

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

OTIMIZAÇÃO DE MATERIAL E DE TRATAMENTO TÉRMICO NO
DESENVOLVIMENTO DE UM COMPONENTE AUTOMOTIVO

Ivan Marcelo Bruinsma Kirchner

Dissertação para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2014

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

OTIMIZAÇÃO DE MATERIAL E DE TRATAMENTO TÉRMICO NO
DESENVOLVIMENTO DE UM COMPONENTE AUTOMOTIVO

IVAN MARCELO BRUINSMA KIRCHNER
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2014

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker, PPGE3M/UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Afonso Reguly, DEMET/UFRGS

Prof. Dr. Mario Wolfart, IFRS

Dr. Tiago Silva, DEMET/UFRGS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação a minha esposa
Adriani que me incentivou desde o início deste
trabalho e aos meus filhos: Eduardo, Elisa e
Arthur.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Telmo pelas sugestões técnicas, revisões e incentivo.

Aos colegas da DHB Componentes Automotivos, principalmente ao Alexandre Condotta e Fernando Katz por confiar e defender este trabalho.

A minha irmã Rosane pelo incentivo.

Aos colegas André Brusius e Alexandre Schneider pelas revisões e sugestões.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XI
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Funcionamento do sistema de direção.....	6
3.2. Torque de quebra do pinhão – Pinion breaking torque.....	7
3.3. Pinhão – Fusível do sistema de direção.....	8
3.4. Projeto mecânico dos componentes e montagem.....	10
3.5. Tratamento térmico.....	11
3.5.1. Têmpera.....	11
3.5.2. Cementação.....	12
3.5.3. Revenido.....	14
3.5.3.1. Curvas temperatura x dureza do revenido.....	15
3.5.3.2. Fragilidade do revenido.....	16
3.5.4. Aços de maior tenacidade.....	17
3.6. Análise teórica do comportamento em fadiga.....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4.1. Materiais e método de fabricação.....	20
4.2. Métodos e procedimentos de ensaio.....	21
4.2.1. Teste “Torque de quebra do pinhão”.....	21
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO.....	25
5.1. Aços com têmpera direta.....	25

5.2.1.	Aços SAE 5140 temperado por indução.....	25
5.2.2.	Aços SAE 8640 e SAE 4340 temperados por indução.....	28
5.2.	Aço SAE 5120 cementado.....	30
5.2.1.	SAE 5120 cementado com revenido em diferentes temperaturas...	30
5.2.2	Resultados dos testes com pinhão de SAE 5120 cementado.....	32
5.3.	Aumento da região dúctil do pinhão.....	35
5.3.1.	Camada cementada menor.....	36
5.4.	Material de alta tenacidade.....	41
5.4.1.	Aumento da tenacidade da engrenagem.....	41
5.4.2.	Resultados dos testes com pinhão de SAE 4320 cementado	41
5.5.	Resumo dos resultados.....	44
5.6.	Análise do comportamento em fadiga.....	45
5.7.	Análise quantitativa de processo.....	46
6.	CONCLUSÕES.....	47
7.	PROPOSTA PARA PRÓXIMO TRABALHO.....	48
8.	REFERÊNCIAS.....	50

LISTA DE FIGURAS

3.1	Movimentação do volante/coluna/mecanismo/roda.....	6
3.2	Par engrenado: pinhão e cremalheira.....	7
3.3	Base do dente da cremalheira.....	9
3.4	Base do dente do pinhão.....	9
3.5	Curva dureza versus temperatura e revenido do aço SAE 4320, 4320H....	15
3.6	Curva dureza versus temperatura e revenido do aço SAE 5120, 5120H.....	15
3.7	Influência da temperatura de revenimento sobre a tenacidade dos aços.....	16
3.8	Influência do teor de níquel nos aços sujeitos a fadiga ao impacto.....	18
3.9	Influência do teor de níquel nos aços sujeitos a fadiga ao dobramento.....	18
4.1	Representação esquemática do teste.....	22
4.2	Bancada de teste de Torque de quebra do pinhão.....	23
5.1	Perfil de dureza medida no pé do dente do pinhão SAE 5140 temperado por indução.....	26
5.2	Representação do plano de fratura do pinhão.....	26
5.3	Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão de SAE 5140 temperado por indução.....	27
5.4	Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão de SAE 8640 temperado por indução.....	29
5.5	Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão de SAE 4340 temperado por indução.....	29
5.6	Perfil de dureza de uma amostra com dureza de núcleo de 38 HRC (372 HV) revenido 230°C e dureza de núcleo de 36 HRC (354 HV) revenido 400°C.....	31
5.7	Imagem do pinhão de aço SAE 5120 cementado com camada 0,75mm rompido no teste.....	32
5.8	Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão cementado de aço SAE 5120 com camada 0,75mm, dureza de núcleo de 38 HRC (372 HV) e temperatura de revenido 230°C.....	33

5.9	Curva de carga de reação na cremalheira e de torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão cementado de aço SAE 5120 com camada 0,75mm, dureza de núcleo de 36 HRC (354 HV) e temperatura de revenido 400°C.....	34
5.10	Imagem do pinhão cementado com 0,75mm de camada e dureza de núcleo 38 HRC (372 HV), após ter rodado teste com carga na cremalheira de 22,5 kN e torque de 190 Nm.....	35
5.11	Perfil de dureza de uma amostra de aço SAE 5120 cementado com camada 0,45 mm.....	37
5.12	A macroestrutura do pinhão de aço SAE 5120 cementado, com camada de 0,45mm.....	37
5.13	A microestrutura da camada cementada do aço SAE 5120.....	38
5.14	Pinhão de aço SAE 5120 com camada de 0,45mm fraturado no teste de torção.....	38
5.15	Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão de aço SAE 5120 cementado com camada 0,45 mm, que rompeu com 27,5 kN de carga e torque aproximado de 230 Nm.....	39
5.16	Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo, para o teste do pinhão aço SAE 5120 cementado com camada 0,45 mm, que rompeu com 28,25 kN de carga e torque aproximado de 240 Nm.....	40
5.17	Perfil de dureza do aço SAE 4320 com camada cementada de 0,45 mm e revenido em 400°C.....	42
5.18	Imagem do pinhão de aço SAE 4320 cementado com 0,45 mm de camada, após ter rodado com carga de 30 kN e 250 Nm.....	43
5.19	A microestrutura da camada de cementada do aço SAE 4320.....	43
5.20	Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão do aço SAE 4320 e revenido em 400°C.....	44

LISTA DE TABELAS

4.1 Aços e tratamentos térmicos utilizados para os pinhões.....	20
5.1 Análise química do aço SAE 5140.....	25
5.2 Análise química do aço SAE 5120.....	30
5.3 Análise química do aço SAE 4320.....	42
5.4 Resumo do resultado dos testes.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS

Ferro γ - Ferro com estrutura cristalina cúbica de face centrada;
Ferro α - Ferro com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado;
CFC – Estrutura cristalina cúbica de face centrada;
CCC - Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado;
T - Torque na engrenagem;
r - Raio primitivo da engrenagem;
 σ - Tensão trativa ou compressiva no pé do dente;
b - Largura de engrenamento;
m - Módulo do dente;
 α – Ângulo de pressão;
x – Correção do dente;
Q - é a carga longitudinal sobre a cremalheira;
Dp – diâmetro primitivo;
Yf - Fator de forma;
Ye - Fator de recobrimento;
Y β - Fator de ângulo de hélice;
Ys - Fator de concentração de tensão
HRC – Dureza Rockwell Classe C;
HV – Dureza Vickers;

RESUMO

Os aspectos relacionados com a segurança dos usuários de veículos automotores são primordiais na indústria automobilística. Por isto, os testes de validação dos componentes de um sistema de direção estão sendo alterados para condições mais severas que garantam sua funcionalidade em condições críticas, tais como: colisões e uso inadequado. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é aumentar a capacidade de carga torcional do fusível do sistema de direção que é o pinhão através da otimização de materiais e tratamentos térmicos. As melhorias devem ser confirmadas através do teste “torque de quebra do pinhão”, requisito que é mandatório para liberação do produto no mercado e confirma sua capacidade de suportar condições severas de utilização. Foram experimentados tratamentos térmicos como têmpera por indução, cementação, assim como, diferentes camadas cementadas e temperaturas de revenido, além de aços das famílias SAE 51XX, SAE 43XX e SAE 86XX. Foi verificado que pinhões de aço SAE 4320, cementado com camadas próximas de 0,4mm, apresentaram os melhores resultados.

ABSTRACT

The aspects related to security for a steering system are priority. Therefore, the validation of these systems and its components are being changed to be stricter to ensure its functionality in critical condition, such as: collisions and inappropriate use. In this context, the goal is to increase the torsional load capacity of the steering system fuse that is the pinion, thru optimizing of materials and heat treatments. Improvements should be confirmed by testing on pinion breaking torque test, which is a mandatory requirement to release the product on the market and confirmed its ability to withstand stricter conditions of use. Different variables such as induction hardening, carburizing, different thickness of case hardened, temper temperature and steels families: SAE 51XX, SAE 43XX and SAE 86XX were tested. It was found that the pinions of steel SAE 4320 with carburized case around 0.4mm had the best performance and reached the test requirement.

1. INTRODUÇÃO

Os fabricantes desenvolveram os equipamentos, estabeleceram normas e testaram automóveis com relação ao desempenho na manutenção das vidas em seu interior. Os testes criados com este propósito dividem os veículos em duas classes; aprovados ou reprovados. Pode-se imaginar o impacto em uma montadora que investiu pesado em um determinado modelo e não conseguiu a aprovação, por exemplo: no “crash test”. O resultado disto é um contínuo aprimoramento das técnicas de simulação e validação do carro e de seus sistemas para assegurar o sucesso na homologação.

No ciclo evolutivo dos procedimentos e dos requisitos para os testes de impacto dos veículos, os carros devem não só proteger os ocupantes, mas também manter funcionais seus sistemas principais, tais como: sistema de direção e freio. Por isto, os testes de validação dos componentes destes sistemas foram alterados para requisitos mais severos, que garantam sua funcionalidade em condições críticas, tais como colisões e uso inadequado. Para tanto, o sistema de direção, objeto de análise deste trabalho, deve ser capaz de absorver energia de impacto nas rodas do carro e se manter funcional, permitindo ao motorista controle sobre o veículo mesmo após determinados acidentes. O “Teste de quebra do pinhão” é um requisito estabelecido pela indústria automobilística que determina o mínimo desempenho admissível para os componentes da direção. Além disto, os fabricantes determinam algumas características que não podem ser alteradas baseadas no projeto do veículo. No sistema de direção deste trabalho, as dimensões dos componentes e conjunto não poderiam ser alteradas para aumentar a robustez. Com estas premissas definidas, a indústria deve se desenvolver-se em tecnologia para encontrar soluções com materiais e tratamentos térmicos para atender as exigências.

Não obstante, a evolução dos sistemas deve ocorrer mantendo ou melhorando os níveis de competitividade comercial do modelo no mercado. Neste cenário, a solução para o sistema de direção está na aplicação de tecnologia capaz de aperfeiçoar o desempenho dos materiais, selecionando processos adequados e mantendo-os estáveis para o contínuo atendimento aos requisitos. Alinhando desta forma os objetivos comerciais e técnicos e criando a sustentabilidade para a evolução tecnológica do produto. Este trabalho foi realizado na DHB Componentes Automotivos.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é aumentar a capacidade de carga torcional do fusível do sistema de direção que é o pinhão através da otimização de materiais e tratamentos térmicos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O efeito característico dos materiais em aplicação mecânica de romperem com tensões cíclicas inferiores às suas tensões de ruptura foi percebido e começou a ser estudado por volta de 1830 por Albert. Ele verificou que eixos de vagões ferroviários podiam romper de forma aparentemente frágil após um pequeno período de serviço, mesmo sendo fabricados com materiais dúcteis. Desde então, inúmeros pesquisadores têm estudado o fenômeno que recebeu o nome fadiga pelo pesquisador Poncelet, em 1839 (NORTON 2004).

As falhas por fadiga provocaram acidentes memoráveis e de grande repercussão, como o caso dos dois aviões Comet em 1954. Nestes acidentes, pequenas trincas com comprimentos inferiores a 1,78mm em cantos de janelas de formato aproximadamente quadrangular, levaram ao colapso da estrutura de dois aviões de transporte comercial de passageiros. Nos dois casos, a falha foi de projeto, pois não foi considerado o efeito de concentração de tensão nos cantos das janelas, que eram submetidas a tensões alternadas pela pressurização e despressurização da fuselagem (NORTON 2004).

