

EFEITOS DA CEMENTAÇÃO E DA NITRETAÇÃO NO CUSTO E NA QUALIDADE DE ENGRENAGENS PRODUZIDAS COM AÇOS ABNT 4140 E 8620

Claudio José Leitão ¹
Paulo Roberto Mei ²
Rodolfo Libardi ³

Resumo

Este trabalho tem por objetivo a comparação entre os processos de nitretação e de cementação para engrenagens submetidas a tensões de contato abaixo de 1.300 MPa. São analisados os custos de fabricação, assim como a profundidade da camada endurecida e a distorção produzida pelos dois processos em engrenagens do aço ABNT 4140 beneficiadas e submetidas a nitretação líquida e gasosa e do aço ABNT 8620 submetido a cementação líquida, seguida de têmpera e revenimento. Foi realizado o controle dimensional das engrenagens, antes e após os tratamentos térmicos e termoquímicos. Conclui-se que os processos de nitretação líquida ou gasosa são mais adequados que o de cementação quando se objetiva a diminuição das deformações em engrenagens, além de serem cerca de 30% mais econômicos. O processo de cementação, ao mesmo tempo em que apresenta a maior profundidade endurecida e a maior dureza superficial, apresenta também a maior deformação e o maior custo. O processo de nitretação líquida, por outro lado, apresenta o menor custo e a menor deformação, porém a menor profundidade endurecida.

Palavras-chave: Cementação; Nitretação; Engrenagens; Deformação.

EFFECTS OF CARBURIZING AND NITRIDING PROCESSES ON THE COST AND QUALITY OF GEARS PRODUCED WITH AISI 4140 AND 8620 STEELS

Abstract

This study compares the effects of nitriding and carburizing processes applied to gears subjected to contact stresses below 1300 MPa. The manufacturing cost, as well the depth of hardened layer and the distortion produced by two processes are analyzed. AISI 4140 gears quenched, tempered, liquid and gas nitriding and AISI 8620 gears after liquid carburizing, quenching and tempering are analyzed. The dimensional control of the gears was carried out before and after heat and thermochemical treatments. It is concluded that liquid or gas nitriding processes are about 30% more economical than liquid carburizing and also they reduce the dimensional changes. By the other hand liquid carburizing achieves greater case depth. Liquid nitriding process presents the lowest cost, dimensional changes and case depth.

Key words: Carburizing; Nitriding; Gears; Dimensional changes.

1 INTRODUÇÃO

O processo de cementação é largamente utilizado para a fabricação de componentes que necessitam de alta dureza superficial e de grande resistência ao desgaste, como pinhões, engrenagens, eixos etc.;⁽¹⁾ porém, devido às características do processo (temperaturas acima de

900°C, resfriamento brusco, mudança de fases etc.), esse tratamento termoquímico ocasiona, em geral, grandes deformações.

A nitretação é outro processo termoquímico utilizado também em aplicações que requeiram elevadas durezas superficiais e grande resistência ao desgaste. Contudo, ao contrário da cementação, as deformações

¹Engenheiro Industrial Mecânico, M. Sc., Diretor Técnico da Supertrat, Rua Irmã Aneta Schnapp, 262, Distrito Industrial II, Cep 13457-194, Santa Bárbara D'Oeste, SP, Brasil. E-mail: claudio@supertrat.com.br

²Professor Titular do Depto de Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, CP 6122, Cep 13083-970, Campinas, SP, Brasil. E-mail: pmei@fem.unicamp.br

³Físico, Professor Doutor da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, Rua Território do Acre, 1222, Cep 13420.585, Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: rlibardi@unimep.br

são mínimas, pois o processo é realizado em baixas temperaturas (350 a 575°C) e não necessita de resfriamento rápido para produzir o endurecimento da camada nitretada.⁽²⁻⁵⁾

Como os dois processos apresentam objetivos similares, há casos onde a nitretação poderia ser usada para substituir a cementação. Porém, para realizar esta substituição vários aspectos precisam ser considerados como: deformações geradas, dureza superficial, profundidade da camada endurecida e custos de fabricação.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo demonstrar que o processo de cementação utilizado em componentes que necessitam de alta dureza superficial e de grande resistência ao desgaste pode, em alguns casos, ser substituído pelo processo de nitretação, trazendo algumas vantagens, entre as quais a redução dos custos de fabricação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As engrenagens foram fabricadas com aços ABNT 4140 e 8620 e submetidas a três tipos de tratamentos. Cada uma das três engrenagens foi identificada pelas siglas:

BNL: Engrenagem beneficiada e submetida a nitretação líquida. Aço ABNT 4140.

