

## **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE TOPO DA RÉGUA DE APOIO E ÂNGULO DE TANGÊNCIA NA CIRCULARIDADE DA PEÇA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CENTERLESS DE PASSAGEM**

Luiz Maurício Gonçalves Neto, [goncalui@yahoo.com.br](mailto:gonalui@yahoo.com.br); [goncalui@schaeffler.com](mailto:goncalui@schaeffler.com)<sup>1</sup>  
Gilberto Walter Arenas Miranda, [gilware@terra.com.br](mailto:gilware@terra.com.br); [gilware@unitau.br](mailto:gilware@unitau.br)<sup>2</sup>

Universidade de Taubaté – UNITAU, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Daniel Danelli, s/n - Jd. Morumbi Taubaté - SP – Brasil CEP 12060-440, tel.: (012) 3625-4192, Fax: (012) 3629-2566.

**Resumo:** A retificação é considerada um dos mais perfeitos processos de usinagem para obtenção de superfícies com alto grau de acabamento e elevado padrão de precisão. A retificação centerless de passagem é uma tecnologia proeminente de manter tolerâncias diametrais extremamente fechadas, com alto grau de acabamento. Para dar as superfícies tal grau de perfeição e forma, os parâmetros de ajustagem de máquina devem ser criteriosamente definidos. No processo de retificação centerless, a característica de qualidade mais difícil de ser controlada é o erro de circularidade da peça, o qual é influenciado principalmente pela variação do ângulo de topo da régua de apoio e do ângulo de tangência, o qual define a posição da peça no vão de retificação. Neste contexto, este artigo tem como principal objetivo explicar o mecanismo de formação do erro de circularidade e analisar a influência do ângulo de topo da régua de apoio e ângulo de tangência no erro de circularidade da peça.

**Palavras-chave:** circularidade, retificação, centerless, estabilidade

### **1. INTRODUÇÃO**

#### **1.1. Retificação Centerless de passagem**

Conforme Slonimisky (1956), Friedrich (2004), Klocke e König (2005) a retificação centerless de passagem efetua-se de maneira que a peça é conduzida passando por meio dos rebolos, em que o processo de usinagem ocorre quando a peça percorre de um lado para o outro o vão de retificação, sendo conduzida pelo rebole de arraste e retificada pelo rebole de corte. Ao contrário da retificação cilíndrica de mergulho, em que a peça é fixada através de pontas rotativas, na retificação centerless de passagem, a peça permanece livre durante a retificação, sendo sustentada apenas por uma régua de apoio, conforme apresentado na Figura 1.

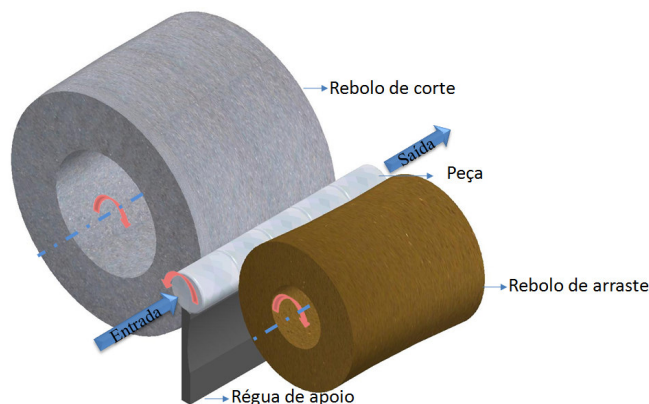


Figura 1 – Representação esquemática de uma retificação centerless de passagem (Gonçalves e Miranda, 2007)

O chamado vão de retificação é definido pela configuração entre os componentes, peça, rebolo de corte, rebolo de arraste e régua de apoio, conforme mostrado na Figura 2.