As consequências trágicas das falhas relatadas influenciaram fortemente os projetos subsequentes. A preocupação com os fatores que possam contribuir para as falhas por fadiga durante a execução de desenhos de peças, conjuntos e processos de fabricação tornou mandatória as revisões com ênfase em fadiga para produtos que acarretem riscos para vidas.

Os cálculos de fadiga são utilizados como uma estimativa do comportamento das peças. Em experimentos onde se tem sob controle diversos fatores que influenciam o

desempenho, tais como: temperatura, qualidade superficial, forma do corpo de prova e parâmetros de teste, os resultados matemáticos apresentam boa resolução com o experimental. Porém, a geometria complexa das peças e a transcrição para modelos que simulem as cargas e frequências da aplicação real, tornam os cálculos em diversas situações somente uma referência.

O entendimento e a completa compreensão do resultado em fadiga são necessários para a aprovação de peças/sistemas que têm produção em grande escala e/ou estão ligadas à segurança. Nestes casos, a maneira mais assertiva para determinação do desempenho em fadiga é testando na condição real de uso. Conforme Norton (NORTON 2004), *“Se muitos dados de resistências se encontram disponíveis a partir de ensaios com corpos de prova, e o engenheiro pode utilizar-se desses dados como ponto de partida para estimar a resistência de uma peça em particular, é preciso dizer que os melhores dados são obtidos por meio de ensaios com conjuntos reais, submetidos a carregamentos verdadeiros e condições realistas de temperatura e ambiente. Trata-se de uma proposta bastante dispendiosa e que é normalmente realizada somente quando os custos do projeto, a quantidade a ser fabricada da peça/dispositivo ou a existência de uma ameaça à segurança humana demandam a realização desse tipo de ensaio.”*

A Norma ISO 6336 – Parte 1 (INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION 2006) reforça as afirmações de Norton (NORTON 2004), determinando a preponderância do resultado de testes de fadiga para engrenagens sobre os demais métodos. A geometria complexa e os carregamentos variáveis das rodas dentadas fazem os fabricantes testarem seus trens de engrenagens conforme procedimentos de teste que simulam condições reais ou mais exigentes. Neste cenário, a indústria automobilística criou o teste de validação do sistema de direção chamado “Teste de quebra do pinhão”. O procedimento testa a engrenagem que tem geometria complexa vinculada a um sistema de segurança veicular, e confirma o resultado em fadiga de baixo ciclo e carga elevada do sistema de direção testado.

Os testes de validação específicos do sistema de direção são realizados durante a fase de projeto do automóvel. As peças são testadas em bancadas que rodam ciclos de testes com uma parametrização de cargas superiores às verificadas no uso normal do veículo, simulando condições semelhantes às observadas em determinados acidentes.

Desta forma, se torna possível confirmar um aspecto importante de segurança, de que o carro continua sob controle direcional, mesmo após grandes impactos nas rodas.

3.1. Funcionamento do sistema de direção

O condutor do automóvel aplica movimento rotacional no volante, que é transformado em movimento linear na caixa de direção e novamente em rotacional nas rodas dianteiras conforme mostra a figura 3.1. A transformação do movimento rotacional do volante para o movimento linear que desloca a roda do carro para direita ou esquerda é realizada por um par engrenado de pinhão e cremalheira. O pinhão é conectado à coluna de direção, que por sua vez é conectada ao volante. A engrenagem menor recebe esforço torcional aplicado pelo motorista e transforma o movimento rotacional em deslocamento linear da cremalheira através de seu engrenamento apresentado na figura 3.2.

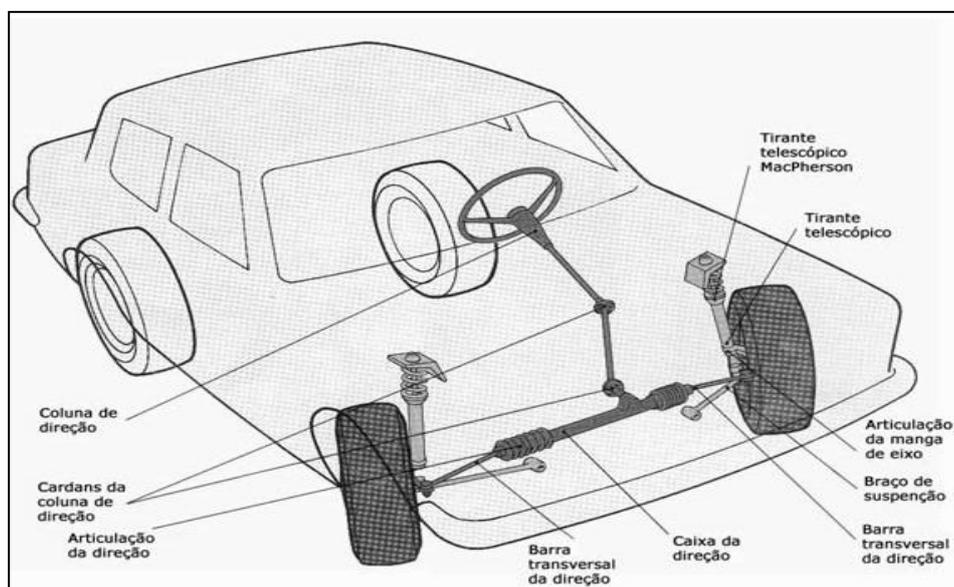


Figura 3.1 Movimentação do volante/coluna/mecanismo/roda (DHB COMPONENTES AUTOMOTIVOS SA 2001)

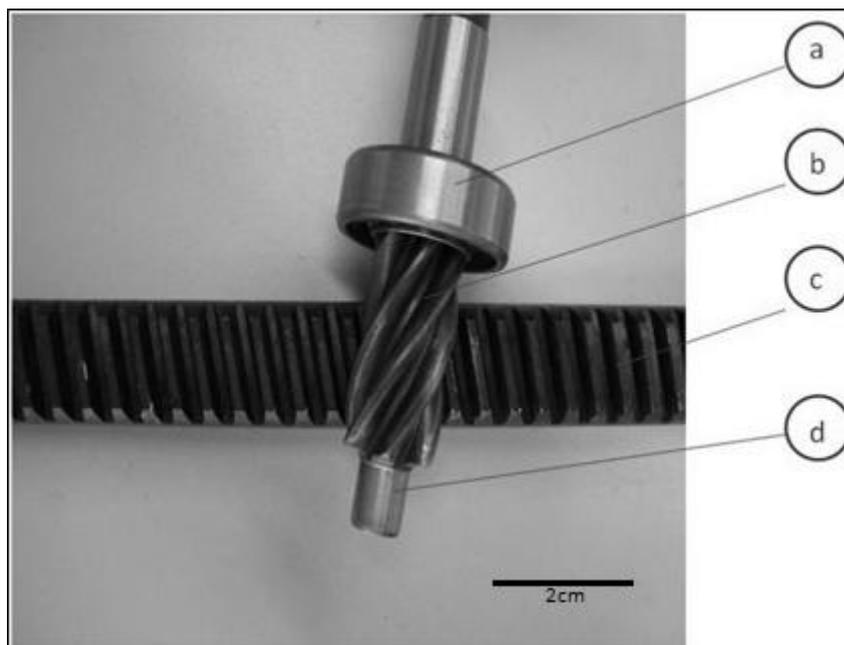


Figura 3.2 Par engrenado: pinhão e cremalheira.

- a- Rolamento superior;
- b- Pinhão;
- c- Cremalheira;
- d- Rolamento inferior.

3.2 Torque de quebra do pinhão – “Pinion breaking torque”

O teste torque de quebra do pinhão simula o funcionamento do sistema de direção com cargas mais elevadas para a movimentação das rodas frontais que as verificadas na utilização do veículo. Aplicando uma crescente sequência de cargas contrárias ao movimento gerado pelo engrenamento e estabelecidas pelo procedimento do teste, se verifica o torque aplicado no pinhão. O procedimento detalhado do teste está disposto no capítulo 4, materiais e métodos.

O torque aplicado no pinhão para a movimentação de cada uma das cargas em sequência depende da relação de transmissão do par engrenado, que é uma função do número de dentes e do módulo dos dentes do pinhão. Conceitualmente, podem-se considerar duas engrenagens como duas rodas lisas acionando sem deslizamento seu par através de seus diâmetros primitivos, desta forma a carga transmitida será:

$$Q = 2 \times T / D_p$$

Onde:

Q - é a carga longitudinal sobre a cremalheira;

T - torque aplicado no pinhão;

D_p – diâmetro primitivo.

Cada projeto de par engrenado recebe um torque específico para a movimentação das diferentes cargas. O requisito do ensaio é que o conjunto deve suportar a sequência de cargas e se manter funcional até que o torque para movimentar o mecanismo seja igual ou superior a 250Nm.

O requisito de aprovação permite que as engrenagens tenham sofrido avarias, como desgaste e deformações, bastam que se mantenham funcionais em todo o teste e alcancem o torque de 250Nm. Após ter sido aprovado, o mecanismo é desmontado para avaliação do nível de avarias. Posteriormente, o teste prossegue para que seja determinada a carga e o torque de colapso do conjunto.

Uma analogia entre as cargas do teste com a força ergonomicamente aceitável que o usuário poderia aplicar no volante mostra que o sistema deve suportar uma carga seis vezes maior durante o teste. O máximo esforço pelos critérios da ergonomia é 20kg, considerando um volante de 400mm de diâmetro, tem-se um torque aplicado de 40Nm, sendo que o mecanismo deve suportar 250Nm, ou equivalente a uma carga de 125kg aplicada pelo usuário.

3.3 Pinhão – Fusível do sistema de direção

Todos os sistemas mecânicos projetados para a transmissão de cargas terão um dos componentes alcançando o limite de carga antes dos demais, por isso denomina-se tal item como o fusível do sistema. No sistema de direção, o fusível é o pinhão. Seu número de dentes é menor que o número de dentes da cremalheira, fazendo com que tenham que engrenar um maior número de vezes que os dentes da contra peça. Nesta condição, a tendência de falha da engrenagem menor é maior. A condição desfavorável do pinhão também se explica pela seção de seus dentes. A base do dente da cremalheira é muito mais

robusta e menos propensa à concentração de tensões, quando comparada à base do dente do pinhão, que é mais delgada e mais propensa a concentrar tensões (BAYRAKCEKEN 2006) (JIANPING 2006). A figura 3.3 mostra a base do dente da cremalheira, e a figura 3.4 à base do pinhão. A dimensão na base do dente torna o pinhão menos robusto aos esforços que, combinado ao maior número de vezes que os dentes engrenam, fazem do pinhão o fusível do sistema de direção.

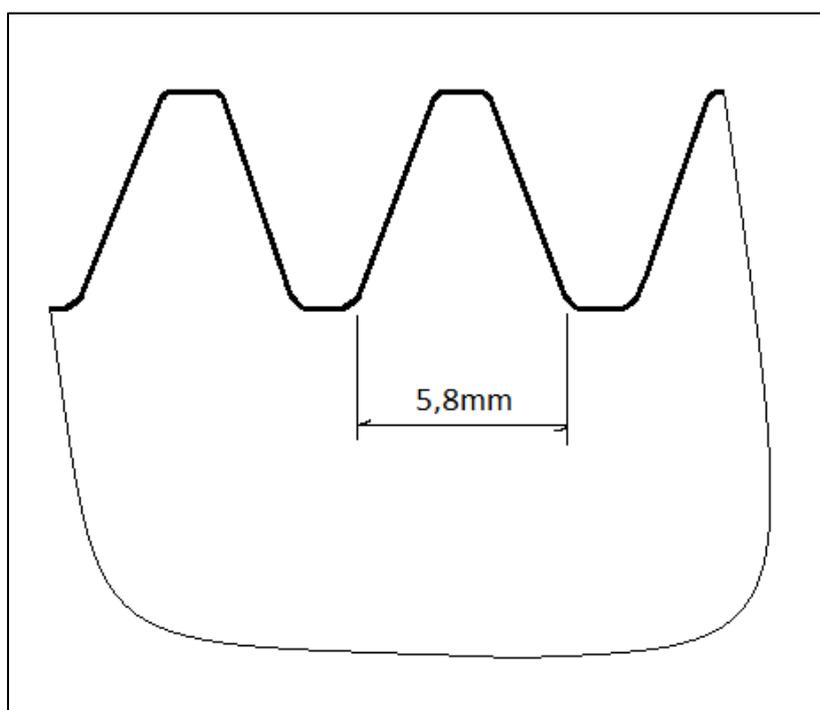


Figura 3.3 Base do dente da cremalheira

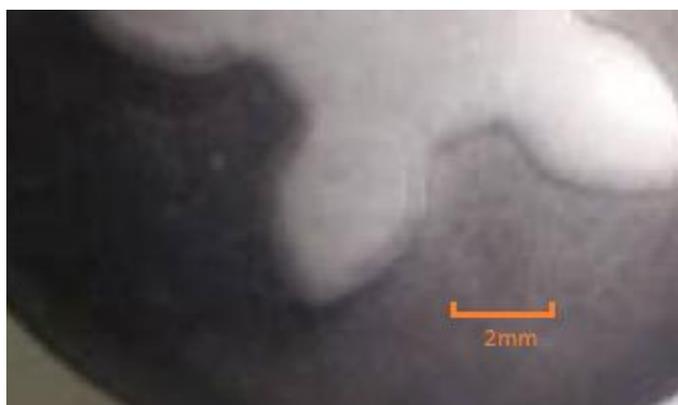


Figura 3.4 Base do dente do pinhão

As engrenagens cilíndricas como o pinhão do sistema de direção recebem e transferem movimentos rotacionais que provocam esforços de torção nos seus corpos. Porém, os dentes recebem esforços de flexão, pois operam como alavancas transmitindo esforço rotacional entre as engrenagens. A flexão nos dentes oscila entre tração e compressão dependendo do sentido de giro do engrenamento (HENRIOT 1968) (NORTON 2004). A variação em ciclos da tensão no dente gera fadiga e contribui para a condição do pinhão como fusível do engrenamento.

