

EFEITOS DA CEMENTAÇÃO E DA NITRETAÇÃO NO CUSTO E NA QUALIDADE DE ENGRENAGENS PRODUZIDAS COM AÇOS 4140 E 8620¹

Claudio Leitão²
 Paulo Roberto Mei³
 Rodolfo Libardi⁴

Resumo

Este trabalho teve por objetivo a comparação entre os processos de nitretação e de cementação para engrenagens submetidas a tensões de contato abaixo de 1300 MPa. Foram 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 à nitretação líquida e gasosa e do aço ABNT 8620 submetida à 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 apresentou a maior profundidade endurecida e a maior dureza superficial, apresentou também a maior deformação e o maior custo. O processo de nitretação líquida, por outro lado, apresentou o menor custo e a menor deformação, porém a menor profundidade endurecida.

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

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

Abstract

This study compared 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 were analyzed. AISI 4140 gears quenched, tempered, liquid and gas nitriding and AISI 8620 gears after liquid carburizing, quenching and tempering were analyzed. The dimensional control of the gears was carried out before and after heat and thermochemical treatments. It was 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 presented the lowest cost, dimensional changes and case depth.

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

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² M. Sc., Diretor da SUPERTRAT, Santa Bárbara D'Oeste, SP, claudio@supertrat.com.br

³ Professor Titular do Depto de Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP, pmei@fem.unicamp.br

⁴ Professor Doutor da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, SP, rilibardi@unimep.br

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), este 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 são mínimas, pois o processo é realizado a baixas temperaturas (350°C 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, dentre outros.

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 MATERIAIS E MÉTODOS

As engrenagens foram fabricadas com aços ABNT 4140 e 8620 e submetidas a três tipos de tratamentos. Cada uma das 3 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.

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

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

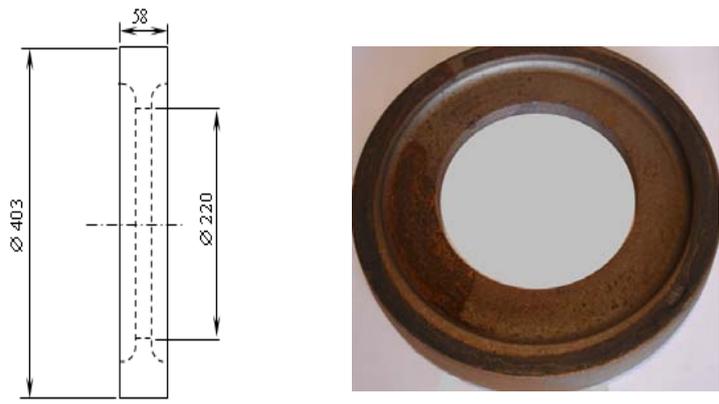
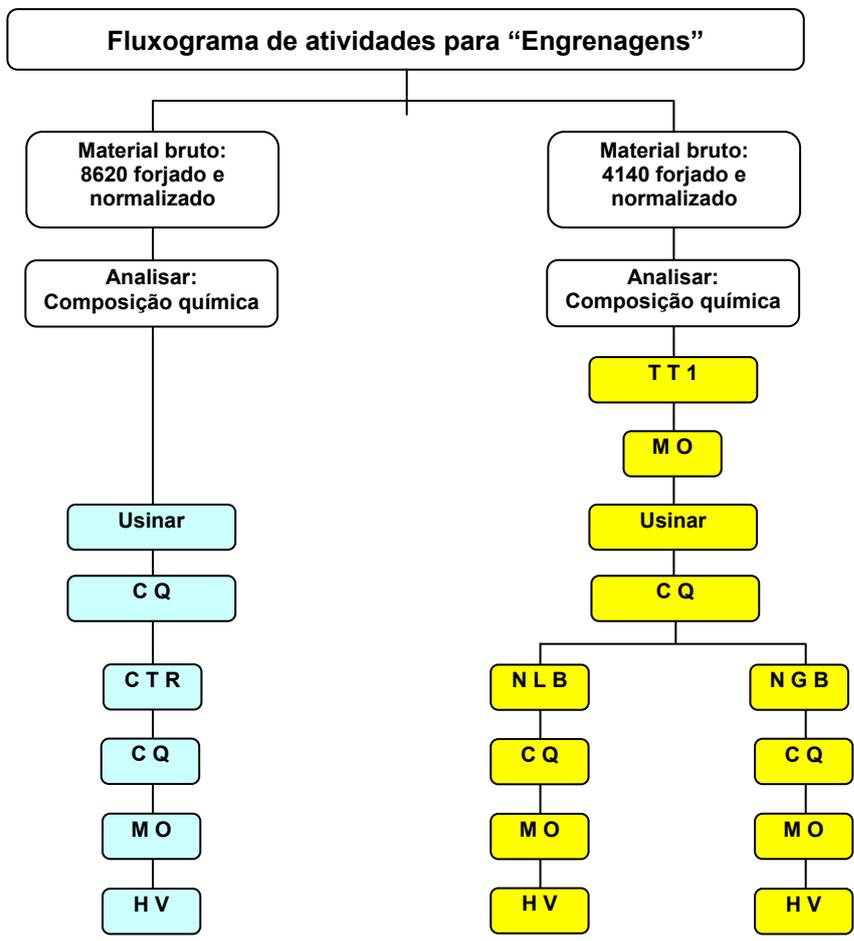


