

DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM DE FACA E CAVIDADE DE AÇO ABNT D6 PARA MATRIZES DE TERMOFORMAGEM

Ricardo Martinello Pinto¹, Luiz Carlos de Cesaro Cavaler², Ilen Maris Martinelli.³

Ricardomartinello90@gmail.com, luiz.cavaler@satc.edu.br, ilen.martinelli@satc.edu.br

¹Faculdade SATC, Engenharia Mecânica - Rua Pascoal Meller, 73 - CEP 88.805-380 - CP 362 - Criciúma - SC - Brasil.

Resumo

A retificação cilíndrica é um processo de fabricação muito utilizado na indústria pela sua capacidade de atingir bons níveis de rugosidade e precisão dimensional. Neste presente trabalho foi verificado o erro de forma de circularidade e a rugosidade de superfície na retificação cilíndrica externa e interna de cavidade e faca utilizadas em molde de termoformagem. Estas peças são responsáveis por realizar o corte do material plástico, trabalhando em um ajuste de encaixe, com uma folga de 5 μm a 10 μm . O material da cavidade e faca é o aço ABNT D6, por isso a retificação é considerada DTG (“*Difficult To Grind*”). Os ensaios basearam-se em uma planilha com os dados de entrada a fim de analisar qual interferência seria gerada nos resultados, ou seja, circularidade e rugosidade. Para fazer esta análise foram realizados quatro ensaios, modificando tempo de centelhamento (*spark-out*), profundidade de corte (a_e) e relação q . Esta última envolve a rotação do rebolo e peça. Após a realização dos ensaios constatou-se que tempo de centelhamento maiores e profundidade de corte menores obtêm-se os mais baixos erros de circularidade. Já para a rugosidade, maiores valores para a relação q e menores valores de profundidade de corte conseguem-se os melhores valores de rugosidade. Assim é possível obter um melhor ajuste de encaixe entre faca e cavidade, evitando perdas na termoformagem de descartáveis plásticos.

Palavras-chave: Retificação cilíndrica; Erro de circularidade; Termoformagem; Rugosidade.

1. Introdução

Mesmo com o crescente avanço tecnológico e com máquinas-ferramentas mais sofisticadas, ainda é impossível obter peças com dimensões exatas. Com isso determina-se um

limite de tolerância nas medições. Mesmo assim, acontece de peças saírem fora deste limite imposto, que ocorre devido a falhas no processo de usinagem. Desta maneira, a peça apresenta erros de forma.

No processo de termoformagem de descartáveis plásticos são utilizadas facas e cavidades. Essas peças passam pelo processo de retificação cilíndrica, onde necessitam de um acabamento de superfície e tolerâncias dimensionais justas. No entanto, é primordial o controle do processo de retificação, pois é nesta etapa que o produto será finalizado, tendo este passado por várias outras etapas como: corte, torneamento externo e interno, furação e tratamento térmico. Assim, deve-se ter um cuidado extremo nesta operação para não gerar prejuízo, visto que o produto ao chegar neste processo já possui um valor agregado alto. A Fig. 1 mostra a cavidade e faca utilizadas para o processo de termoformagem.

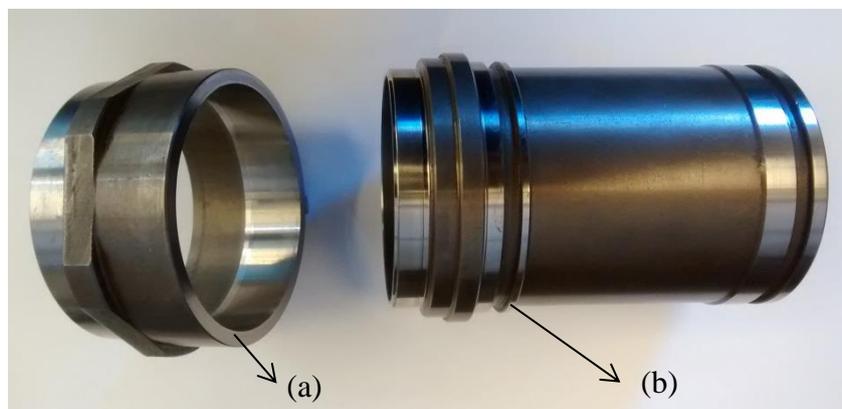


Figura 1 – Componentes do molde de termoformagem: a – faca; b – cavidade.

Conforme a Fig. 1, observa-se que ambas as peças possuem uma parede cilíndrica muito fina, em torno de 3 mm. Isto facilita o surgimento de erros de forma, como circularidade. Este erro influencia no ajuste de folga entre elas, pois possui tolerâncias muito justas, de aproximadamente 5 a 10 μm , acarretando em rebarbas nas bordas de copos plásticos, onde exatamente é feito o corte do polipropileno (PP), ou dependendo do erro nem realizar o corte do PP. Como o material é aquecido para realizar a termoformagem, ele tem a facilidade de escoar nestes espaços gerados pelo erro de forma, onde não há contato entre cavidade e faca.

Uma análise mais detalhada da retificação cilíndrica trará melhorias no processo de fabricação das cavidades e facas para termoformagem. Dessa forma, um estudo através de experimentos, com a utilização de corpos de prova previamente dimensionados, é um modo de encontrar uma solução prévia para este problema, aumentando a qualidade deste conjunto,

evitando assim, perdas nas etapas finais do processo e conseqüentemente impedir o aumento no custo do produto.

Portanto, pretende-se modificar parâmetros de usinagem como profundidade de corte radial (a_e), relação q e tempo de centelhamento (*spark-out*), com o intuito de melhorar o acabamento da superfície e, principalmente reduzir o erro de forma de circularidade. A análise mais profunda deste estudo será reconhecer os possíveis causadores deste erro de forma, utilizando rebolos específicos para a retificação do aço ferramenta D6 temperado com dureza entre 60 e 62 HRc.

Para reconhecer quais parâmetros têm maiores influencias sobre a circularidade, será utilizado o teste estatístico de regressão linear múltipla, com a finalidade de obter uma relação matemática entre a variável dependente e as variáveis independentes. Por meio desta equação será possível ter uma predição do erro de circularidade, através da regra estatística dos mínimos quadrados.

2. Revisão Bibliográfica

Em busca de ampliar conhecimentos quanto ao processo de retificação cilíndrica, bem como suas variáveis e processos relacionados, fundamenta-se uma breve revisão bibliográfica do tema apresentado, visando um entendimento mais amplo sobre os parâmetros de entrada, e das características de saída do produto.

2.1 Operação de Retificação Cilíndrica

Na indústria metal mecânica é muito utilizado o processo de retificação cilíndrica, por ser considerado um processo de precisão. Nas últimas décadas, o processo vem se aperfeiçoando, com novas máquinas e abrasivos, alcançando assim bons níveis de qualidade dimensional e superficial, além de proporcionar uma rugosidade baixa. Na retificação cilíndrica a peça deve estar fixa na placa ou entre pontas, girando a uma rotação determinada enquanto um rebolo abrasivo gira a uma alta velocidade (20 a 140 m/s). O rebolo é pressionado contra a peça, gerando uma força perpendicular na área de contato, ocorrendo à usinagem por abrasão, onde o material é removido da peça e do rebolo (Malkin, 1989).

Segundo Alves *et al* (2008), o processo de retificação é muito complexo, pois há vários parâmetros para serem ajustados que interferem diretamente nas características de saída.

De acordo com a norma NBR ISO 3002-1 (2013), as operações de retificação são identificadas conforme a superfície do rebolo entra em contato com a peça e com o avanço dele sobre a mesma. Desta forma, os avanços são classificados da seguinte maneira: tangencial de mergulho, tangencial de passagem, lateral de mergulho e lateral de passagem.

Neste trabalho será utilizada a retificação cilíndrica externa tangencial de passagem, e retificação cilíndrica interna tangencial de passagem, esquematizadas na Fig. 2, onde v_w (m/s) é a velocidade tangencial da peça, v_s (m/s) é a velocidade tangencial do rebolo, v_{fr} (mm/min) é a velocidade de avanço radial, v_{fa} (mm/min) é a velocidade de avanço axial, a_e (μm) é a profundidade de corte radial e a_p (μm) é a profundidade de corte axial.

