

O PROCESSO DE ACABAMENTO EM PINHÕES DE SISTEMAS DE DIREÇÃO

Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufsj.edu.br¹
Sandro Pereira da Silva, sandro.silva@trw.com²
Gabriel Andrade de Abreu, gabriel.abreu@trw.com²
Paulo César Lima, paulo.lima@trw.com²

¹Universidade Federal de São João del Rei, Praça Frei Orlando, 170 – Centro

²TRW Automotive Ltda – Distrito Industrial Lavras

Resumo: *O perfeito acabamento do perfil evolvente e ângulo de hélice dos pares pinhão & cremalheira proporciona um engrenamento preciso e livre de vibrações. Sistemas de direção estão sob constante pesquisa no melhoramento destes perfis com o objetivo de diminuir os esforços de esterçamento, simetria na retornabilidade e proporcionar ao motorista uma melhor sensação durante a direção. Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre o processo convencional de fresamento e um novo processo implantado na planta da TRW de Lavras que utiliza o sistema de honing. O desenvolvimento deste novo processo visa melhorar não apenas o perfil evolvente dos dentes, mas também a textura superficial diminuindo o atrito de rolamento do pinhão ao longo dos dentes da cremalheira durante o engrenamento. Os testes realizados mostraram que o sistema de honing dos pinhões gerou valores de rugosidade Ra e Rz muito inferiores quando comparados com o processo de fresamento convencional. Em relação ao perfil evolvente os erros também foram menores e ficaram dentro dos valores técnicos especificados pelo cliente, diminuindo dessa forma a vibração de todo sistema de direção.*

Palavras-chave: *Perfil Evolvente; Retificação; Fresamento; Rugosidade.*

1. INTRODUÇÃO

Devido a sua capacidade de transmissão de movimentos e potência, engrenagens estão entre os mais importantes elementos de máquinas da indústria moderna. Uma especial atenção é dada na produção de engrenagens em função de perfis específicos. Os dentes de engrenagens têm uma complexa e precisa forma com exigências normalizadas e um alto grau de precisão da textura superficial. Engrenagens podem ser fabricadas por um grande número de processos (fundição, forjamento, extrusão, metalurgia do pó, etc). Mas como regra geral o processo de retificação é usado para gerar o perfil evolvente final, a forma exata e a rugosidade final na engrenagem (Fässler, 2008).

Superfícies de alto desempenho com especiais exigências de funcionalidade como, por exemplo, os perfis evolventes de engrenagens, são fabricados usando um ou mais processos de fabricação. A textura final é a combinação destas texturas superficiais em função dos processos empregados (Sannareddy, et al. 1998). Segundo DeChifre et al. (2000), três elementos devem ser considerados cuidadosamente e estão diretamente inter-relacionados: a geração do produto por retificação, lapidação; a função do componente como desgaste, vedação e finalmente a qualificação do componente como dimensionamento, visualização e qualificação.

Outros processos para a melhoria da rugosidade de engrenagens foram propostos por Oobayashi et al. (2005), onde foi usada uma metodologia de acabamento que empregou uma técnica tribo com lubrificação pela água. Este método denominado como TOFF ou oxidação tribo assistida para acabamento fino, consistia em empregar água com vazão de 1000 ml.min⁻¹ fornecida com elemento abrasivo entre os dentes de engrenagens possibilitando assim, um auto ajuste do engrenamento e um melhoria significativa do ruído durante o engrenamento.

Entretanto, das técnicas de usinagem de acabamento de engrenagens, o processo de “honing” tem se tornado o mais empregado, devido à alta eficiência que possui no acabamento de engrenagens endurecidas e de sua facilidade em ajustar o perfil da evolvente e ângulo de incidência na contra-peça. O processo de “honing” de engrenagens é empregado para eliminar erros após o tratamento térmico na superfície do dente. A cinemática do processo de “honing” e a geometria da ferramenta são similares ao corte inicial do perfil da engrenagem e o material e velocidade de corte da ferramenta são similares ao processo de retificação. O processo de retificação convencional remove material das superfícies da engrenagem gerando marcas na direção perpendicular ao contato de engrenamento. No processo de “honing” é simulado o movimento cinemático verdadeiro da malha do engrenamento, o que proporciona uma melhor rugosidade que no processo de retificação.

