22.

No mapa de estabilidade geométrica torna-se evidente que pequena variação do ângulo de topo da régua representa grandes mudanças no valor da circularidade e erro de forma geométrico. Neste ensaio o mapa de estabilidade foi gerado para comparar o valor do número teórico de ondulações “Z”, calculado analiticamente, com o valor da circularidade dos corpos-de-prova após a retificação, em função da variação do ângulo de topo da régua de apoio.

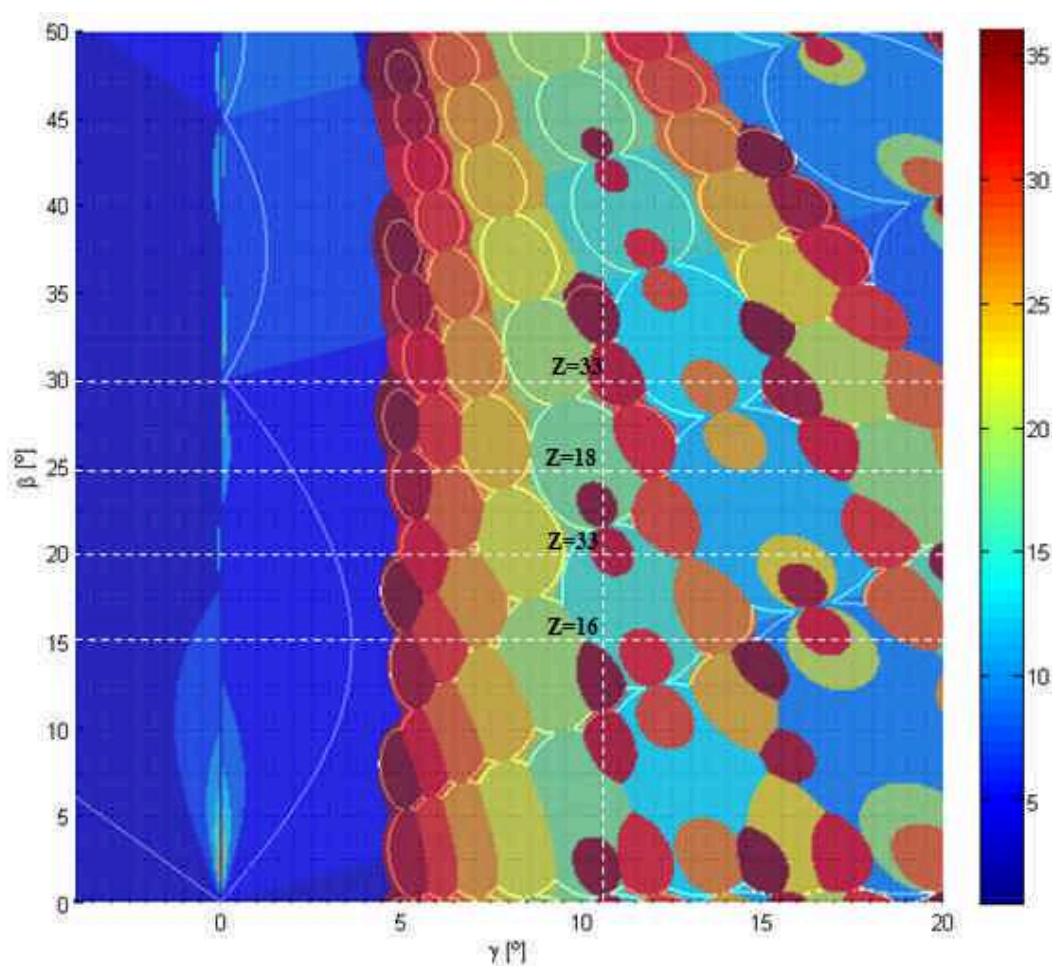


Figura 67- Mapa de estabilidade,  $\beta = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$  e  $\gamma = 10,5^\circ$

As Figuras 68-71 mostram que o ângulo de topo da régua possui influência significativa no valor da circularidade. Os corpos-de-prova tiveram após a retificação diferentes valores do erro de circularidade.

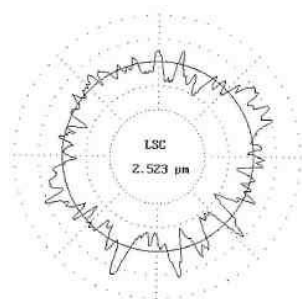


Figura 68 - Erro de circularidade,  $\beta = 15^\circ$  e  $\gamma = 10,5^\circ$  -  $Z = 16$

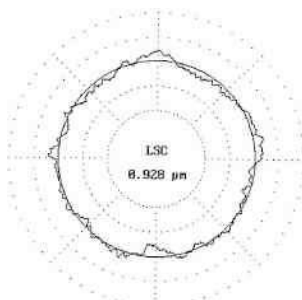


Figura 69 - Erro de circularidade,  $\beta = 20^\circ$  e  $\gamma = 10,5^\circ$  -  $Z = 33$

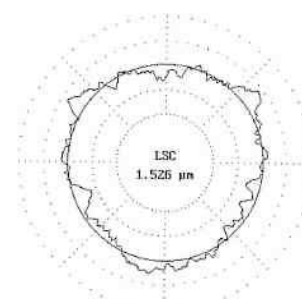


Figura 70 - Erro de circularidade,  $\beta = 25^\circ$  e  $\gamma = 10,5^\circ$  -  $Z = 18$

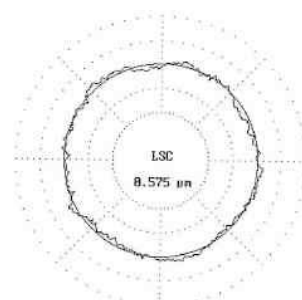


Figura 71 - Erro de circularidade,  $\beta = 30^\circ$  e  $\gamma = 10,5^\circ$  -  $Z = 33$

Pela observação da Figura 72, é possível notar que o valor da circularidade diminui à medida que aumenta o valor teórico do número de ondulação “Z”, valor indicado no mapa de estabilidade para cada ângulo da régua de apoio.