BNG: Engrenagem beneficiada e submetida a nitretação gasosa. Aço ABNT 4140.

CTR: Engrenagem submetida a cementação seguida de têmpera e revenimento a 180°C. Aço ABNT 8620.

A Tabela 1 mostra a composição química dos aços ABNT 8620 e 4140 utilizados.

A Figura 1 mostra as dimensões das engrenagens forjadas e a Figura 2 mostra o fluxograma das atividades realizadas com as engrenagens.

2.1 Tratamentos Térmicos e Termoquímicos

2.1.1 Cementação, têmpera e revenimento (CTR)

A engrenagem de aço ABNT 8620 foi cementada a 925°C por 4 horas em um forno de banho de sal, utilizando o sal Durferrit C-97, com potencial de carbono de 0,8%, seguindo-se um resfriamento em banho de sal Durferrit ASI40 a 180°C. O revenimento foi feito a 180°C por 2 horas para manter a dureza acima de 60 HRC.

2.1.2 Beneficiamento e nitretação gasosa e líquida (BNG e BNL)

A austenitização das engrenagens de aço ABNT 4140 foi feita em um forno de banho de sais a 850°C e o resfriamento em banho de sal Durferrit AS-140 a 180°C.⁽⁶⁾ O revenimento foi feito a 600°C por 2 horas para estabilizar a estrutura dos aços antes do processo de nitretação, ou seja, garantir que todas as transformações ocorram neste processo, visto que as nitretações ocorreram em temperaturas menores (565°C na nitretação líquida e 510°C na nitretação gasosa).⁽⁷⁾

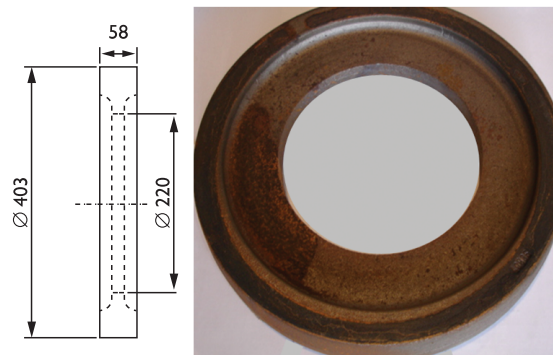


Figura 1. Dimensões do material forjado para confecção das engrenagens de aços ABNT 8620 e 4140 (dimensões em milímetros).

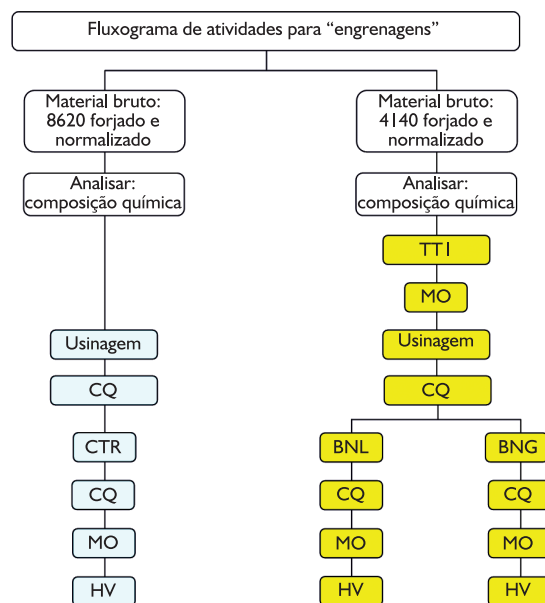


Figura 2. Fluxograma de atividades desenvolvidas. **CTR:** Cementar, temperar e revenir; **BNG:** Beneficiado + nitretação gasosa; **BNL:** Beneficiado + nitretação líquida; **MO:** Microscopia ótica; **HV:** Dureza Vickers; **CQ:** Controle de qualidade; **TTI:** Austenitização a 850°C por 2 horas, seguida de revenimento a 600°C por 2 horas.