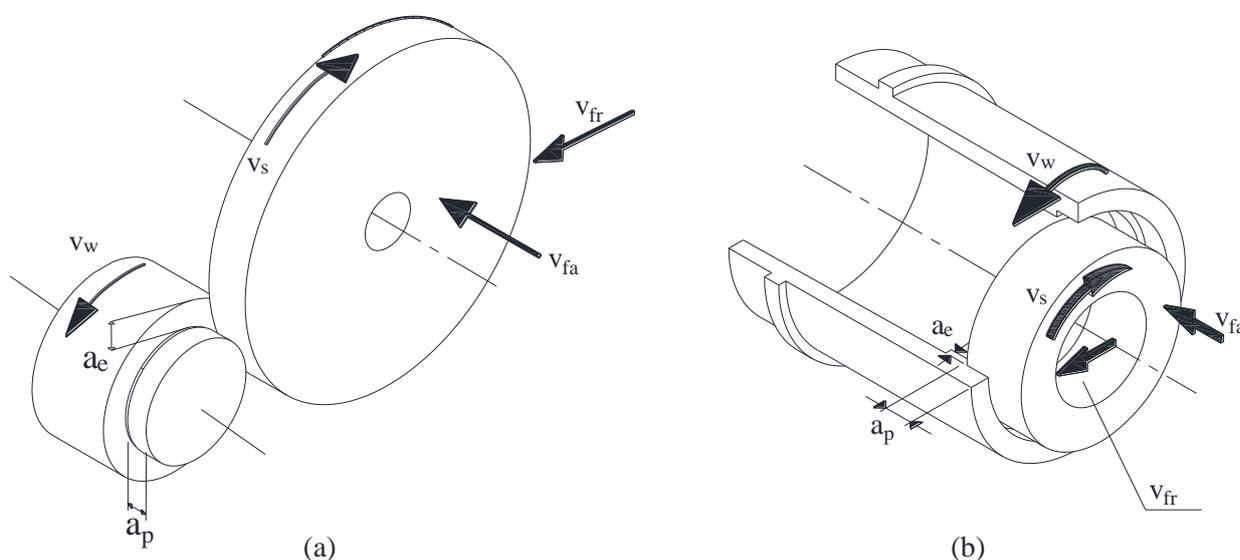


Figura 2 - Retificação cilíndrica: a - externa; b – interna (Schuhli *apud* Oliveira, 2007).

2.1.1 Retificação Cilíndrica Externa

Como o rebolo possui um diâmetro maior que a peça, gera-se um pequeno arco de contato entre ambos, ocasionando um aumento do comprimento do cavaco e consequentemente diminui a espessura média do cavaco. Isto facilita a retificação, pois gera uma menor força de usinagem, visto que a espessura do cavaco é menor (Magnani, 2013).

A retificação pode ocorrer através de fixação da peça diretamente na placa, entre pontas ou através de gabarito (processo empregado neste trabalho).

2.1.2 Retificação Cilíndrica Interna

Operação realizada em diâmetros internos gera um grande arco de contato entre peça e rebolo, devendo esse possuir no máximo 0,75 vezes o diâmetro interno da peça, ocasionando assim um cavaco mais espesso, ocorrendo uma força maior de retificação. É necessário se atentar para furos que possuem um comprimento muito extenso, a fim de evitar possíveis flexões (Cuoco *et al*, 2009).

2.2 Fatores que Determinam a Escolha de um Rebolo

Segundo Bianchi *et al* (2002), na usinagem por abrasão uma ferramenta rotativa denominada rebolo faz o processo de retificação. Esta ferramenta tem a forma de um disco, e é constituída de um ligante e grãos abrasivos. Para a seleção de um rebolo, deve-se analisar o projeto da peça a fim de conhecer o tipo de material a ser retificado, a precisão e acabamento desejados. Estes fatores são constantes, específicos do projeto da peça, portanto devem ser mantidos, escolhendo o rebolo que se adapte a estas condições. Fatores variáveis também determinam na escolha de um rebolo, como velocidade tangencial do rebolo (v_s) e velocidade de avanço axial (v_{fa}). Abaixo a Tab. 1 mostra os tipos de rebolos que podem ser utilizados no processo de retificação.

Tabela 1 - Chave de códigos para seleção de rebolos (Magnani *apud* Salmon, 2013)

Abrasivo	Granulometria	Dureza	Estrutura	Ligante
AA: Oxido de alumínio branco	8-14: Muito grosseiro	A: Macio	0-3: Denso	V: Vitrificado
C: Carboneto de silício	16-36: Grosseiro	L: Médio	4-6: Médio	B: Resinoide
B: CBN	40-80: Médio	Z: Duro	7-9: Poroso	R: Elástico
D: Diamante	90-220 : Fino		10+: Altamente poroso	M: Metálico
	240-1200: Muito fino			

Para determinar o tipo de abrasivo é necessário saber o tipo de material que será

retificado. Para aços carbono, aços liga e aços rápidos utiliza-se o AA (Al_2O_3). Em relação a granulometria utiliza-se grãos finos para materiais duros e quebradiços, e quando deseja-se uma rugosidade baixa. A dureza de um rebolo vai ser determinada através da dureza da peça, ou seja, rebolos macios para materiais duros (Valarelli, 2002).

Durante a usinagem ocorre a formação de cavacos, assim os rebolos possuem uma estrutura que pode ser mais denso ou poroso, que serve como alojamento destes, e conseqüentemente o fluido de corte expulsá-los desta região (Bianchi, 2001).

O tipo de ligante mais utilizado é o vitrificado, pois com ele consegue-se fazer um controle maior do nível de porosidade e pode-se atingir uma velocidade máxima do rebolo de 60 m/s (Stemmer, 1995).

2.3 Material ABNT D6 (VC-131)

O material utilizado na fabricação da faca e cavidade para termoformagem é o aço ABNT D6 temperado e revenido, com uma dureza em torno de 62 HRc. No processo de retificação este aço é considerado de difícil usinagem, ou seja, DTG (“*Difficult To Grind*”). O aço ligado ABNT D6 é utilizado como aço ferramenta para trabalhos a frio e possui uma estabilidade dimensional excelente, sendo considerado como indeformável, e apresenta ótima resistência a abrasão, além de manter o grau de afiação do gume quando empregado como ferramenta de corte (Fernandes *et al*, 2004).

2.4 Tempo de Centelhamento (*spark-out*)

No decorrer do processo de retificação os grãos abrasivos removem o material da peça, com o avanço do rebolo. Porém este processo não ocorre de maneira tão simples, pois conforme Chen *et al* (2002) e Rowe (2014), o processo apresenta três estágios: escorregamento, deformação elástica e corte.

Durante a retificação ocorrem deformações elásticas causadas pela falta de rigidez do conjunto máquina-peça-ferramenta. Isto ocasiona um atraso no avanço real em relação ao teórico, fazendo com que não se obtenha a dimensão desejada na peça. Assim é determinado um tempo de permanência do rebolo sobre a superfície da peça, a fim de evitar estes erros dimensionais. Este processo é denominado tempo de centelhamento ou *spark-out*. Ao longo

deste tempo as deformações elásticas que tinham sido geradas são eliminadas, e a dimensão desejada é obtida. Na Fig. 3 observa-se como funciona o tempo de centelhamento (s_p).

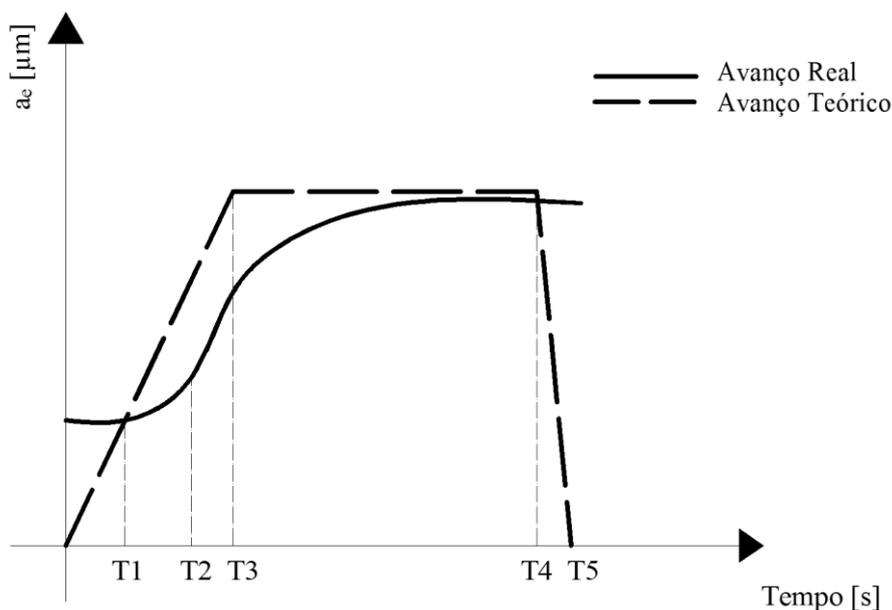


Figura 3 – Ciclo de retificação cilíndrica externa (Hassui, 2003).