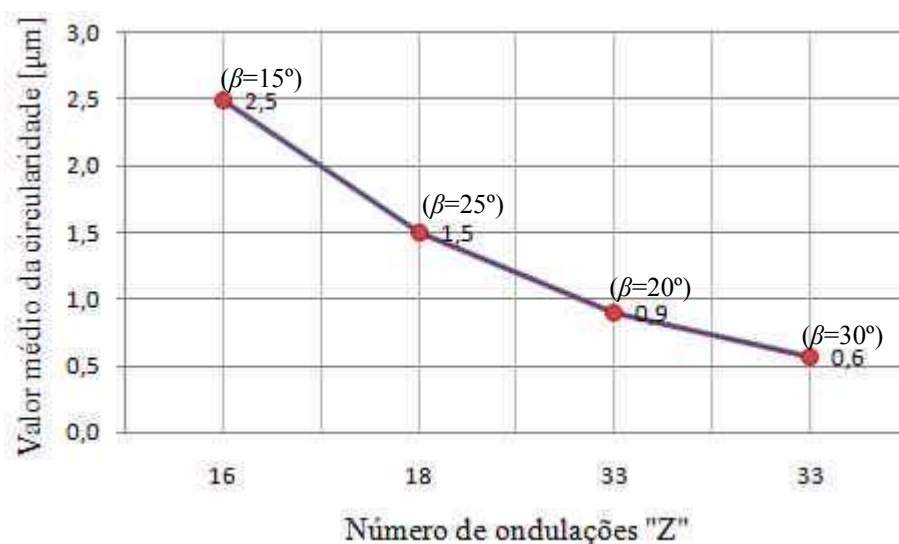


Figura 72 – Valor da circularidade para  $\gamma = 10,5^\circ$  e  $\beta = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$  e  $30^\circ$

As combinações do ângulo de tangência  $\gamma = 10,5^\circ$  com os ângulos de topo da régua de apoio  $\beta = 20^\circ$  e  $\beta = 30^\circ$ , apresentaram menores valores da circularidade,  $LSC = 0,9 \mu\text{m}$  e  $LSC = 0,6$ , respectivamente. Estas combinações apresentam no mapa de estabilidade o mesmo número de ondulações  $Z = 33$ , porém a combinação  $\gamma = 10,5^\circ$  com  $\beta = 30^\circ$  resultou um menor erro de circularidade. Esta variação do erro de circularidade era esperada, pois  $\beta = 30^\circ$  localiza numa região mais próxima aos limites de estabilidade (linhas amarelas do mapa), com isso menor a variação da profundidade de corte e conseqüentemente menor o erro de circularidade.

O maior valor da circularidade encontrado foi com as combinações  $\gamma = 10,5^\circ$  com os ângulos  $\beta = 15^\circ$  e  $\beta = 25^\circ$ , sendo  $LSC = 2,5 \mu\text{m}$  e  $LSC = 1,5 \mu\text{m}$ .

Este fenômeno pode ser explicado, pois quando maior valor teórico do número de ondulações "Z" menor será a profundidade de corte dos corpos-de-prova durante a retificação e, portanto, menor erro da circularidade.





Pela observação das Figuras 74-80, nota-se a influência da variação do ângulo de tangência no erro de circularidade e formato da seção transversal dos corpos-de-prova. Nas Figuras 74 e 75 os formatos obtidos nos corpos-de-prova após retificação são iguais aos valores do número teórico de ondulações indicado no mapa de estabilidade, isto é, 3 e 5 ondulações, respectivamente. Os valores de  $\gamma = 0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$  e  $5^\circ$  representam regiões instáveis no mapa de estabilidade, ou seja,  $Z < 22$ .

As Figuras 74-80 apresentam os valores da circularidade (LSC) para cada variação do ângulo de Tangência “ $\gamma$ ”.