Tabela 1. Análise química via espectrometria de emissão óptica (% em massa)

Aço - Processo	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al
8620 - CTR	0,20	0,72	0,23	0,670	0,50	0,24	0,003	0,032
4140 - BNL	0,37	0,82	0,26	0,094	1,03	0,19	0,003	0,014
4140 - BNG	0,41	0,99	0,26	0,032	0,95	0,19	0,010	0,020

Após beneficiamento, uma das engrenagens foi submetida a nitretação líquida por 90 minutos a 565°C, em um banho de sais com 33% de cianato e 3% de cianeto, usando o processo Durferrit-Tenifer. A outra passou por um processo de nitretação gasosa a 510°C utilizando uma sequência de operações definidas na Tabela 2.

2.2 Usinagem das Engrenagens Forjadas

As engrenagens de aço ABNT 4140 foram usinadas após o beneficiamento e a engrenagem de aço ABNT 8620 foi usinada após forjamento e normalização, antes da cementação + têmpera + revenimento, conforme apresentado na Figura 3.

As engrenagens foram medidas e avaliadas conforme as exigências da norma DIN 3962 de 1978 (*Tolerances for Cylindrical Gear Teeth*),⁽⁸⁾ que define as tolerâncias dimensionais para os dentes de engrenagens e um índice de qualidade, que varia desde a menor qualidade (12) até a de maior precisão (qualidade 1). As medições foram efetuadas em uma medidora de engrenagens universal Mahr GMX 400.

2.3 Análise dos Dentes das Engrenagens

As microestruturas das camadas nitretadas e cementadas foram avaliadas nas seguintes regiões: topo e flanco do dente, (mostradas na Figura 4).

Tabela 2. Etapas do processo de nitretação gasosa

Etapas	Dissociação da amônia (%)	Pressão (torr)	Tempo (horas)
Purgar	10	--	0,5
Aquecer até 510°C	10	14,7	10
Nitretar a 510°C	20	14,7	30
Nitretar a 510°C	30	14,7	18
Ligar ventilador e resfriar até 90°C	5	14,7	10
Quando chegar a 90°C, retirar as peças	-	-	1
Tempo total	-	-	69,5

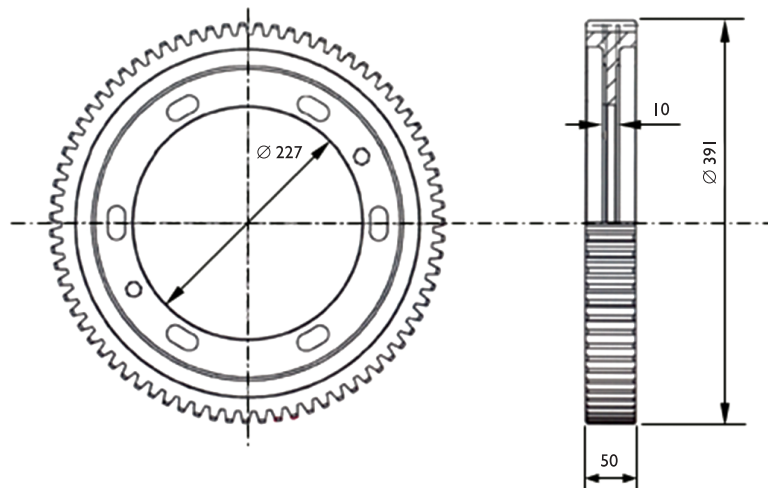


Figura 3. Dados das engrenagens. Número de dentes: 75. Módulo: 5,0. Largura do dente: 50 mm. Ângulo de pressão: 20°.

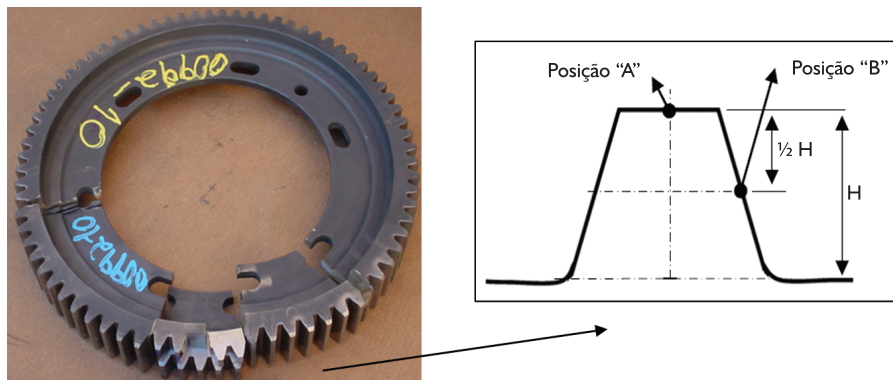


Figura 4. Fragmento da engrenagem utilizado para avaliações microestruturais da camada cementada e nitretada, perfil de dureza Vickers (posição B) e de dureza externa (posição A).⁽⁹⁾

3 RESULTADOS

3.1 Dureza e Microestrutura após o Tratamento Térmico de Beneficiamento

A Tabela 3 mostra as respectivas microestruturas e durezas das engrenagens de aço ABNT 4140 após beneficiamento.