3.4 Projeto mecânico dos componentes e montagem

O desempenho de um par engrenado é fortemente influenciado pelas características do projeto mecânico dos componentes e da montagem do sistema (BOINARDI 2006). Características especificadas incorretamente para um determinado sistema podem provocar a redução da vida dos componentes. As dimensões listadas devem estar especificadas corretamente para as peças individuais e conjuntos.

- Número de dentes (n)
- Módulo normal (m)
- Ângulo de hélice (β)
- Correção (x)
- Ângulo de pressão (α)
- Diâmetro primitivo (D_p)

Além das especificações de projeto citadas acima, o desempenho de um sistema de direção é sensível à lubrificação adicionada as regiões que necessitam contato deslizante. Os lubrificantes devem ser selecionados considerando o tipo de contato, os materiais envolvidos, as velocidades, o ambiente e temperatura da aplicação. Os pares engrenados dos sistemas de direção são lubrificados com graxas. A quantidade de lubrificante e a sua substituição ao longo da vida do conjunto também são fundamentais para obter o melhor desempenho.

As características das peças que afetam o desempenho das engrenagens durante o teste devem ter controle dimensional antes da montagem, assim como o resultado funcional dos conjuntos após montados. Discrepâncias dimensionais das peças e

quantidade de lubrificantes afetam o resultado e podem levar a conclusões errôneas desempenho dos itens testados.

3.5 Tratamento térmico

Conforme citado na introdução, não são permitidas mudanças dimensionais para o aumento da robustez da caixa de direção, pois a posição e dimensões já estão definidas no projeto do automóvel. A melhoria necessária no desempenho deve ser alcançada através de soluções com matérias e seu beneficiamento.

3.5.1 Têmpera

Entre os processos disponíveis para o beneficiamento de aços, a têmpera é largamente utilizada para a melhoria das propriedades mecânicas. Os aços para têmpera devem ter sua temperabilidade garantida na matéria prima, já que neste processo não ocorrem mudanças na composição química do material, ou apenas alguma descarbonetação superficial. Normalmente os aços com quantidade de carbono próxima de 0,40% tem boa temperabilidade. A remoção rápida de calor durante o resfriamento das peças em temperatura de austenitização é necessária para a formação da martensita e ocorre com facilidade na região próxima a superfície. A profundidade endurecida será determinada pela temperabilidade do aço e pela velocidade de resfriamento durante o processo. Por esta condição a profundidade de têmpera é variável em áreas diferentes da peça, e dependerá da condição de troca térmica de cada região.

Os dentes de uma engrenagem tem grande área para a troca de calor com o fluido refrigerante, por esta característica em engrenagens de dentes pouco espessos, até 5 mm de espessura, tem-se o endurecimento em toda espessura do dente. Embora se consiga reduzir a dureza da martensita através de revenido, esta estrutura reduz extremamente a ductilidade do dente e conseqüentemente do pinhão (SANDOR 2006). A condição descrita para dentes pouco espessos leva as engrenagens a ter falhas frágeis devido a pouca ductilidade.

3.5.2 Cementação

Os aços para cementação tem carbono próximo de 0,20%, precisando passar por uma alteração química na superfície para torná-los temperáveis. Durante o processo, o aço na superfície da peça é enriquecido com carbono para faixa de 0,7 a 0,9% (BOINARDI 2006)(GENEL 1999)(HOLM). O carbono se difunde gradativamente pela superfície da peça tornando possível um bom controle da região enriquecida e por consequência a profundidade de têmpera. Conforme Canale (CANALE 2008), a manutenção de quantidades até 0,9% na camada reduz o potencial de formação de martensita em placas, que é uma estrutura frágil e com fácil nucleação de trincas. Com o conteúdo de carbono no patamar de 0,8%, o potencial de formação de austenita retida e cementita também são reduzidos. A austenita retida é instável na temperatura ambiente e se transforma em martensita não revenida ao receber trabalho mecânico. Sem revenido a estrutura martensítica é frágil e contrária às características de tenacidade necessárias ao pinhão (CANALE 2008). A cementita é dura e frágil, por isto, também indesejável na microestrutura da engrenagem. O processo de cementação deve ter o tempo adequado para evitar que o carbono que se difundiu pela superfície avance para o núcleo do dente, assim como, para o núcleo da engrenagem. A manutenção da quantidade de carbono em 0,20% no interior do dente garante melhor tenacidade e ductilidade da engrenagem após a têmpera (SANDOR 2006).

Para atingir melhores resultados as engrenagens temperadas podem passar por reaquecimentos em série durante o revenido. O recurso de reaquecimentos em série refina o grão melhorando as propriedades mecânicas da engrenagem (APPLE 1973) (WISE 2000).

Além do aumento de resistência com a superfície dos dentes temperados, a cementação aumenta a capacidade de carga das engrenagens pela formação de tensão residual compressiva na superfície. Esta compressão da camada cementada é formada durante a têmpera, pelo fato da região limite entre a superfície e o núcleo ter menos carbono. Conforme o diagrama de equilíbrio do Fe-C, as regiões com menor teor de carbono transformam de ferro γ (CFC) para α (CCC) antes das regiões com maior teor. Quando a camada enriquecida com carbono se transformar, terá sua expansão inibida,

promovendo tensão compressiva (BOINARDI 2006) (BAYRAKCEKEN 2006) (SUGIANTO 2009) (WISE 2000) (SANDOR 2006). Este efeito não ocorre nos aços temperados, pois o carbono é igual em toda extensão da peça.

Para uma engrenagem, o processo de cementação é seguido de têmpera e revenido, e ao final para melhorar a qualidade superficial os pinhões do sistema de direção passam pelo processo de retífica para remover as imperfeições oriundas dos tratamentos térmicos (BOINARDI 2006) (SUGIANTO 2009). A operação de retífica remove entorno de 0,08mm de cada face dos dentes. Desta forma, para garantir uma espessura de camada, deve ser considerada a remoção do processo de retífica.

A cementação permite que se tenha maior controle sobre a espessura da superfície resistente ao desgaste e amassamento, assim como sobre a dimensão do núcleo de baixo carbono que se mantém dúctil após a têmpera, agregando à engrenagem a capacidade de suportar energia de impactos através da deformação. O controle de camadas cementadas permite um equilíbrio entre a resistência e a ductilidade da engrenagem através da variação da espessura de camada e a dimensão do núcleo dúctil.

Além do aumento do núcleo dúctil, conforme Genel (GENEL 1999) e citado por Sandor (SANDOR 2010), quanto menor a camada cementada maior a tensão compressiva. Esta característica deveria dificultar a formação das trincas, que posteriormente progredem para a fratura e, desta forma, aumentar a resistência do pinhão no teste de torção. Genel define uma regra empírica para o cálculo da profundidade ideal (GENEL 1999)(GENEL 2005). A razão entre a profundidade da camada e a espessura da peça deve ser 0,12 (GENEL 1999). Ele testou aços AISI 8620 com 300 Vickers de dureza de núcleo. Resultados que corroboram aos de Genel foram verificados por Farfán (FARFÁN 2004).

A espessura dos dentes de uma engrenagem de dentes helicoidais é calculada conforme Henriot (HENRIOT 1968) e Norton (NORTON 2004) pela fórmula:

$$e = m \cdot (\pi/2 + 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha)$$

Os pinhões de sistema de direção de automóveis de passeio tem espessura de dente entorno de 4mm, que usando a razão de 0,12 proposta por Genel resultam em camadas de

0,48mm. Por trabalharem com cargas e velocidades rotacionais baixa, as engrenagens do sistema de direção de automóvel tem um nível de desgaste é muito pequeno (BOINARDI 2006). Esta condição técnica da aplicação permite reavaliar e se possível reduzir a região endurecida e, por consequência, aumentar a área dúctil do núcleo e a tenacidade do pinhão.

Dentes com espessura cementada excessiva, além de reduzir o núcleo dúctil, que pode ser indesejável para engrenagens onde a aplicação necessita de tenacidade, também podem ter otimização na relação espessura de camada e resistência proposto por Genel (GENEL 1999) para viabilizar reduções de custo. Já as camadas menores devem também buscar a otimização, pois se excessivamente finas podem não ter rigidez mecânica suficiente para a aplicação.

Níveis menores de carbono e microdureza também dificultam a propagação de trincas, como estudado por Sandor (SANDOR 2006). A redução da camada cementada diminui a região onde a velocidade de propagação de trincas é elevada. A propagação é mais lenta nas regiões com menos carbono e isto confere ao pinhão maior tenacidade. Corroboram com esta abordagem os conhecimentos de mecânica da fratura, nos quais, determinados tamanhos de defeito são toleráveis e avançarão gradativamente. Dificultando o aumento da trinca, o pinhão seria capaz de passar por mais ciclos de teste, já que o critério de aceitação permite trincas e/ou deformações ao final do teste. Conforme Strohaecker (STROHAECKER 2005), a trinca avança de maneira controlada até o comprimento crítico, mas a partir dele pode levar a falha rapidamente.

3.5.3 Revenido

O revenimento é um tratamento térmico destinado aos aços previamente temperados (microestrutura martensítica), com o objetivo principal de aumentar sua ductilidade e tenacidade que são propriedades fundamentais para uma engrenagem no teste de quebra do pinhão. O processo é realizado em temperaturas inferiores à de austenitização com tempos de duração e velocidades de resfriamento controladas. Segundo Sandor (SANDOR 2010) e Preston (PRESTON 1993), a redução de dureza do núcleo influencia positivamente na tenacidade das engrenagens.

3.5.3.1 Curvas temperatura x dureza no revenido

Cada aço apresenta uma correlação entre a temperatura de revenimento e as propriedades mecânicas. As curvas de dureza versus temperatura de revenimento são empregadas para a seleção da temperatura. A figura 3.5 mostra a curva dureza versus temperatura de revenido para o aço SAE 4320. A curva representa a média verificada em uma estrutura totalmente temperada.

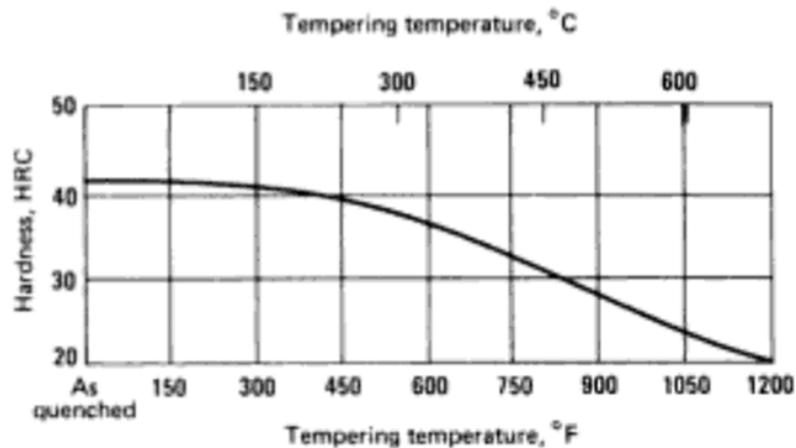


Figura 3.5 Curva dureza versus temperatura e revenido do aço SAE 4320, 4320H.
Fonte: HEAT TREATER'S GUIDE: PRACTICES AND PROCEDURES FOR IRONS AND STEELS of Harry Chandler.

A figura 3.6 mostra a curva dureza versus temperatura de revenido para o aço SAE 5120. A curva representa a média verificada em uma estrutura totalmente temperada.