Figura 1. Dimensões do material forjado para confecção das engrenagens de aços 8620 e 4140, em milímetros.



- CTR:** Cementar, temperar e revenir.
- BNG:** Beneficiar, nitretação gasosa.
- BNL:** Beneficiar, nitretação líquida.
- MO:** Microscopia ótica.
- HV:** Dureza Vickers.
- CQ:** Controle de qualidade.

Figura 2. Fluxograma de atividades desenvolvidas.

2.1 Tratamentos Térmicos e Termoquímicos

2.1.1 Cementação, têmpera e revenimento (CTR)

A engrenagem de aço ABNT 8620 foi cementada em um forno tipo banho de sal, utilizando o sal Durferrit C-97, com potencial de carbono de 0,8%, seguida de resfriamento em banho de sal Durferrit AS140 a 180°C. O revenimento foi feito a 180°C 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 tipo banho de sal a 850°C e o resfriamento em banho de sal Durferrit AS-140 a 180°C.⁽⁶⁾ O revenimento foi feito a 600°C 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⁾

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

Tabela 2. Etapas do processo de nitretação gasosa

Etapas	Dissociação Amônia (%)	Pressão (torr)	Tempo (h)
Purgar	10	--	0,5
Aquecer ate 510°C	10	14,71	10
Nitretar a 510°C	20	14,71	30
Nitretar a 510°C	30	14,71	18
Ligar ventilador, resfriar até 90°C	5	14,71	10
Quando chegar a 90°C, retirar as peças	--	--	1
Total	--	--	69,5

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 Figura 3.

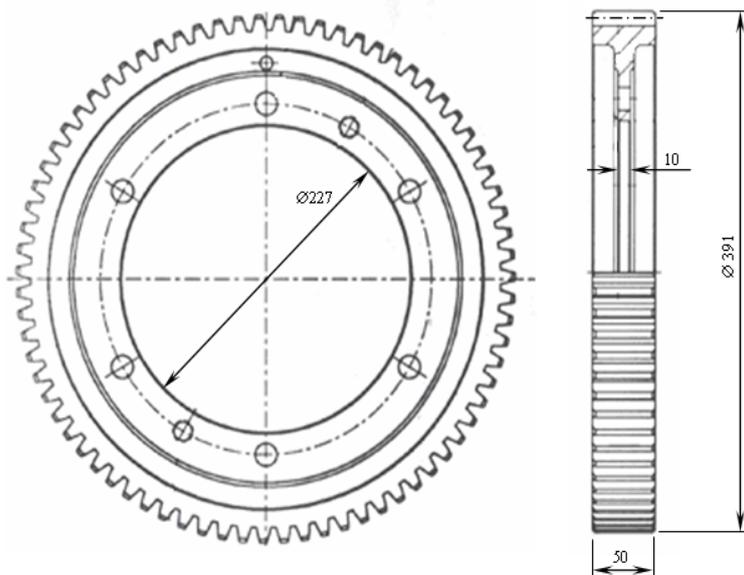


Figura 3. Dimensões das engrenagens: Número de dentes: 75, Módulo: 5,0, Largura do dente: 50mm e ângulo de pressão: 20°.

As engrenagens foram medidas e avaliadas conforme a norma DIN 3962 de 1978 (*tolerances for cylindrical gear teeth*),⁽⁸⁾ a qual 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 regiões mostradas na Figura 4.