Segundo Hermes (2008), uma considerável redução de ruídos em acoplamentos pode ser conseguida com o processo de “honing”. Geralmente, os perfis dos dentes de engrenagens são seguidos pela operação de “honing” utilizando máquinas desenvolvidas exclusivamente para esta operação de usinagem. A minimização de grandes picos de rugosidade é significativa, permitindo, além disso, a correção do perfil evolvente do dente da engrenagem. A Fig (1) mostra um processo típico de “honeamento” de dentes de engrenagem. Nota-se que, iniciando a cadeia produtiva, se obtém o perfil inicial pelos processos de corte de dentes e/ou pelo processo de conformação, e seguida, faz-se o tratamento térmico. Na etapa final, utilizam-se dois processos a retificação do perfil dos dentes e após o processo de “honing” ou pode-se usar o processo de “honing” diretamente. Este trabalho propõe comparar dois processos de acabamento de dentes de engrenagem de pinhões de sistemas de direção, onde inicialmente foi empregado o tradicional método de fresamento por geração do perfil dos dentes e o outro o “honing” direto do perfil.

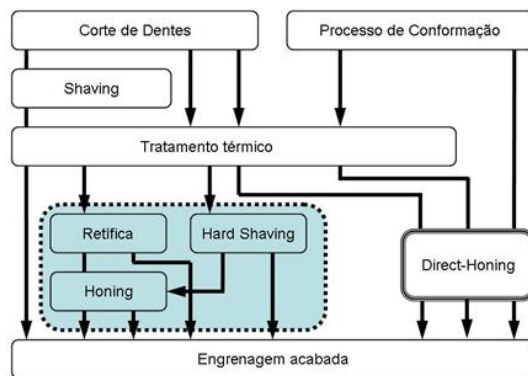


Figura 1. Diagrama do processo típico de “honing” na fabricação de engrenagens (Fässler, 2008).

2. METODOLOGIA

Nos experimentos foram empregados pinhões de sistemas de direção como corpos-de-prova. O material foi o aço SAE 4320-H com dureza de núcleo variando de 295/460 HV2 e uma camada de cementação na superfície de 600 HV2. As especificações das dimensões gerais do acabamento e perfil evolvente do dente estão previstos conforme a norma ISO 1328 1/2 e ISO TR 10064-1. A Figura (2) mostra um desenho esquemático com a região de engrenamento onde é definido o ponto “P” que corresponde ao ponto de aplicação de carga máxima no dente durante o engrenamento. O equipamento empregado foi uma máquina Fässler HMX-400 com nove graus de liberdade. O Rebolo utilizado apresenta uma composição de óxido de Alumínio (Al_2O_3), Sili-Gel (óxido de Alumínio sinterizado) e Carbureto de Silício prensando em um aglutinante a base de resina epóxi. O módulo de elasticidade da liga do rebolo era de 21.000 N.mm⁻² e a densidade de 2,45 g.cm⁻³

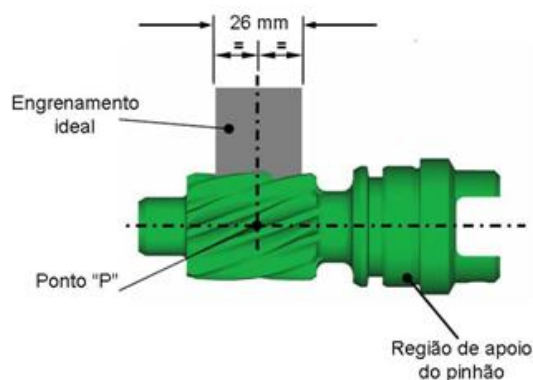


Figura 2. Detalhe esquemático do pinhão.

O processo de “honing” consiste na utilização de um rebolo denteado interno dressável a base epóxi e um dressador padrão com a geometria do produto com uma cobertura de diamante. Na fabricação do rebolo o perfil já é previamente definido, entretanto, para a realização do processo “honing” inicialmente faz-se a dressagem do dentado interno, transferindo para o rebolo a geometria do dressador que tem exatamente o perfil evolvente dos dentes do pinhão. Em seguida é realizado o “honing”, que consiste na transferência da geometria do rebolo para o produto. A dressagem consiste na recomposição da geometria da superfície de usinagem do rebolo para garantir a qualidade do acabamento do produto. O processo de “honing” dos dentes dos pinhões foi realizado com as seguintes variáveis de corte, rotação do pinhão 5500 RPM e rotação do rebolo 285 RPM. O sobremetal deixado no pinhão foi 88 micrometros por flanco e o avanço do eixo z da máquina foi 500 mm.min⁻¹. A Fig. (3) mostra o detalhe do sistema de fixação do rebolo e o

cabeçote com fixação por pinça. O pinhão é montado na placa de fixação e apresenta um segundo ponto de apoio posicionado dentro do cabeçote de usinagem. O eixo z se desloca no sentido axial da máquina, exatamente na dimensão do comprimento do pinhão que deve ser usinado. O detalhe “A” da Fig. (3) mostra o perfil do reboło.