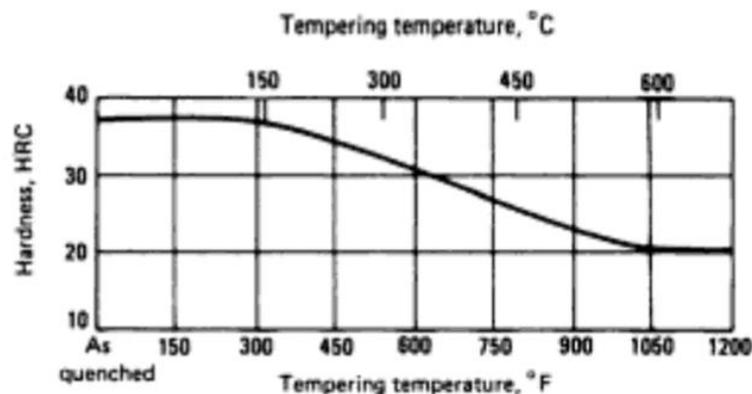


Figura 3.6 Curva dureza versus temperatura e revenido do aço SAE 5120, 5120H.
Fonte: HEAT TREATER'S GUIDE: PRACTICES AND PROCEDURES FOR IRONS AND STEELS of Harry Chandler.

3.5.3.2 Fragilidade do revenido

O revenimento de aços ao carbono e aços baixa-liga na faixa de temperatura entre 230°C e 370°C pode resultar na diminuição da tenacidade, este fenômeno é denominado fragilidade da martensita revenida. O fenômeno é creditado à precipitação da cementita (Fe_3C) em contornos de grão de martensita. A precipitação por sua vez, seria decorrente da transformação de austenita retida em filmes de cementita (HERRING 2014). A recomendação é evitar este intervalo de temperatura. Para o aço 4320, Totten recomenda evitar o revenimento na faixa compreendida entre 260 e 370°C para evitar a fragilização, porém se o revenido for executado nesta faixa a recomendação é um resfriamento rápido (TOTTEN 1993).

Um segundo fenômeno que provoca a redução da tenacidade no revenimento ocorre quando aços ao carbono e baixa-liga são revenidos por longos períodos ou resfriados lentamente entre 375°C e 575°C, estes apresentam uma tenacidade inferior à obtida para temperaturas de revenimento mais baixas. A fragilidade ao revenido nesta temperatura é provocada descoesão dos antigos contornos austeníticos (fratura intergranular). A causa deste fenômeno é creditada a segregação de compostos contendo impurezas como P, Sb, As, Sn.

A figura 3.7 mostra a influência da temperatura de revenido sobre a dureza e a tenacidade.

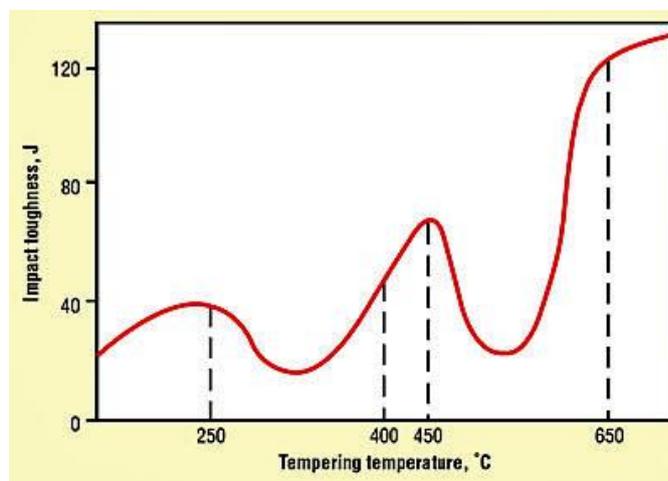


Figura 3.7 Influência da temperatura de revenimento sobre a tenacidade dos aços. Fonte: The Embrittlement Phenomena in Hardened & Tempered Steel. Herring D.H.

3.5.4 Aços de maior tenacidade

A composição química do aço determina em grande parte suas propriedades mecânicas. A adição das ligas tem o objetivo de melhorar as propriedades. Cada elemento tem efeito sobre uma ou mais características do aço, mas o efeito do elemento isoladamente pode ser diferente do obtido se adição for combinada com outros elementos, assim como pode ser diferente em função das quantidades adicionadas. Entre outras características, os elementos de liga afetam a resistência mecânica, tenacidade, resistência à corrosão, resistência ao calor, resistência em baixa temperatura e soldabilidade.

As ligas podem afetar negativamente o desempenho para determinada característica, por isso a escolha do aço com os elementos de liga corretos e em proporções adequadas otimizam o resultado para diferentes aplicações. Para as engrenagens o aumento da resistência mecânica normalmente é o objetivo principal, entretanto, para uma engrenagem do sistema de direção, onde é mandatória a manutenção da funcionalidade após movimentação de elevadas cargas e impactos, a ductilidade e tenacidade são fundamentais.

O níquel tem forte influência na tenacidade de aços. A adição de quantidades maiores que 1,5% de níquel são recomendados para aumentar a tenacidade de componentes (WISE 2000) (DOSSETT 2006). O níquel não forma carbeto e se dissolve na ferrita aumentando sua tenacidade e resistência (Metallurgical Consultant 2012). Conforme Hayden (HAYDEN 1969), o níquel contribui para homogeneização do escorregamento de planos cristalinos na ferrita.

O aumento da tenacidade nos aços é proporcional à quantidade de níquel adicionado. O incremento nos resultados pode ser verificado em ensaios de fadiga ao impacto e ao dobramento, ambos tipos de fadiga existentes em dentes de engrenagens. Resultados obtidos pelo Instituto do níquel (INCO 2014) mostram o avanço das propriedades de acordo com a quantidade de níquel no aço. Foram testados os aços 4118 com 0,24% de níquel, 4626 com 0,9%, 4620 com 1,69%, 4817 com 3,38%, aço ferramenta EX1 com 5,02% e o aço DIN 16MnCr5 sem adição de níquel.

A figura 3.8 mostra o resultado dos aços com diferentes teores de níquel em testes de fadiga ao impacto.

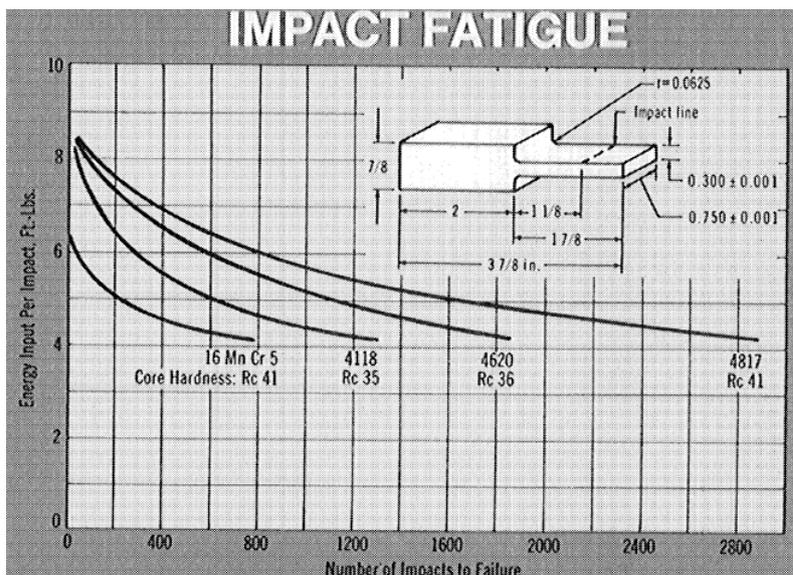


Figura 3.8 Influência do teor de níquel nos aços sujeitos a fadiga ao impacto. Fonte: Six Reasons for Specifying Nickel Carburizing Steels (1203). Nickel Institute (INCO).

A figura 3.9 mostra o resultado dos aços com diferentes teores de níquel em testes de fadiga ao dobramento.

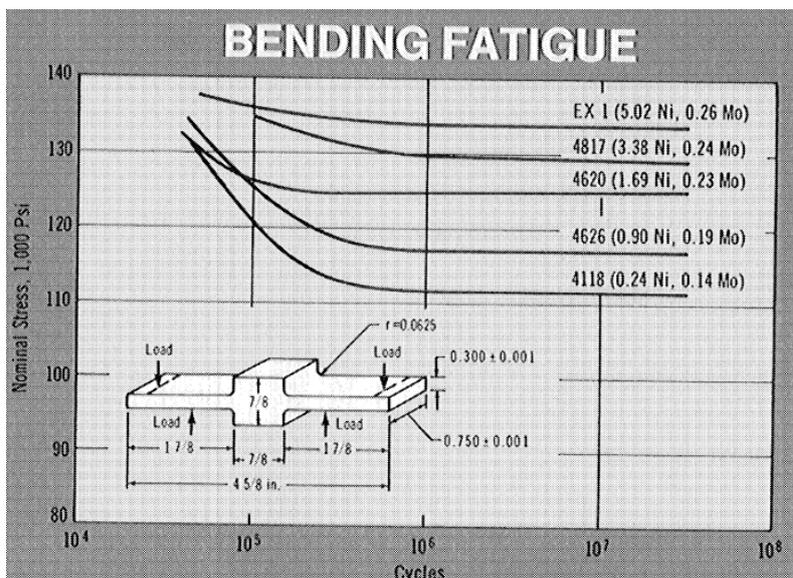


Figura 3.9 Influência do teor de níquel nos aços sujeitos a fadiga ao dobramento. Fonte: Six Reasons for Specifying Nickel Carburizing Steels (1203). Nickel Institute (INCO).

3.6 Análise teórica do comportamento em fadiga

Na fratura caracterizada pelo rompimento por flexão dos dentes nas suas bases (BOINARDI 2006), tem-se a ruptura ocorrendo devido à tensão de tração no pé do dente. Seguindo a metodologia de cálculo proposta por Henriot (HENRIOT 1968), a força trativa e a tensão no pé do dente são dados por:

$F_t = 2000 \cdot T / 2 \cdot r$, (HENRIOT 1968) onde:

- T é o torque na engrenagem;
- r é o raio primitivo.

$\sigma = (F_t / (b \cdot m)) \cdot Y_f \cdot Y_e \cdot Y_\beta \cdot Y_s$, (HENRIOT 1968) onde:

- σ é a tensão no pé do dente;
- b é a largura de engrenamento;
- m é o módulo do dente;
- Y_f é o fator de forma;
- Y_e é o fator de recobrimento;
- Y_β é o fator de ângulo de hélice;
- Y_s é o fator de concentração de tensão.

A tensão de tração na base do dente é diretamente proporcional ao torque aplicado, veja a fórmula estabelecida por Henriot. O torque máximo em operação do pinhão é 40Nm, e o torque suportado pelo pinhão mandatório para aprovação é 250 Nm, sendo então a razão igual a 0,16. Com este resultado considera-se vida infinita para pinhões que aprovarem no teste “Torque de quebra do pinhão”, pois a razão para termos vida infinita é 0,5. Garcia definiu da seguinte forma o limite de resistência a fadiga: “*Na prática, admite-se com boa aproximação, que a razão entre o limite de resistência à fadiga e o limite de resistência à tração dos aços é aproximadamente 0,5*” (GARCIA 2000).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais e método de fabricação

As sete configurações de aços e tratamentos térmicos utilizados para os pinhões testados estão apresentados conforme a tabela 4.1.

Tabela 4.1 Aços e tratamentos térmicos utilizados para os pinhões

Aços	Tratamento térmico	Camada cementada (mm)	Camada temperada (mm)	Temperatura revenido (°C)	Dureza em 0,1mm da superfície (HV)	Dureza núcleo (HRC)
SAE 5140	Têmpera e revenido, ambos por indução	não aplicável	2	-	622	-
SAE 8640		não aplicável	2	-	-	-
SAE 4340		não aplicável	2	-	-	-
SAE 5120	Cementação, têmpera e revenido, todos em forno c/ atmosfera controlada	0,75	não aplicável	230	570	38
		0,65	não aplicável	400	520	36
		0,45	não aplicável	400	550	36
SAE 4320		0,45	não aplicável	400	530	38

A separação das amostras de aço SAE 5120 e camada cementada de 0,65 a 0,80 mm em dois lotes ocorreu somente antes de cada lote passar por temperaturas diferentes de revenido. Todos os aços de pinhões acima descritos foram testados engrenando com cremalheira de aço SAE 1045H temperada por indução e revenida em forno.