3.2 Deformações após Tratamentos Térmicos e Termoquímicos

Foi realizado o controle dimensional das engrenagens, antes e após os tratamentos térmicos e termoquímicos. Na Figura 5 observa-se que as engrenagens dos aços ABNT 8620 e 4140 foram usinadas para obtenção da mesma qualidade (nível 7). Posteriormente, a engrenagem do aço ABNT 8620 foi submetida a cementação seguida de têmpera e revenimento (CTR), e as engrenagens de aço ABNT 4140 foram submetidas a nitretação líquida (BNL) e a nitretação gasosa (BNG). Observa-se que a engrenagem que passou pelo processo CTR apresenta a pior qualidade (12). Em seguida, a engrenagem que passou pelo processo BNG possui qualidade 9 e, por fim, a engrenagem que passou pelo processo BNL praticamente não deformou, pois apresenta a mesma qualidade (7).

CTR: Cementação, Têmpera e Revenimento;
NG: Nitretação Gasosa; **NL:** Nitretação Líquida.

3.3 Dureza após os Processos de Nitretação e Cementação

A Tabela 4 mostra as medidas de dureza superficial (posição "A" da Figura 4) e os valores de dureza abaixo da superfície obtidos nos processos de cementação e nitretação gasosa e líquida (posição "B" da Figura 4). A Figura 6 mostra os perfis de dureza para os três processos. Verifica-se que os valores da camada nitretada, ou seja, a dureza de núcleo da engrenagem mais 50 pontos encontrados na escala Vickers conforme determina a norma DIN 50190,⁽¹⁰⁾ estão em 0,50 mm para a nitretação gasosa e 0,25 mm para a nitretação líquida. No caso da engrenagem cementada encontra-se uma camada efetiva de 1,10 mm, ou seja, a profundidade na qual se encontra um valor de 513 HV (50 HRC, camada efetiva segundo Parrish⁽¹¹⁾).

Tabela 3. Microestrutura e dureza após o beneficiamento de engrenagens do aço ABNT 4140 antes da nitretação

Tratamento	Microestrutura	Dureza do núcleo (RC)
BNL	Martensita revenida	27 ± 1
BNG	Martensita revenida	28 ± 1

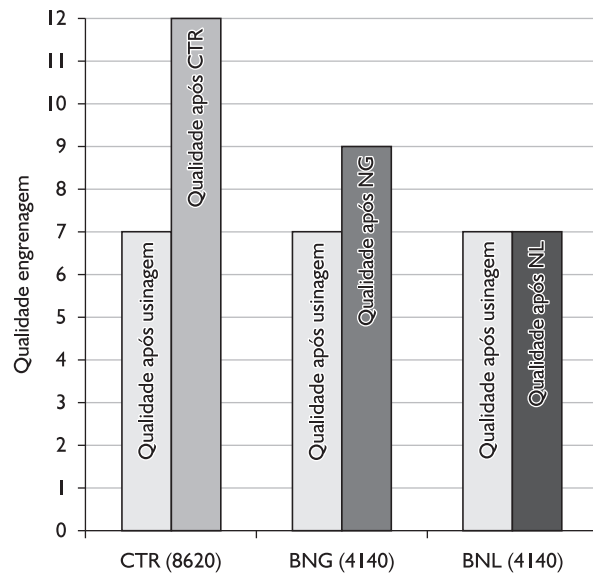


Figura 5. Qualidade de engrenagens antes e após os tratamentos termoquímicos efetuados.