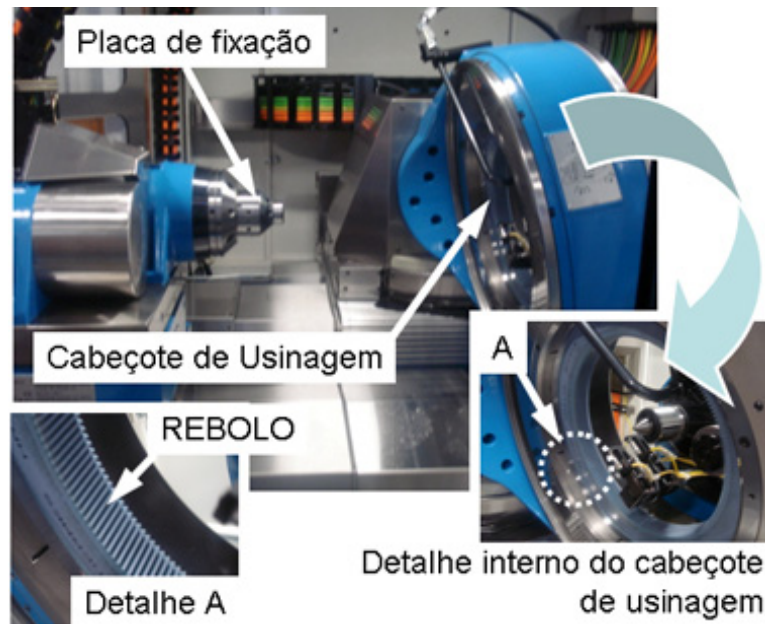


Figura 3. Detalhe do cabeçote de usinagem.

O objetivo dos experimentos era medir o perfil gerado pelo processo de “honing” e compará-lo com perfil gerado pelo processo tradicional de fresamento por detalonamento dos dentes. Os parâmetros de medição eram os desvios do perfil transversal, os erros de hélice e os desvios do circular pitch. Todos estes parâmetros estão de acordo com a DIN 3962 (1978). A Fig. (4) mostra o diagrama do teste e a representação dos desvios transversais do perfil do dente. A Fig. (5) mostra o diagrama com a região onde é medido o erro de hélice e a Fig. (6) mostra a representação gráfica dos desvios do circular pitch.

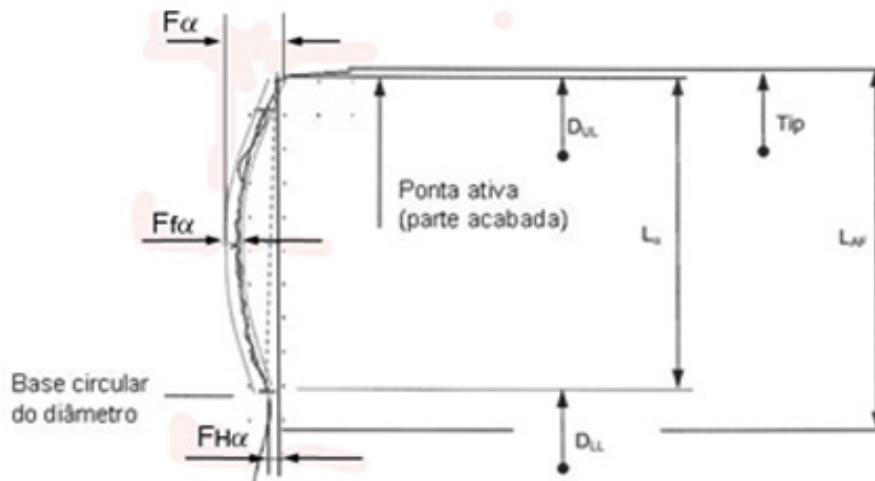


Figura 4. Perfil transversal.

Onde:

- L_{AF} : Faixa de medição do perfil transversal (evolvente);
- L_{α} : Faixa de análise do perfil transversal entre D_{UL} E D_{UL} ;
- D_{LL} : Análise inicial do diâmetro;
- D_{UL} : Análise final do diâmetro;
- F_{α} : Desvio total do perfil do dente;
- $f_{H\alpha}$: Desvio da inclinação do dente;
- $f_{f\alpha}$: Desvio da forma do dente.