A posição da peça no vão de retificação é determinada pelo contato do rebolo de arraste, rebolo de corte e régua de apoio. A ligação entre as linhas de centro dos rebolos define a linha de referência, o qual define a altura entre centros, ou seja, centro da peça com a linha de referência, conforme Figura 2. Os pontos de tangência entre peça e rebolos formam o ângulo de tangência “ $\gamma$ ”, que governa a altura da peça “ $h_w$ ” em relação ao centro do rebolo de corte (Klocke e König, 2005; Lindenau, 2006).

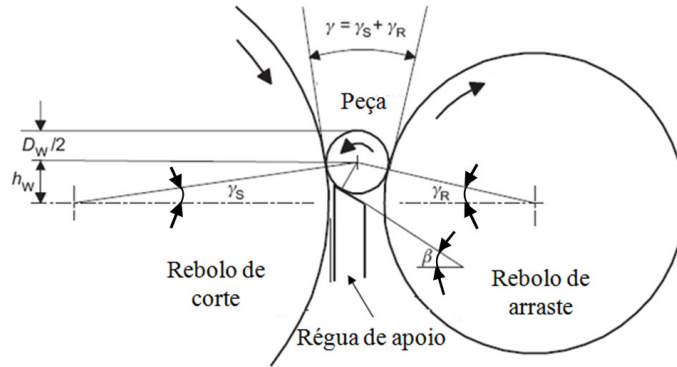


Figura 2 – Vão de retificação (Lindenau, 2006)

Em função do ângulo de tangência “ $\gamma$ ”, diâmetro da peça e diâmetros dos rebolos de corte e arraste, a altura da peça “ $h_w$ ” pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$h_w = \frac{\gamma \cdot \pi}{360} \cdot \frac{(D_R + D_W) \cdot (D_S + D_W)}{D_R + D_S + 2 \cdot D_W} \quad (2)$$

Um dos parâmetros mais importante na ajustagem de uma retificadora centerless é o ângulo de tangência “ $\gamma$ ”, pois influencia diretamente no erro de circularidade da peça.

## 1.2. Mecanismo de formação do erro de circularidade

O erro de circularidade de uma peça cilíndrica é o desvio radial macro geométrico do contorno externo a um formato circular ideal (Becker, 1965; Schreitmüller, 1971). A técnica de medição deste desvio de forma é definida conforme norma DIN 7182 pela diferença entre o menor diâmetro circunscrito ( $d_i$ ) o maior inscrito ( $d_c$ ) da superfície da peça, Figura 3.

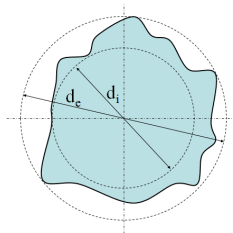


Figura 3 - Erro de circularidade conforme DIN 7182

Mediante a condução e processamento da superfície da peça, pode-se resultar um erro de circularidade. Friedrich (2004) explica esse fenômeno, mostrando como é gerada a forma geométrica da peça durante o processo de retificação centerless.

Em primeiro lugar é considerada uma peça ideal circular com uma circunferência de raio constante e sobre ela encontrar-se uma saliência idealizada, conforme apresentado na Figura 4 I-II. O centro da peça localiza-se na mesma linha de centro dos rebolos de corte e arraste. Durante a retificação, a saliência da peça em contato com o rebolo de arraste (ponto “R”) movimentará a peça contra o rebolo de corte. Diametralmente oposto à saliência, é então retificado a peça a uma profundidade de corte “ $a_{e1}$ ”, no ponto de contato (S), conforme Figura 4 I (Friedrich, 2004). Quando a saliência da peça tocar a superfície da régua de apoio (ponto de contato “A”) movimenta-se o centro da peça, retificando a peça a uma nova profundidade de corte “ $a_{e2}$ ”, conforme apresentado na Figura 4 II.

Retificando nessas condições, um diâmetro constante na peça será obtido, mas não necessariamente na forma circular (Norton, 1994).

