

DESENVOLVIMENTO DO TRATAMENTO TERMOQUIMICO DE NITRETAÇÃO
APLICADO EM ENGRENAGENS

Antonio Fernando C. Cardoso (1)

Jair Pasquini (2)

Thales M. Watanabe (3)

RESUMO

As crescentes exigências dos consumidores por produtos com melhores qualidades e custos menores, tornam o mercado altamente competitivo, obrigando as indústrias a buscarem incessantemente a redução dos seus custos industriais. Procurou-se desenvolver um processo de endurecimento superficial que substituísse com vantagens o processo de cementação convencional amplamente aplicado em engrenagens automotivas.

O presente trabalho apresenta os resultados práticos de um estudo de viabilidade da aplicação do processo de nitretação líquida em engrenagens veiculares submetidas a baixas e médias tensões de trabalho, comparando-os com modelos matemáticos.

SUMMARY

The growing demands of consumers for goods with better qualities at lower costs, make the market very competitive, imposing to the industries an incessant seeking for their industrial costs reduction. One tried to develop a superficial hardening process that would take with advantage, the place of conventional carburizing process widely applied to automotive gearing.

The present work presents the practical results of a viability study of liquid carburizing process application to automotive gearing exposed to low and medium working stresses, confronting them to mathematical models.

-
- (1) Engenheiro Metalurgista, Departamento de Engenharia - ENGESA.
 - (2) Engenheiro de Projetos, transmissões, Departamento de Engenharia - ENGESA.
 - (3) Engenheiro Metalurgista, Coordenador de Desenvolvimento Tecnológico, Departamento de Engenharia - ENGESA.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de nitretação em engrenagens é ainda hoje pouco explorada e divulgada.

Dos processos disponíveis no mercado o de nitretação em banho de sal apresenta como vantagens o baixo custo relativo, a desprezível distorção dimensional, a simplicidade de controle de processo e a curta duração de tratamento. A maior desvantagem é a limitação da profundidade da camada endurecida, tornando-a uma opção intermediária entre o tratamento de têmpera e revenimento (beneficiamento) e a cementação, em termos de desempenho. A aplicação correta desse tratamento, associada a seleção de material e cálculo de esforços, permite grandes reduções de tamanho em conjuntos de engrenagens beneficiados e reduções de custos em conjuntos cementados superdimensionados pelo lay-out. O processo de nitretação a gás de ciclo curto apresenta engrenagens com menor desempenho que o banho de sal. O de ciclo longo apresenta maior custo e tempo de tratamento, apesar de atingir camadas endurecidas mais profundas.

Este artigo descreve o desenvolvimento realizado, para compreensão e aplicação do tratamento de nitretação em banho de sal, orientando especificamente ao conjunto de engrenagens da caixa de transferência de um de nossos veículos.

2. DEFINIÇÕES

Núcleo:- região no interior da peça, fora da camada nitretada, situada a uma distância aproximada da superfície de três vezes a profundidade efetiva de nitretação.

Camada branca ou de ligação:- camada superficial marcadamente diferenciada da camada de difusão pela diferente composição estrutural resultante do alto teor relativo de nitrogênio formando nitretos e carbonitretos de mais variados tipos.

Camada de difusão:- camada situada abaixo da camada branca, considerada até a profundidade na qual ainda existe aumento significativo do teor de nitrogênio em comparação com a composição química original do material.

Camada nitretada:- camada formada pela camada branca mais a camada de difusão

Profundidade efetiva de nitretação:- distância vertical medida a partir da superfície da peça, em seção resultante do corte normal da mesma, até o ponto no qual a dureza é igual a um valor limite apropriadamente estipulado, conforme DIN 50190 parte 3 ou conforme especificação do projetista.

3. SELEÇÃO DO MATERIAL

Para a escolha do aço foram considerados vários critérios a seguir:

Temperalidade:- o tratamento de nitretação em banho de sal é aplicado a temperatura de aproximadamente 570°C . Portanto, a mínima temperatura de revenimento a ser aplicada ao aço para garantia da manutenção das propriedades mecânicas é 570°C . Com isso a temperabilidade do aço selecionado deve garantir dureza de núcleo de dente, após revenimento, compatível com o cálculo mecânico prévio. Um aço de boa temperabilidade garante uma homogeneidade estrutural da superfície até o núcleo do dente.

Composição química:- os elementos químicos de boa aptidão a formação de nitretos são Al, Cr, Va, W, Mo. Dentre esses elementos os de presença mais frequente como liga entre os aços de construção mecânica são Cr e Mo. A presença de Al ocorre como agente desoxidante durante o processo de aciaria.

Custo e disponibilidade:- o aço selecionado deve ser de boa disponibilidade no mercado, em revendedores e ou forjaria, para aquisição em pequenos lotes, compatíveis com a escala de produção do veículo.