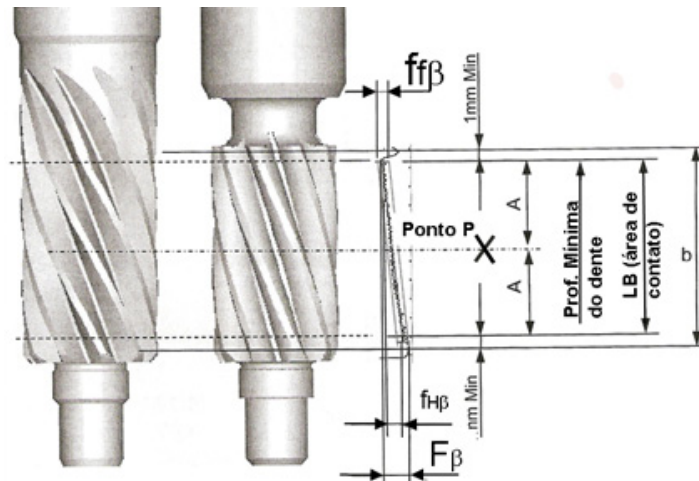


Figura 5. Diagrama da representação do erro de hélice.

Onde:

L_{β} : Faixa de teste da linha do dente;

B: Largura da face;

F_{β} : Desvio total da hélice;

$f_{H\beta}$: Desvio da inclinação da hélice;

$f_{f\beta}$: Desvio da forma da hélice.

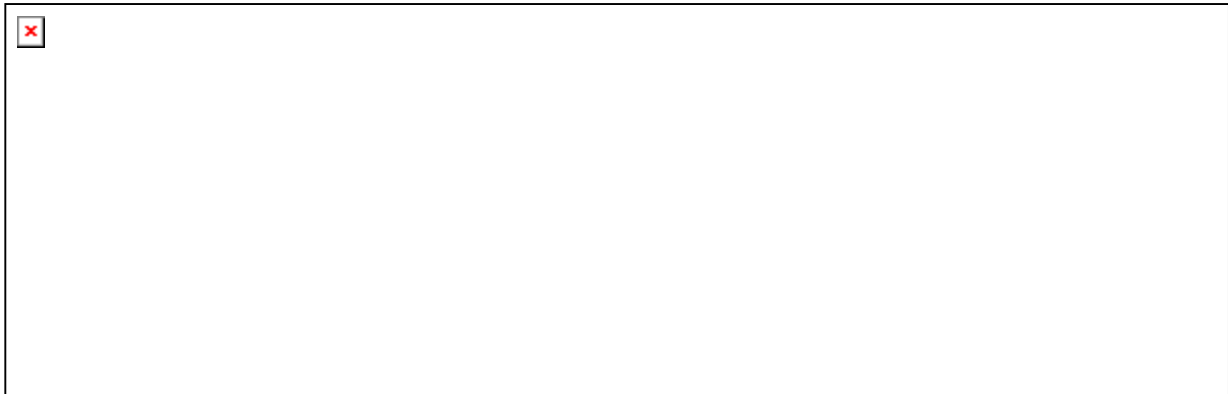


Figura 6. Gráfico do Circular Pitch.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As Figuras (7) e (8) mostram os gráficos típicos dos erros de evolvente para o processo de fresamento e o processo de honing dos dentes do pinhão. As medições foram realizadas nos dentes 1, 4, 6 e 9. No gráfico é mostrado o perfil do dente no sentido vertical, sendo as escalas diferentes para os eixos das abscissas e coordenadas. As Fig. (9) e (10) mostram a representação gráfica da evolvente e ângulo de hélice após a operação de honing.

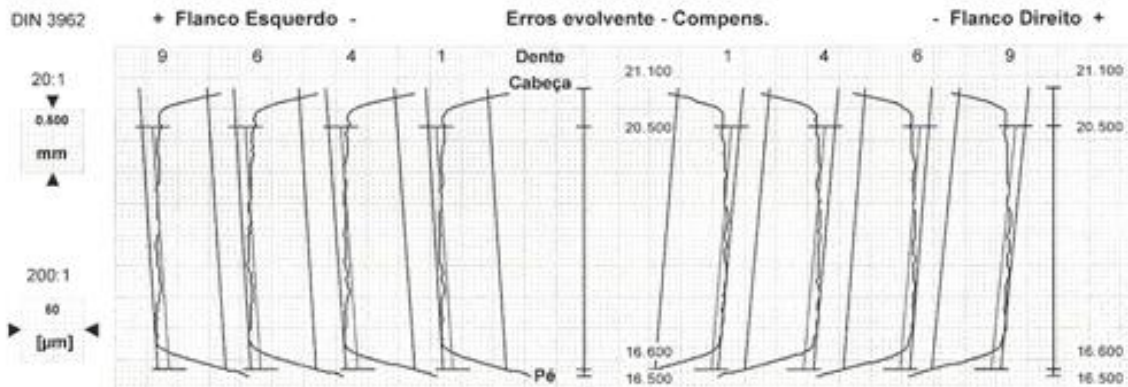


Figura 7. Perfil transversal para os erros de evolvente (dente fresado)