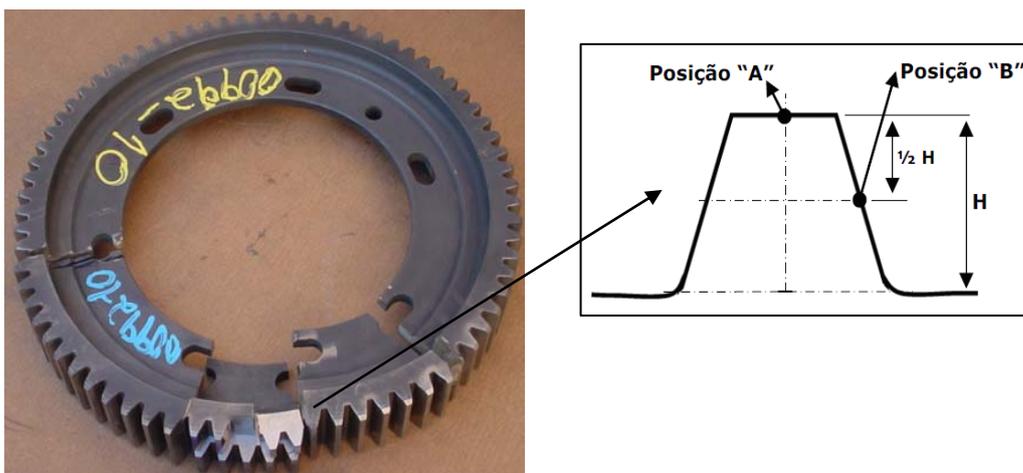


Figura 4. Fragmento da engrenagem utilizado para avaliações microestruturais da camada cementada e nitretada, perfil de dureza Vickers (posição "B") e de dureza externa (posição "A").⁽⁹⁾

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.

Tabela 3. Microestrutura e dureza após o beneficiamento de amostras de aço ABNT4140 antes da nitretação

Engrenagem	Microestrutura	Dureza do núcleo (HRC)
BNL	Martensita revenida	27 ±1
BNG	Martensita revenida	28 ±1

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 à nitretação líquida (BNL) e à nitretação gasosa (BNG). Observa-se que a engrenagem que passou pelo processo CTR obteve a pior qualidade (12). Em seguida a engrenagem que passou pelo processo BNG obteve qualidade 9 e por fim, a engrenagem que passou pelo processo BNL praticamente não deformou, pois apresentou a mesma qualidade (7).