Resistência mecânica:- o aço selecionado deve ter, após o tratamento térmico e antes da nitretação, as propriedades mecânicas compatíveis com as obtidas no cálculo mecânico.

Como o aço SAE 4140 atende a esses requisitos, o desenvolvimento selecionou corpos de prova e engrenagens nesse material.

4. NITRETAÇÃO

Os corpos de prova em SAE 4140 (diâmetro 20 x comprimento 60mm) foram ensaiados para determinar as propriedades física, química e metalográfica, submetidos em tratamento de nitretação em banho de sal.

Os resultados médios dos testes de dureza, profundidade de camada de ligação e difusão conforme a norma DIN 50190 parte 3, porosidade e fotomicrografias para vários tempos de tratamento são mostrados na tabela 1.

TABELA 1 - Propriedades dos corpos de prova para diferentes tempos de tratamento

TEMPO	Nº DO LOTE	DUREZA SUPERF. (HVO,2)	DUREZA NÚCLEO (HV5)	CAMADA LIGAÇÃO (mm)	CAMADA DIFUSÃO (mm)	POROSIDADE %
25	1	593	318	0,0005	0,15	20
45	2	593	318	0,0007	0,25	30
60	3	549	318	0,0009	0,25	30
90	4	549	296	0,0013	0,30	30
120	5	644	318	0,0015	0,25	30
180	6	644	318	0,0018	0,25	20

Em função dos resultados obtidos e dos parâmetros próprios da empresa, foi adotado para as engrenagens a seguinte especificação:

- a) blank forjado normalizado;
- b) beneficiamento: têmpera e revenimento para dureza de 28 a 32 Rockwell C na superfície e temperatura de revenimento de 570°C mínima;
- c) nitretação em banho de sal:
 - profundidade da camada de difusão conf DIN 50190, parte 3 Nht HV0,5= 0,25 mm mínima;
 - profundidade da camada de ligação 10 a 15 um;
- d) porosidade máxima de 30%
- e) resfriamento em água (80°C) ou ar;
- f) dureza mínima perpendicular a superfície 500 HV0,2.

Considerações importantes:

- 1) Variação da composição química dentro dos limites permitidos por norma, tomando-se diferentes matérias primas para confecção dos corpos de prova. Não foi notada evidência prática de variação considerável de camada (difusão ou ligação) em diferentes composições químicas e nem qualquer correlação fixa entre diferenças de profundidade e composição química.
- 2) Inclusões:- o fenômeno em estudo é superficial (ou subsuperficial) de forma que o nível (e o tipo) de inclusões é de grande importância no desempenho final do componente, uma vez que as inclusões podem ser nucleadoras de outros defeitos. A classificação de inclusões segundo a norma SAE J422, da matéria prima dos corpos de prova e das engrenagens enquadrada-se dentro dos padrões normais de produção (aciaria) e mercado, não sendo notada qualquer anormalidade que invalidasse os testes.

5. TESTES EM CADEIA CINEMÁTICA ENERGIZADA

Os sistemas de dinamômetro de absorção e a cadeia cinemática energizada são métodos de determinação de parâmetros de durabilidade de caixas de transmissão e ou seus componentes, de veículos rodoviários automotores e tratores, na análise comparativa de materiais, processos, projeto e na avaliação da qualidade de produção.

A cadeia cinemática energizada utiliza o circuito fechado de momento de força para o qual a caixa de transferência a ensaiar tenha sido projetada ou especificada, conforme Figura 1.

A execução dos ensaios foi dividida em 03 etapas a saber:

- 1) amaciamento:- operação do sistema submetido a 10% do momento máximo de força numa velocidade angular compatível a esse momento do motor que trabalha com a caixa, durante cerca de 15 minutos.
- 2) operação:- aplicação do sistema do momento de força para o qual a caixa de transferência foi projetada, mantendo a temperatura do óleo lubrificante a um valor compatível com o seu uso;
 - . O momento de força aplicado: 55 e 30 Kgfm equivalentes aos torques de 1ª marcha e de maior duração respectivamente.
 - . Temperatura de operação: 80 a 90°C.
 - . rotação de 390 rpm compatível com a velocidade de operação do veículo;
- 3) avaliação:- foram programadas paradas periódicas com tempos de 15, 20, 25 e 30 horas (que é o limite de projeto) e após operação contínua até ruptura do dente. Acompanhamento visual de surgimento de pittings ou spalling. A aplicação de líquido penetrante estava condicionada ao nível de desgaste do dente.

Nesse teste não havia nenhum requisito mínimo devido sua finalidade ser comparativa, no sentido de se obter informações básicas de projeto.

Para avaliação e comparação de vida das engrenagens, a análise de Weibull é usualmente feita para determinar os níveis B10 e B50 em um mínimo de 03 engrenagens conjugadas para uma análise estatística adequada.