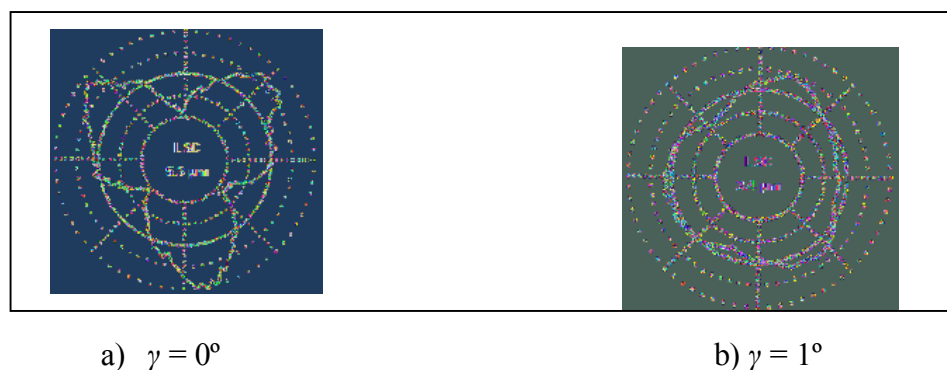


Figura 74 – Erro de circularidade,  $Z = 3$

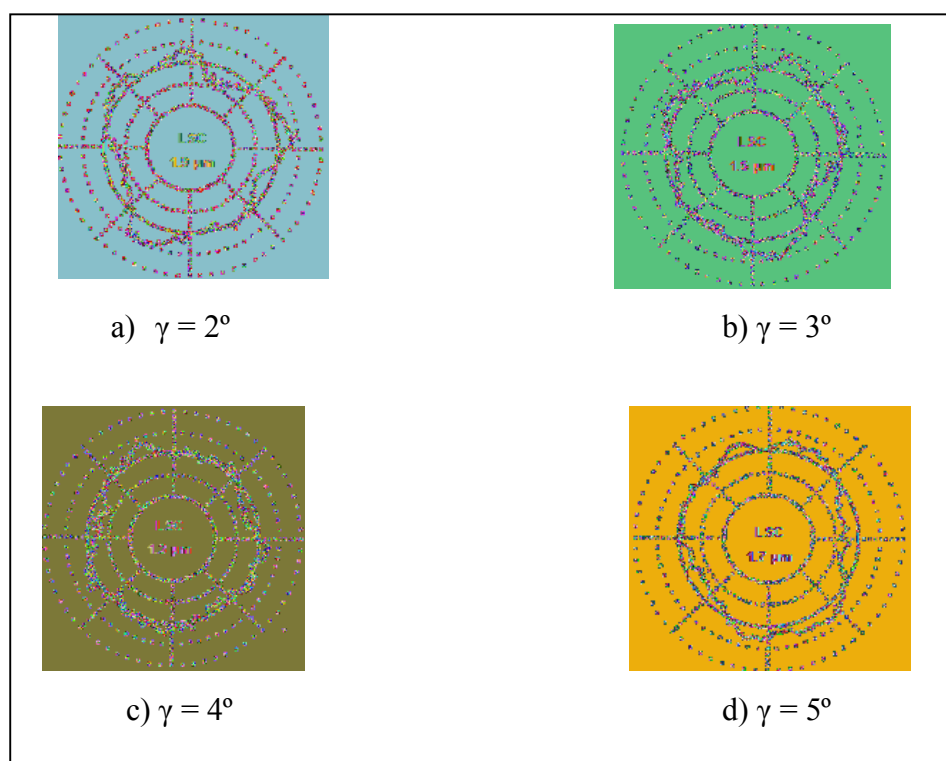


Figura 75 – Erro de circularidade,  $Z = 5$

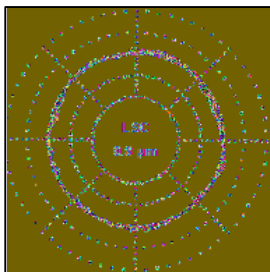


Figura 76 – Erro de circularidade,  $Z = 32$ ,  $\gamma = 6^\circ$

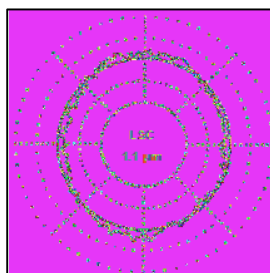


Figura 77 – Erro de circularidade,  $Z = 22$ ,  $\gamma = 7^\circ$

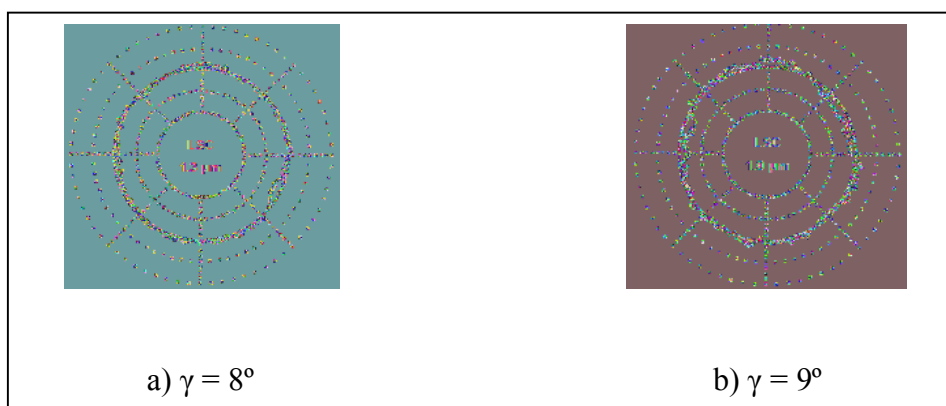


Figura 78 – Erro de circularidade,  $Z = 28$

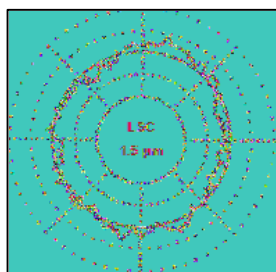


Figura 79 – Erro de circularidade,  $Z = 18$ ,  $\gamma = 10^\circ$



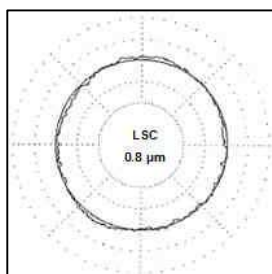


Figura 80 – Erro de circularidade,  $Z = 33$ ,  $-\gamma = 10.5^\circ$

Pela observação do gráfico, conforme Figura 81, nota-se que o valor da circularidade diminui à medida que aumenta o valor teórico do número de ondulação “Z”, valor indicado no mapa de estabilidade para cada ângulo de tangência “ $\gamma$ ”. Os menores valores do erro de circularidade foram obtidos para  $\gamma=6^\circ$  e  $\gamma=10,5^\circ$ , representando no mapa,  $Z = 32$  e  $33$  ondulações.

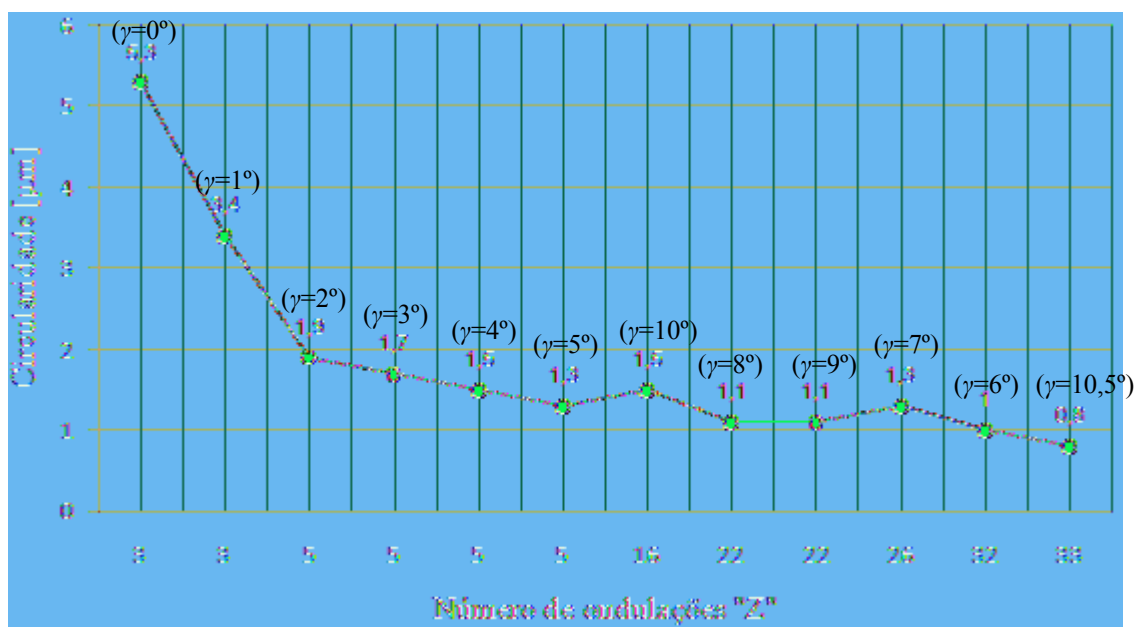


Figura 81 – Erro de circularidade em função de “Z”

Este fenômeno pode ser explicado, pois quando maior valor teórico do número de ondulações “Z” e mais próximo do limite de estabilidade, para cada combinação “ $\beta$ ” e “ $\gamma$ ”,

menor será a movimentação dos corpos-de-prova durante a retificação, com isso menor variação da profundidade de corte e, portanto, menor erro da circularidade.

#### 4.5 Influência da frequência natural da máquina no contorno dos corpos-de-prova

A Figura 82 apresenta o valor da frequência da peça versus número de ondulações “Z” para 06 experimentos realizados.

