

COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DE USINAGEM EM ACABAMENTO DE DENTES HELICOIDAIS NO PROCESSO DE FRESAMENTO E “HONING”

Mouhamed Zorkot¹

Sandro Pereira da Silva¹

Joelma Rezende Durão Pereira¹

¹ Universidade Federal de Lavras, UFLA, MG, Brasil, mzorkot@engenharia.ufla.br; sandro.silva@deg.ufla.br; joelma.durao@deg.ufla.br; anderson.silva1@posgrad.ufla.br

Lincoln Cardoso Brandão²

Aristides Magri³

Daniel Iwao Suyama⁴

Anderson Pereira da Silva¹

² Universidade Federal de São João Del Rei, UFSJ, MG, Brasil, lincoln@ufs.br

³ Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, SP, Brasil, arimagri@fem.unicamp.br

⁴ Faculdade de Ciências Aplicadas, UNICAMP, SP, Brasil, daniel.suyama@fca.unicamp.br

Resumo. *Sistemas de transmissão aplicados em mecanismos de direção estão sob constante pesquisa no melhoramento dos perfis de engrenagem visando diminuir os esforços em serviço, simetria na retornabilidade e aumento da vida do sistema de engrenamento. Novos processos de acabamento para estes tipos de componentes têm sido objeto de estudos de muitos pesquisadores, no entanto ainda existem lacunas que necessitam serem exploradas. Neste contexto, o processo de “honing” para engrenagens helicoidais tem apresentado bons resultados em termos de qualidade de engrenamento, já o processo de fresamento, também conhecido como fresamento após tratamento térmico, tem superado os tradicionais processos de acabamento para engrenagens helicoidais. O objetivo deste trabalho é comparar as características de engrenamento dos dentes de pinhões helicoidais gerados a partir do processo de fresamento e o inovador processo de “honing”. Os experimentos foram realizados em uma indústria de autopeças no interior do estado de São Paulo. Buscou-se comparar os dois processos com relação a qualidade de engrenamento no perfil de hélice e evolvente, sob a norma DIN. Os resultados demonstraram que o processo de “honing” em comparação ao processo de fresamento foi no mínimo 6 vezes superior em relação a dispersão micrométrica para os perfis de hélice e evolvente, considerando qualidade DIN 6 para o processo de “honing” e DIN 9 para o processo de fresamento. Contudo os resultados mostraram razoável capacidade de eliminação de erros de engrenamento aplicando o processo de “honing” para usinagem de dentes helicoidais aplicados em mecanismos de direção.*

Palavras chave: Pinhões de direção, Honing, Acabamento superficial, Perfis de Engrenagem.

1. INTRODUÇÃO

O tema de acabamento de dentes de engrenagens utilizando o processo de fabricação por “honing” é pouco explorado, por se tratar de um processo relativamente novo. Os primeiros estudos surgiram de aplicação do “honing” em 1970, pelo Dr. Albert Fässler, em desenvolvimento da primeira máquina para “honing” de dentes de engrenagens com cunha indefinida. (SILVA, 2010).

A partir da década de 1970, investigações teóricas e experimentais vêm sendo desenvolvidas para o estudo do comportamento dinâmico de sistemas engrenados. Pode-se observar uma primeira tendência ligada à pesquisa de tensões no dente da engrenagem, ao que diz respeito à qualidade do engrenamento e considerando a sua flexibilidade, tendo como objetivo o aperfeiçoamento de projeto do dente de engrenagem (SILVA, 2010).

Segundo Gillespie (1992), o efeito do engrenamento em sistemas de direção dos veículos automotores possui grande importância no comportamento estático e dinâmico veicular. A função do sistema de direção é gerar ângulos nas rodas dianteiras e/ou traseiras em resposta às necessidades impostas pelo condutor para que haja o controle do veículo. Contudo, os ângulos de esterçamento efetivos são modificados pela geometria do sistema de suspensão, direção, condições de tracionamento para os veículos de tração dianteira e qualidade apresentada na relação de engrenamento pinhão/cremalheira. Por sua vez, Bastow (1993), salienta a importância do sistema de direção em função de aceitar as irregularidades verticais impostas pelas pistas provocando perturbações no sistema de direção em especial ao pinhão e cremalheira.

Os sistemas de engrenamento, devido a sua capacidade de transmissão de movimentos e potência, 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 na sua rugosidade. 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 CUSTOMIZED SOLUTIONS, 2008).