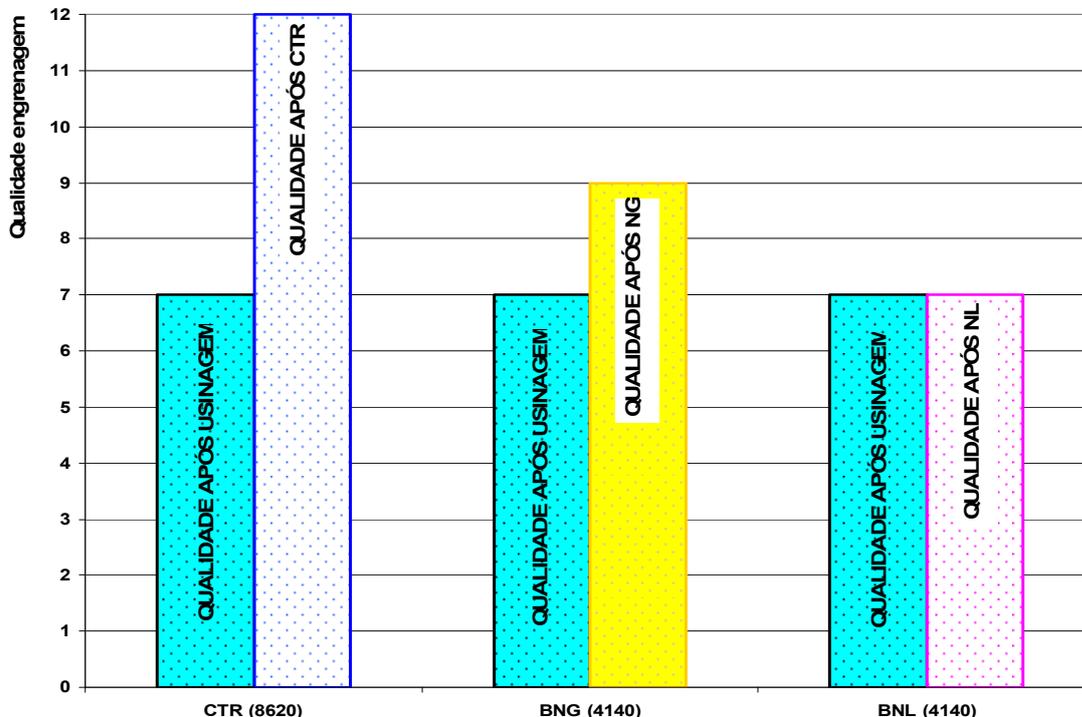


Figura 5. Qualidade de engrenagens antes e após os tratamentos termoquímicos efetuados.

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 na escala Vickers conforme determina a norma DIN 50190,⁽¹⁰⁾ encontrados ficaram em 0,50 mm para a nitretação gasosa e 0,25 mm para a nitretação líquida. No caso da engrenagem cementada foi encontrada uma camada efetiva de 1,10 mm, ou seja, a profundidade na qual se encontrou um valor de 513 HV (50HRC, camada efetiva segundo Parrish⁽¹¹⁾).

Tabela 4. Dureza das engrenagens nitretadas

		4140 BNG HV_{0,5}	4140 BNL HV_{0,5}	8620 CTR HV₁
Superfície		670	725	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

A cementação produziu 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 Vickers 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 µm -14 µm) quanto para a nitretação líquida (9 µm -18 µm) atendem os parâmetros da qualidade classe “B” (abaixo de 20 µm).

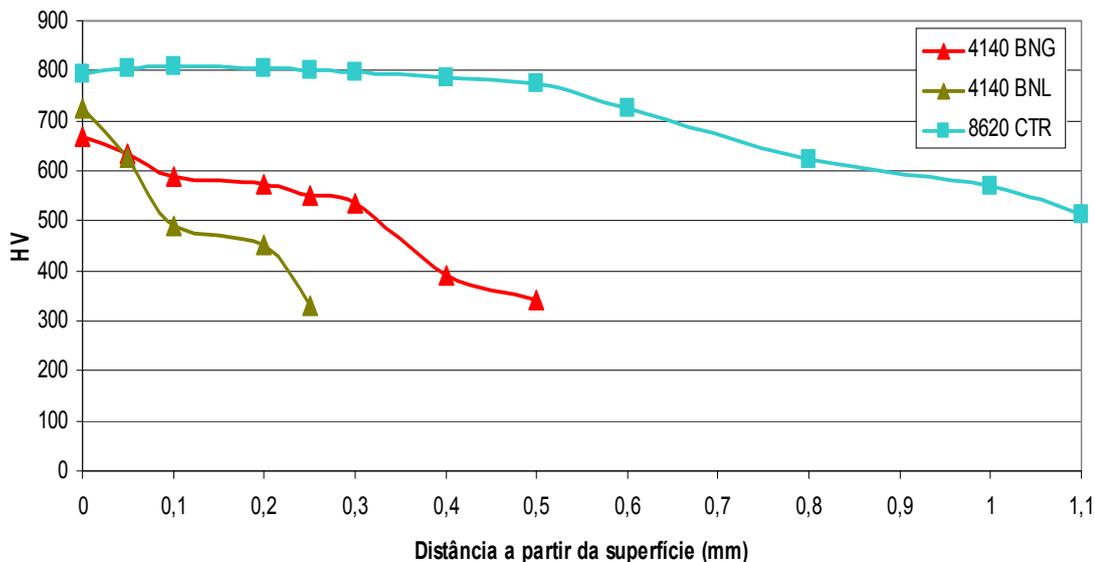


Figura 6. Perfil de dureza das engrenagens após a nitretação e a cementação.