As etapas da figura podem ser analisadas da seguinte forma:

- T1: Deslocamento do rebolo em direção a peça, com avanço rápido;
- T2: Contato inicial entre rebolo e peça. É nesta etapa que ocorre as deformações elásticas da máquina, rebolo e peça, ocasionando atraso no avanço real em relação ao teórico. No fim desta etapa inicia-se a formação de cavaco;
- T3: A profundidade de corte com o decorrer do tempo passa a ter uma simetria em relação a teórica;
- T4: É nesta etapa que entra o tempo de centelhamento, onde o rebolo permanece sobre a peça sem avanço radial, com a finalidade de remover as deformações causadas pela força de retificação;
- T5: Recuo do rebolo, para troca da peça.

A Saint-Gobain (2007) recomenda a utilização do tempo de centelhamento de 10 á 20 voltas da peça.

2.5 Erro de forma - Circularidade

A seleção dos parâmetros de corte na retificação cilíndrica é muito importante, pois afeta diretamente na qualidade dimensional da peça. De acordo com Saravanakumar *et al* (2016), a profundidade de corte radial (a_e) e a rigidez do conjunto máquina-ferramenta-peça afeta diretamente a circularidade da peça. Outra variável muito importante que ocasiona este erro é o centelhamento, pois para tempos muito baixos não ocorre à absorção das deformações plásticas ocorridas durante o processo, acarretando no erro de circularidade (Taborga *et al*, 2003 e Fernandes, 2004). A Fig. 4 apresenta o erro de forma de circularidade, conforme norma NBR ISO 2768-2 (2001).

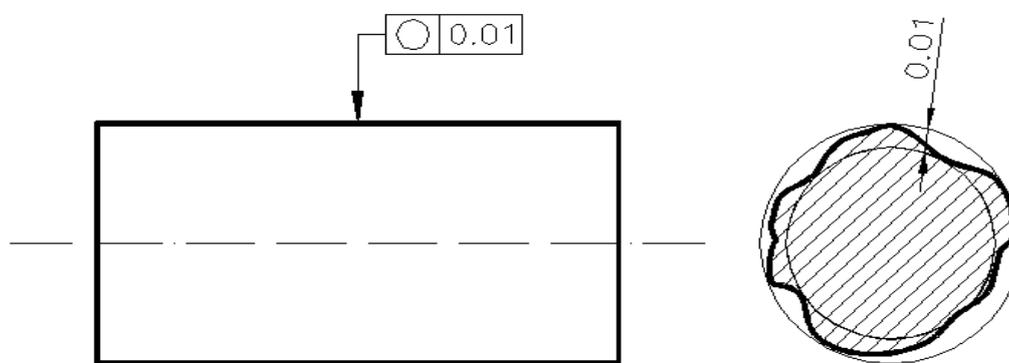


Figura 4 – Erro de forma de circularidade conforme norma NBR ISO 2768-2.

Segundo Fragoso *et al* (2016), durante o processo de retificação há geração de calor, ocasionando deformações térmicas e dilatações, favorecendo o surgimento de erros dimensionais, como é o caso da circularidade. Para amenizar este fator deve-se utilizar níveis menores de profundidade de corte radial (a_e), para reduzir o atrito entre peça e rebolo, consequentemente reduzindo dilatações e deformações térmicas.

Para determinar quais parâmetros têm maiores influências sobre o erro de forma de circularidade será utilizado o teste estatístico de regressão linear múltipla. Com esta ferramenta é possível analisar qual parâmetro têm maior relevância sobre o erro de circularidade, além de fornecer um modelo matemático com as variáveis independentes e a variável dependente. A equação geral desse modelo pode ser expressa como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_k \cdot x_k + \varepsilon \quad (1)$$

Onde Y é a variável dependente, x são variáveis independentes, ε é o erro aleatório

que serve para tornar o modelo probabilístico, sendo igual a 0, onde 0 representa o vetor nulo. O valor de β_0 é o intercepto de Y, e os outros valores de β representam a contribuição de cada variável independente (McClave, 2009).

2.6 Operação de Dressagem (*Dressing*)

Durante o processo de retificação o rebolo sofre desgaste perdendo sua afiação, e proporcionando acabamentos grosseiros, ou seja, níveis de rugosidade maiores. A operação de afiação do rebolo tem por objetivos principais (Oliveira, 1989):

- Remover os grãos desgastados do rebolo através da passagem de uma ferramenta de diamante, com o rebolo em rotação;
- Obter a concentricidade entre a face de trabalho e o eixo de rotação;
- Afiar os grãos remanescentes do processo de dressagem.

O momento de dressagem deve ser analisado pelo operador, a fim de identificar o tempo certo, pois se for realizada antes do ponto de reafiação ocasiona uma perda de tempo e um custo maior na finalização do produto, porém se for realizada depois do tempo de reafiação apresentará perdas na qualidade final das peças, como rugosidade elevada e erros geométricos, como o de circularidade (Wang, 2008).

Neste trabalho será utilizado um dressador multigranular do tipo *Fliese*, com as condições de avanço mantidas constantes, assim não influenciando nos parâmetros de saída.

2.7 Influência dos Parâmetros de Entrada na Rugosidade Superficial

No processo de retificação a rugosidade é um dos parâmetros que determina a qualidade final da peça. Em função da cavidade e faca trabalharem em atrito constante, será utilizado o parâmetro de rugosidade média (R_a). Conforme a norma NBR ISO 4287 (2002), o parâmetro de rugosidade R_a é a média aritmética entre os valores de y_i e a quantidade de pontos analisados durante um percurso de medição L_m , como pode ser observado na Fig. 5.

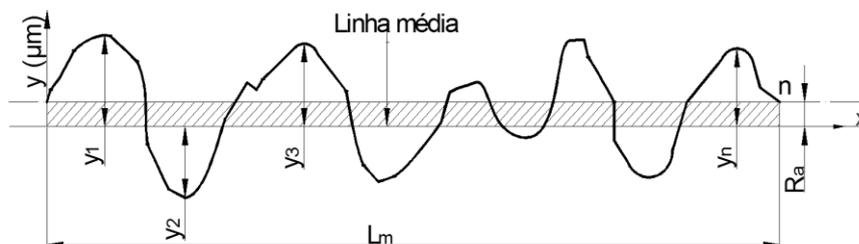


Figura 5 – Rugosidade média aritmética R_a conforme a norma NBR ISO 4287 (2002).

Conforme Fig. 5 a rugosidade media aritmetica é obtida atraves da equação:

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad [\mu\text{m}] \quad (2)$$

Segundo Torga (2003), a rugosidade depende de vários parâmetros de entrada do processo, como relação q e profundidade de corte radial (a_e). A relação q é determinada através da velocidade periférica do rebolo (v_s) e velocidade periférica da peça (v_w), e pode ser encontrada através da seguinte equação:

$$q = \frac{v_s}{v_w} \quad [\dots] \quad (3)$$

De acordo com Saint-Gobain (2007), conforme a operação de retificação cilíndrica, determina-se a relação q , como pode ser visto na Tab. 2:

Tabela 2 – Relação q para diferentes níveis de operação conforme Saint-Gobain (2007).

Tipo de Operação	Relação q
Desbaste	< 90 ~ 60
Semi-Acabamento	~90
Acabamento	> 90 ~ 120

É possível reduzir a rugosidade média (R_a) através da modificação destes parâmetros, com a relação q para acabamento e diminuição da profundidade de corte radial (a_e). Com uma relação q menor e um aumento da profundidade de corte radial obtém-se um cavaco mais espesso e conseqüentemente um aumento da rugosidade média. Conforme Hassui (2003), o tempo de centelhamento (*spark-out*) influencia fortemente na rugosidade superficial, pois para tempos parciais não há tempo suficiente para absorção das deformações elásticas ocorridas

durante o processo, fazendo com que as cristas de rugosidade permaneçam na peça.

A análise da rugosidade superficial será baseada na norma NBR 8404 (2013), através das classes de rugosidade, que varia entre N1 e N12.

3. Procedimento Metodológico

Esta etapa apresentará cada procedimento para elaboração do projeto, por meio de ensaios, para determinar quais parâmetros de entrada interferem nos resultados de saída.

3.1 Corpos de Prova para Realização de Testes Práticos

Para a realização da retificação cilíndrica foram adquiridas cavidades e faca que estavam estocadas e inutilizadas. Estas serão utilizadas como corpos de prova para os ensaios, sendo obtidas dezoito peças, formando nove conjuntos.

Estas peças foram disponibilizadas e fabricadas na empresa Metael metalúrgica Ltda, em aço ABNT D6 (VC-131), temperadas e revenidas, com dureza entre 60 e 62 HRc.