6. MODELO DE CÁLCULOS

A AGMA 211.02 tem o propósito de calcular as tensões de contato de engrenagens helicoidais e bihelicoidais através de uma fórmula fundamental, como todos os fatores que afetam a resistência dos dentes ao pitting. Apresenta também um gráfico com as profundidades efetivas da camada na linha primitiva, para engrenagens cementadas. Entretanto, as camadas desse gráfico são um tanto arbitrárias e não relatam requisitos de aplicações específicas. A capacidade de engrenagens endurecidas de resistir as tensões superficiais e subsuperficiais que produzem pitting e spalling é razoavelmente definida pela dureza do material do dente. Entretanto, para engrenagens endurecidas superficialmente, a dureza e a profundidade da camada, a dureza do núcleo e as tensões residuais contribuem para que a engrenagem resista ao pitting e spalling e a possibilidade de quebra do dente devido a trincas superficiais.

A seleção do material e do método de endurecimento requer análise mais sofisticada do que a expressa na AGMA 211.02, particularmente quando a dureza do núcleo e a profundidade da camada devem ser em alguns casos, analiticamente avaliados, para adaptar a condições particulares de serviço.

Através da análise de tensões subsuperficiais é possível avaliar as limitações de endurecimento pouco profundos tais como a nitretação.

A equação do Hertz é usada para determinar as tensões principais aplicadas em algum ponto abaixo da superfície do dente de engrenagem. Comparando a tensão admissível com a tensão aplicada (calculada), resulta um fator de segurança em alguma profundidade abaixo da superfície do dente da engrenagem. O fator de segurança mínimo pode entretanto ser encontrado aplicando esses cálculos para diferentes profundidades.

A tensão admissível em uma dada profundidade pode ser encontrada pela dureza e as tensões residuais naquele ponto.

Um critério para determinação da resistência do material a tensões de cisalhamento subsuperficiais foi proposto por V.K Sharma e pode ser resumido e adaptado da seguinte forma:

- a) o limite de resistência (LR) de um aço de construção mecânica é dado pela relação aproximada de 0,35 vezes a dureza Brinell, em unidade de Kgf/mm²;
- b) a relação entre o limite de resistência e a resistência a fadiga para 10⁶ ciclos para corpos de prova cilíndricos testados em flexão reversa segundo Lipson, é 2;
- c) a relação entre a fadiga de flexão e torção, assumida igual a 2 está em concordância com as teorias de resistência (cisalhamento máximo e energia de distorção) para uma ampla variedade de materiais.

Portanto, a relação para a resistência a fadiga a torção pode ser expressa da seguinte forma:

$$\tau_f = 0,35 \times (HB) \times 0,50 \times 0,50 = LR \times 0,25 = \tau_f$$

A relação de Lipson deve no entanto, ser corrigida pois foi levantada para corpos de prova sem entalhe, polidos, com diâmetro de 7,62 mm, em flexão reversa e para classe de aços estruturais com microestrutura livre de tensões.

- 1) fator de tamanho = 0,85. O limite de fadiga tende a diminuir com o aumento de volume do material altamente tensionado.
- 2) fator microestrutural = 0,80 devido o gradiente de tensões geradas pelo endurecimento superficial na zona de transição. Considerando os fatores de tamanho e microestrutural a relação anterior será:

$$\tau_f = 0,17 \times LR$$

- 3) fator de concentração de tensões: na presença de concentradores de tensões, a tensão média diminui a amplitude da tensão oscilante.

7. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A tensão de cisalhamento calculada no projeto não considerou possíveis erros de perfil, desalinhamento, e distribuição de carga nos dentes. De acordo com essas imprecisões o gradiente de tensão de cisalhamento deve ser convertido numa tensão crítica através da multiplicação por um fator de projeto K_s , sendo então a mínima resistência requerida para resistir a fadiga subsuperficial.

Não é possível assumir um valor exato para K_s devido a variação das imprecisões, porém nossa experiência indica que um valor de 1,2 a 1,3 seria adequado.

A avaliação desse critério para determinação dos requisitos da profundidade da camada endurecida de engrenagens nitretadas foi confirmada através da execução de testes em cadeia cinemática energizada. Várias engrenagens foram nitretadas conforme especificação e testadas sob torque constante em duas condições de carregamento, conforme mostradas na figura 2 (anexo).

As curvas C1 e C2 são curvas de tensões de cisalhamento aplicadas no dente. A curva C1 corresponde a condições de máximo torque de curta duração e a C2 à condição de torque de longa duração. Não é objeto deste trabalho discutir os conceitos teóricos utilizados para o cálculo das tensões aplicadas sobre os dentes.

A curva R1 representa as condições de resistência do material em cada ponto abaixo da superfície do dente.