É importante salientar que a faixa da frequência natural da máquina utilizada no ensaio é de 357 a 377 Hz. Lembrando que, quando a frequência da peça atinge esta faixa de frequência ou seu múltiplo (724 a 744 Hz), conforme mostra a Figura 82, o sistema entrará em ressonância, ocasionando defeitos da seção transversal dos corpos-de-prova, no formato de uma oscilação harmônica.

Pela observação do gráfico, conforme Figura 82, nota-se que para as rotações do rebolo de arraste: Ra = 76 rpm, Ra = 88 rpm, Ra = 106rpm e Ra = 131 rpm, os número de ondulações (número periódico) que faz os corpos-de-prova atingir a faixa da frequência da máquina são: Z = 14, 12, 10, 8 (ondulações na seção transversal).

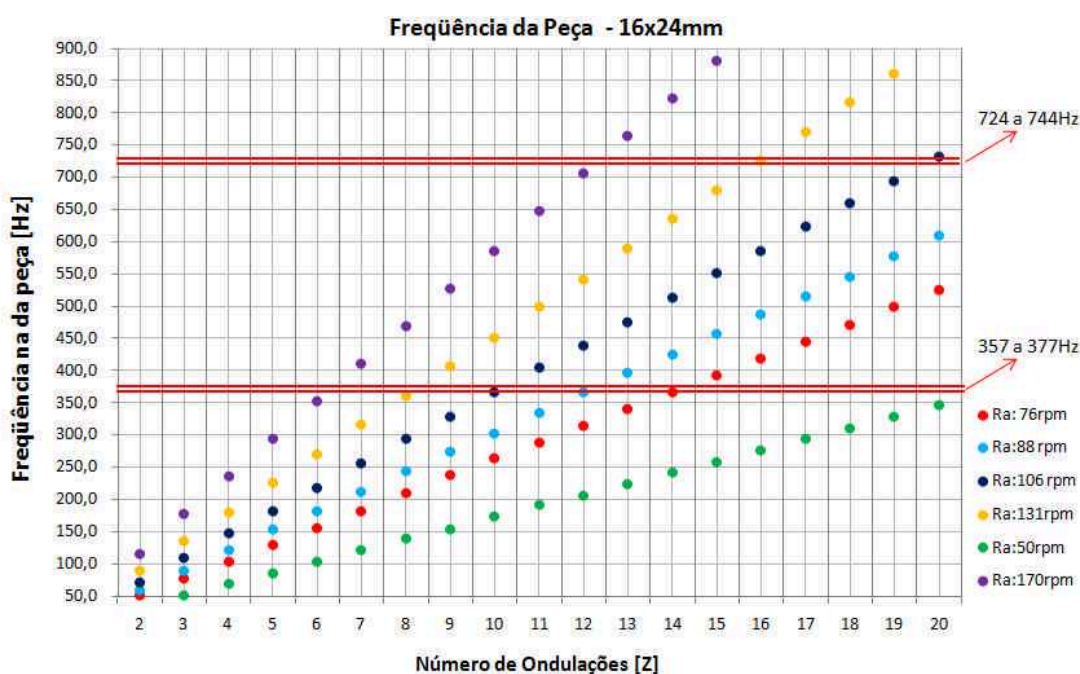


Figura 82 – Frequência dos corpos-de-prova

A Figura 83 a-d mostra claramente a seção transversal dos corpos-de-prova, na forma de uma oscilação harmônica, após a retificação.

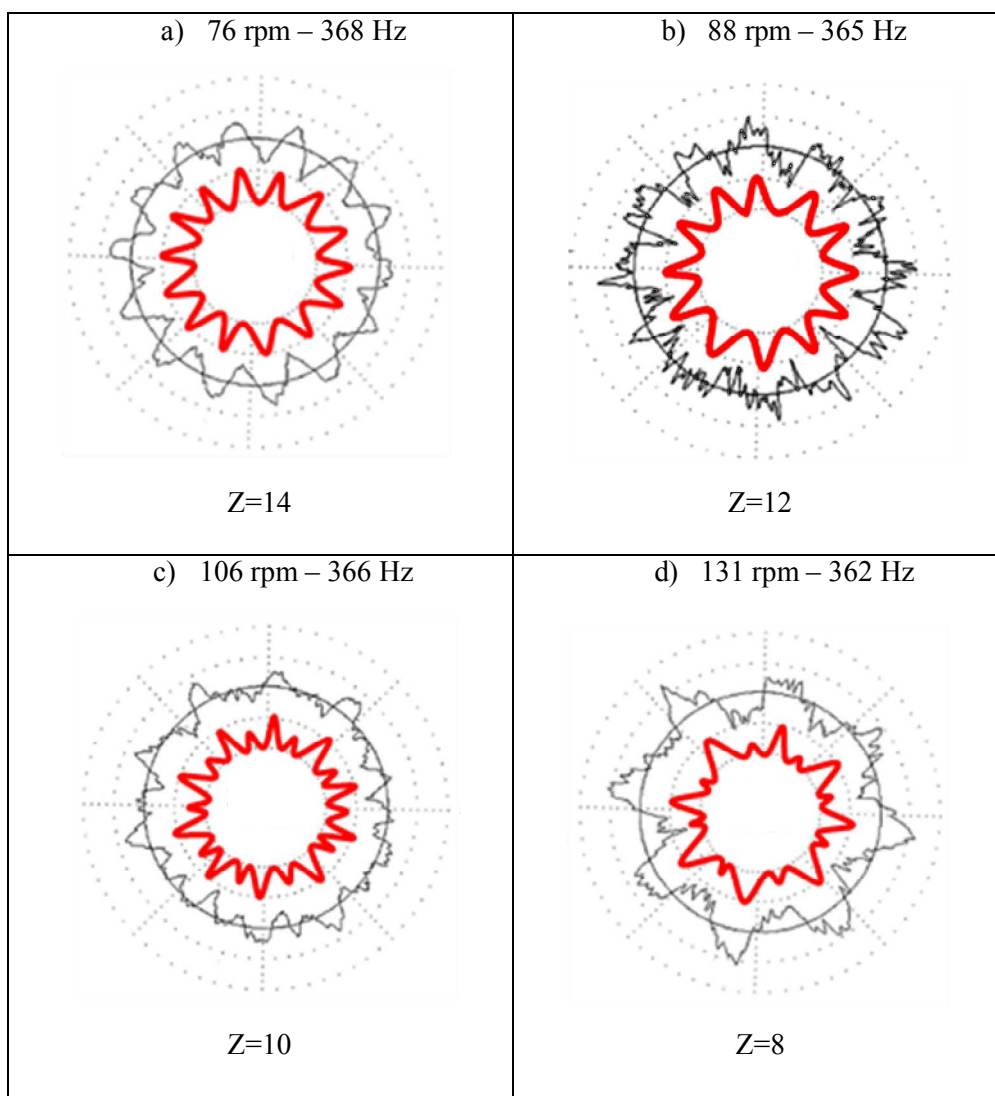


Figura 83- Frequência dos corpos-de-prova - frequência da máquina

No primeiro ensaio, Figura 83.a, o rebolo de arraste trabalhou com uma rotação de 76 rpm, esta rotação fez com que os corpos-de-prova alcançassem frequência de 368 Hz, obtendo 14 ondulações após a retificação. A Figura 83.b os corpos-de-prova atingiram frequência de 365 Hz, obtendo 12 ondulações após retificação. Nos ensaios conforme mostra Figuras 83.c e 83.d os corpos-de-prova obtiveram formato de 10 e 8 ondulações