3.2 Processo de Retificação Cilíndrica Externa

O processo de retificação cilíndrica foi executado na empresa Metael Metalúrgica Ltda, onde a máquina-ferramenta utilizada para a ensaio foi um torno CNC Romi serie CENTUR 30D, adaptado com um cabeçote de retificação externo e interno. Na Tab. 3 são apresentadas as características técnicas desta máquina relevantes ao processo de retificação cilíndrica.

Tabela 3 - Características do Torno CENTUR 30D.

Curso Longitudinal eixo Z	650 mm
Curso transversal eixo X	400 mm
Diâmetro admissível sobre o barramento	475 mm
Diâmetro admissível sobre o carro transversal	170 mm
Potência do motor principal	30 CV

Utilizou-se o avanço tangencial de passagem, pois foi à forma de conseguir um avanço radial (v_{fr}) mais lento, tendo em vista que o menor avanço que o torno possibilita é de 1 mm/min, este sendo utilizado no avanço axial (v_{fa}). A dressagem foi realizada com um

dressador multigranular, do tipo *fliese*, com avanço de 10 mm/min, sendo feito este procedimento antes de cada ensaio, para garantir resultados confiáveis.

A fixação da cavidade se deu através de gabarito, como mostra a Fig. 6, considerando-se que diretamente na placa sofreria maiores tensões de aperto, podendo acarretar em erros geométricos na mesma.

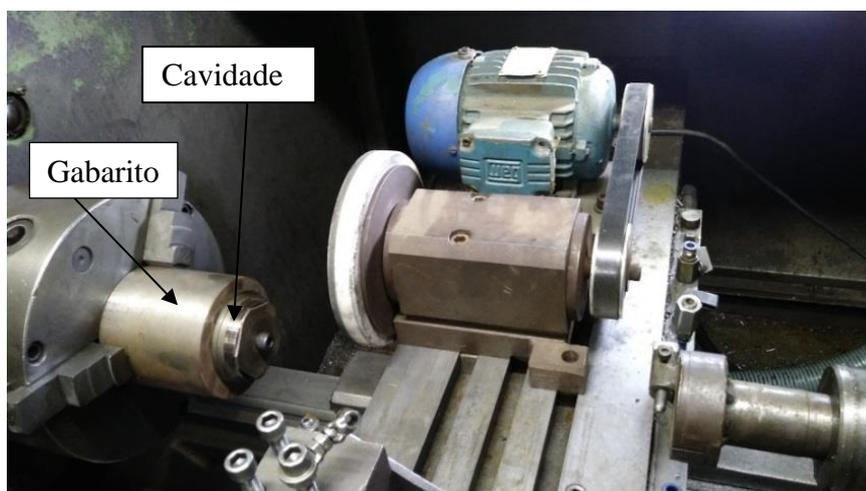


Figura 6 – Processo de retificação cilíndrica externa.

O ensaio foi efetuado utilizando um rebolo do tipo 38A 80 K V conforme Tab. 1 da Norton Abrasivos, com as seguintes dimensões: 203,00 mm de diâmetro externo, 25,4 mm de largura e 31,75 mm de diâmetro interno. Foram realizados 4 tipos de ensaios, cada um com 3 cavidades, modificando parâmetros de corte de entrada. A refrigeração utilizada foi emulsão com diluição 1:30. Os parâmetros de corte utilizados estão discriminados na Tab. 4.

Tabela 4 – Parâmetros de corte utilizados na retificação cilíndrica externa.

Ensaio	s_p [s]	v_{fa} [mm/min]	v_{fr} [mm/min]	a_e [μ m]	a_p [mm]	v_w [m/s]	v_s [m/s]
Ensaio 1	5	1	0,025	50	7	0,24	18,12
Ensaio 2	15	1	0,025	50	7	0,24	18,12
Ensaio 3	15	1	0,025	50	7	0,20	21,47
Ensaio 4	15	1	0,025	20	7	0,20	21,47

Como mostra a Tab. 4 foram utilizados 7 parâmetros de corte para realizar os ensaios, porém apenas 3 são invariáveis: velocidade de avanço axial (v_{fa}), velocidade de avanço radial (v_{fr}) e profundidade de corte axial (a_p). Os outros 4 parâmetros foram alterados, afim de

verificar o comportamento nos resultados de saída, dando enfoque para o tempo de centelhamento (*spark-out*) e profundidade de corte radial (a_e).

3.3 Processo de Retificação Cilíndrica Interna

Da mesma forma da cavidade, a faca foi fixada através de gabarito, conforme abaixo na Fig. 7.

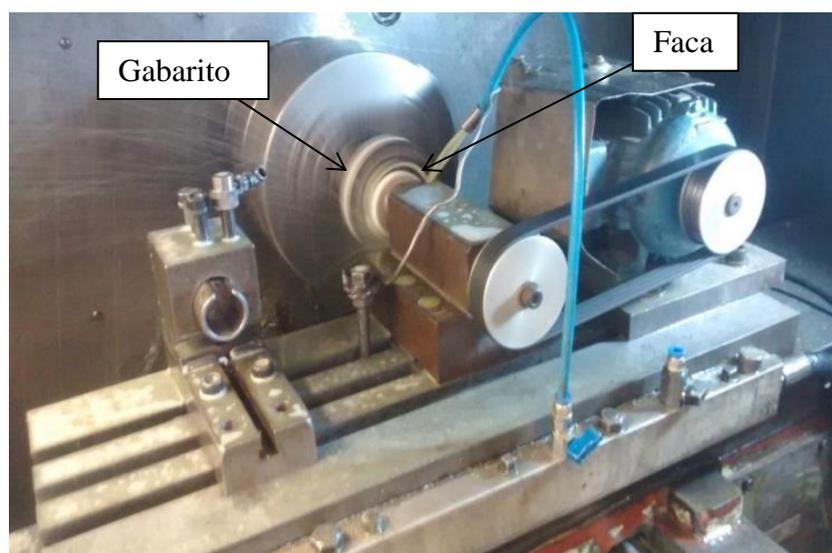


Figura 7 – Processo de retificação cilíndrica interna.

Nota-se o rebolo utilizado sendo da Norton abrasivos, do tipo 38A 120 K V conforme Tab. 1, tendo as seguintes dimensões: 53,00mm de diâmetro externo, 19,05 mm de largura e 31,75 mm de diâmetro interno.

Os parâmetros de corte utilizados estão discriminados na Tab. 5.

Tabela 5 – Parâmetros de corte utilizados na retificação cilíndrica interna.

Ensaio	s_p [s]	v_{fa} [mm/min]	v_{fr} [mm/min]	a_e [μ m]	a_p [mm]	v_w [m/s]	v_s [m/s]
Ensaio 1	5	1	0.025	50	7	0,20	15,33
Ensaio 2	15	1	0.025	50	7	0,20	15,33
Ensaio 3	15	1	0.025	50	7	0,17	17,57
Ensaio 4	15	1	0.025	20	7	0,17	17,57

Da mesma forma da cavidade, não foi alterado os parâmetros de velocidade de avanço

axial (v_{fa}), velocidade de avanço radial (v_{fr}) e profundidade de corte axial (a_p) da faca. Os parâmetros variáveis seguem os mesmos valores para a cavidade, porém há uma diferenciação apenas na velocidade tangencial do rebolo (v_s), devido ao diâmetro do rebolo possuir 53,00 mm para a faca, enquanto para a cavidade 203,00 mm de diâmetro externo. O método de refrigeração utilizado foi emulsão, com diluição 1:30.

3.4 Medição de Valores de Saída: Circularidade e Rugosidade

As medições foram todas realizadas na faculdade SATC. A circularidade foi realizada no Laboratório de Metrologia 2, utilizando-se uma máquina de medição tridimensional Mitutoyo Bright-M modelo BRM507. O diâmetro médio foi obtido através de 3 pontos distantes 120° , repetindo este procedimento mais duas vezes, alternado em 40° . Para cada diâmetro mensurado foi repetido mais duas vezes, para dar confiabilidade na medição.

No LACAMI (Laboratório de Caracterização Microestrutural) foi executada a medição de rugosidade, utilizando um rugosímetro do fabricante Mitutoyo, modelo SJ-310, ajustado com “*cut-off*” de 0,25 mm, e um comprimento de medição (L_m) de 1,5 mm. A rugosidade média aritmética (R_a) foi realizada no sentido axial da peça, sendo efetuada a medição em 4 pontos distantes a 90° , e cada ponto sendo mensurado 3 vezes, para garantir a confiabilidade da medição.

3.5 Levantamento de Dados para Análise do Teste Estatístico Regressão Linear Múltipla

Com os resultados de circularidade obtidos foi possível elaborar os testes estatísticos da regressão, através do software Microsoft Office Excel 2010, tanto para a cavidade quanto para a faca.