Tabela 4. Dureza das engrenagens nitretadas

	4140 BNG		4140	8620 CTR
	HV _{0,5}	BNL HV _{0,5}	HV ₁	HV ₁
Superfície	670	725	792	792
Distância da superfície (mm)	0,05	635	625	805
	0,10	590	490	809
	0,20	575	451	805
	0,25	550	329	802
	0,30	537	-	796
	0,40	390	-	787
	0,50	342	-	773
	0,60	-	-	727
	0,80	-	-	621
1,00	-	-	571	
1,10	-	-	513	
Núcleo	292	279	327	327

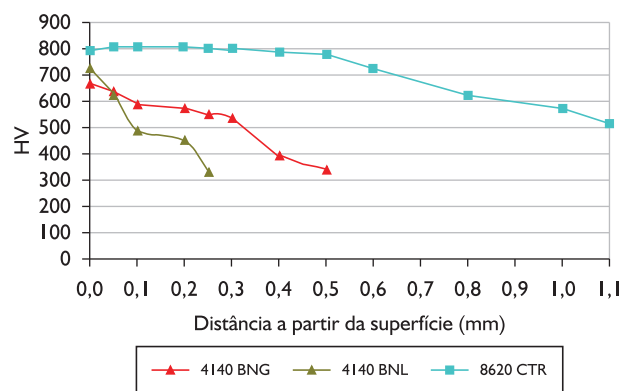


Figura 6. Perfis de dureza das engrenagens após a nitretação e a cementação.

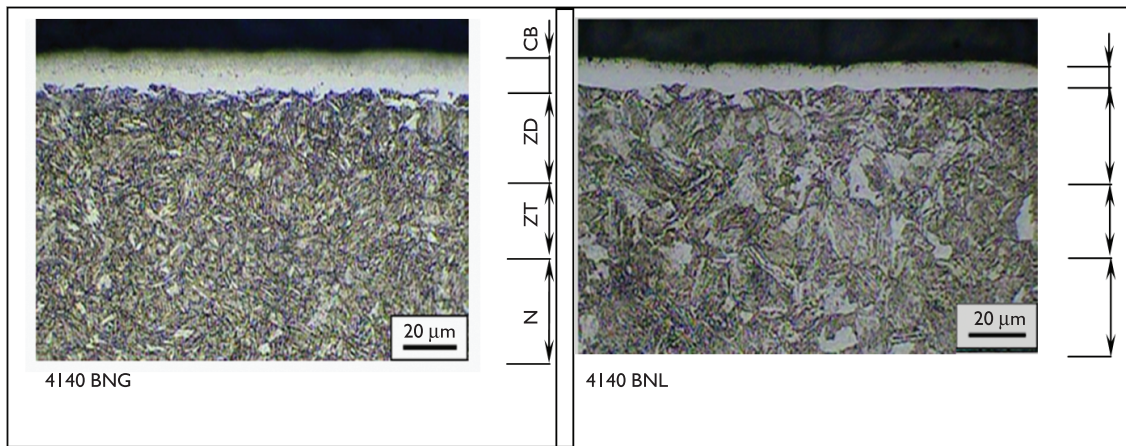


Figura 7. Microestruturas observadas nos processos de nitretação gasosa (BNG) e líquida (BNL): **CB:** camada branca; **ZD:** zona de difusão; **ZT:** zona de transição e **N:** núcleo (metal base). Ataque: nital 3%.

A cementação produz uma dureza superficial maior que a nitretação líquida ou a gasosa (792, 725 e 670 HV, respectivamente) e uma profundidade de camada endurecida, com dureza acima de 500 HV, muito maior que a nitretação gasosa e líquida (> 1,1; 0,3 e 0,1 mm, respectivamente).

3.4 Microestrutura após os Processos de Nitretação

A Figura 7 mostra a variação da espessura da camada branca em função do processo de nitretação utilizado. A Tabela 5 mostra as camadas brancas admissíveis para cada classe de fabricação das engrenagens.⁽¹²⁾ Portanto, os valores encontrados, tanto para a nitretação gasosa (5 a 14 µm) quanto para a nitretação líquida (9 a 18 µm), atendem aos parâmetros da qualidade classe “B” (abaixo de 20 µm).

3.5 Custo dos Processos

A Figura 8 mostra a comparação dos custos envolvendo a confecção de engrenagens de acordo com os tipos de tratamentos térmicos e termoquímicos utilizados. As Figuras 9-11 mostram as composições dos custos apresentados para cada processo. Nota-se que o custo sofre grande influência do processo de acabamento final (retífica). Nesta situação, por exemplo, a engrenagem cementada fica cerca de 40% mais cara que a nitretada. Este custo é calculado levando-se em conta os valores fornecidos pela empresa ACE-Supertrat, para o mês de maio de 2010.