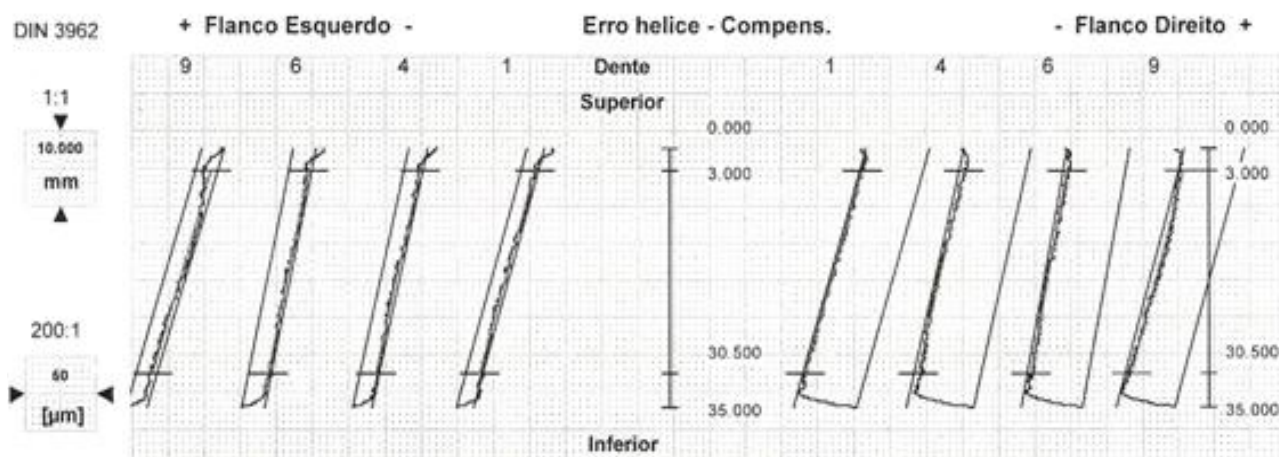


Figura 8. Erro de hélice (dente fresado)

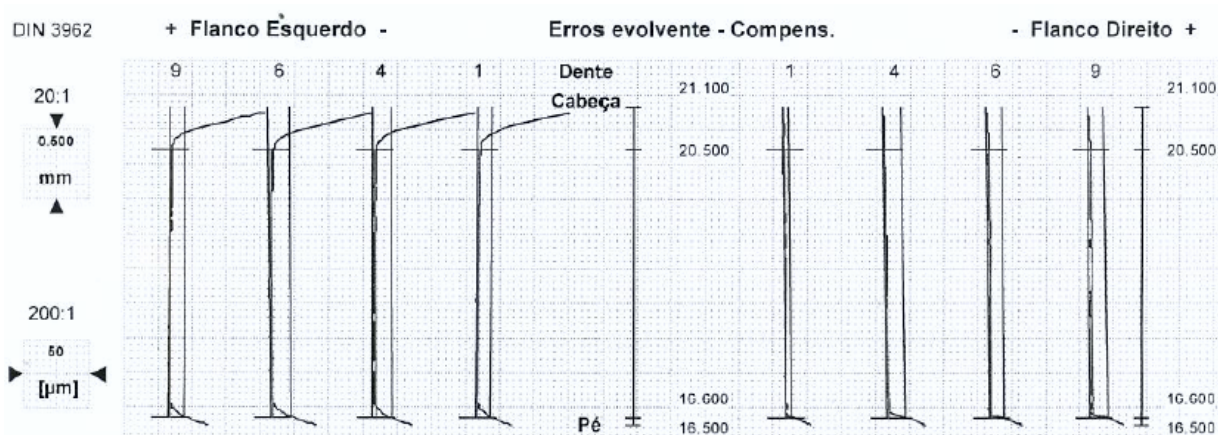


Figura 9. Perfil transversal para os erros de evolvente (dente “honeado”)