4. Resultados e Análises

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios bem como suas variáveis de saída, que farão parte da análise de pesquisa deste estudo.

As rugosidades obtidas após medição em laboratório serão demonstradas na forma de gráficos, juntamente com os parâmetros de entrada que mais determinam e afetam sua dimensão, sendo neste estudo aplicado a rugosidade média aritmética (R_a).

4.1 Cavidade

Após as devidas medições, os resultados obtidos aos desvios de circularidade e rugosidade serão mostrados na forma de gráficos.

4.1.1 Desvios de Circularidade da Cavidade

A Fig. 8 mostra os ensaios realizados na cavidade, sendo utilizado dois tempos de centelhamento (*spark-out*) diferentes, ocorrendo o primeiro ensaio um centelhamento parcial e os outros 3 completos. Os valores de circularidade estão expressos em μm , e cada ensaio já vem acompanhado de seu respectivo desvio-padrão.

Analisando a Fig. 8 percebe-se uma redução do erro de forma de circularidade quando aumenta-se o tempo de centelhamento (*spark-out*). Para o ensaio 1 foi utilizado um centelhamento parcial (5 s), onde não houve tempo suficiente para remover as deformações elásticas causadas pela força exercida do rebolo sobre a peça.

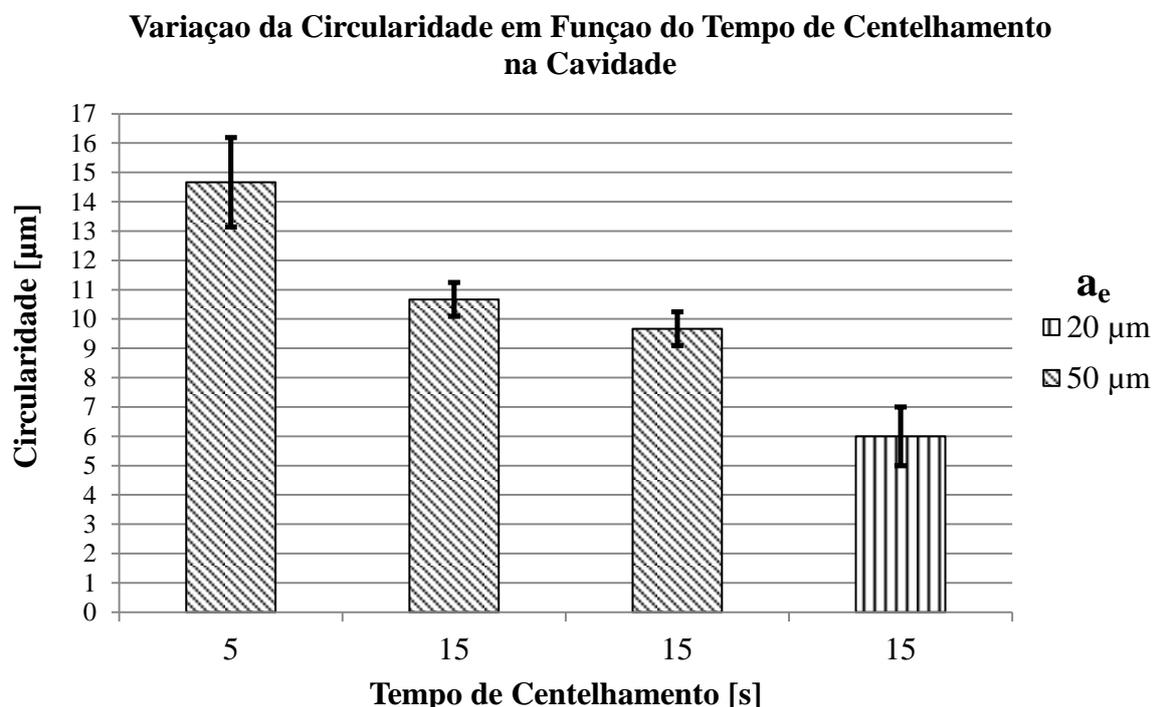


Figura 8 – Erro de forma de circularidade para a cavidade.

Conforme Rowe (2014), é necessário realizar o centelhamento completo para remover as deformações geradas durante o processo de retificação, assim evitando erros geométricos

na mesma. Deste modo justifica-se o ensaio 1 ter apresentado a circularidade maior. Os ensaios 2 e 3 apresentaram uma menor circularidade, comprovando que para tempos maiores de centelhamento, ou centelhamento completo há uma absorção maior das deformações geradas durante o processo de retificação, conseqüentemente tendo peças com o menor erro possível (Taborga *et al*, 2003).

Comparando o ensaio 4 com o 2 e 3, há uma redução no erro de circularidade, mesmo utilizando o centelhamento completo. Isto se explica devido a profundidade de corte radial (a_e) do ensaio 4 ser menor do que o ensaio 1, 2 e 3. Conforme Saravanakumar *et al* (2016), a profundidade de corte radial (a_e) provoca o surgimento do erro de forma de circularidade, pois para maiores profundidades de corte há uma maior área de contato entre peça e rebolo, gerando uma força tangencial de corte maior.

4.1.1.1 Análise da Regressão para a Circularidade da Cavidade

Nesta estatística foi definido um nível de confiança de 95% sendo informada ao software Microsoft Office Excel pela análise de dados Regressão. O software apresentou um coeficiente de regressão (R^2) de 93,46%, na qual apresenta uma significância entre os parâmetros de entrada sendo eles tempo de centelhamento (s_p), profundidade de corte radial (a_e) e relação q , sobre o erro de circularidade.

Através da utilização do método Regressão foi possível obter a equação da reta através da regressão linear múltipla que comprovam a correlação entre os parâmetros de entrada: tempo de centelhamento (s_p), profundidade de corte radial (a_e) e relação q . Conforme o coeficiente de determinação (R^2) comprova-se que as variáveis tem forte correlação com o erro de circularidade, justificando o modelo adotado. As variáveis da regressão linear múltipla podem ser observadas na Tab. 6.

Tabela 6 – Regressão linear múltipla para a circularidade da cavidade.

	Coeficiente	Valor-P
Intersecção	13,05556	0,002281
s_p	-0,40	0,001195
a_e	0,12222	0,002027
Relação q	-0,03333	0,255508

A equação da reta obtida através da regressão linear múltipla pode ser expressa como:

$$Y = 13,05556 - 0,4.s_p + 0,12222.a_e - 0,03333.q \text{ } [\mu\text{m}] \quad (4)$$

Onde:

Y [μm]: Erro de circularidade

s_p [s]: Tempo de centelhamento

a_e [μm]: Profundidade de corte radial

q [...]: Relação q

O Valor-P nos parâmetros de entrada tem que apresentar resultados menores que 0,05 para possuir um nível de significância maior que 95%. Conforme a Tab. 6 nota-se que a relação q apresentou valores acima deste limite o que comprova que este parâmetro tem uma significância menor em relação aos outros parâmetros utilizados.

Com a equação obtida pode-se simular diversas possibilidades dos parâmetros de entrada utilizados para a retificação cilíndrica da cavidade, indicando o possível erro de forma, como é demonstrado na Tab. 7, com um nível de confiança de acerto de 95%.

Tabela 7 – Simulações com os parâmetros de entrada utilizando a equação da regressão.

Simulação	s_p	a_e	Relação q	Erro de Circularidade [μm]
1	5	50	75	14,67
2	15	50	75	10,67
3	5	50	105	13,67
4	15	50	105	9,67
5	5	20	75	11
6	15	20	75	7
7	5	20	105	10
8	15	20	105	6

Com a análise da Tab. 7 percebe-se que a simulação 8 apresenta os menores valores de circularidade. Os parâmetros utilizados nesta simulação coincidem com o ensaio 4 experimental, onde os valores de circularidade podem ser observados na Tab. 8.

Tabela 8 – Ensaio 4 experimental.

Cavidade	Erro de Circularidade [μm]
10	6
11	5
12	7
Média	6

Comparando os resultados de circularidade obtidos no ensaio 4 experimental, com o resultado da simulação 8, percebe-se uma coerência entre valores encontrados, o que comprova a eficácia da equação obtida estaticamente por regressão linear, que pode ser utilizada como parâmetro para determinar os valores de circularidade com um nível de confiança de 95%.

4.1.2 Rugosidade de Superfície R_a da Cavidade

A seguir na Fig. 9 é mostrado as rugosidades médias aritméticas (R_a), obtidas sobre diferentes condições de corte. Para cada ensaio foi efetuado a retificação cilíndrica externa de três peças, com isso foi feito uma média aritmética e o desvio padrão para cada ensaio.