com outras pequenas ondulações. Isso ocorre quando o múltiplo da frequência da peça atinge o múltiplo da frequência natural da máquina.

Observando-se a Figura 84 a-b, nota-se que os corpos-de-prova após retificação não representaram formato de uma oscilação harmônica, isto deve ao fato de que para estas rotações (50 rpm e 170 rpm) os corpos-de-prova não atingiram a faixa de frequência natural da máquina, ou seja, o sistema não entrou em ressonância.

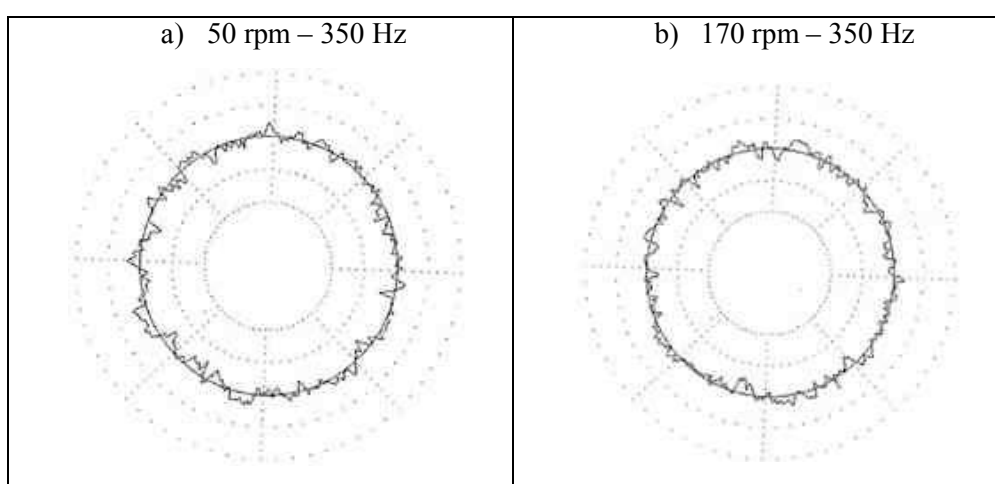


Figura 84- Frequência dos corpos de prova diferente da frequência da máquina

As Figuras 85 a-d mostram os contornos dos corpos-de-prova para os quatro experimentos realizados com os corpos-de-prova, 10 x 10,8 mm, retificados com diferentes rotações do rebolo de arraste. Os diferentes formatos foram induzidos dinamicamente, fazendo a frequência os corpos-de-prova, coincidir com a frequência natural da máquina.

Observa-se para estes quatro experimentos o mesmo fenômeno ocorreu, gerando peças com 12, 6, 5 e 4 ondulações.

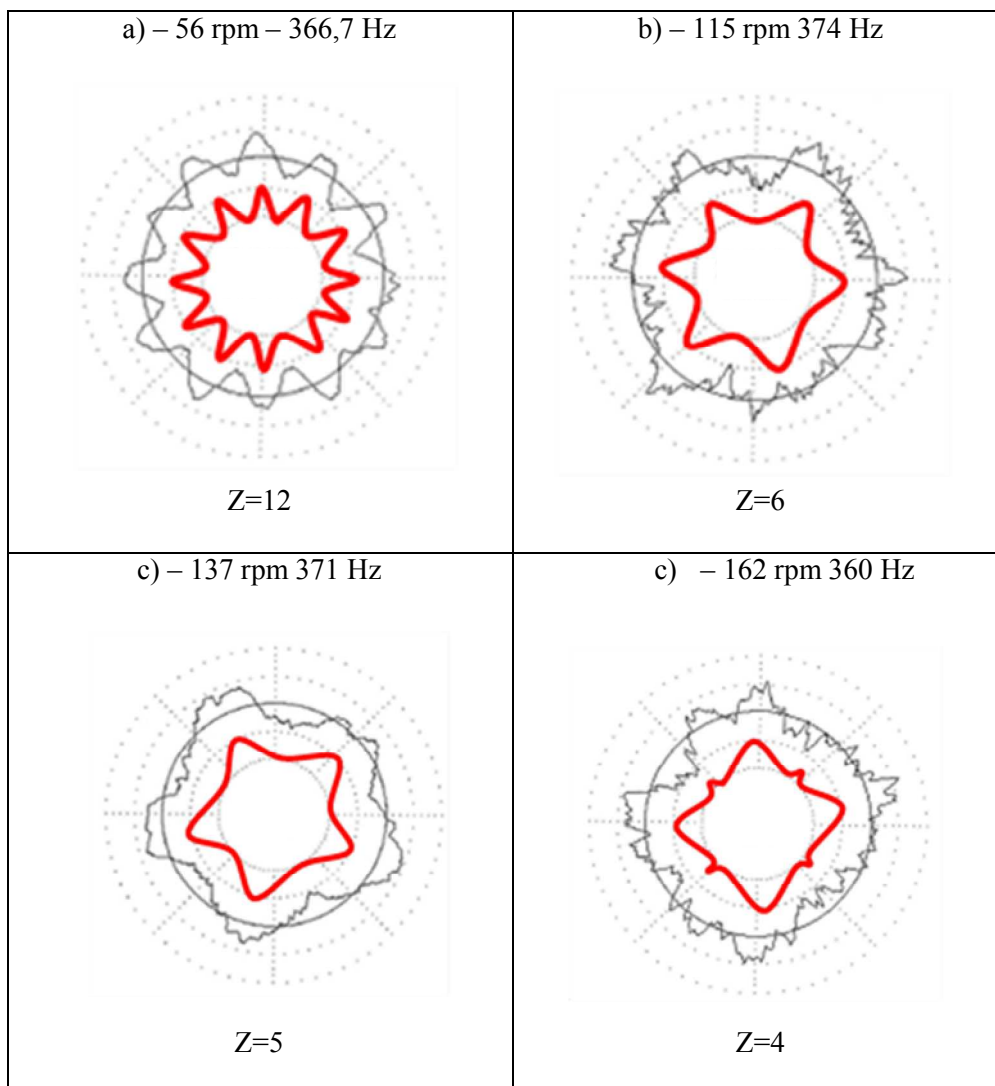


Figura 85 - Influência da frequência natural no erro de forma da peça

Mesmo quando o erro de circularidade esteja dentro dos valores especificados é de suma importância avaliar o perfil da seção transversal da peça retificada. Peças no formato de uma oscilação harmônica, em diversas aplicações, como rolamentos automotivos, podem gerar níveis de ruído fora do limite permitido pelos fabricantes de veículos.