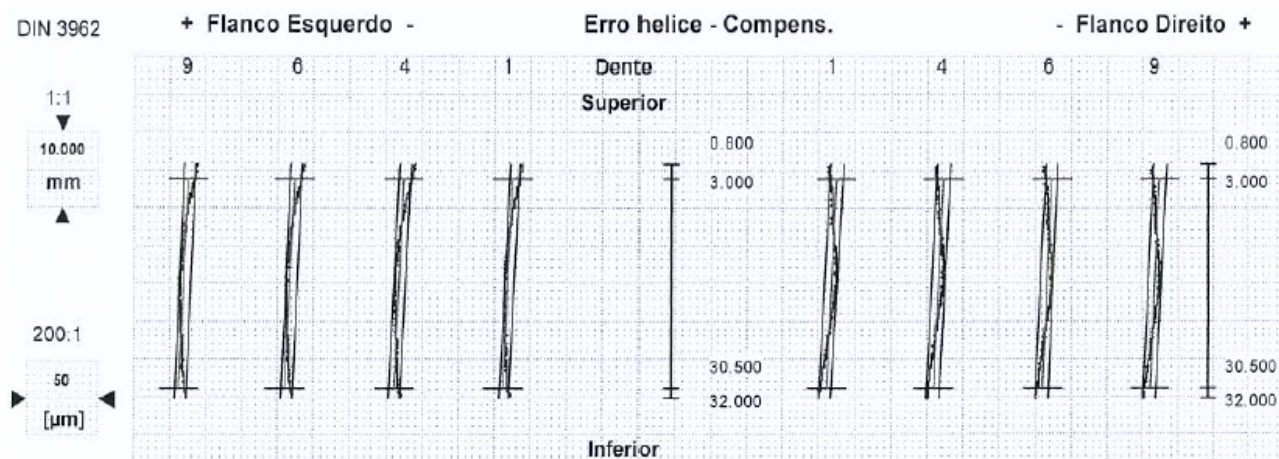


Figura 10. Erro de hélice (dente “honeado”)

A Tabela (1) mostra os valores obtidos nos gráficos comparando os dois processos fresamento e “honing”. Os parâmetros são apresentados com seus respectivos valores em micrometros. Na tabela são medidos os valores de quatro dentes e obtida a média destes na última coluna. Nota-se que os valores são significativamente inferiores quando se emprega o processo de “honing” sendo estes na ordem de 10 vezes, em média, menores para o processo de “honing”, considerando o parâmetro F_α que é o desvio total do perfil do dente em micrometros. Para o parâmetro $f_{H\alpha}$ que corresponde ao desvio da inclinação do dente, estes valores foram em média 5 vezes menores. Finalmente, o parâmetro $f_{f\alpha}$ do desvio da forma do dente foi o que obteve a maior diferença ficando em valores médios na faixa de 15 vezes menor para o processo de “honing”. Os valores entre parênteses correspondem à qualidade de tolerância conforme a norma DIN 3962 – parte 1 e 2 (1978), estes valores são menores a medida que o erro diminui e aumenta a qualidade da superfície usinada, minimizando assim os erros do perfil evolvente.

Pode-se observar que o processo de “honing” em função de utilizar um rebolo abrasivo minimiza os efeitos dos riscos da ferramenta, comparando com os valores do desvio da forma do dente onde as ondulações provocadas pelas ferramentas de fresamento são muito superiores. Além disso, com o processo de “honing” o erro total do perfil transversal é minimizado em função de uma constante correção do perfil da ferramenta pelo processo de dressagem, o que não pode ser realizado com frequência no processo de fresamento.

Tabela 1. Valores medidos nos erros de evolvente para os dentes fresados e “honeados”.

Operação	Parâmetros	Erros de Evolvente (micrometros) – Flanco Esquerdo					
		Dente 9	Dente 6	Dente 4	Dente 1	Média	
Fresamento	F_{α}	55,3 (11)	54,0 (11)	55,5 (11)	52,5 (11)	54,4 (11)	
	$f_{H\alpha}$	12,7 (9)	11,9 (9)	13,4 (9)	12,1 (9)	12,5 (9)	
	$f_{f\alpha}$	53,5 (12)	51,6 (12)	53,8 (12)	49,4 (12)	52,1 (12)	
	Parâmetros	Erros de Evolvente (micrometros) – Flanco Direito					
		Dente 9	Dente 6	Dente 4	Dente 1	Média	
		F_{α}	63,5 (12)	57,6 (12)	59,9 (12)	58,0 (12)	59,8 (12)
$f_{H\alpha}$		19,4 (10)	15,8 (10)	17,1 (10)	16,2 (10)	17,1 (10)	
$f_{f\alpha}$	56,0 (12)	53,1 (12)	55,1 (12)	50,7 (12)	53,7 (12)		
Honing	Parâmetros	Erros de Evolvente (micrometros) – Flanco Esquerdo					
		Dente 9	Dente 6	Dente 4	Dente 1	Média	
		F_{α}	4,5 (5)	2,7 (3)	5,7 (5)	5,4 (5)	4,6 (5)
	$f_{H\alpha}$	3,3 (5)	-0,2 (1)	3,3 (5)	3,6 (5)	2,5 (4)	
	$f_{f\alpha}$	3,1 (5)	2,7 (4)	3,7 (5)	4,0 (5)	3,4 (5)	
	Parâmetros	Erros de Evolvente (micrometros) – Flanco Direito					
		Dente 9	Dente 6	Dente 4	Dente 1	Média	
		F_{α}	4,7 (5)	1,6 (2)	3,0 (3)	4,7 (5)	3,0 (4)
		$f_{H\alpha}$	2,8 (4)	-0,4 (1)	1,7 (3)	2,8 (4)	1,0 (1)
		$f_{f\alpha}$	3,5 (5)	1,7 (3)	2,5 (4)	3,5 (5)	2,6 (4)