Segundo Hermes (2008), considerável redução de ruídos em engrenamento pode ser conseguida com o processo de “honing”. A minimização de grandes picos de rugosidade é significativa, permitindo a correção do perfil evolvente e ângulo de hélice do dente da engrenagem.

Este trabalho propõe comparar a aplicação do processo de “honing” no acabamento de dentes helicoidais de pinhões aplicados em sistemas de direção e o fresamento, sendo que inicialmente foi empregado o tradicional método de fresamento por geração do perfil dos dentes para ambos os processos.

2. METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados em uma empresa de autopeças americana especializada em fabricar sistemas de direção. Pinhões de sistemas de direção foram empregados como corpos de prova. Os pinhões são fabricados em aço SAE 4320-H com dureza no 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 previstas conforme a norma ISO 1328-1 (1995), ISO 1328-2 (1997) e ISO TR 10064-1 (1992).

O equipamento empregado no experimento foi um centro de usinagem específico para o processo de “honing” da marca Fässler, modelo HMX-400 com comando numérico da marca Siemens, modelo 840D, e o equipamento de corte de dentes no processo de “hard shaving” da marca Gleason – Pfauter, modelo P60, o comando numérico é da marca Siemens, modelo 840D.

O rebolo utilizado no experimento para o processo de “honing” é de Óxido de Alumínio (Al_2O_3) com aglutinante a base de resina epóxi. O módulo de elasticidade da liga do rebolo é de 21.000 N.mm^{-2} e a densidade de $2,45 \text{ g.cm}^{-3}$. Conforme Hermes (2008), para a realização do processo de “honing”, inicialmente faz-se o perfilamento do dentado interno no rebolo de corte, transferindo para o rebolo a geometria do dressador que tem exatamente o perfil evolvente e ângulo de hélice dos dentes do pinhão. Em seguida, realizou-se o processo de “honing” que consiste na transferência da geometria do rebolo para o pinhão. Detalhes do “set-up” do processo de “honing” são apresentados na Figura 1a, sendo o pinhão montado na placa de fixação ao qual 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. Já a Figura 1b representa o “set-up” para o processo de fresamento. O princípio de usinagem do processo de fresamento tem como deslocamento de mergulho o avanço do ferramental de fresamento tipo caracol com 3500 RPM em corte concordante com os dentes helicoidais do pinhão.

Os parâmetros comparativos adotados foram os desvios do perfil transversal e os erros de hélice, de acordo com a norma DIN 3962 (1978). Tem-se na Figura 2 a representação gráfica dos desvios transversais do perfil do dente e a Figura 3 mostra a região onde é verificado o erro de hélice do pinhão.

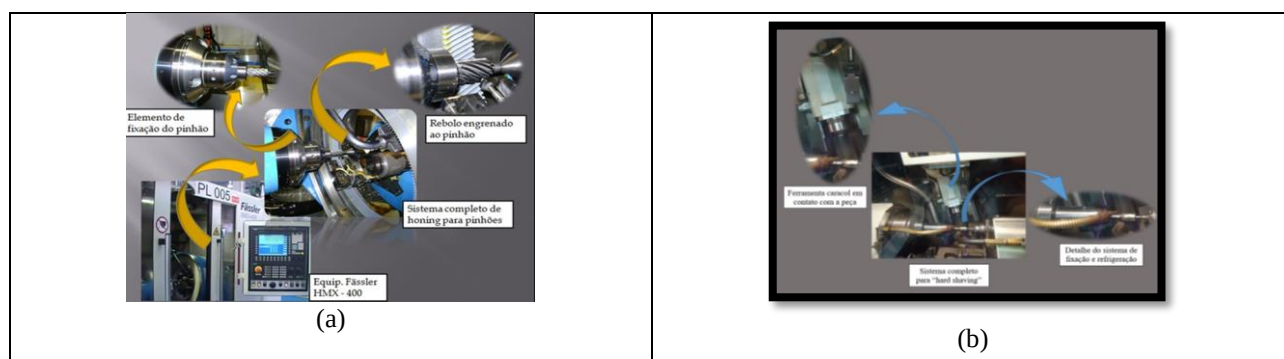


Figura 1: (a) Detalhe do “set-up” aplicado ao processo de “honing”. (b): Detalhe do “set-up” aplicado ao processo de fresamento.