As crescentes exigências quanto ao nível de ruído dos rolamentos foram causados por construções mais leves, mudanças de materiais, por exemplo, a caixa de cambio dos veículos era antigamente feita de ferro fundido, um material que amortecia satisfatoriamente oscilações. Atualmente são usadas ligas de alumínio com características de amortecimento

menos vantajosas. Além disto, nos últimos anos se tornou mais rigorosa a determinação dos níveis de ruídos.

O ruído dos rolamentos é ocasionado principalmente pelo formato de seus componentes, sejam roletes ou anéis internos e externos. Um único rolete, que apresenta formato de uma oscilação harmônica (Figuras 83 e 85) pode produzir oscilações de alta frequência e ruído de alta intensidade no rolamento, não permitindo aplicação industrial.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Baseando-se nos resultados obtidos experimental e analiticamente e também no estudo das referências bibliográficas, pode-se concluir para o processo de retificação centerless de passagem:

- Com auxílio do mapa de estabilidade geométrico é possível definir uma condição ideal de ajustagem da altura da peça “ $h_w$ ”, em função do valor ideal do ângulo de tangência.
- É possível verificar o melhor ângulo de topo da régua de apoio e melhor ângulo de tangência com auxílio do mapa de estabilidade.
- A variação do ângulo de topo da régua e ângulo de tangência varia significativamente o valor da circularidade da peça após retificação.
- É de suma importância para o processo de retificação centerless de passagem conhecer a frequência natural na máquina, por meio destes dados é possível definir rotações de trabalho do rebolo de arraste, de maneira que a frequência da peça não coincida com a frequência natural da máquina, evitando o fenômeno de ressonância e conseqüentemente erro característicos de circularidade (perfil transversal da peça na forma de uma oscilação harmônica).
- Para definir corretamente os parâmetros de retificação no *software* desenvolvido é necessário conhecimento detalhado e compreensão do processo de retificação centerless de passagem.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Realizar estudo para verificar a influência da velocidade de passagem da peça pelo vão de retificação na rugosidade e circularidade da peça, variando o ângulo de inclinação do rebolo de arraste, mantendo sua rotação constante;

Verificar vantagens na utilização de dressadores rotativos para o rebolo de corte no processo de retificação centerless de passagem.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. AGOSTINHO, O. L. Apostila da disciplina – **Processos de Fabricação e Planejamento de Processos**. UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, 2004.
02. ALMEIDA, M. T. Vibrações Mecânicas para Engenheiros. **Editora Edgard Blücher Ltda**, 1987.
03. BECKER, E. A. **Kraefte und kreisformfehlerbeim Spitzenlosen – Einsteichschleifen**. Dissertation, RWTH – Aachen, 1965.
04. BIANCHI, E. C. Análise do comportamento de rebolos convencionais na retificação de aços frágeis. In: **Congresso de Engenharia Mecânica – Norte Nordeste, Fortaleza**, 1996.
05. BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R. Formas otimizadas para a aplicação de fluídos de corte na retificação dos metais. In.: **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais – CBECIMAT**, Natal, RN, Brasil, 2002.
06. BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. PIUBELI, B. A. Aplicação e utilização de fluídos de corte nos processos de retificação. **Editora Artliber**, 2004.
07. BOETTLER, E. **Konzept und Technologie Grundlagen zum Aufbau eines Informationszentrum fuer die Schleifbearbeitung**. Dissertation, RWTH – Aachen, 1978.
08. BRINKSMEIER, E.; HEIZEL, C.; WITTMANN, M. SCHMID, U. FREYER, M. RATHA, H. J. Como a aplicação do fluído refrigerante pode ser melhorada na retificação. *Revista Máquina e Metais*, outubro, 2001.

09. CATAI, R. E. **Otimização das condições de refrigeração/lubrificação no processo de retificação cilíndrica de mergulho**. Dissertação - Universidade Paulista – Guaratinguetá, 2004.
10. CATAI, R. E.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R; MATOSKI, A.; CERRI, J. A. **Como a variação do fluido de corte influência as circularidades, tensões residuais e microestrutura do aço VC 131**. Revista Máquinas e metais, nº502, novembro de 2007.
11. CATAI, R. E.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. **Estudo da Importância dos Métodos e Processos de dressagem e Perfilamento, bem como dos Principais Tipos de dressadores Utilizados nas Operações de retificação, 2002**.
12. DALL, A. H. Rounding Effect in Centerless Grinding. **Mechanical Engineering**, 1946.
13. DINIZ, A. E. Apostila do curso de especialização em Automação Industrial – Processos abrasivos de Usinagem : **Retificação com rebolos abrasivos**. UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, 2004.
14. DINIZ, A. E. Apostila de retificação da disciplina: Usinagem dos Materiais do curso de Engenharia Mecânica da UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, 2004.
15. DIN 69100 Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel, 1988.
16. FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. **Editora Edgard Blüchen Ltda**, 1977.
17. FLECK, K. **Beitrag zur Klärung der Geschwindigkeits und Kraftverhältnisse beim spitzenlosen Schleifen**. Dissertation TH Hannover, 1931.
18. FRIEDRICH, D. **Prozessbegleitete Beeinflussung des geometrischen Rundungseffektes beim spitzenlosen Aussenrundeinstechschleifen**. Shaker Verlag, D82 (Dissertation, RWTH-Aachen), 2004.