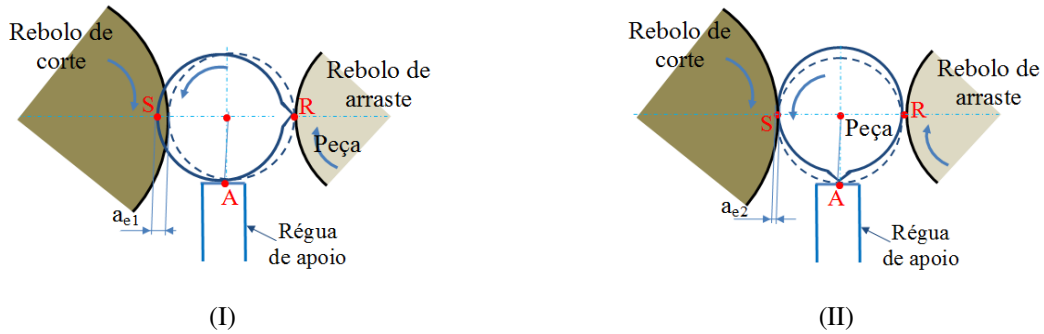


Figura 4 – 1º caso: Mecanismo de formação do erro de circularidade (Friedrich, 2004)

O efeito da circularidade é avaliado, no segundo caso, considerando a remoção do material na circunferência de uma peça circular ideal, sem saliência, conforme Figura 5. O processo de remoção de material é realizado pelo rebole de corte e é garantido por meio da pressão contínua da peça sobre a superfície da régua de apoio e o rebole de arraste. À medida que é retificada, por meio do contato com o rebole de corte reduz-se o raio da peça, o resultado é que a cada variação da forma da peça, tem como consequência, uma mudança da posição da peça em relação à posição inicial, nos sentidos dos eixos “x” e “y” (Friedrich, 2004; Klocke, König, 2005; Slonimski, 1956). Os deslocamentos “ $\Delta x$ ”, “ $\Delta y$ ” gera, portanto, irregularidade na peça, que resulta em outras saliências.

Analisando esse fenômeno, fica evidente que a diferença na posição geométrica da peça pode favorecer, agravar ou não influenciar na caracterização do efeito do erro de circularidade na peça.

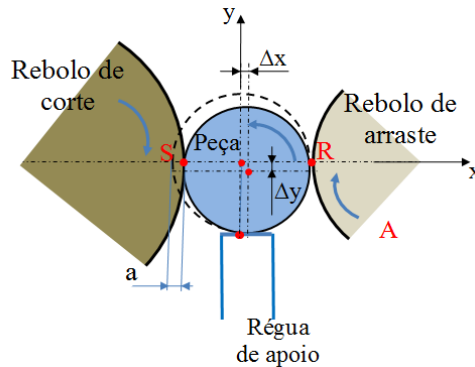


Figura 5 – 2º caso: Mecanismo de formação do erro de circularidade (Friedrich, 2004)

Estes efeitos são corrigidos fazendo-se duas alterações. Primeiramente, a altura da régua de apoio deve ser alterada fazendo com que a peça fique localizada fora da linha de centro dos rebolos. Em seguida, cria-se um ângulo de topo na régua de apoio. Quando o ponto mais alto da peça estiver em contato com o rebole de arraste, o correspondente ponto não será diametralmente oposto, conforme Figura 6. O erro diminuirá progressivamente e a concentricidade da peça será rapidamente obtida (Slonimski, 1956).

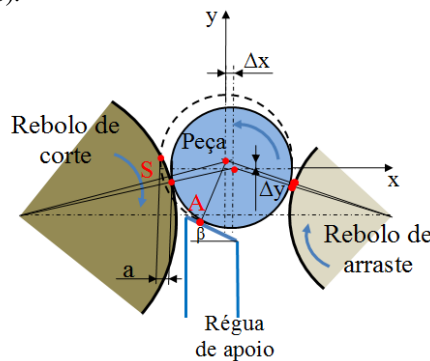


Figura 6 – Posição geométrica da peça

A ação corretiva depende muitas vezes, de variáveis, tais como do ângulo de topo da régua de apoio, da dimensão da peça e sua dureza, da velocidade do rebole de arraste e outros fatores. Considerando-se todos os parâmetros iguais, peças que giram com velocidades mais altas alcançam a forma cilíndrica mais rapidamente do que peças que giram lentamente. O fator limitante é quando a peça começa a vibrar e não obtém as características exigidas de qualidade. A vibração é causada quando a régua é ajustada numa altura muito elevada ou a velocidade demasiada alta. Outra fonte adicional do erro de circularidade em retificação é provocada pela vibração da máquina, que se refere à frequência natural da estrutura da máquina e pode ocorrer em todo sistema de retificação (Petrosky, 1998).