Observe que a curva C1 apresenta regiões onde a tensão aplicada ultrapassa a resistência do material, sendo previsível a ocorrência de spalling em tais condições.

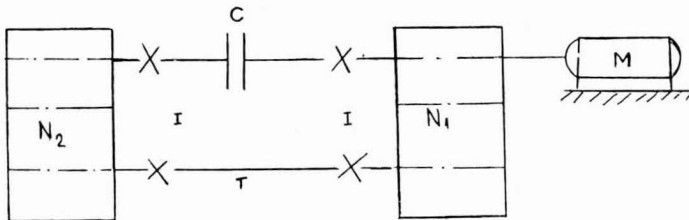
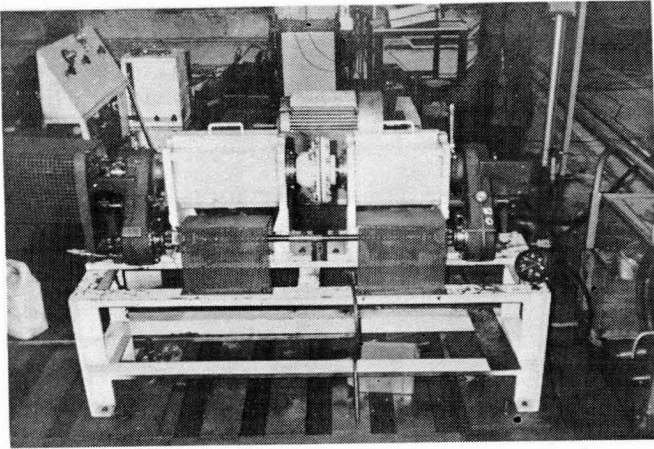
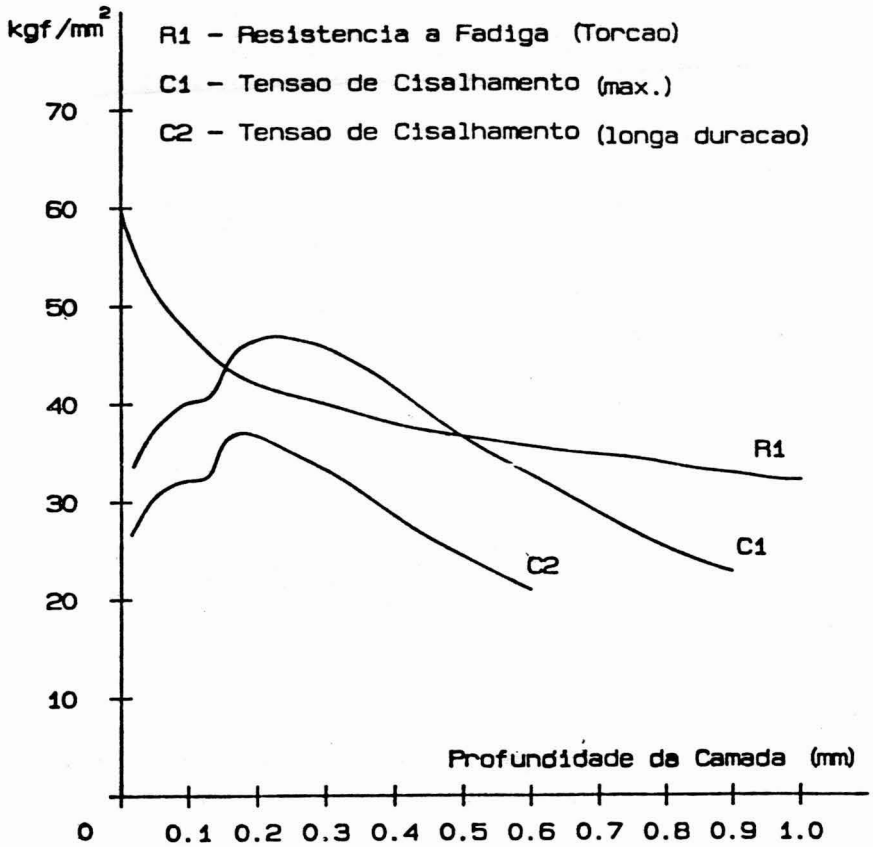


FIG.1 - Esquema básico do sistema de cadeia cinemática energizada.

- M - Motor de acionamento
- N₁ - Caixa de transferência principal
- N₂ - Caixa de transferência auxiliar
- C - Dispositivo de aplicação de carga ao sistema
- T - Barra de torção
- I - Instrumentos de controle



Prof.	Superf	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	Nucleo
Dureza (HV0.5)	545	468	441	418	400	364	340	300
R1	60	51.5	48.5	46	44	40	37.5	32.5

FIG. 2 - Tensões de cisalhamento e resistência a fadiga (torção) das engrenagens.