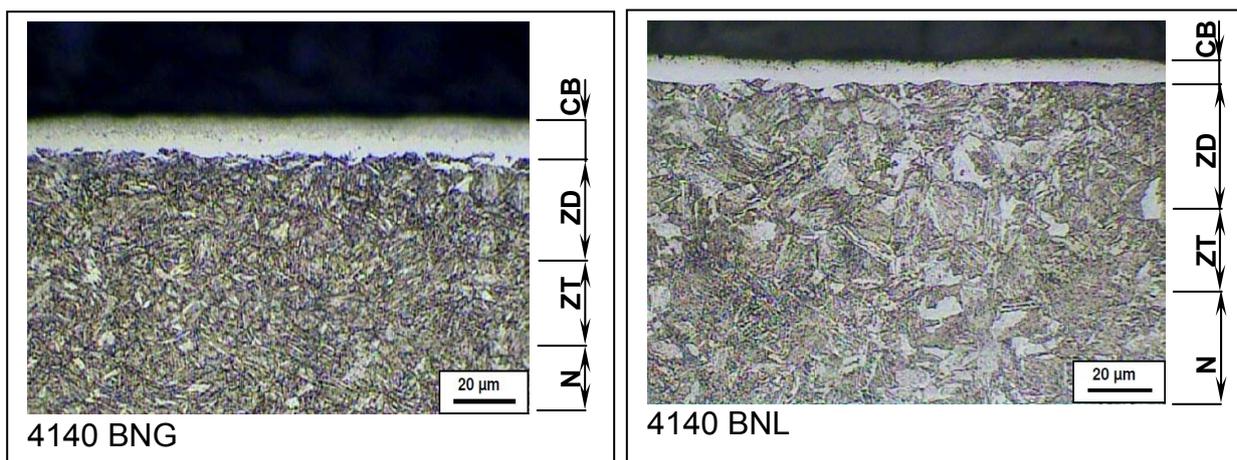


Figura 7. Microestruturas observadas nos processos de nitretação gasosa (BNG) e líquida (BNL). Ataque: nital 3%.

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

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 térmico e termoquímico utilizados. As Figuras 9, 10 e 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 ficou cerca de 40 % mais cara que a nitretada. Este custo foi calculado levando-se em conta os valores fornecidos pela empresa ACE-Supertrat para o mês de maio de 2010.

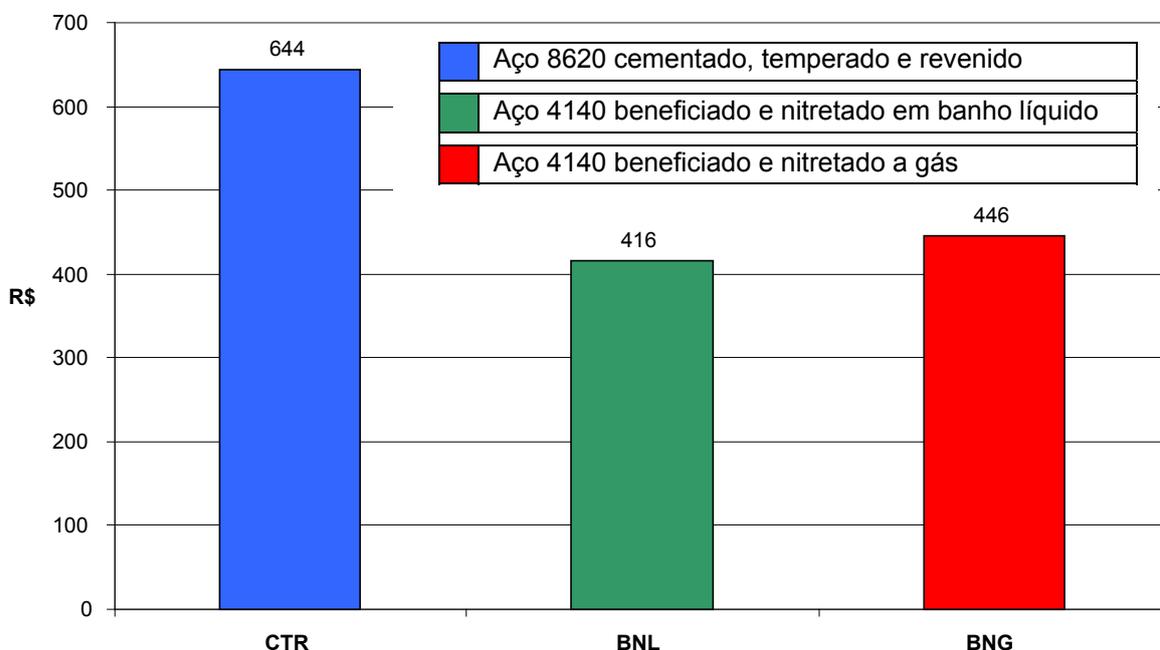


Figura 8. Comparação do custo total para a produção de engrenagem usando diferentes tratamentos térmicos e termoquímicos.