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

O ângulo de topo da régua de apoio é uma grandeza com alta influência na estabilidade do processo de retificação centerless e também na distribuição das forças de corte (Becker, 1965; Friedrich, 2004). A alteração do ângulo de topo da régua pode mudar o número esperado de ondulações na peça e, conseqüentemente, o valor da circularidade. Pequenas alterações podem minimizar ou agravar a circularidade da peça. Na prática industrial, utilizam-se valores entre 5° a 45° do ângulo de topo da régua de apoio. Valores altos, geralmente, são aplicados para retificação de peças com pequenos diâmetros e respectivamente régua de apoio finas. A utilização de régua com ângulos íngremes geralmente causa desgastes progressivos na régua e pode levá-la a ruptura.

O ângulo de topo da régua de apoio depende, principalmente, do diâmetro da peça, do ângulo de tangência, diâmetro dos rebolos, dentre outros. O aumento do ângulo da régua de apoio aumenta significativamente a pressão da peça no rebole de arraste. Por meio do mapa de estabilidade proposto por Reeka, (1967) e Meis (1980) é possível definir o ângulo ideal da régua de apoio de modo a minimizar o efeito sobre o erro de circularidade da peça durante o processo de retificação centerless.

### 1.4. Teoria da Estabilidade

O ponto de partida para o cálculo da estabilidade geométrica para o processo de retificação centerless, que averigua o coeficiente de estabilidade, foi representado por Reeka (1967) como:

$$G = \frac{\cos(\beta + \gamma)}{\cos(\beta - \gamma)} \cdot e^{-i.Z.\varphi^2} + \frac{\sin(\gamma)}{\cos(\beta - \gamma)} \cdot e^{-i.Z.\varphi} \quad (14)$$

O coeficiente de estabilidade “G” representa o comportamento do deslocamento da peça, permitindo uma afirmação sobre a estabilidade do processo. Considera-se o processo instável, aquele em que durante a retificação ocorre maior deslocamento da peça, que conseqüentemente, maior variação na profundidade de corte. O processo ideal (estável) é aquele em que o erro de circularidade é minimizado durante a retificação, ou seja, ocorre menor variação da profundidade de corte. A definição do coeficiente de estabilidade corresponde para  $G < -1$ , por exemplo -1.1, um processo instável, isto é, o erro de circularidade mantém-se ou pode aumentar. Para  $G > -1$ , por exemplo -0.9, resulta-se uma melhoria da circularidade para cada rotação da peça. A região estável do gráfico de estabilidade, no existente erro teórico reproduzido, localiza-se para  $G = -1$  (Lindenau, 2006; Meis, 1980).

A Figura 7 representa o mapa de estabilidade geométrico, gerado a partir do teorema da estabilidade. O mapa de estabilidade, gerado em função do diâmetro dos rebolos, indica para cada combinação do ângulo de topo da régua de apoio “ $\beta$ ” e ângulo de tangência “ $\gamma$ ” regiões que caracteriza a estabilidade do processo. As linhas brancas no mapa de estabilidade indicam o limite de estabilidade do processo, ou seja, valor de  $G = 1$ . As regiões dentro dos círculos com contornos brancos representam valores de  $G > -1$  (região instável) e fora, valores de  $G < -1$  (região estável). As regiões coloridas representam o número teórico de ondulações “Z” e pode ser quantificado com auxílio da barra de cores, conforme Figura 7.