A Figura 12 resume os resultados obtidos, onde se pode observar que:

- Os processos de nitretação líquida ou gasosa são mais adequados que o de cementação quando se objetiva a diminuição das deformações em engrenagens, além de serem mais econômicos. No entanto, deve-se atentar que a nitretação não deve ser utilizada quando as tensões de contato nas engrenagens forem acima de 1.300 MPa;⁽¹³⁾

Tabela 5. Valores admissíveis da camada branca em função da classe da engrenagem⁽¹²⁾

Classe	Espessura da camada branca admissível (µm)
“A”	12,7
“B”	20,3
“C”	25,0

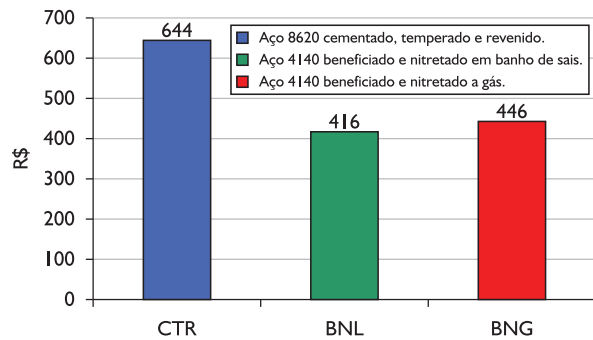


Figura 8. Comparação do custo total para a produção de engrenagem usando diferentes tratamentos térmicos e termoquímicos.

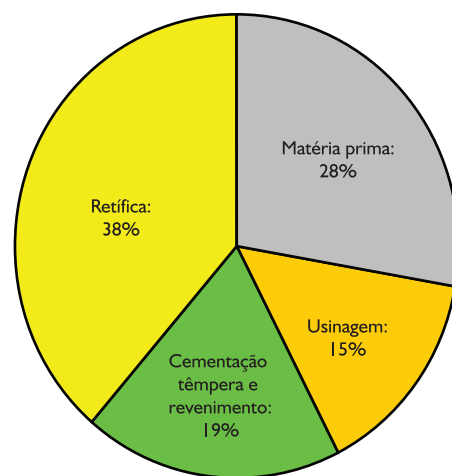


Figura 9. Distribuição de custos na fabricação da engrenagem de aço ABNT 8620 no processo CTR. Custo total de R\$ 644,00.

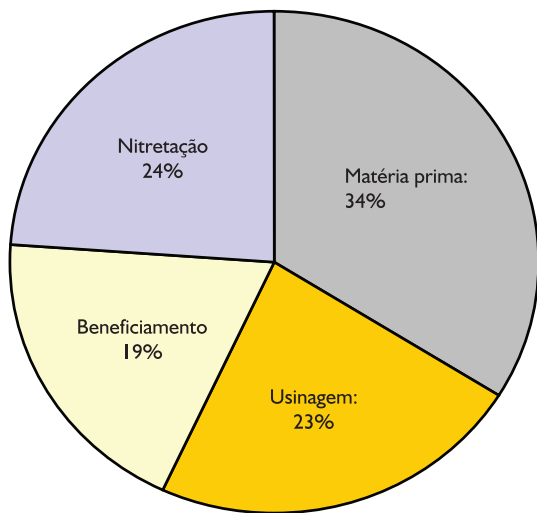


Figura 10. Distribuição de custos na fabricação da engrenagem de aço ABNT 4140 no processo BNL. Custo total de R\$ 416,00.

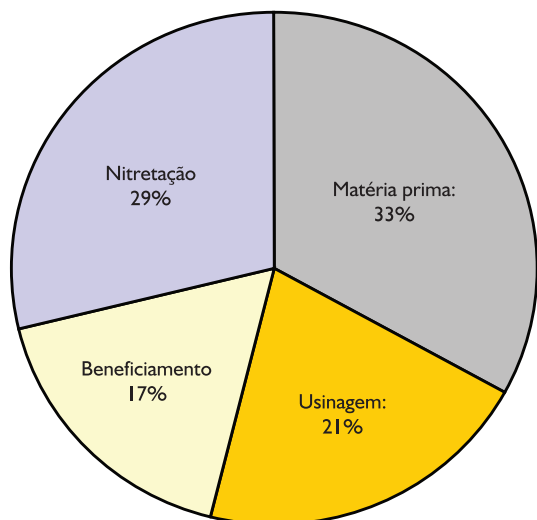


Figura 11. Distribuição de custos na fabricação da engrenagem de aço ABNT 4140 no processo BNG. Custo total de R\$ 446,00.