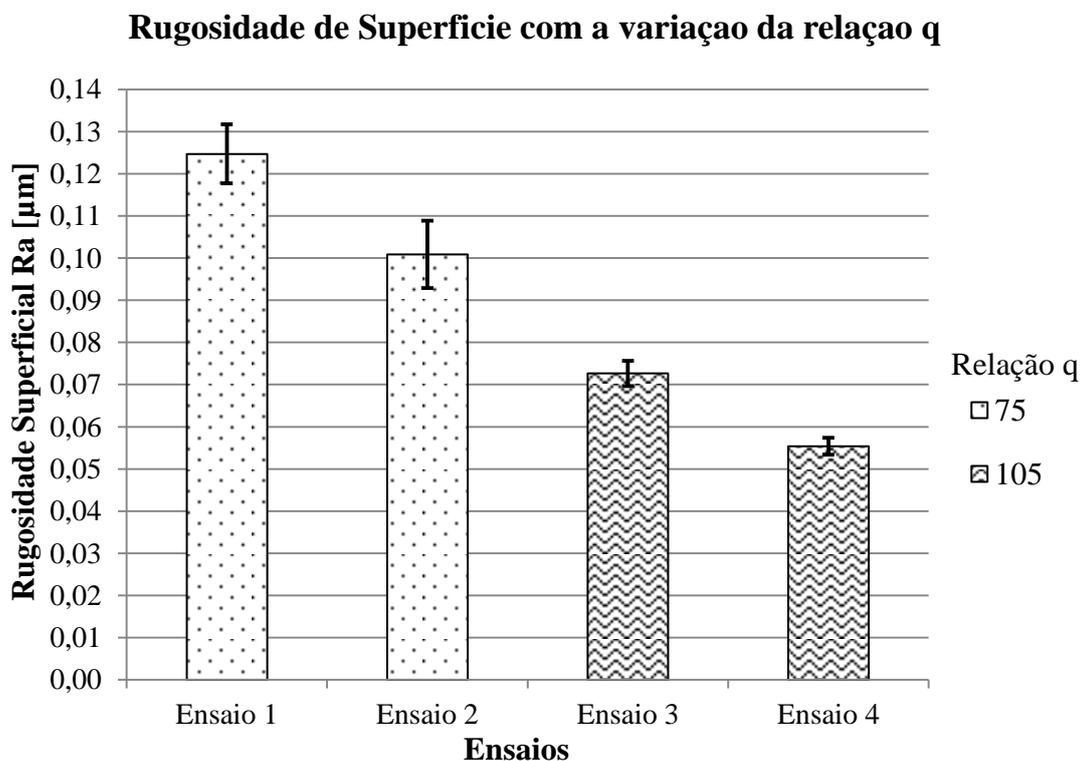


Figura 9 – Rugosidade Superficial para a cavidade.

No ensaio 1 foi verificado a maior rugosidade entre os ensaios. Isso pode ser explicado pelo fato deste ter um tempo de centelhamento parcial. Este tempo não é suficiente para remover as cristas de rugosidade geradas durante o processo de retificação. Essa situação é comprovada através do ensaio 2, onde foi mantido os mesmos parâmetros de corte, inclusive a relação q , pois é um dos parâmetros que mais interfere na rugosidade, e alterado para um centelhamento completo (Taborga, 2003).

No ensaio 3 a relação q foi alterada para acabamento, passando de uma velocidade periférica do rebole (v_s) de 18,12 m/s para 21,47 m/s e uma velocidade periférica da peça (v_w) de 0,24 m/s para 0,20 m/s, ou seja aumentou-se a velocidade do rebole e diminuiu-se a velocidade da peça. Pode-se perceber uma melhora na rugosidade superficial, com valores em torno de 0,07 μm , que são muitos satisfatórios para o processo de retificação.

Analisando o ensaio 4, percebe-se o menor valor de rugosidade encontrado, mesmo utilizando a mesma relação q do ensaio 3. Segundo Taborga (2003), reduzindo a profundidade de corte radial (a_e) consegue-se obter valores menores de rugosidade. Como no ensaio 4 foi reduzido a profundidade de corte de 50 μm para 20 μm , obteve-se valores menores de rugosidade, comprovando que para uma relação q maior e uma profundidade de corte radial (a_e) menor, obtém-se os menores valores de rugosidade. Neste ensaio conseguiu-se uma classe de rugosidade N2, conforme norma NBR 8404, estando em valores ótimos para a operação de retificação cilíndrica.

4.2 Faca

Após as devidas medições, os resultados obtidos aos desvios de circularidade e rugosidade para a faca serão mostrados na forma de gráficos.

4.2.1 Desvios de Circularidade da Faca

Do mesmo modo da cavidade será feita uma análise dos desvios de circularidade da faca, analisando quais fatores estão interferindo neste erro de forma. A Fig. 10 mostra os ensaios realizados para o processo de retificação cilíndrica interna.

Verificando o gráfico percebe-se que para o ensaio 1 o erro de forma está acima do valor máximo considerado para a operação, conseqüentemente as peças desse ensaio terão problemas na realização do corte do material PP.

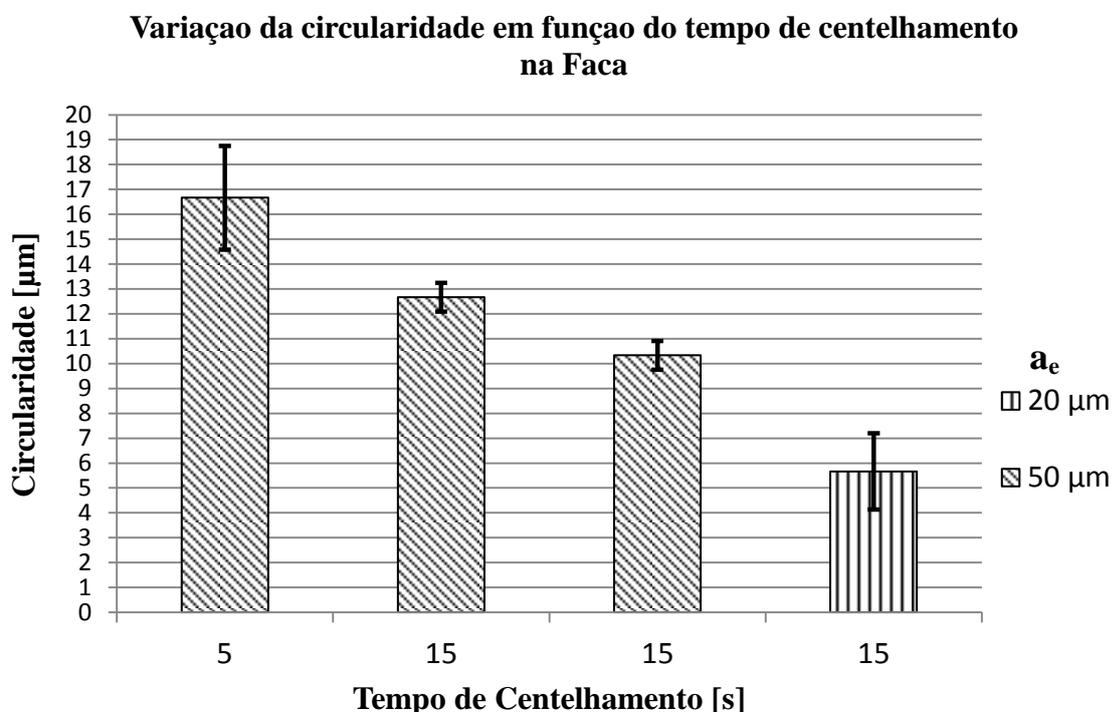


Figura 10 – Erro de forma de circularidade para a faca.

Como na cavidade, a faca também apresentou valores melhores para centelhamentos completos, onde foi utilizado tempos de 15 segundos. Comparando o ensaio 1, 2 e 3 observa-se uma diferença de 6 µm na circularidade do ensaio 1 para o 3. Isto ocorre devido ao tempo de centelhamento, já que no ensaio 1 não houve o tempo necessário para o avanço real se igualar ao avanço teórico, assim removendo as deformações elásticas causadas pela falta de rigidez do conjunto máquina-peça-ferramenta (Fernandes, 2004).

O ensaio 4 foi o que apresentou uma menor circularidade. Neste foi utilizado uma profundidade de corte (a_e) de 20 µm, enquanto nos outros 50 µm. Segundo Saravanakumar *et al* (2016), a profundidade de corte afeta na circularidade, isto confirma o fato de o ensaio 4 ter apresentado a menor circularidade, aliado ao tempo de centelhamento completo.