A Tabela (2) mostra os valores dos erros de hélice, onde nota-se da mesma forma que a minimização do erro foi significativa entre os dois processos. Para o parâmetro $f_{H\beta}$ que é o desvio da inclinação da hélice os valores foram menores, da ordem de 3 vezes, e demonstram que o “honing” dos dentes permite manter o ângulo de hélice dentro do projeto especificado. Assim, um engrenamento mais suave e uma atuação mais homogênea dos esforços sobre o dente. Para o parâmetro $f_{f\beta}$ que é o desvio da forma da hélice os valores também foram maiores para o processo de “honing”.

Tabela 2. Valores medidos nos erros de hélice para dentes fresados e para o processo “honing”.

Operação	Parâmetros	Erros de Hélice (micrometros) – Flanco Esquerdo					
		Dente 9	Dente 6	Dente 4	Dente 1	Média	
Fresamento	F_{β}	56,3 (11)	46,1 (10)	46,7 (10)	55,2 (11)	51,1 (11)	
	$f_{H\beta}$	-53,5 (11)	-35,0 (10)	-39,1 (10)	-49,3 (11)	-44,2 (11)	
	$f_{f\beta}$	16,1 (9)	15,9 (9)	13,5 (9)	12,2 (9)	14,4 (9)	
	Parâmetros	Erros de Hélice (micrometros) – Flanco Direito					
		Dente 9	Dente 6	Dente 4	Dente 1	Média	
		F_{β}	37,5 (10)	35,1 (10)	36,6 (10)	44,1 (10)	38,3 (10)
$f_{H\beta}$		-48,2 (11)	-33,0 (10)	-39,9 (10)	-50,4 (11)	-42,9 (11)	
$f_{f\beta}$	41,6 (11)	42,5 (11)	45,7 (12)	43,7 (11)	43,4 (11)		
Honing	Parâmetros	Erros de Hélice (micrometros) – Flanco Esquerdo					
		Dente 9	Dente 6	Dente 4	Dente 1	Média	
		F_{β}	10,7 (7)	11,3 (7)	11,6 (7)	11,7 (7)	11,3 (7)
	$f_{H\beta}$	-7,4 (6)	-7,9 (6)	-9,3 (7)	-9,3 (7)	-8,5 (6)	
	$f_{f\beta}$	7,8 (7)	8,0 (7)	7,8 (7)	7,2 (7)	7,7 (7)	
	Parâmetros	Erros de Hélice (micrometros) – Flanco Direito					
		Dente 9	Dente 6	Dente 4	Dente 1	Média	
		F_{β}	12,8 (7)	11,7 (7)	11,5 (7)	12,1 (7)	12,0 (7)
		$f_{H\beta}$	-9,2 (7)	-9,1 (7)	-8,4 (6)	-8,6 (6)	-8,8 (6)
		$f_{f\beta}$	9,0 (7)	8,6 (7)	8,3 (7)	8,8 (7)	8,7 (7)

Os erros de circular pitch dos dois processos são apresentados na Tab. (3). Os valores são medidos nos 10 dentes do pinhão, onde um gráfico de acordo com a Fig. (6) é gerado. Os valores permitidos apresentados na Tab. (3) na segunda coluna são valores de acordo com a norma DIN 3962 – parte 1 e 2 (1978). Os valores medidos demonstram que o processo de “honing” minimiza os erros de circular pitch, inclusive reduzindo a qualidade de trabalho do valor máximo de 6 com alguns valores iguais a 3 no processo de fresamento para valores na faixa de 2 no processo de “honing”. O valor Fr corresponde ao erro de excentricidade e apresenta somente um valor, já os valores Fp e fpt que correspondem à variação total do passo e ao erro de passo, respectivamente, apresentam dois valores de medição, que correspondem a medição no flanco esquerdo e no flanco direito do dente. O valor $Fp_{z/8}$ é o erro acumulado do circular pitch sobre um setor de aproximadamente 1/8 do perímetro do dente.

Tabela 3. Valores medidos nos erros de circular pitch para os dentes fresados e “honeados”.