- O processo de cementação, ao mesmo tempo em que apresenta as maiores profundidade endurecida e dureza superficial, apresenta também a maior deformação e o maior custo; e
- O processo de nitretação líquida apresenta o menor custo e a menor deformação, porém a menor profundidade endurecida.

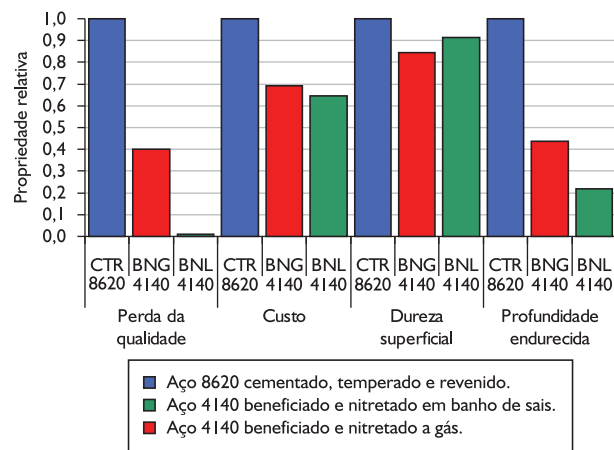


Figura 12. Resumo das propriedades relativas das engrenagens nas três condições de tratamento.

4 CONCLUSÕES

Em relação às engrenagens fabricadas com os aços ABNT 8620 (cementada, temperada e revenida) e ABNT 4140 (temperada, revenida e nitretada) conclui-se que:

- Os processos de nitretação líquida e gasosa são mais adequados que a cementação quando se objetiva a diminuição das deformações em engrenagens, além de serem cerca de 30% mais econômicos;
- O processo de cementação, ao mesmo tempo em que apresenta a maior profundidade endurecida e a maior dureza superficial, apresenta também a maior deformação e o maior custo; e
- O processo de nitretação líquida, por outro lado, apresenta o menor custo e a menor deformação, porém a menor profundidade endurecida.

Agradecimentos

Os autores agradecem às empresas:

- ACE_Supertrat; pelos tratamentos térmicos e termoquímicos realizados e pela determinação dos perfis de dureza;
- Eacial, pelas medidas de controle dimensional; e
- Labteste, pelas análises químicas e metalográficas realizadas.

REFERÊNCIAS

- 1 COLPAERT, H.; SILVA, A. L. C. *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.
- 2 DAVIS, J. R. Nitriding. In: _____, (Ed.). *Surface hardening of steels: understanding the basics*. Materials Park: ASM International, 2002. p. 141-94.
- 3 KNERR, C. H.; ROSE, T. C.; FILKOWSKI, J. H. Gas nitriding In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Metals handbook*. 6. ed. Metals Park, 2004. v. 4. Heat treating, p. 387-409.
- 4 PYE, D. *Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing*. 2. ed. Materials Park: ASM International, 2005.
- 5 SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. *Aços e ligas especiais*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.
- 6 DUBAL, G. P. et al. Modern applications for salt bath heat treating of automotive components. In: INTERNATIONAL AUTOMOTIVE HEAT TREATING CONFERENCE, I., 1998, Puerto Vallarta, Mexico. *Proceedings...* Materials Park: ASM International, 1999. p. 90-95.
- 7 ChaNDLER, H. *Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels*. 2. ed. Materials Park: ASM International, 2000.
- 8 Gemaque, M. J. A. *Abordagem para solução de um problema metalúrgico na indústria: medição de engrenagens*. 2004. 132 p. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- 9 ALBAN, L. E. *Systematic analysis of gear failures*. 4. ed. Materials Park: ASM International, 1993.
- 10 SANTOS, C. E. Z. *Simulação termodinâmica dos processos de nitretação, nitrocarburação e carbonitretação gasosas*. 2003. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- 11 PARRISH, G. Core properties and case depth. In: PARRISH, G. *Carburizing: microstructures and properties*. Materials Park: ASM International, 1999. p. 135-70.
- 12 RAKHIT, A. K. *Heat treatment of gears: a practical guide for engineers*. Materials Park: ASM International, 2000.
- 13 DAVIS, J. R. *Gear: materials, properties, and manufacture*. Materials Park: ASM International, 2005.

Recebido em: 13/11/2011

Aprovado em: 19/08/2012