Analisando o erro de forma apresentado na cavidade e faca, observam-se valores próximos, porem a cavidade apresentando valores menores deste erro. Esta causa é explicada pela retificação cilíndrica interna ser mais difícil comparada com a externa. De acordo com

Cuoco *et al* (2009), na retificação interna há uma maior força de usinagem, devido ao arco de contato gerado entre peça e rebolo ser maior, ao fato que esse deve possuir no máximo 0,75 vezes o diâmetro do rebolo. Outro fator relevante é a lubrificação, onde na retificação interna há uma maior dificuldade na emulsão conseguir realizar a devida refrigeração da peça e consequentemente limpar o rebolo dos cavacos que são gerados durante o processo, ocasionando assim uma maior força de retificação. Outro fator relevante é com relação a profundidade de corte radial (a_e), pois conforme Fragoso (2016), com este parâmetro menor, há um menor atrito entre peça e rebolo, promovendo uma menor geração de calor na peça, assim evitando possíveis erros geométricos, como o de circularidade.

4.2.1.1 Análise da Regressão para a Circularidade da Faca

O software Microsoft Office Excel pela análise de dados Regressão apresentou um coeficiente de regressão (R^2) de 92,83%, na qual apresenta uma significância entre os parâmetros de entrada sendo eles tempo de centelhamento (s_p), profundidade de corte radial (a_e) e relação q, sobre o erro de circularidade.

Através da utilização do método Regressão foi possível obter a equação da reta através da regressão linear múltipla que comprovam a correlação entre os parâmetros de entrada: tempo de centelhamento (s_p), profundidade de corte radial (a_e) e relação q. Conforme o coeficiente de determinação (R^2) comprova-se que as variáveis tem forte correlação com o erro de circularidade. As variáveis da regressão linear múltipla podem ser observadas na Tab. 9.

Tabela 9 – Regressão linear múltipla para a circularidade da Faca.

	Coefficiente	Erro Padrão	Valor-P
Intersecção	16,72222	4,02	0,00315
s_p	-0,40	0,11	0,00680
a_e	0,15556	0,04	0,00291
Relação q	-0,07778	0,04	0,06781

A equação da reta obtida através da regressão linear múltipla pode ser expressa como:

$$Y=16,72222-0,4.s_p+0,15556.a_e -0,07778. q [\mu\text{m}] \quad (5)$$

Onde:

Y [μm]: Erro de circularidade

s_p [s]: Tempo de centelhamento

a_e [μm]: Profundidade de corte radial

q [...]: Relação q

O Valor-P nos parâmetros de entrada tem que apresentar resultados menores que 0,05 para possuir um nível de significância maior que 95%. Conforme a Tab. 9 nota-se que a relação q apresentou valores acima deste limite, o que comprova que a relação q tem uma significância menor em relação aos outros parâmetros utilizados.

Com a equação obtida pode-se simular as diversas possibilidades dos parâmetros de entrada utilizados para a retificação cilíndrica da faca, indicando o possível erro de forma, como é demonstrado na Tab. 10 com um nível de significância de acerto de 95%.

Tabela 10 – Simulações com os parâmetros de entrada utilizando a equação da regressão.

Simulação	s_p	a_e	Relação q	Erro de Circularidade [μm]
1	5	50	75	16,67
2	15	50	75	12,67
3	5	50	105	14,33
4	15	50	105	10,33
5	5	20	75	12
6	15	20	75	8
7	5	20	105	9,67
8	15	20	105	5,67

Observando a Tab. 10 percebe-se que a simulação 8 apresenta os menores valores de circularidade. Os parâmetros utilizados nesta simulação coincidem com o ensaio 4 experimental da faca, onde os valores de circularidade podem ser observados na Tab.11.

Tabela 11 – Ensaio 4 experimental.

Faca	Erro de Circularidade [μm]
10	6
11	4
12	7
Média	5,67

Comparando os resultados de circularidade obtidos no ensaio 4 experimental, com o resultado da simulação 8, percebe-se uma coerência entre valores encontrados, o que comprova a eficácia da equação obtida estaticamente por regressão linear, que pode ser utilizada como parâmetro para determinar os valores de circularidade com um nível de confiança de 95%.

4.2.2 Rugosidade de Superfície da Faca

A rugosidade media aritmética (R_a) da faca é demonstrada através da Fig. 11 com os quatros ensaios realizados, sendo cada ensaio efetuado a retificação cilíndrica interna de três peças, gerando assim um desvio-padrão para cada ensaio.

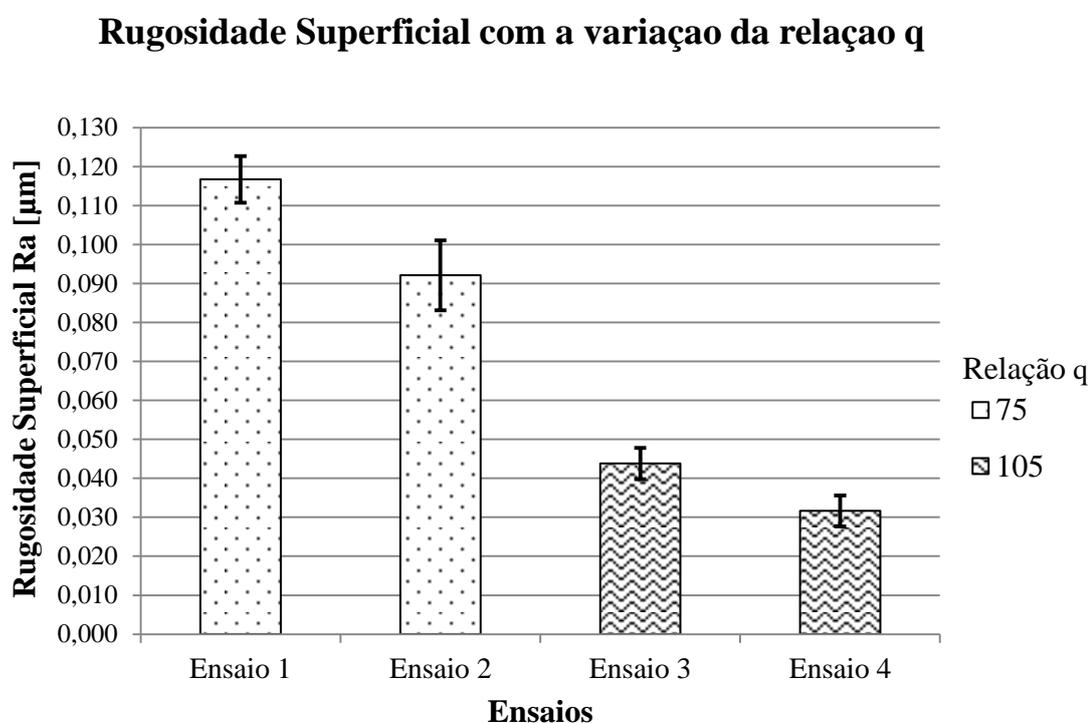


Figura 11 – Rugosidade de Superfície para a faca.

Observando a Fig. 11 percebe-se que o maior valor de rugosidade encontra-se no ensaio 1. Neste ensaio foi utilizado a mesma relação q do ensaio 2, que encontra-se um valor menor de rugosidade. O parâmetro alterado do ensaio 1 para o 2 foi o tempo de centelhamento, onde no ensaio 1 foi utilizado um tempo parcial, enquanto no ensaio 2 total. De acordo com Hassui (2003), um tempo de centelhamento parcial não há tempo suficiente para o rebolo remover as cristas de rugosidade geradas durante o processo de fabricação, assim comprova-se para o ensaio 2 ter apresentado uma rugosidade menor, visto que com um tempo de centelhamento completo houve tempo para o rebolo remover as cristas de rugosidade geradas durante a retificação cilíndrica interna.

Para o ensaio 3 foi modificado a relação q para acabamento, alterando a velocidade periférica do rebolo (v_s) de 15,33 m/s para 17,57 m/s e uma velocidade periférica da peça (v_w) de 0,20 m/s para 0,16 m/s. Conforme Taborga (2003), esses parâmetros alteram a rugosidade, obtendo valores melhores. Isto pode ser comprovado nos ensaios, onde houve uma melhora significativa do ensaio 2 para o 3, saindo de uma classe de rugosidade N4 para N2.

O ensaio 4 foi o que apresentou uma melhor rugosidade, tendo valores muito expressivos para a operação. A classe de rugosidade obtida neste ensaio ficou muito próxima da classe N1, onde esta classe esta designada para processos como lapidação e polimento. Este sucesso esta correlacionado entre a relação q e a profundidade de corte radial (a_e), onde do ensaio 3 para o 4 foi alterado este parâmetro, passando de 50 μm para 20 μm , onde afirma Taborga (2003), este parâmetro influencia na rugosidade superficial.