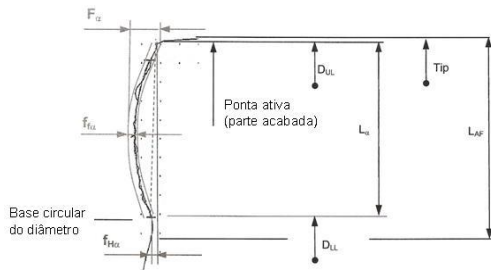
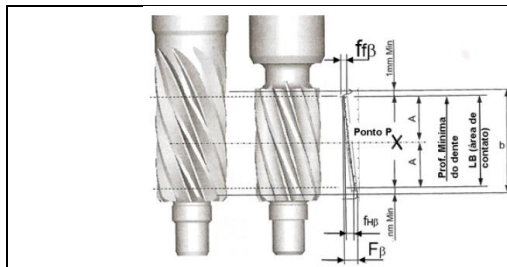


Figura 2: Perfil transversal do dente.



Em que:

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_{fb} : Desvio da forma da hélice.

Figura 3: Diagrama da representação do erro de hélice

3. RESULTADOS

As medições foram realizadas nos dentes 1, 2, 3 e 4, conforme mostrado nas Figuras 4, 5, 6 e 7, apresentando os gráficos típicos dos erros de evolvente e ângulo de hélice, para o processo de “honing” e fresamento dos dentes do pinhão, respectivamente.

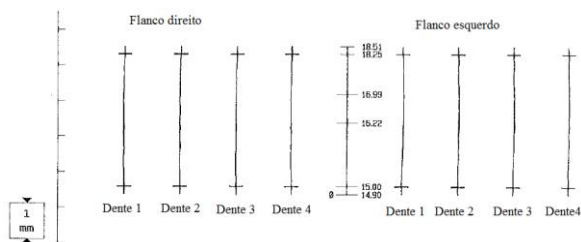


Figura 4: Diagrama da representação do perfil evolvente – “honing”.

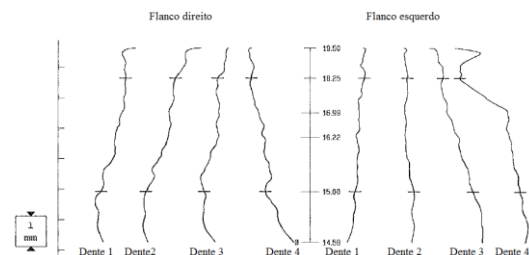


Figura 5: Diagrama da representação do perfil evolvente – fresamento.

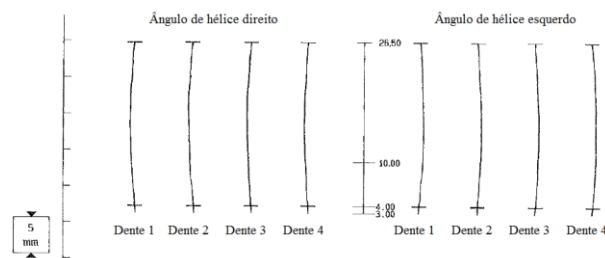


Figura 6: Diagrama da representação do erro de hélice – “honing”.

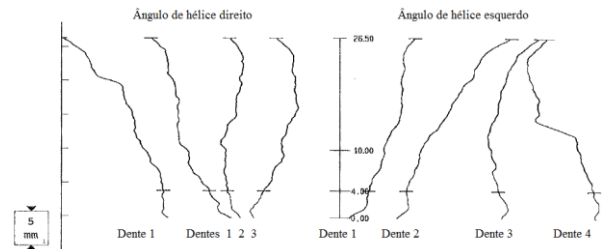


Figura 7: Diagrama da representação do erro de hélice – fresamento.

As Tabelas 1 e 2 apresentam os valores obtidos nos gráficos comparando os dois processos “honing” e fresamento em relação aos erros do perfil evolvente. Os resultados são apresentados com seus respectivos valores em micrometros. Nas tabelas são representados os valores de quatro dentes e obtida à média destes na última coluna.

Os valores alcançados no processo de “honing” são significativamente inferiores ao comparar com o processo de fresamento, sendo estes na ordem de seis 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 próximos 4 vezes inferiores. Já para o parâmetro f_{fa} que corresponde ao desvio da forma do dente foi o que obteve a maior diferença ficando em valores médios na faixa de aproximadamente 11 vezes

menor para o processo de “honing” em comparação ao processo de fresamento. Os valores entre parênteses correspondem à qualidade de tolerância conforme a norma DIN 3962 (1978 a,b), quanto menor forem estes valores, melhor será a qualidade do engrenamento, pois à medida que o erro diminui minimiza os erros do perfil evolvente.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores dos erros para o ângulo de hélice.