Reeka (1967), Meis (1980), Lindenau (2006) consideram o processo estável quando a combinação do ângulo de topo da régua de apoio “ $\beta$ ” e o ângulo de tangência “ $\gamma$ ” apresentam no mapa de estabilidade, valor de “Z” maior que 22 e  $G = -1$  (linhas brancas no mapa de estabilidade). Quanto maior o número de ondulações menor o erro da circularidade da peça após a retificação.

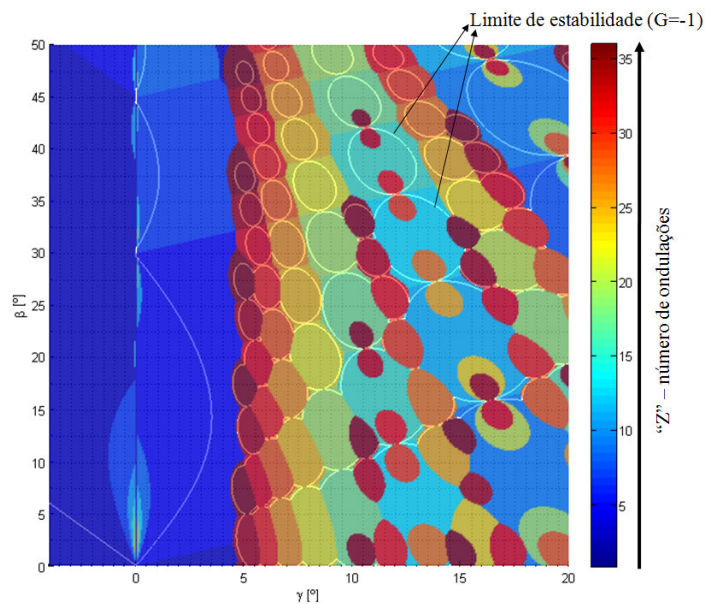


Figura 7 - Mapa de estabilidade para diâmetro do rebole de arraste = 350 mm e diâmetro do rebole de corte = 400 mm

## 2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios foram realizados em uma retificadora centerless de passagem, com rotação máxima do rebolo de corte de 1750 rpm e 600 rpm para o rebolo de arraste e diâmetros 400 mm e 350 mm respectivamente. Os corpos de prova com dimensões de 4,9 mm x 16,4 mm, material ABNT 51.100, temperado e revenido com dureza de 60 HRc, foram utilizados para realizar os experimentos.

### 2.1. Influência do ângulo de topo da régua de apoio

Foram realizados quatro 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. Adotou-se ângulo de tangência: 10,5° e altura do dressador: 16,2 mm.

Pela observação da Figura 8, a combinação do ângulo de tangência  $\gamma = 10,5^\circ$  com o ângulo de topo da régua de apoio  $\beta = 30^\circ$ , apresentou menor valor da circularidade de 0,6  $\mu\text{m}$ . O maior valor da circularidade encontrado foi com a combinação “ $\gamma = 10,5^\circ$ ” e “ $\beta = 15^\circ$ ”, sendo 2,5  $\mu\text{m}$ .

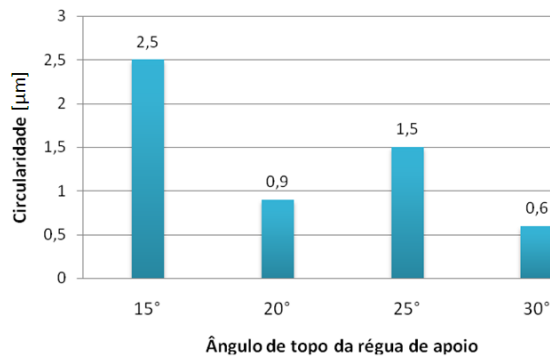


Figura 8 – Influência do ângulo de topo da régua no erro circularidade

### 2.2. Influência do ângulo de tangência na circularidade da peça

Foram realizados 12 ensaios, variando o ângulo de tangência, que conseqüentemente varia a altura do corpo-de-prova em relação ao centro do rebolo de corte, conforme Tabela 01. A cada variação da altura do dressador ( $h_d$ ), foi necessário 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.