19. FRIEDRICH, D. Spitzenlossschleifen muss Flexibler werden, **Schleifring Grinding Symposium**, 2005.
20. FRIEDRICH, D. In der Schatztruhe liegen noch viele Ideen, **Unternehmen Forschung – Industrieanzeige**, 2006.
21. GONÇALVES, L. M.; MIRANDA, G. W. *Software Paramétrico para o Processo de Retificação Centerless de Passagem*. In.: **Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica - CIBIM 8º**, Cusco – Peru, 2007.
22. HASSUI, A.; DINIZ, A. E. Correlation surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Vol.43, 2003.
23. HASSUI, A. **Estudo da Vibração Durante o Corte e Centelhamento na Retificação Cilíndrica de mergulho**, Tese de Doutorado, Universidade de Campinas, SP, 2002.
24. INA Brasil Ltda, Teoria Sobre o Processo de Retificação, **Manual e Apostila de Treinamento**, 2005.
25. KHATER, E. **Diagnóstico de falhas em máquinas rotativas através da análise de vibração torcional**. Universidade Federal de São João Del Rei, 1998.
26. KREHER, R. **Gütesteigerung beim spitzenlosen Schleifen**. Dissertation TH Dresden, 1939.
27. KÖNIG, W, **Fertigungsverfahren: Schleifen, Honen, Läppen**. **VDI Verlag**, GMBH Runeldorf, 1980.
28. KLOCKE, F.; FRIEDRICH, D.; LINKE, D.; NACHMANI, Z., Basics for in-process roundness error improvement by a functional workrest blande, **Annals of the CIRP**, **53/1, 2004**.

29. KLOCKE, F.; KÖNIG, W., *Fertigungsverfahren: Schleifen, Honen, Läppen*. **VDI Verlag GMBH, Düsseldorf**, 2005.
30. KOVACH, J. A.; MALKIN, S. *High Speed Low Damage Grinding on Advanced Ceramic*. **OAK Ridge National Laboratory, Springfield**, 1996.
31. LEICHTER, S. *Auswahl günstiger Schleifmittel für die Fertigung*. **Technische Mitteilungen**, 1975.
32. LINDENAU, K. *Wirtschaftliche Fertigung mit Schleifen – Kostensenkung durch Prozesssicherheit und gezielte Maschinenbeschaffung*, **Carl Hanser Verlag, München** 2006.
33. LINDSAY, R. *Fundamental of Precision Production Grinding*. **SME Society of Manufacturing Engineers, Detroit**, 1999.
34. LIU, J. J. B. **Monitoring the precision machining process: sensor, signal, processing and information analysis**. Berkeley: Dept. of Mech. Eng. Of University of California, 1991.
35. LORTZ, W. *Bestimmung der Schneidenraumstruktur von Schleifscheiben*, *Ind. Anz* 1974.
36. MALKIN, S. *Grinding Technology: Theory and Application of Machining With Abrasives*. 1. ed. **Chichester, Ellis Horwood Limited**, 1989.
37. MEIS, F. U. **Geometrische und Kinematische Grundlagen fuer das spitzenlose Durchlaufschleifen**. Dissertation, RWTH – Aachen, 1980.
38. MIKROSA, *Körper Schleifring*. **Produktionslösungen für spitzenlos Aussenrundscheifen**, 2005.
39. MINKE, E. *Handbuch zur Abrichttechnik*. **Riegger Diamantwerkzeuge GMBH**, 1999.

40. NOBREGA, P. G. B. **Análise dinâmica de estruturas de concreto: estudo experimental e numérico das condições de contorno de estruturas pré-moldadas.** Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, SP, 2004.
41. NORTON, Abrasives Marketing Group. Centreless Grinding. **IDA Industrial Distribution Association**, Massachusetts, United States of America, 1994.
42. NUSSBAUM, G. CH. Rebolos e Abrasivos - Tecnologia Básica, Vol.: I, II e III. **Livraria e Editora Jacomo Ltda**, 1988.
43. OLIVEIRA, J. F. G.; PURQUÉRIO, B. M. Dressagem controlada: uma solução para os problemas. **Revista Máquina e Metais**, nº 283, 1989.
44. OTT, H. W. Kühlschmierer – Voraussetzung für Kostengünstiges schleifen und Abrichten. **VDI – Bildungswerk**, 1988.
45. PETERS, J., DECNEUT, A. L'Épaisseur de coupe équivalent, parameter determinant en retification. **Mecanique materiaux eletricité**, October, 1975.
46. PETROSKY, G. C. **Workpiece Shape control in throug – feed centerless grinding.** Dissertation, University of Connecticut, 1998.
47. PICCOLI, H. C. Apostila do curso de Engenharia Mecânica – **Vibrações Mecânicas**, FURS – Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2005.
48. REEKA, D. **Über den Zusammenhang zwischen Schleifspaltgeometrie und Rundheitsfehler beim Spitzenlosen Schleifen.** Dissertation, RWTH – Aachen, 1967.
49. RIPPER NETO, A. P. **Vibrações Mecânicas**, e-papers **Serviços Editoriais Ltda**, Rio de Janeiro, 2007.

50. ROSSI, M. Máquina Operatrizes Modernas – Comandos Oleodinâmicos – Métodos de Usinagem – Tempo de Produção, Vol.: II **Editorial Científico – Médica**, Barcelona: Espanha, 1970.
51. RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G. N. The effect deformation on the contact area in grinding. **In Annals of the CIRP**, 1993.
52. SALES, W. F. **Determinação das características refrigerantes e lubrificantes de fluídos de corte**. Tese de Doutorado, Uberlândia, MG, Abril, 1999.
53. SCHMIDT, E. **Standzeituntersuchung an Schleifscheiben**. Diplomarbeit, Fachhochschule des Landes Rheinlend Pfalz, 1989.
54. SCHREITMÜLLER, H. **Kinematische Grundlagen fuer die Praktische Anwendung des Spitzenlosen Hochleistungsschleifens**. Dissertation, RWTH – Aachen, 1971.
55. SHIH, A. J. A New Regulating Wheel Truing Method for Through-Feed Centerless Grinding. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 2001.
56. SLONIMSKI, W. I. Theorie und Praxis des spitzenlosenschleifens. **VEB Verlag Technick**, Berlin, 1956.
57. STEPHESON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice – Second Edition**. **Taylor & Francis**.
58. THÖING, W. **Untersuchung über das Abrichten von Schleifscheiben mit Diamantwerkzeugen**. Dissertation T.H. Brauschweig, 1956.
59. THOMSON, W. T. Teoria da Vibração; com aplicações. 1.ed. Rio de Janeiro: **Editora Interciência Ltda**, 1978.
60. WEBER, A. Unterlagen Technologie-Schulung – Centerless Schleifen. **IWH – Group Schaeffler**, Homburg, 1994.