Tabela 1: Erros de Evolvente [μm] - Flanco Direito (FD) e Flanco Esquerdo (FE).

Processo	Parâmetros	Dente 1		Dente 2		Dente 3		Dente 4		Média	
		FD	FE	FD	FE	FD	FE	FD	FE	FD	FE
“Honing”	F_α	3,1 (4)	2,6 (3)	3,7 (4)	3,3 (4)	2,4 (3)	2,4 (3)	4,3 (5)	3,2 (4)	3,4 (4)	2,9 (4)
	$f_{H\alpha}$	2,0 (3)	1,4 (2)	2,9 (4)	2,6 (4)	1,3 (2)	1,9 (3)	3,2 (5)	2,9 (4)	2,3 (3)	2,2 (4)
	$f_{f\alpha}$	1,9 (3)	1,9 (3)	1,6 (3)	1,8 (3)	1,9 (3)	2,0 (3)	2,2 (4)	2,1 (4)	1,9 (3)	1,9 (3)

Tabela 2: Erros de Evolvente [μm] - Flanco Direito (FD) e Flanco Esquerdo (FE).

Processo	Parâmetros	Dente 1		Dente 2		Dente 3		Dente 4		Média	
		FD	FE	FD	FE	FD	FE	FD	FE	FD	FE
Fresa- mento	F_α	19,2 (9)	19,2 (9)	16,8 (9)	16,8 (9)	25,2 (10)	25,2 (10)	15,8 (8)	15,8 (8)	19,2 (9)	19,2 (9)
	$f_{H\alpha}$	18,3 (10)	18,3 (10)	15,4 (10)	15,4 (10)	25,2 (11)	25,2 (11)	15,1 (10)	15,1 (10)	18,5 (10)	18,5 (10)
	$f_{f\alpha}$	7,5 (7)	7,5 (7)	8,5 (7)	8,5 (7)	16,5 (10)	16,5 (10)	8,0 (7)	8,0 (7)	10,1 (9)	10,1 (9)

Tabela 3: Erros de Hélice [μm] - Flanco Direito (FD) e Flanco Esquerdo (FE).

Processo	Parâmetros	Dente 1		Dente 2		Dente 3		Dente 4		Média	
		FD	FE	FD	FE	FD	FE	FD	FE	FD	FE
“Honing”	F_α	7,7 (5)	6,8 (5)	8,8 (6)	8,5 (6)	7,8 (5)	7,1 (5)	8,9 (6)	8,4 (6)	8,3 (6)	7,7 (5)
	$f_{H\alpha}$	5,1 (5)	4,0 (4)	9,0 (6)	7,7 (6)	4,6 (5)	5,0 (5)	8,6 (6)	7,0 (6)	6,8 (6)	6,0 (5)
	$f_{f\alpha}$	7,2 (7)	6,1 (6)	7,4 (7)	6,2 (6)	6,1 (6)	6,0 (5)	7,2 (7)	6,0 (5)	7,0 (7)	6,1 (6)

Tabela 4: Erros de Hélice [μm] - Flanco Direito (FD) e Flanco Esquerdo (FE).

Processo	Parâmetros	Dente 1		Dente 2		Dente 3		Dente 4		Média	
		FD	FE	FD	FE	FD	FE	FD	FE	FD	FE
Fresa- mento	F_α	61,4 (12)	69,2 (11)	35,5 (10)	40,8 (10)	28,6 (9)	35,4 (10)	28,9 (9)	57,11 (11)	38,6 (10)	50,6 (10)
	$f_{H\alpha}$	69,8 (12)	73,2 (12)	27,1 (9)	48,9 (11)	28,1 (10)	36,9 (10)	25,8 (9)	72,2 (12)	37,7 (10)	57,8 (11)
	$f_{f\alpha}$	19,5 (10)	31,2 (11)	29,1 (11)	13,3 (9)	17,8 (9)	17,2 (9)	17,4 (9)	15,0 (9)	20,9 (10)	19,2 (9)

Observa-se que a menor variação ocorreu nos processos de “honing”. Para o parâmetro $f_{H\alpha}$ que é o desvio da inclinação da hélice os valores foram menores, da ordem de aproximadamente 6 vezes menor, nota-se que o processo de “honing” aplicado para dentes de pinhões helicoidais permite manter o ângulo de hélice dentro de um fino padrão de qualidade, garantindo assim, um engrenamento mais suave e atuação mais homogênea dos esforços sobre o dente. Para o

parâmetro f_{fb} , que é o desvio da forma da hélice, os valores também foram menores para o processo de “honing” em comparação ao processo de fresamento.