Tabela 01 – Ordem de realização dos ensaios

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

A alteração do ângulo de tangência é obtida simplesmente com a variação da altura da régua de apoio no vão de retificação.

O gráfico, conforme Figura 9, apresenta os valores da circularidade da peça em função do ângulo de tangência, para um valor fixo do ângulo de topo da régua de apoio, isto é,  $\beta = 20^\circ$ . Observa-se que os menores valores da circularidade foram obtidos para os ângulos de tangência  $\gamma = 6^\circ$ ,  $10,5^\circ$ . Para  $\gamma = 0^\circ$ , peça localizada na mesma linha de centro dos rebolos obteve-se o maior erro da circularidade.

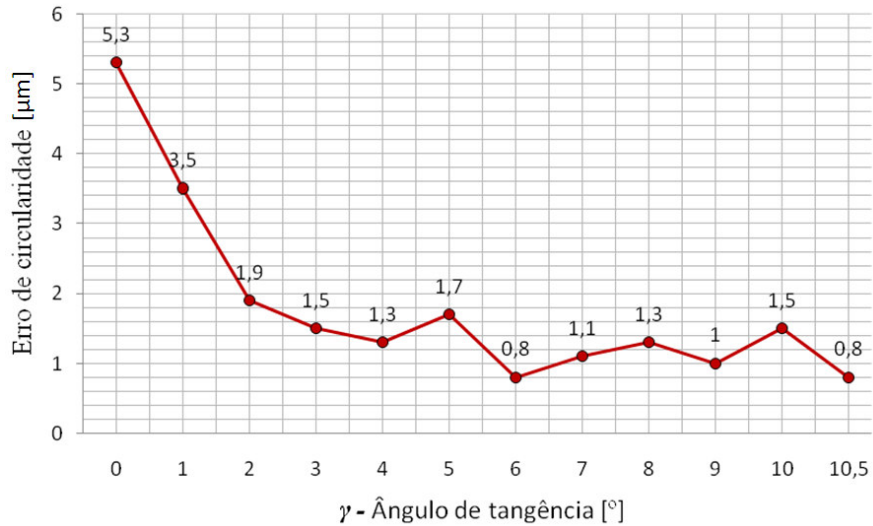


Figura 9 – Influência do ângulo de tangência no erro de circularidade

Pela observação das Figuras 8 e 9, nota-se que tanto o ângulo de topo da régua como o ângulo de tangência influenciam significativamente o erro de circularidade da peça após a retificação.

Este fenômeno pode ser explicado através do mapa de estabilidade geométrica, gerado especificamente para o processo de retificação centerless, a partir do teorema da estabilidade. O mapa de estabilidade indica qual a melhor combinação do ângulo de topo da régua com ângulo de tangência de modo que, após a retificação a peça obtém o menor erro de circularidade. As melhores combinações são aquelas que indicam no mapa o maior valor do número teórico de ondulação “Z” e localizada próximo aos contornos (limite de estabilidade). O número de ondulação pode ser obtido com auxílio da barra de cores, conforme Figura 10.

Nos ensaios realizados os menores valores do erro de circularidade foram obtido para as combinações que apresentaram o maior valor teórico do número de ondulações. Quando maior valor teórico do número de ondulações “Z” menor será a movimentação das peças durante a retificação, com isso, menor variação da profundidade de corte e, portanto, menor erro da circularidade.