61. WEINGAERTNER, W. L. Desenvolvimento de rebolos superabrasivos, **Revista Máquina e Metais, Aranda Editora** – Ano XLIV nº503, Dezembro 2007.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS**

01. ATLANTIC, Schleifscheiben, Catálogo de rebolos, 2003.
02. DERENTHAL, L. **Form und Masskorrekturen bim spitzenlosen Kurzhubhonen.** Dissertation, RWTH Aachen –1969.
03. GUENIS, B.; DOCTOR, L.; TERGAN, V. Trabajos en las Rectificadoras Cilíndricas, **Editorial MIR.**
01. HAGBY, Diamond restblandes for centerless grinding. Disponível em: <<http://www.hagby.se>>. Acesso em 08 de novembro de 2007.
02. HAGER, H. Abhängigkeit der Härte Keramisch gebundener Schleifkörper von Art und Menge der Bindung, Struktur und Korngrösse der Schleifmittels. Disponível em: <http://www.hager.de>. Acesso em 08/ novembro 2007.
04. SALJÉ, E. Begriffe der Schleif und Konditioniertechnik. **Vulkan Verlag, Essen - Alemanha,1991.**
05. HANSELMAN, D; LITTLEFIELD, B. Matlab 6 – Curso Completo. **Person Education do Brasil, 2007.**

## APÊNDICE - A

### Programa de aquisição desenvolvido em LabView

A Figura A.1 mostra o painel de controle do programa de aquisição de dados

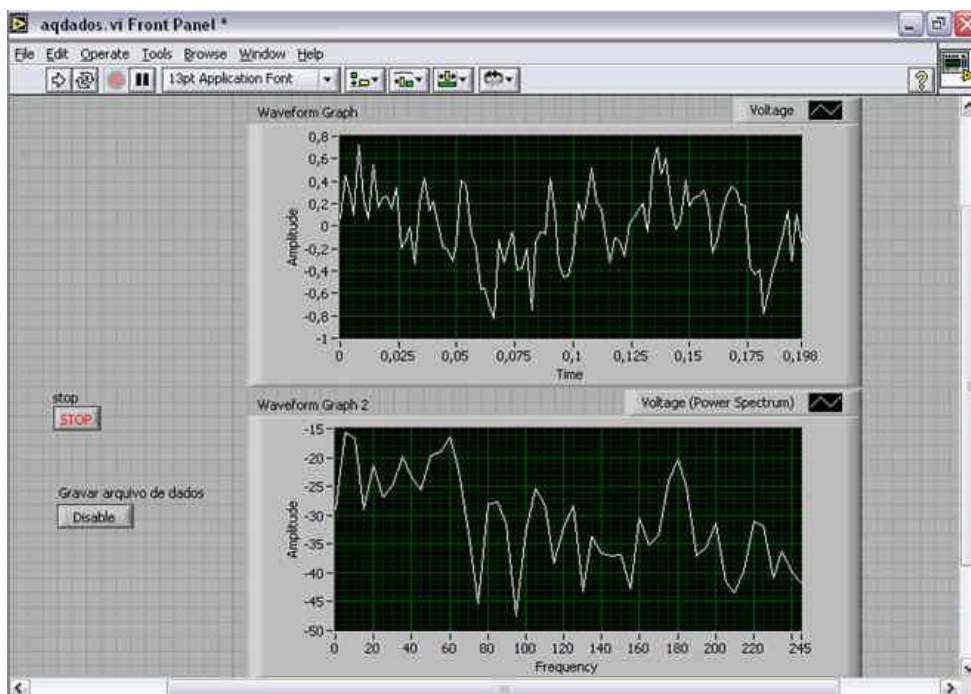


Figura A.1 Interface do Programa de Aquisição

A Figura A.2 mostra o diagrama do programa de aquisição de dados, correspondente à interface mostrada em A.1.

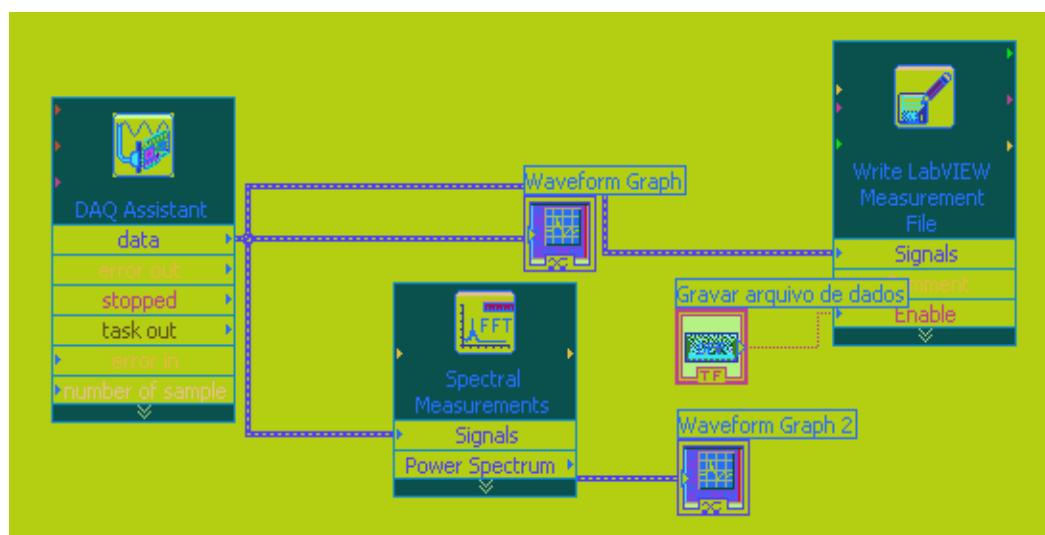


Figura A.2 – Diagrama do programa de aquisição



## Apêndice B - Programa desenvolvido em Scilab 4.1.2

Neste apêndice é apresentado o programa que foi utilizado para cálculo da FFT a partir do sinal puro de emissão acústica.

```

arq=input('s','string')
arq = 'X = fscanfMat("'" + arq + "'");
execstr(arq);
X = X';
t = X(:,1); acel=X(:,2);
xinit;plot(t,acel);xgrid;
frequ = (1/(t(2)-t(1)))/2;
namostras = 2000;
nvezes = int(length(acel)/namostras);
for i = 1, nvezes,
    fini = 1;
    ffim = namostras;
    fftacel=fft(acel(fin:ffim));
    fini = fini + namostras;
    ffim = ffim + namostras;
    if i == 1 then rfinal = fftacel; else rfinal = rfinal + fftacel; end;
end;
rfinal = rfinal(1:length(rfinal)/2)/nvezes;
dfreq = frequ/(namostras/2):frequ/(namostras/2):frequ;
xinit; plot(dfreq,abs(rfinal));xgrid;

```