4. CONCLUSÕES

Excelentes qualidades de perfil e hélice para o processo de “honing” na ordem de DIN 6, em média, enquanto o processo de fresamento não ultrapassou o patamar médio de DIN 9. Os dados mostram razoável capacidade de eliminação de erros de engrenamento aplicando o processo de “honing” para dentes de engrenagens helicoidais. O processo de fresamento apresenta características de engrenamento no mínimo 6 vezes pior em comparação ao processo de “honing” em engrenagens helicoidais.

5. AGRADECIMENTOS

Especial agradecimento à FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto liberado e para a participação no COBEF 2019. Os autores agradecem a empresa de autopeças localizada no interior de São Paulo – SP pelo apoio durante a realização dos experimentos.

6. REFERÊNCIAS

- BASTOW, DONALD, Car Suspension and Handling, / rev. by Geoffrey P. Howard, London, Warrendale, PA, USA: Pentech Press: **Society of Automotive Engineers**, (1993), 3rd ed. 362p.
- 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 COSTUMIZED SOLUTIONS. **Apresentação do processo de honing de engrenagens com rebolos cerâmicos**, (2008), Manual Técnico, 38 páginas.
- GILLESPIE, T. D.. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**, Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, (1992), v. 1. 495 p.
- HERMES ABRASIVES, 2008, “Gear Honing Technology”, **Catálogo Técnico**, N. 54, p. 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, (1995), 2nd edition, 27 p.
- 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, (1997), 2nd edition, 11 p.
- ISO TR 10064-1 **Cylindrical gears - Code of inspection practice**; part 1: inspection of corresponding flanks of gear teeth, (1992), 1st edition, 40 p.
- 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.
- SILVA, S.P. (2010) **Otimização do processo de “honing” em pinhões de direção utilizando a metodologia de superfície de resposta**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João del Rei, MG, 2010.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Comparison of the machining processes in finishing of helical teeth in the process of milling and "honing"

Mouhamed Zorkot¹

Sandro Pereira da Silva¹

Joelma Rezende Durão Pereira¹

¹ Universidade Federal de Lavras, UFLA, MG, Brasil, mzorkot@engenharia.ufla.br; sandro.silva@deg.ufla.br; joelma.durao@deg.ufla.br; anderson.silva1@posgrad.ufla.br

Lincoln Cardoso Brandão²

Aristides Magri³

Daniel Iwao Suyama⁴

Anderson Pereira da Silva¹

² Universidade Federal de São João Del Rei, UFSJ, MG, Brasil, lincoln@ufsj.edu.br

³ Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, SP, Brasil, arimagri@fem.unicamp.br

⁴ Faculdade de Ciências Aplicadas, UNICAMP, SP, Brasil, daniel.suyama@fca.unicamp.br

Abstract. *Transmission systems applied in steering mechanisms are under constant research in the improvement of the gear profiles in order to reduce the efforts in service, symmetry in the returnability and increase the life of the gear system. New finishing processes for these types of components have been the subject of research by many researchers, but there are still gaps that need to be explored. In this context, the "honing" process for helical gears has shown good results in terms of gear quality, while the milling process, also known as milling after heat treatment, has surpassed the traditional finishing processes for helical gears. The objective of this work is to compare the gear characteristics of the helical pinion teeth generated from the milling process and the innovative honing process. The experiments were carried out in an auto parts industry in the State of São Paulo. We sought to compare the two processes with respect to gear quality in the propeller profile and involute, under the DIN standard. The results showed that the "honing" process compared to the milling process was at least 6 times higher than the micrometric dispersion for the helix and involute profiles, considering DIN 6 quality for the honing process and DIN 9 for the milling process. However, the results showed a reasonable ability to eliminate gear errors by applying the honing process for the machining of helical tines applied in steering mechanisms.*

Keywords: Pinion, Honing, Surface Finishing, Gear Profiles.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.