A matéria prima utilizada para a fabricação dos pinhões são barras de aço de secção circular, de diâmetro 22 mm. Os tarugos no comprimento de 213 mm são recebidos do fornecedor com as demais dimensões já prontas para a usinagem do dente. Após a geração do dentado, as engrenagens são enviadas ao fornecedor de tratamento termo-químico para os processos de cementação/têmpera/revenido/desempeno. Após o tratamento finalizado, amostras são avaliadas com relação à microestrutura, dureza superficial (HRC), dureza de núcleo (HV 0,5) e perfil de dureza (HV 0,5), as mesmas

análises são repetidas em amostras ao retornarem do fornecedor. O controle sobre a espessura da camada cementada e dureza de núcleo, foram realizadas com um microdurômetro escala Vickers HV 0,5 com um microscópio com escala centesimal para medição da indentação.

Após o tratamento térmico os dentes são retificados na mesma geradora de dentes e enviados para a montagem nos mecanismos de direção. A montagem e os testes de desempenho são realizados em equipamentos especializados que serão apresentados no item 4.2. As células de carga e os medidores de torque seguem padrões de aferição da fábrica recomendados pelos devidos fabricantes.

4.2 Métodos e procedimentos de ensaio

Para cada uma das sete configurações de pinhão apresentadas na tabela 4.1 foram testadas três amostras. Duas amostras foram ensaiadas até o torque de quebra. Para a terceira engrenagem, o ensaio foi dividido em duas partes. Na primeira foi testada até o torque mais elevado no qual os dois pinhões de mesmo material e tratamento térmico passaram sem quebra, para então ser realizada a desmontagem e avaliação. Após a análise do modo de falha, o pinhão prosseguia para remontagem com as mesmas peças da primeira parte da avaliação, sendo que na segunda parte o pinhão era levado até a quebra. A ordem de ensaio dos materiais e tratamentos térmicos seguiu a ordem da tabela 4.1.

Os pinhões foram testados dentro dos mecanismos com as demais peças originais de fábrica. As peças que não estavam danificadas em um teste não foram reaproveitadas em outro teste. Todos os mecanismos de teste seguiam os mesmos padrões e procedimentos de montagem e pré-testes.

4.2.1. Teste “Torque de quebra do pinhão”

O teste torque de quebra do pinhão consiste em atuar o mecanismo de direção simulando o funcionamento normal, aplicando torque no pinhão e colocando uma carga controlada de reação sobre a cremalheira, sempre oposta ao movimento estabelecido pelo pinhão. No início do teste, a engrenagem menor está em um dos extremos de seu par e

girando em seu eixo engrena até o outro extremo da cremalheira e por fim retorna ao extremo inicial do teste. A bancada de teste controla e registra os parâmetros abaixo:

- Força de reação da cremalheira (N);
- Tempo (s);
- Torque no pinhão (Nm).

A figura 4.1 mostra a representação esquemática do ensaio e a figura 4.2 apresenta a bancada de teste onde foram realizados os ensaios.

Onde:

- M - identifica que o torque deve ser aplicado na extremidade do pinhão;
- α_s - velocidade angular controlada;
- M_s - torque controlado;
- F_r - Força de reação controlada

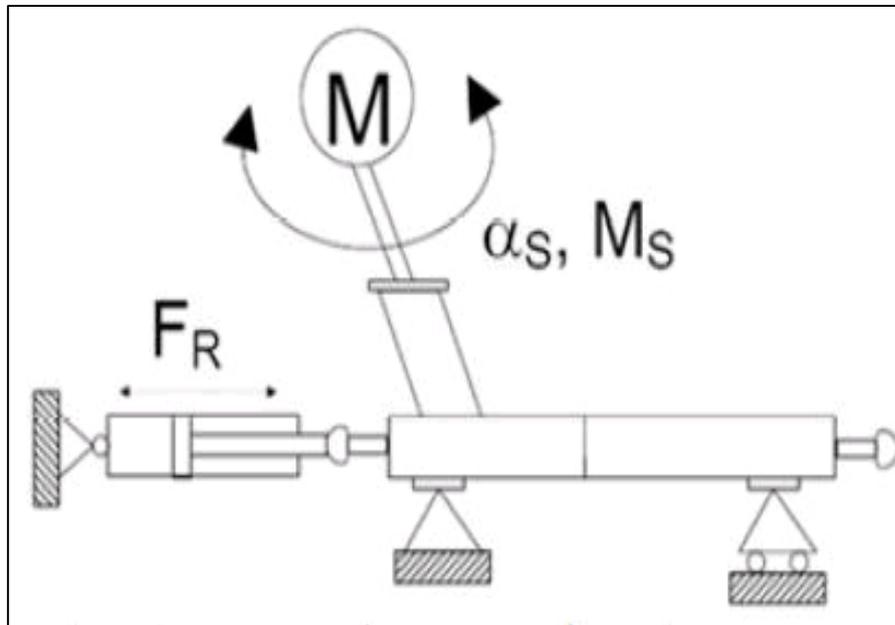


Figura 4.1 Representação esquemática do teste

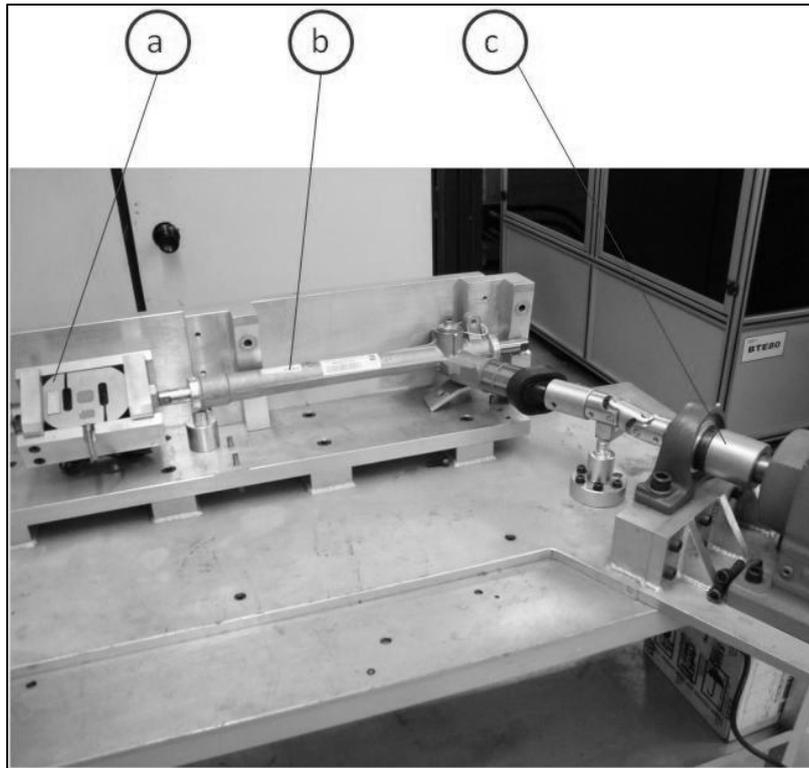


Figura 4.2 Bancada de teste de torque de quebra do pinhão

- a- Célula de carga;
- b- Mecanismo de direção;
- c- Motor de passo;

O resultado do teste Torque de quebra do pinhão é apresentado de forma gráfica, na qual ficam registrados todos os dados coletados e que devem ser controlados durante o teste.

O procedimento de teste estabelece os demais parâmetros de execução; velocidade e cargas de reação na cremalheira. A velocidade de giro do pinhão é padronizada em $45^\circ/\text{s}$ independente do ciclo e da reação na cremalheira. As cargas em cada ciclo de teste seguem o procedimento descrito abaixo:

- 1º ciclo a carga é 5kN;
- 2º ciclo: 7,5kN;
- 3º ciclo: 10kN;

- Do 4° ao 9° ciclo a regra se mantém, a carga deve ser aumentada 2,5kN a cada ciclo;
- 9° ciclo: 25kN
- 10° ciclo: 26,25kN;
- A partir do 10° ciclo a carga deve se acrescida em 1,25kN após cada ciclo.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO

5.1 Aços com têmpera direta

5.1.1 Aço SAE 5140 temperado por indução

O conceito inicial do sistema de direção foi baseado em projetos já existentes e que não haviam sido validados conforme o teste torque de quebra do pinhão. Assim, o par engrenado do sistema de direção primeiramente testado neste produto foi um pinhão de aço SAE 5140, temperado e revenido por indução e a cremalheira de aço SAE 1045 temperada por indução e revenida em forno. A especificação para a têmpera da engrenagem menor era 520 HV (1,6 a 2,0mm) medida no pé do dente. Na tabela 5.1 está a análise da composição química do lote de amostras de SAE 5140 e que se mostra conforme a especificação.

Tabela 5.1 Composição química do aço SAE 5140 (% em peso)

C	Mn	P	S	Si	Cr
0,38-0,43	0.70-0.90	0,035 máx	0,040 máx	0.15-0.30	0.70-0.90
0.41	0.79	0.025	0.033	0.28	0.81

A figura 4.1 apresenta o perfil de dureza medida no pé do dente. A dureza se manteve praticamente constante acima dos 600 HV até 1,5 mm de profundidade, caindo para 500 HV na cota de 2,0 mm. Ambas as análises foram realizadas em uma mesma amostra do lote dos pinhões testados.

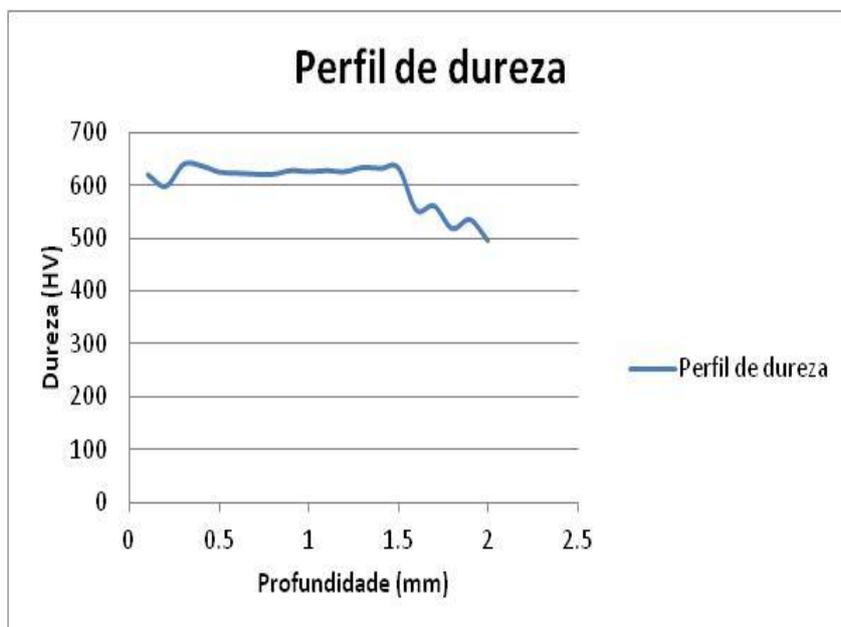


Figura 5.1 Perfil de dureza medida no pé do dente do pinhão SAE 5140 temperado por indução

Nesta primeira configuração de tratamento térmico e materiais foram testados os três conjuntos, todos apresentaram resultados semelhantes e tiveram ruptura de forma frágil. Os pinhões falharam com uma carga de reação na cremalheira de 17,5 kN e torque de 150Nm. A falha ocorreu em um plano perpendicular ao eixo da engrenagem, conforme representado pela linha vermelha na figura 5.5. A figura 5.6 apresenta a evolução da carga e do torque ao longo do tempo.