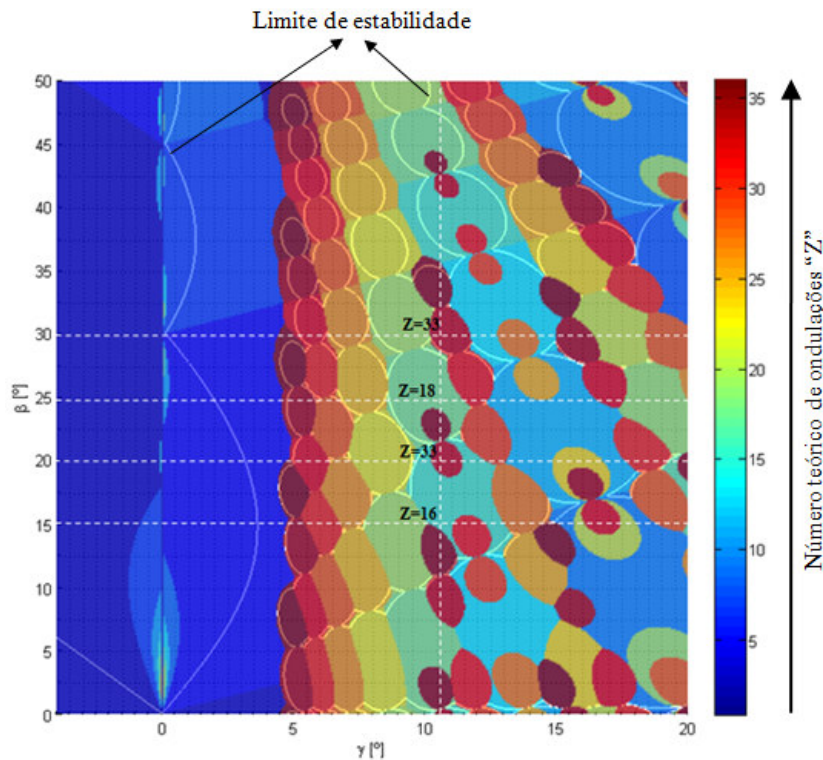


Figura 10 - Mapa de estabilidade para diâmetro do rebolo de arraste = 350 mm e diâmetro do rebolo de corte = 400 mm

### 3. 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 o valor ideal do ângulo de topo da régua de apoio e uma condição ideal de ajustagem da altura da peça “ $h_w$ ”, em função do valor ideal do ângulo de tangência.
- A partir da análise comparativa entre os valores da circularidade obtidos experimentalmente, conclui-se que a variação do ângulo de topo da régua e ângulo de tangência possui influência significativa no erro de circularidade dos corpos-de-prova após a retificação.

### 4. REFERÊNCIAS

- Becker, E.A. Kraefte und kreisformfehler beim Spitzenlosen – Einstechschleifen. Dissertation, RWTH – Aachen, 1965.
- Friedrich, D. Prozessbegleitete Beeinflussung des geometrischen Rundungseffektes beim spitzenlosen Aussenrundeinstechschleifen. Shaker Verlag, D82 (Dissertation, RWTH-Aachen), 2004.
- Gonçalves, L. M.; Miranda, G. W. *Software* Paramétrico para o Processo de Retificação Centerless de Passagem. In.: Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica - CIBIM 8°, Cusco – Peru, 2007.
- Klocke, F.; König, W., *Fertigungsverfahren: Schleifen, Honen, Läppen*. VDI Verlag GMBH, Düsseldorf, 2005.
- Lindenau, K. *Wirtschaftliche Fertigung mit Schleifen – Kostensenkung durch Prozesssicherheit und gezielte Maschinenbeschaffung*, Carl Hanser Verlag, München 2006.
- Norton, Abrasives Marketing Group. *Centreless Grinding*. IDA Industrial Distribution Association, Massachusetts, United States of America, 1994.
- Petrosky, G. C. *Workpiece Shape control in through – feed centerless grinding*. Dissertation, University of Connecticut, 1998.
- Schreitmüller, H. *Kinematische Grundlagen fuer die Praktische Anwendung des Spitzenlosen Hochleistungsschleifens*. Dissertation, RWTH – Aachen, 1971.
- Slonimski, W.I. *Theorie und Praxis des spitzenlosenschleifens*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1956.

### 5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores se responsabilizam pelo conteúdo e autorizam a publicação e reprodução do artigo “Estudo da Influência do ângulo de topo da Régua de Apoio e ângulo de Tangência na Circularidade da Peça no Processo de Retificação Centerless de Passagem”, no V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – 5°COBEF.