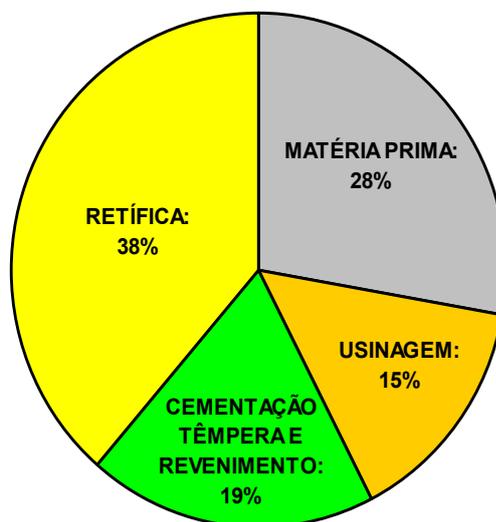


Figura 9. Distribuição de custos na fabricação da engrenagem de aço ABNT 8620 no processo CTR. Custo total de R\$ 644,00.

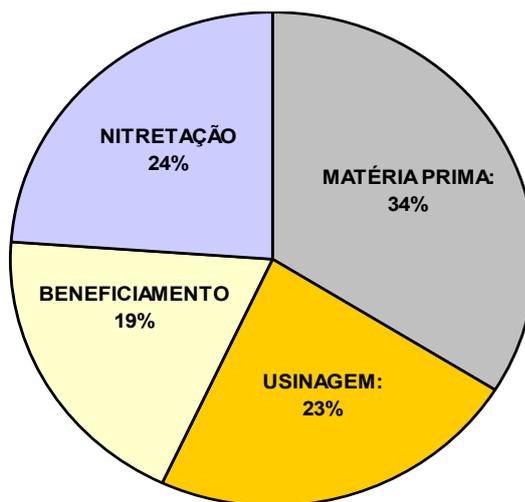


Figura 10. Distribuição de custos na fabricação da engrenagem de aço ABNT 4140 no processo BNL. Custo total de R\$ 416,00.

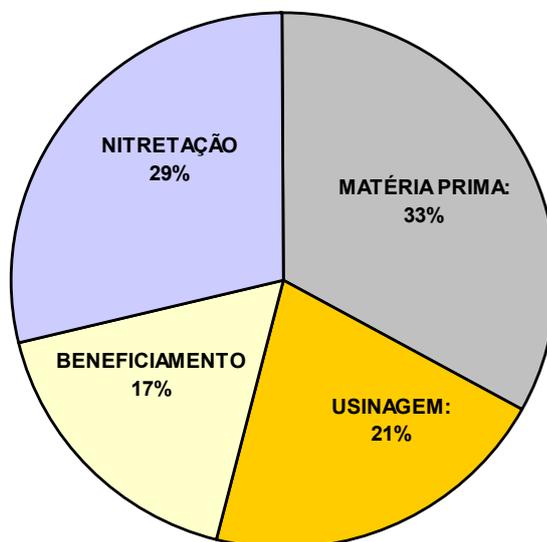


Figura 11. Distribuição de custos na fabricação da engrenagem de aço ABNT 4140 no processo BNG. Custo total de R\$ 446,00.