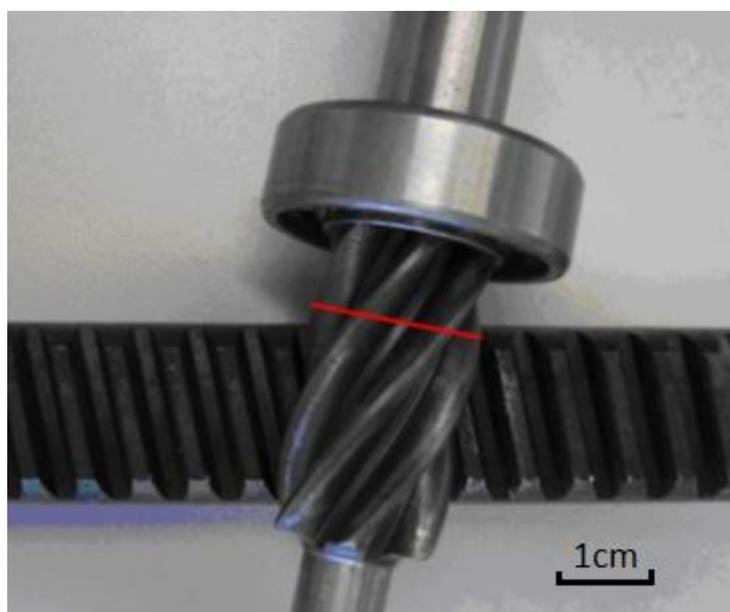


Figura 5.2 Representação do plano de fratura do pinhão

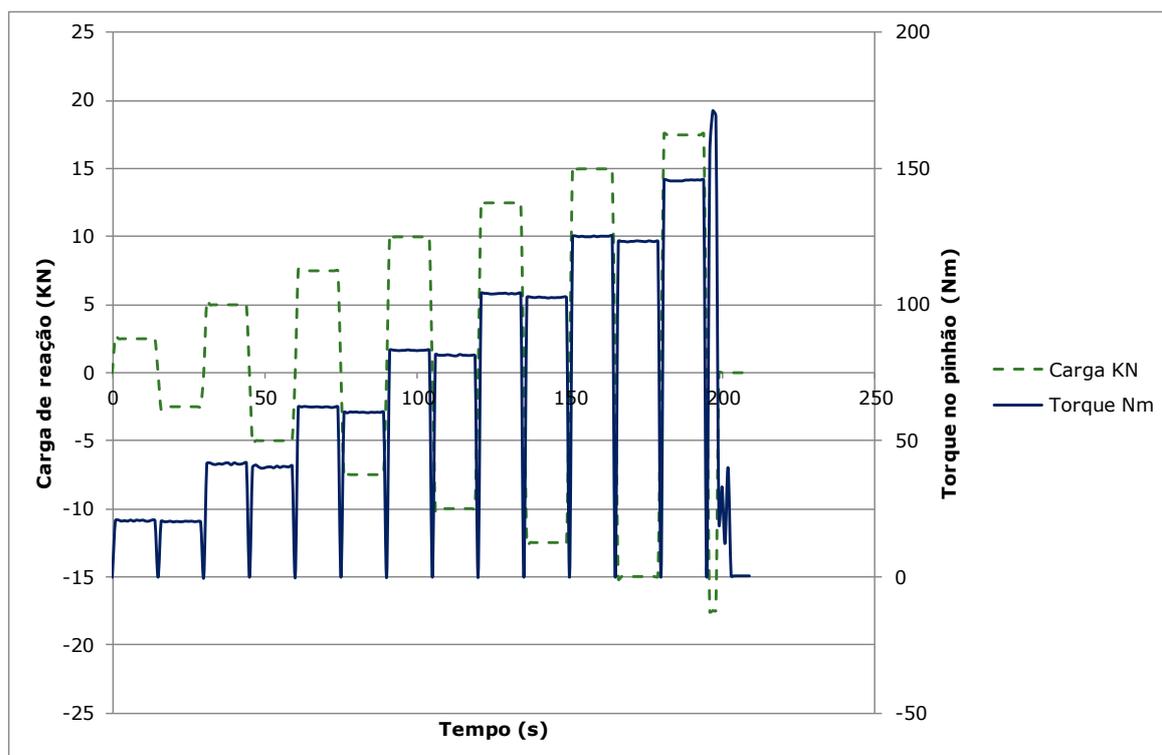


Figura 5.3 Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão de SAE 5140 temperado por indução.

Com o terceiro pinhão testado, foi realizado o acompanhamento distinto citado na metodologia, após o teste com 15 kN o mecanismo foi desmontado e avaliado. Verificou-se que não havia deformações ou trincas, somente marcas normais de contato do engrenamento. Retornando ao teste como descrito, o pinhão teve fratura no torque de 150Nm, sem ter apresentado qualquer início de falha nas cargas anteriores.

A análise dos resultados da micrografia do pinhão revelou que a têmpera seguida de revenido, ambos por indução, foram realizadas apropriadamente e formaram martensita revenida. A fratura do pinhão antes de alcançar o requisito do teste não foi causada por alguma falha do tratamento térmico.

O projeto mecânico foi revisado para confirmar que a falha prematura não era provocada por algum erro nas especificações dos componentes. Por isso, foram reavaliadas todas as especificações que pudessem estar envolvidas na falha. Características que poderiam comprometer a vida das engrenagens como: o desalinhamento entre o

dentado da cremalheira com o dentado do pinhão, assim como sobre carga nos dentes originada por erro de especificação técnica da forma do dente ou dimensão citada na revisão bibliográfica foram reavaliadas e confirmadas como apropriadas para as peças em análise.

A segunda linha de investigação foi relacionada às dimensões das peças que haviam sido testadas. Peças do mesmo lote que não foram ensaiadas passaram por uma avaliação dimensional para assegurar que atendiam as especificações do projeto. Não foram verificadas discrepâncias que pudessem justificar as falhas prematuras. O processo que iria produzir as peças para os próximos testes seria o mesmo e demonstrava boa capacidade de atender os requisitos dimensionais.

Conforme apresentado na avaliação bibliográfica, um terceiro ponto investigado foi a lubrificação do mecanismo de direção. A ausência, deficiência ou excesso na lubrificação interna do sistema poderia aumentar a carga de reação ou desgastes prematuros. Porém, foi considerada apropriada para o sistema e o teste de torção.

Conforme apresentado na introdução desta dissertação, tecnicamente soluções como aumento do número de dentes ou aumento do módulo do dentado poderiam melhorar a capacidade de carga e alcançar sem falhas os 250Nm de torque no pinhão. Porém os parâmetros definidos pela montadora, tais como; relação de transmissão do mecanismo de direção, número de dentes do pinhão e dimensões máximas da carcaça não poderiam ser alteradas. Portanto, as melhorias teriam que ser obtidas sem mudanças dimensionais e sim através de materiais e tratamento térmico.

5.1.2 Aços SAE 8640 e SAE 4340 temperados por indução

As amostras do aço SAE 8640 e 4340 foram tratadas da mesma forma reportada anteriormente e apresentaram resultados semelhantes. As características inferidas pelo tratamento térmico determinaram a resistência do pinhão no teste. Todas as peças tiveram as falhas praticamente nas mesmas cargas e torques, independente do material. A figura 5.4 apresenta a evolução da carga e torque ao longo do tempo para o aço SAE 8640 e a figura 5.5 para o aço SAE 4340.

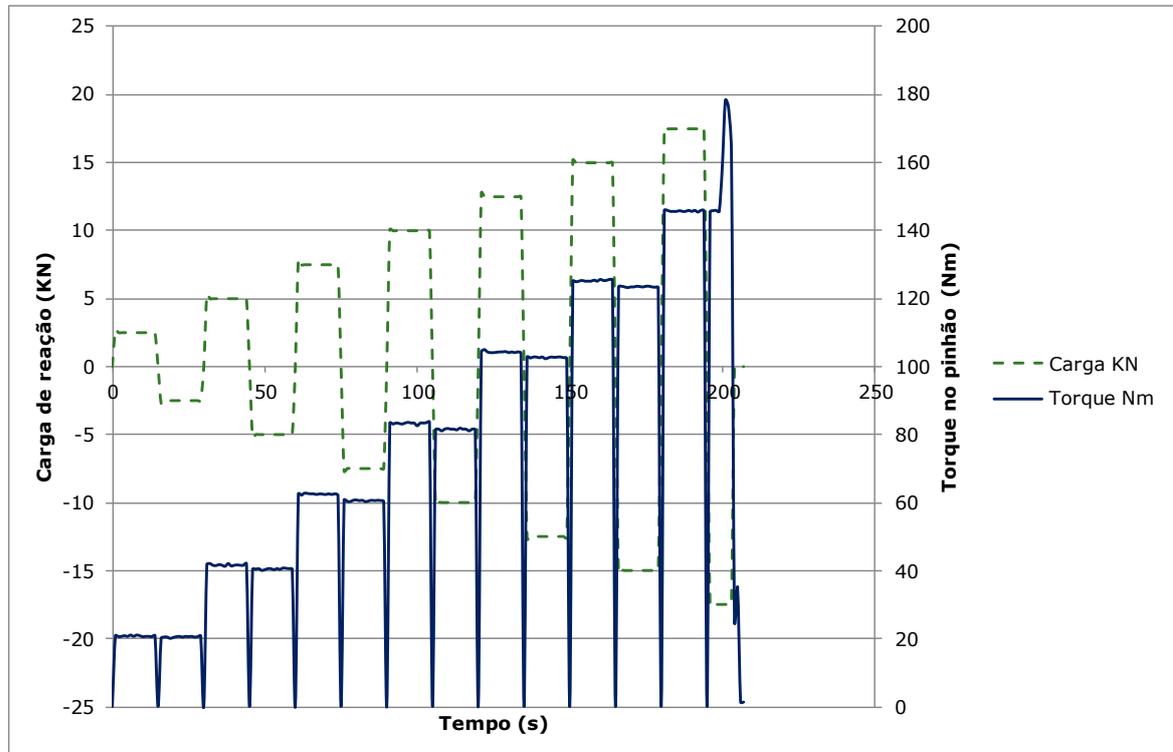


Figura 5.4 Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão de SAE 8640 temperado por indução.

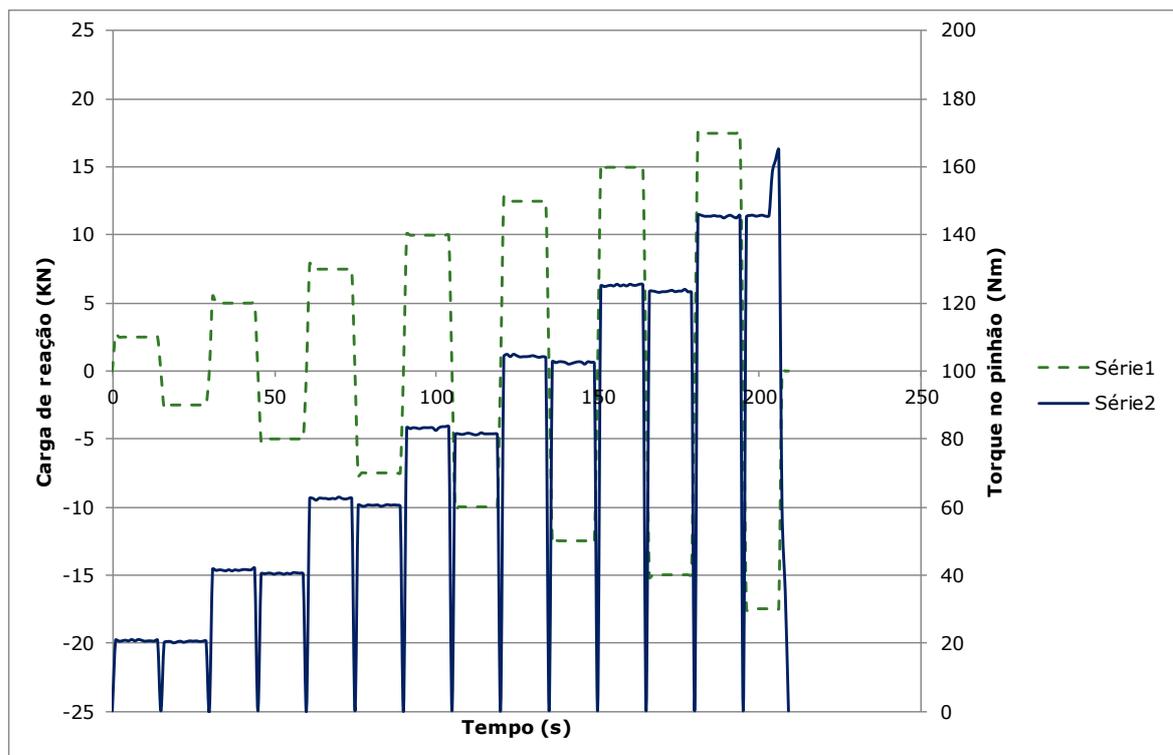


Figura 5.5 Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão de SAE 4340 temperado por indução.

5.2 Aço SAE 5120 cementado

O requisito de aprovação do teste de torção é que o sistema de direção se mantenha funcional após o ciclo em que foi aplicado o torque de 250 Nm no pinhão. Desta forma, medições geométricas posteriores não são critérios de aprovação e pode-se ter o pinhão deformado e mudando sua forma original para absorver torques mais elevados.

5.2.1 SAE 5120 cementado com revenido em diferentes temperaturas

Para absorver energia do teste através de deformação é necessário que o pinhão e os seus dentes tenham um núcleo dúctil (SANDOR 2010). Para isto, foram avaliados pinhões cementados de aço SAE 5120. A especificação usada para a cementação foi 479HV (0,65 a 0,80mm) e dureza de núcleo em dois patamares, sendo o primeiro entre 37/39 HRC (363/382 HV) revenido a temperatura de 230°C e outro abaixo de 36 HRC (354 HV) revenido a temperatura de 400°C. As temperaturas de revenimento foram escolhidas para evitar os fenômenos de fragilidades do revenimento conforme apresentado na revisão bibliográfica. Ambos os processos de revenido tiveram tempo de permanência de 2 horas. Os lotes eram subdivididos somente antes da operação de revenido, conforme informado em materiais e métodos.