Outro fator relevante a ser observado no gráfico é o desvio-padro, onde nos ensaios 1 e 2 houve uma variação maior da rugosidade em relação aos ensaios 3 e 4. Este fato está relacionado a velocidade periférica do rebolo (v_s), quando alterou-se a relação q , a velocidade do rebolo foi modificada, aumentando-se e assim fazendo com que o rebolo rotacione mais sobre a peça, consequentemente removendo as cristas de rugosidade, deste modo fazendo com que haja uma similaridade entre as três peças de cada ensaio.

5. Conclusão

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise profunda e um maior entendimento sobre o processo de retificação cilíndrica interna e externa, identificando os parâmetros que causam alterações nas peças durante o processo.

- O referencial teórico foi muito importante para verificar as etapas necessárias e alcançar os resultados esperados, assim adquirindo maior conhecimento sobre o assunto tratado;
- O tempo de centelhamento (*spark-out*) influencia tanto na circularidade da peça quanto na rugosidade. Para a obtenção de valores satisfatórios deve-se utilizar tempos de centelhamento completos, pois para tempos parciais não há obtenção de valores consideráveis;
- Os erros de circularidade encontrados estão praticamente todos dentro do limite de 15 μm imposto para realização do corte do PP, sem gerar defeitos no mesmo. Porém, para a faca utilizando um centelhamento parcial obteve-se peças fora deste limite, atingindo erros de 18 μm . Portanto, para este processo de fabricação deve-se utilizar centelhamento completo;
- Os melhores valores encontrados para a circularidade tanto da faca quanto da cavidade, foi a combinação de um tempo de centelhamento de 15 segundos e uma profundidade de corte radial (a_e) de 20 μm ;
- Os valores obtidos de rugosidade de superfície foram bem satisfatórios, até melhores do esperado para a operação de retificação cilíndrica. Na cavidade e na faca obtiveram valores na classe de rugosidade N2, conforme norma NBR 8404.
- Os parâmetros que influenciaram na rugosidade média aritmética (R_a) foram o tempo de centelhamento, relação q e a profundidade de corte radial (a_e). Com o tempo de centelhamento completo há uma remoção maior das cristas de rugosidade geradas durante o processo. Conforme a Tab. 2 comprova-se que para valores maiores de relação q tem-se um acabamento melhor da superfície, ou seja, menores valores de rugosidade. Já com uma profundidade de corte (a_e) menor obtiveram-se menores valores de rugosidade.
- Através da utilização da regressão linear múltipla foi possível obter uma equação que determina o erro de circularidade conforme os parâmetros de entrada adotados. Sendo esta equação comprovada através do ensaio 4 experimental, onde obteve-se os valores de circularidade próximos ao valor simulado na equação.
- Como sugestões para trabalhos futuros sugerem-se novos ensaios utilizando as mesmas configurações dos parâmetros de entrada, que obtiveram os melhores resultados. Porém realizando a retificação de mais amostras, a fim de verificar o comportamento do rebolo, se este não perde a capacidade de corte. Como os melhores resultados foram obtidos com velocidades de rotação do rebolo alta, pode-se ocorrer uma perda diametral do rebolo ocorrendo erros dimensionais nas amostras.

6. Agradecimentos

O autor agradece a Deus pela saúde e força. Aos meus familiares e a instituição de ensino faculdade SATC, pelo conhecimento adquirido e oportunidade de realizar este trabalho. Agradeço ao professor Luiz Carlos de Cesaro Cavaler, pela orientação neste artigo. E ainda a empresa Metael metalúrgica LTDA, pela disponibilidade da máquina para realizar os devidos ensaios.

7. Referências Bibliográficas

ABNT – NBR ISO 2768-2. Tolerâncias Gerais – Parte 2: Tolerâncias Geométricas para elementos sem indicação de tolerância individual. Rio de Janeiro, RJ, 2001.

ABNT – NBR ISO 3002-1. Grandezas básicas em usinagem e retificação – Geometria da parte cortante das ferramentas de corte – Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

ABNT - NBR ISO 4287. Especificação Geométrica do Produto (GPS) - Rugosidade: Método do Perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, RJ, 2002.

ABNT – NBR 8404. Indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos - Fixa símbolos e indicações complementares para a identificação do estado de superfície em desenhos técnicos. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

Alves, M. C. S.; Bianchi, E. C.; Aguiar, P. R. Influencia da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados. Revista Materia, v. 13, n. 4, p. 636-642, 2008.

Bianchi, E. C.; Monici, R. D.; Neto, L. D., “Estudo Comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolo de oxido de alumínio e CBN, fabricados com ligante resinoide e vitrificado”. 2º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – Conem, agosto, 12-15, 2002, Joao Pessoa, PB, Brasil.

Bianchi, E. C.; Monici, R. D.; Junior, E. N. S. “Análise da Influência da Pressão e Vazão de Fluido de Corte no Processo de Retificação com Rebolos Convencionais e Superabrasivos”. 1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, abril, 02-04, 2001, Curitiba, PR, Brasil.

Chen, X.; Rowe, W. B.; CAI, R. “Precision grinding using CBN wheels”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, 2002, p. 585-593.

Cuoco, G. N.; Canarim, R. C.; Bianchi, E. C.; Aguiar, P. R.; Alves, M. C. S.; Biscioni, R. P. B.; Oliveira, R. F. M. “Estudo do Processo de Retificação Cilíndrica Interna de Mergulho, com Rebolo Convencional, Utilizando-se o Método Otimizado de Lubrificação Proposto por Webster”. 5º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, abril, 14-17, 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Fernandes, U. B.; Alves, J. A. C.; Catai, R. E.; Bianchi, E. C.; Aguiar, P. R. “Análise da influência do tempo de centelhamento na retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos VC-131”. 11º Simposio de engenharia de produção – SIMPEP, novembro, 08-10, 2004, bauru, SP, Brasil.

Fragoso, K. M.; Umberto, D. R.; Barili, I. C.; Bianchi, E. C.; Da Silva, R. B.; Aguiar, P. R.; Mello, H. J., 2016, “Retificação cilíndrica do aço VP50 utilizando o rebolo de carbetto de silício verde com a técnica de MQL”. *Revista Matéria*, Vol. 21, pp.756-766.

Hassui, A.; Diniz, A. E. “Estudo da influência do tempo de centelhamento, das condições de corte e da dressagem na qualidade de peças retificadas”. 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, maio, 18-21, 2003, Uberlândia, MG, Brasil.

McClave, J. T.; Benson, P. G.; Sincich, T., “Estatística para administração e economia”, Ed. Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2009, 871 p.

Malkin, S. *Grinding Technology – theory and applications of machining with abrasives*, Ellis Horwood Ltd, 1989.

Magnani, E. G. , 2013, “ Retificação cilíndrica externa do aço ABNT 1045 temperado e revenido utilizando diferentes rebolos e condições operacionais”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte/MG, Brasil, 91 p.

Oliveira, J.F.G, 1989, “Tópicos avançados sobre o processo de retificação”, apostila – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Rowe, W. B. *Principles of Modern Grinding Technology*, 2 ed., Burlington, William andrew Publish-ing, 2014.

Stemmer, C. E., 1995, “Ferramentas de Corte 2: Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscar, Fresas, brochas, Rebolos e Abrasivos.” Ed. da UFSC, Florianópolis, 162 p.

Saravanakumar, V.; Viswanath, M.; Thirumalaisamy, N. “Analysis of surface roughness and machining time in cylindrical grinding of SS430 material using response surface method”, *International Journal Of Engineering Trends and Technology (IJETT)* – vol. 42, n. 6, dezembro, 2016.

Schuhli, L. A., 2007, “Monitoramento de Operações de Retificação Usando Fusão de Sensores”. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos/SP, Brasil, 119 p.

Saint-Gobain Abrasives, 2007, *Tecnologia de Retificação I – Material Didático curso Winter Abrasivos*, Vinhedo-SP, paginação irregular.

Taborga, A. R. M.; Taborga, J. D. M.; Weingaertner, W. L.; “Análise da rugosidade obtida na retificação de ferro fundido nodular utilizando os rebolos de SiC e Al₂O₃”. 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, maio, 18-21, 2003, Uberlândia, MG, Brasil.

Valarelli, I. D. D.; Bianchi, E. C.; Aguiar, P. R.; Monici, R. D. “Estudo Comparativo do Desempenho de Rebolos com Grãos Superabrasivos e Convencionais Submetidos a Diversas Condições de Usinagem” 2º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM, agosto, 12-16, 2002, João Pessoa, PB, Brasil.

Wang, J. P. 2008, “Avaliação da retificação com rebolo de CBN vitrificado aplicada em ligas de alto desempenho”. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos/SP, Brasil, 123 p.