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

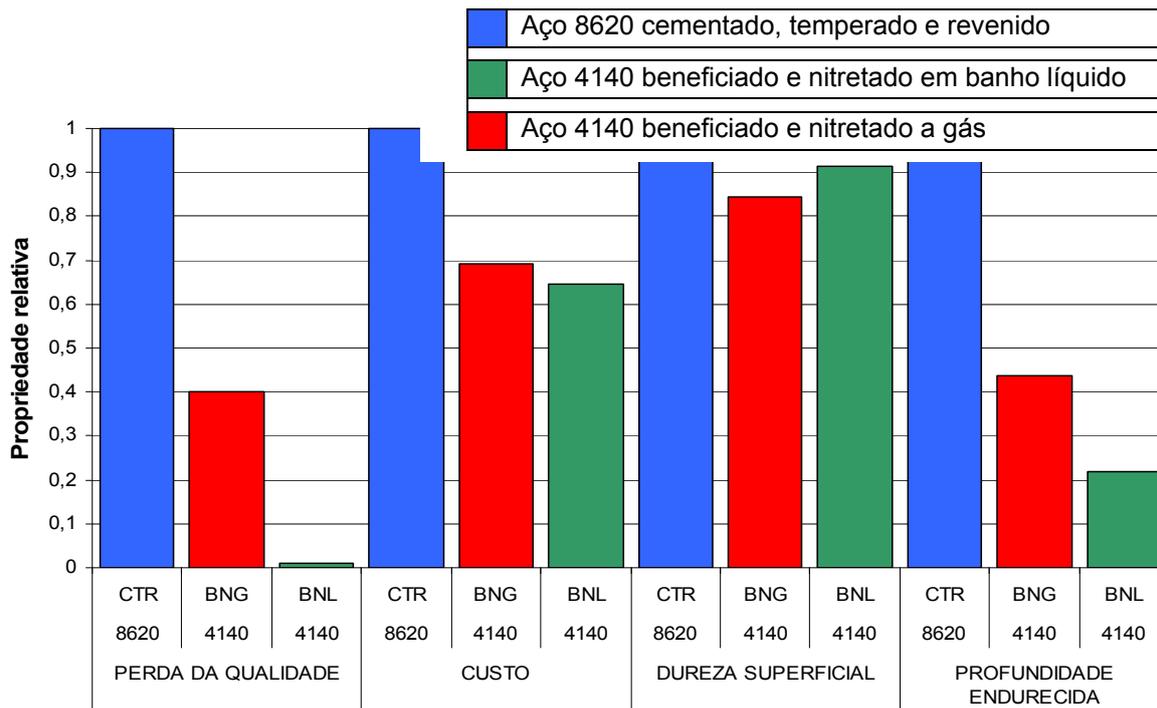


Figura 12. Resumo das propriedades relativas das engrenagens nas três condições de tratamento.

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 apresentou a maior profundidade endurecida e a maior dureza superficial, apresentou também a maior deformação e o maior custo; e
- o processo de nitretação líquida, por outro lado, apresentou o menor custo e a menor deformação, porém a menor profundidade endurecida.

Agradecimentos

À empresa ACE_Supertrat pelos tratamentos térmicos e termoquímicos realizados e pela determinação dos perfis de dureza.

À empresa EACIAL pelas medidas de controle dimensional.

À empresa LABTESTE pelas análises químicas e metalográficas realizadas.

REFERÊNCIAS

- 1 COLPAERT, H. e SILVA, A. L. C. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. São Paulo: Edgard Blücher, 2008, 672p.
- 2 DAVIS, J. R. Nitriding – In: Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics. USA. ASM International, 2002, cap. 6, p. 141-194.



- 3 KNERR, C. H.; ROSE, T. C.; FILKOWSKI, J. H. Gas Nitriding - In: ASM Handbook Vol. 4. Heat Treating. USA. ASM International. 6^a ed., 2004. p. 387-409.
- 4 PYE, D. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing. USA: ASM International. 2^a ed., 2005. 256 p.
- 5 SILVA, A. L. C e MEI, P. R. Aços e Ligas Especiais, São Paulo: Edgard Blücher, 3^a ed., 2010. 664 p.
- 6 DUBAL, G. P. et al. Modern Applications for SALT Bath Heat Treating of Automotive Components. In: The 1st International Automotive Heat Treating Conference. USA. ASM International, 1999, p. 90-95.
- 7 CHANDLER, H. Heat Treater's Guide – Practices and Procedures for Irons and Steels. USA: ASM International, 2^a ed., 2000, 903p.
- 8 GEMAQUE, M. J. A. Abordagem para Solução de um Problema Metrológico na Indústria: Medição de Engrenagens – 2004. 132p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina.
- 9 ALBAN, L. E. Systematic Analysis of Gear Failures. USA: ASM International. 4^a ed., 1993, 232p.
- 10 SANTOS, C. E. Z. Simulação termodinâmica dos processos de nitretação, nitrocarburação e carbonitretação gasosas. 2003. 120p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 11 PARRISH, G. Core Properties and Case Depth – In: USA. ASM International, 1999, cap. 6, p. 135-170.
- 12 RAKHIT, A. K. Heat treatment of gears, a practical guide for engineers, USA: ASM International, 2000, 209p.
- 13 DAVIS, J. R. Gear: Materials, Properties, and Manufacture, USA: ASM International, 2005. 339p.