A análise da composição química (%) do lote de amostras de SAE 5120 é apresentada na tabela 5.2.

Tabela 5.2. Composição química do aço SAE 5120 (% em peso)

C	Mn	P	S	Si	Cr
0,17-0,22	0.70-0.90	0,035 máx	0,040 máx	0.15-0.30	0.70-0.90
0,19	0.83	0.026	0.035	0.23	0.82

Os lotes cementados não poderiam passar por reaquecimentos diferentes dos necessários para têmpera e revenido. Esta padronização se fazia necessária para evitar o refino do grão por aquecimentos em série (APPLE 1973) (WISE 2000), que adicionariam mais uma variável no experimento. O recurso de reaquecimentos para refinar o grão melhora propriedades da engrenagem, mas não foi utilizado pelos aspectos custo do processo e de redução de complexidade.

O processo de cementação seguido de têmpera e revenido passa ao final pelo processo de retífica para remover as imperfeições oriundas dos tratamentos térmicos (BOINARDI 2006)(SUGIANTO 2009). A operação de retífica remove 0,08mm de cada face dos dentes. Desta forma, para garantir espessura de camada de 0,65/0,80mm após retifica, as peças deveriam ser cementadas com profundidade de 0,73/0,88mm.

Depois de completado o processo de cementação/têmpera/revenido/retífica, uma amostra de cada lote foi analisada para verificação do atendimento da especificação. A curva de dureza da camada cementada da amostra revenida em 230°C iniciou com 570HV a 0,1mm e finalizou com 479 HV a 0,75mm, apresentando dureza de núcleo de 38HRC (372 HV). A amostra revenida a 400°C apresentou 540 HV a 0,1mm e finalizou 479 HV em 0,65mm, sendo a dureza de núcleo 36 HRC (354 HV). Veja na figura 5.8, na cor azul, o perfil de dureza de uma amostra com dureza de núcleo de 38 HRC (372 HV) revenido em 230°C, e na cor verde, para dureza de núcleo de 36 HRC (354 HV) revenido em 400°C.

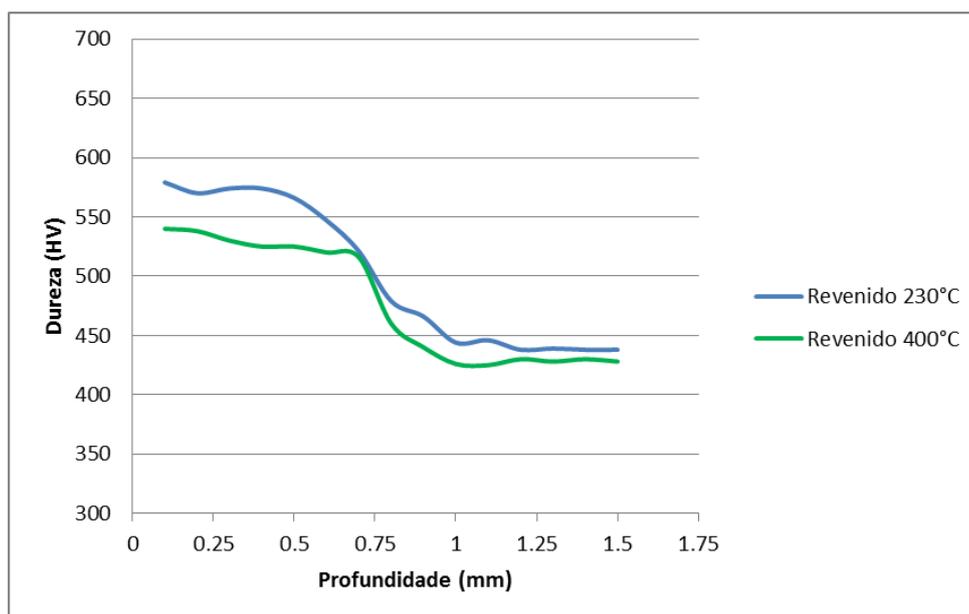


Figura 5.6 Perfil de dureza de uma amostra com dureza de núcleo de 38 HRC (372 HV) revenido 230°C e dureza de núcleo de 36 HRC (354 HV) revenido 400°C

5.2.2 Resultados dos testes com pinhão de SAE 5120 cementado

Conforme descrito em materiais e métodos, três amostras de engrenagens oriundas de cada processo de tratamento térmico foram montadas em mecanismos de direção e submetidas a teste de torque de quebra do pinhão. Após o teste, verificou-se que as fraturas das amostras foram similares e se caracterizavam por um cisalhamento perpendicular aos dentes e ao eixo do pinhão. Imagem do pinhão fraturado na figura 5.7.



Figura 5.7 Imagem do pinhão de aço SAE 5120 cementado com camada 0,75mm rompido no teste

O torque de ruptura dos mecanismos de ambas as temperaturas de revenido não atenderam a especificação mínima de 250 Nm de torque no pinhão. As amostras revenidas à temperatura de 230°C romperam com aproximadamente 190 Nm de torque e 22,5 kN de carga de reação na cremalheira. Já as amostras revenidas com temperatura de 400°C, fraturaram com aproximadamente 210 Nm de torque e 25 kN de carga. Embora os valores de torque especificados para aprovação não tenham sido atingidos, o resultado com as peças cementadas teve um incremento de aproximadamente 40% no torque e na carga aplicada em relação ao resultado verificado com o aço SAE 5140, SAE 8640 e SAE 4340 temperados por indução. A figura 5.8 apresenta a evolução da carga e do torque ao longo do tempo para uma amostra com 38 HRC (372 HV) de dureza de núcleo e revenida em 230°C.

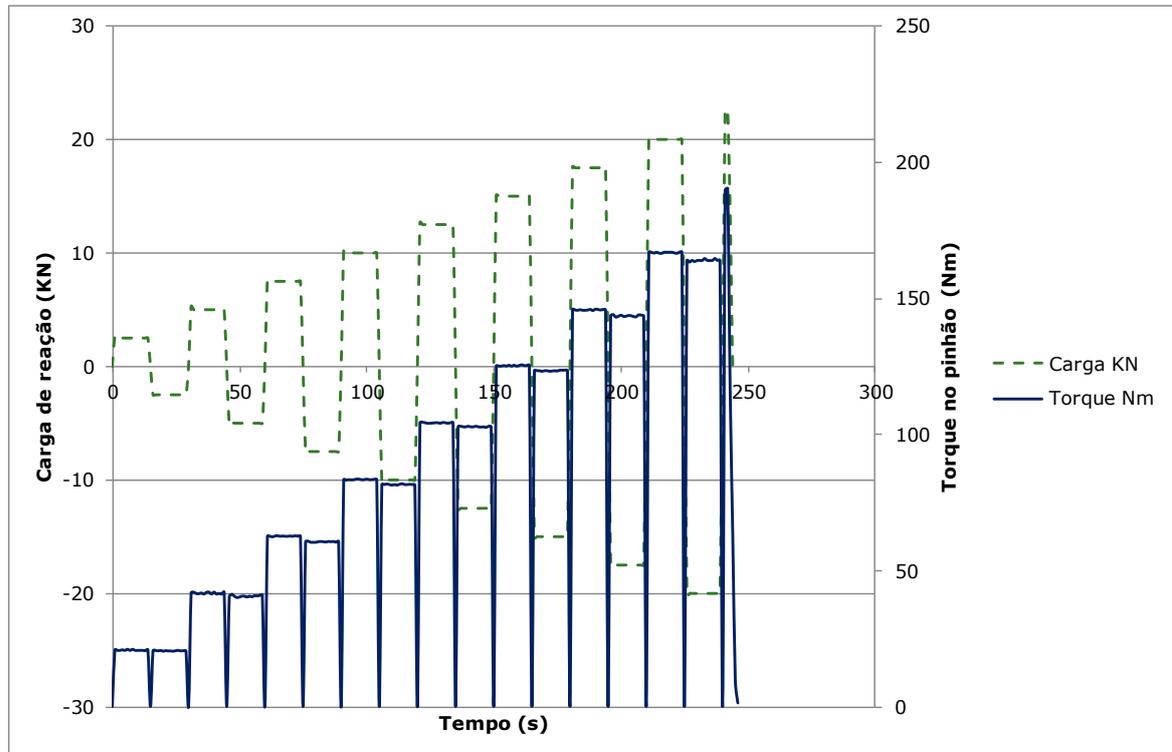


Figura 5.8 Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão cementado de aço SAE 5120 com camada 0,75mm, dureza de núcleo de 38 HRC (372 HV) e temperatura de revenido 230°C

A figura 5.9 apresenta a evolução da carga e torque ao longo do tempo para uma amostra com 36 HRC (354 HV) de dureza de núcleo.

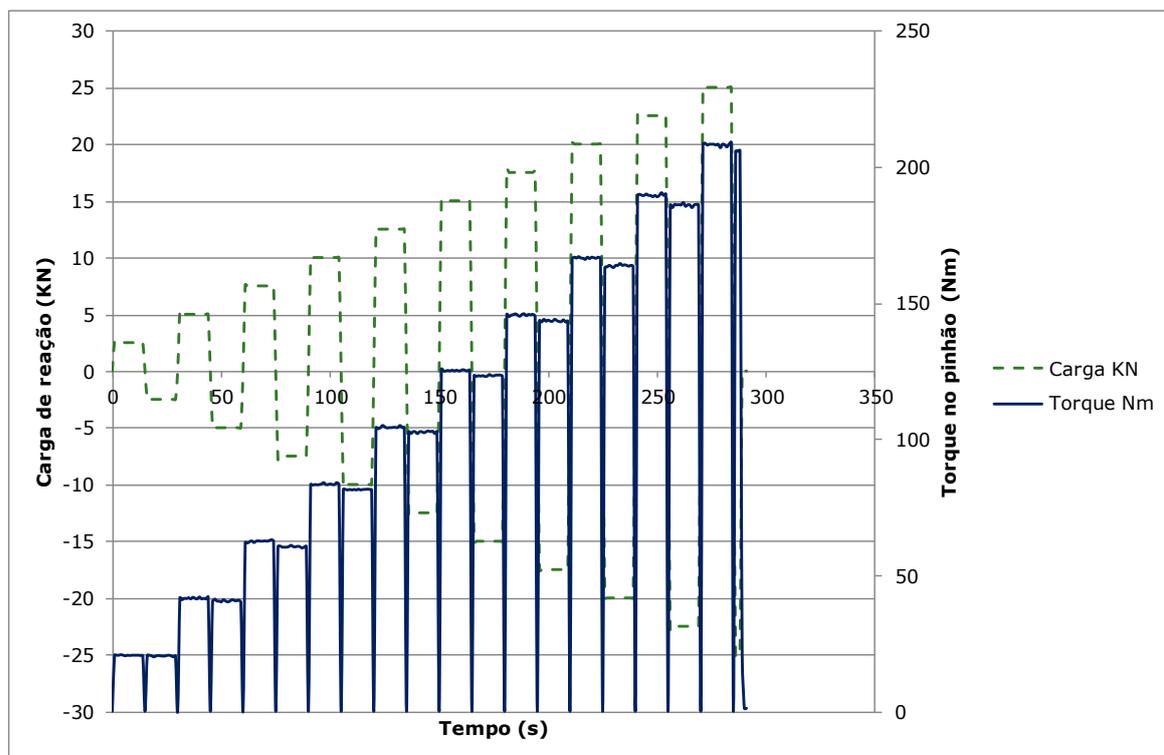


Figura 5.9 Curva de carga de reação na cremalheira e de torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão cementado de aço SAE 5120 com camada 0,65mm, dureza de núcleo de 36 HRC (354 HV) e temperatura de revenido 400°C

A ruptura por cisalhamento ocorreu tanto nos pinhões apenas temperados e revenidos, assim como nas amostras cementadas. Porém, analisando a região de engrenamento, era perceptível que os dentes das peças cementadas tinham se deformado antes do colapso da engrenagem, absorvendo uma carga e torque maior, diferentemente dos pinhões de aço com 0,4% de carbono e temperados por indução, que colapsavam antes de qualquer deformação de seus dentes. Além da melhoria provocada pelo núcleo dúctil, o aumento de capacidade de carga dos pinhões enriquecidos com carbono também é atribuído à tensão residual compressiva na superfície conforme mencionado na revisão bibliográfica. A figura 5.10 apresenta a deformação dos dentes do pinhão cementado e revenido à temperatura de 400°C, com dureza de núcleo de 36 HRC (354 HV). Este pinhão foi o terceiro da amostragem e teve o teste paralisado para análise na carga de 22,5 kN. A engrenagem apresentava sinais de amassamento e trincas nas regiões de início do engrenamento e após o reinício do teste quebrou assim como os outros da amostragem, na carga de 25 kN.