Parâmetro	Valor permitido [micrometros]	Valores medidos [micrometros]		Valores medidos [micrometros]	
Fr	20,0 (7)	7,3 (5)		2,1 (1)	
Fp	28,0 (7)	6,4 (3)	8,0 (4)	1,8 (1)	2,7 (1)
$Fp_{z/8}$	18,0 (7)	5,0 (5)	3,7 (3)	1,0 (1)	2,7 (2)
fpt	9,0 (7)	5,0 (6)	3,7 (5)	1,0 (1)	2,7 (4)

4. CONCLUSÕES

De acordo com os dados obtidos nas medições dos erros dos perfis evolvente dos dentes de engrenagens, pode concluir que:

- ✓ O processo apresenta excelente acabamento superficial e valores de rugosidade muito baixos, dessa forma a textura superficial não provoca ruídos durante o engrenamento;
- ✓ Conforme os dados obtidos, nota-se excelente qualidade de perfil e hélice diminuindo do parâmetro DIN 12 para DIN 6;
- ✓ Os dados mostram uma razoável capacidade de eliminação de erros de concentricidade e passo;
- ✓ Baixo custo de ferramental pelo aumento da vida útil dos rebolos cerâmicos, cada reboło removendo 88 micrometros por flanco, tem vida útil para aproximadamente 20.000 peças e o dressador na ordem de 75.000 peças;
- ✓ Elevada capacidade de remover material e de introduzir correções na hélice e na conicidade do pinhão sem ter que construir novo dressador ou novo reboło, onde toda correção é realizada via CNC do equipamento HMX 400;
- ✓ O processo é extremamente econômico para altos lotes de produção, chegando a obter redução de US\$0,15 em comparação com o processo tradicional, apresentando uma flexibilidade de reconstituição do perfil do dente pelo processo em poucos segundos;

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a TRW Automotive Ltda localizada em Lavras – Minas Gerais pelo apoio durante a realização dos experimentos.

6. REFERÊNCIAS

- De Chiffre, L.; Lonardo, P.; Trumpold, H.; Lucca, D.A.; Goch, G.; Brown, C.A.; Raja, J.; Hansen, H.N., 2000, “Quantitative characterization of surface texture”, Ann. CIRP 49, v.2.
- DIN 3962 – Part 1, 1978, “Tolerances for Cylindrical Gear Teeth – Tolerances for Deviations of individual Parameters”, Deutsche Normen, Aug.
- DIN 3962 – Part 2, 1978, “Tolerances for Cylindrical Gear Teeth – Tolerances for Tooth Trace Deviations”, Deutsche Normen, Aug.
- Fässler Customized Solutions, 2008. “Apresentação do processo de honing de engrenagens com rebolos cerâmicos”. Manual Técnico, 38 páginas.
- Hermes Abrasives, 2008, “Gear Honing Technology”, Catálogo Técnico, N. 54, pp. 1-10.
- ISO 1328-1 Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth
- ISO 1328-2 Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information
- ISO TR 10064-1 Cylindrical gears; code of inspection practice; part 1: inspection of corresponding flanks of gear teeth
- Oobayashia, K.; Iriea, K.; Hondab, F., 2005 “Producing gear teeth with high form accuracy and fine surface finish using water-lubricated chemical reactions”, Tribology International, v.38, 243–248.

Sannareddy, H.; Raja, J.; Chen, K., 1998, "Characterization of surface texture generated by multi-process manufacture", International Journal of Machine Tools & Manufactures, v.38, pp. 5–6.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

THE HONING OF GEARS IN STEERING WHEEL SYSTEMS

Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufsj.edu.br¹

Sandro Pereira da Silva, sandro.silva@trw.com²

Gabriel Andrade de Abreu, gabriel.abreu@trw.com²

Paulo César Lima, paulo.lima@trw.com²

¹Federal University of São João del Rei, Praça Frei Orlando, 170 – Centro

²TRW Automotive Ltda – Distrito Industrial - Lavras

Abstract: *The perfect and high precision assembly of the evolute and angle profile of gears provides a master gear application free of vibrations. Steering gears systems are under constant research in the improvement of these profiles with the objective to minimizing the steering efforts, symmetry of back to the center of the direction and to provide to the driver one better sensation during the driving. This work presents a comparison between the traditional milling of the gear and a new process implanted in the plant of the TRW at Lavras that uses the honing system. The development of this new process intends to not only improve the profile evolute of teeth, but also the surface texture minimizing the attrition of rolling during of pinion length to rack. The tests had shown that the system of honing of the gears generated values of roughness Ra and Rz less when compared with the traditional milling. In relation to the profile of evolute the errors also had been lesser and been inside of the values technician specified by the customer, minimizing the vibration of all steering system.*

Key-words: *Evolute Profile; Gear Honing Tool; Milling; Roughness.*