Figura 5.10 Imagem do pinhão cementado com 0,65mm de camada e dureza de núcleo 36 HRC (354HV), após ter rodado teste com carga na cremalheira de 22,5 kN e torque de 190 Nm

As amostras SAE 5120 cementadas e com menor dureza de núcleo devido ao revenido em temperatura maior tiveram uma resistência 10% superior. Tais resultados para peças com dureza de núcleo menores já haviam sido experimentados por Preston (PRESTON 1993) e Sandor (SANDOR 2010) (SANDOR 2006), que registraram, em suas análises, que a variação no número de ciclos nos testes de fadiga tinha correlação com a dureza de núcleo, conforme mencionado na revisão bibliográfica.

5.3 Aumento da região dúctil do pinhão

A melhoria obtida mantendo a parte central do dente do pinhão dúctil foi significativa e obtida pela manutenção do carbono em torno 0,2%, conforme material base. A camada cementada dos pinhões testados foi de 0,75mm, com a espessura do dente de 3,94mm. Considerando ainda que ocorreu difusão de carbono (SUGIANTO 2009) até 0,95mm, o núcleo realmente dúctil ficou reduzido a uma dimensão de 2,04mm. A camada de cementação estabelecida em projeto é apenas um limite para controle e padronização do tratamento na manufatura das peças, sendo que, após o limite estabelecido, a dureza se

mantém elevada, conforme se observa na curva de dureza medida na figura 5.6. Isto revela a formação de martensita, pois o carbono oriundo da cementação reduz gradativamente conforme o aumento da profundidade, até que o teor seja o do material base.

5.3.1 Camada cementada menor

As engrenagens de sistema de direção estão sujeitas a cargas e rotações baixas onde o nível de desgaste é pequeno, viabilizando camadas cementadas menores. Porém, camadas muito pequenas também tem resultado negativo pela sua baixa resistência mecânica. Ambos os limites de espessura de camada provocam redução de performance da engrenagem.

A proposta para as novas amostras foi reduzir a camada cementada para a faixa compreendida entre 0,35 e 0,5 mm após retífica. Além do ganho técnico através da capacidade de carga, esperava-se também uma redução de custo no processo de cementação devido à redução de tempo de processo. A cementação então deveria produzir camada de 0,43/0,58 mm, para que, após a retífica a camada se estabelecesse dentro da especificação de 0,35/0,50 mm. Esta dimensão está coerente com a razão empírica encontrada por Genel (GENEL 1999) e mencionada na revisão bibliográfica. Considerando a espessura do dente 3,94 mm com a razão de Genel temos 0,45mm de espessura de camada.

Repetiu-se o mesmo material SAE 5120 e mesmo lote dos pinhões do teste anterior, a fim de testar apenas a variável profundidade de camada. A especificação usada para a cementação foi 479 HV (0,35 a 0,50 mm). A dureza de núcleo foi especificada em 37 HRC (363 HV) máximo e dureza superficial entre 51 e 55 HRC, com as peças sendo revenidas em 400°C devido ao resultado positivo do teste anterior.

Depois de completado o processo de cementação/têmpera/revenido, uma amostra foi analisada para verificação do atendimento da especificação. A curva de dureza medida na camada cementada da peça iniciou com 540 HV a 0,1 mm e finalizou com 479 HV a 0,45 mm. A dureza superficial foi 51 HRC e a dureza de núcleo de 36 HRC (354 HV). A figura 5.11 mostra o perfil de dureza, a figura 5.12 a macroestrutura e a figura 5.13 a microestrutura encontrada.

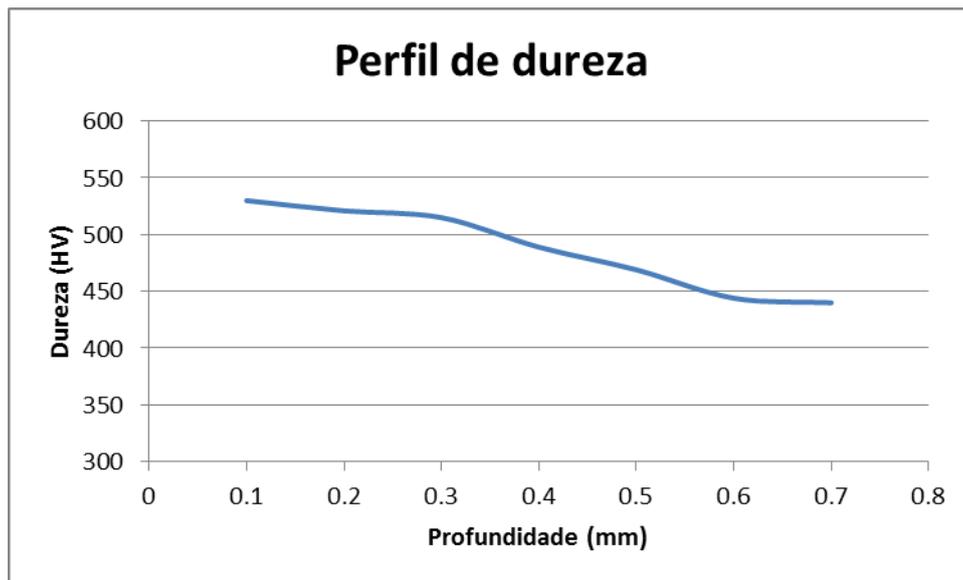


Figura 5.11 Perfil de dureza de uma amostra de aço SAE 5120 cementado com camada 0,45 mm.

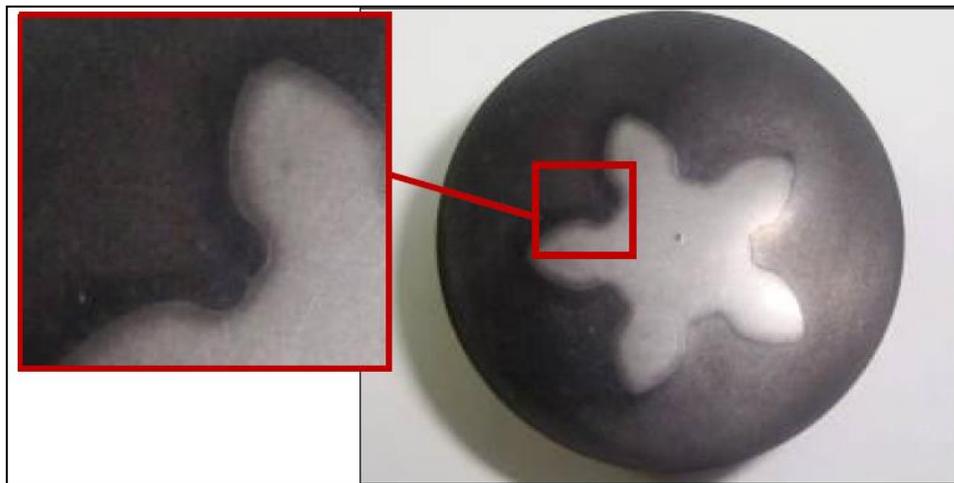


Figura 5.12 Macroestrutura do pinhão SAE 5120 com camada cementada de 0,45mm

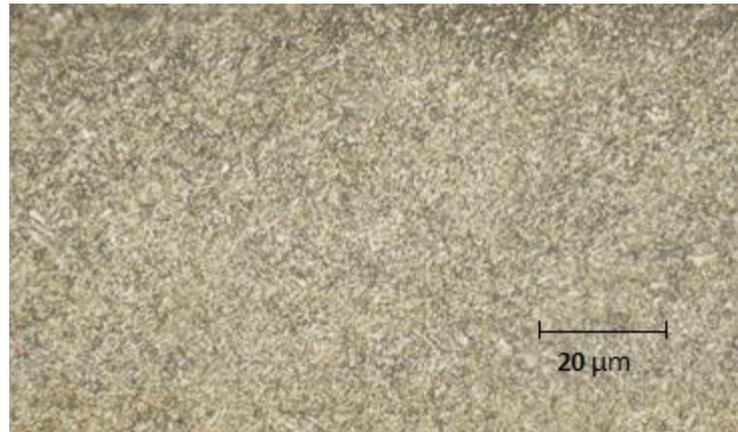


Figura 5.13 A microestrutura da camada cementada do aço SAE 5120

Conforme descrito em materiais e métodos, três amostras de engrenagens oriundas do processo de tratamento térmico acima citado foram montadas em mecanismos de direção e submetidas a teste torque de quebra do pinhão. Após o teste, verificou-se que as fraturas das amostras eram similares e se caracterizavam por deformações pelo esforço de torção e flexão dos dentes. A figura 5.14 mostra um pinhão fraturado no teste.



Figura 5.14 Pinhão de aço SAE 5120 com camada de 0,45 mm fraturado no teste de torção.

Dois pinhões alcançaram a carga de 27,5 kN e torque aproximado de 230 Nm. O terceiro teve o teste paralisado na carga de 26,25 kN para entender o modo de falha. Após o teste com 26,25 kN eram perceptíveis amassamentos na superfície dos dentes no final das regiões de contato da engrenagem menor com a cremalheira. O mecanismo foi então remontado e testado com a carga de 27,5 kN, com a qual não falhou. Então foi novamente desmontado para avaliação. Ele apresentou pequenas trincas em seus dentes. Seguindo a sequência de teste, o pinhão falhou com a carga seguinte, de 28,75 kN, e torque aproximado de 240 Nm.

A figura 5.15 apresenta a evolução da carga e torque ao longo do tempo, de um pinhão que chegou à carga de 27,5 kN.

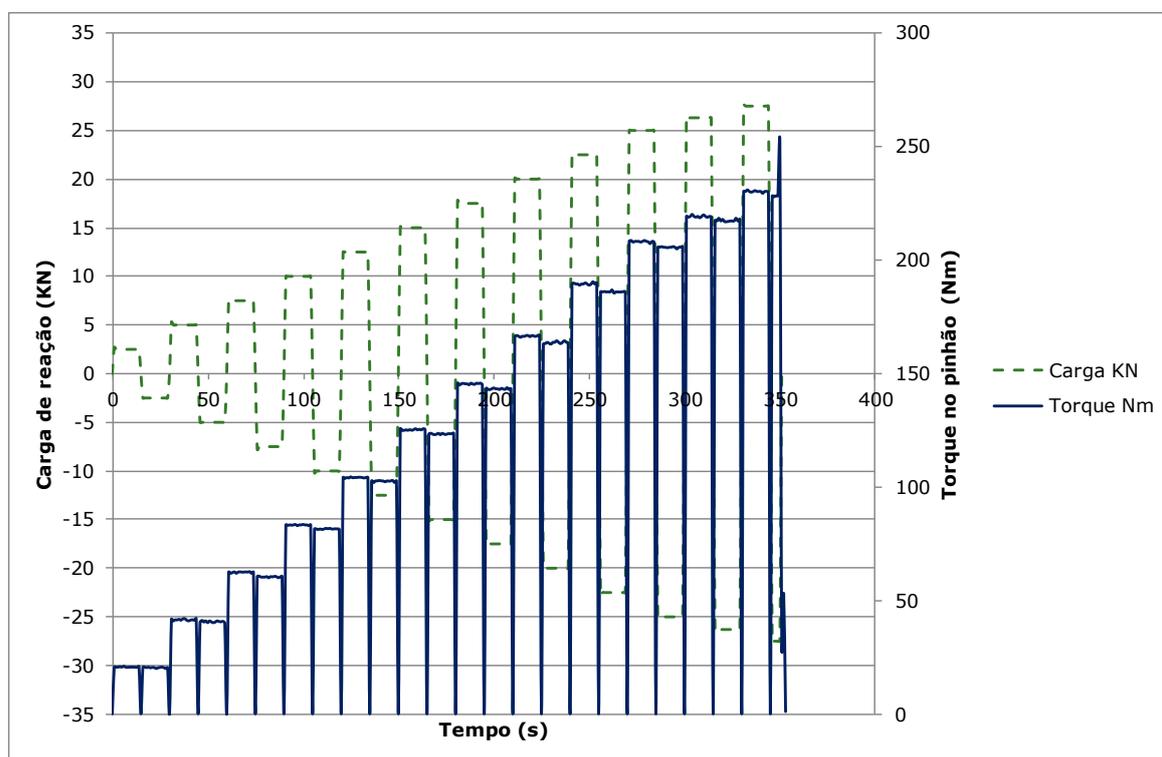


Figura 5.15 Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão de aço SAE 5120 cementado com camada 0,45 mm, que rompeu com 27,5 kN de carga e torque aproximado de 230 Nm

A figura 5.16 apresenta a evolução da carga e torque ao longo do tempo de um pinhão que chegou a carga de 28,75 kN.

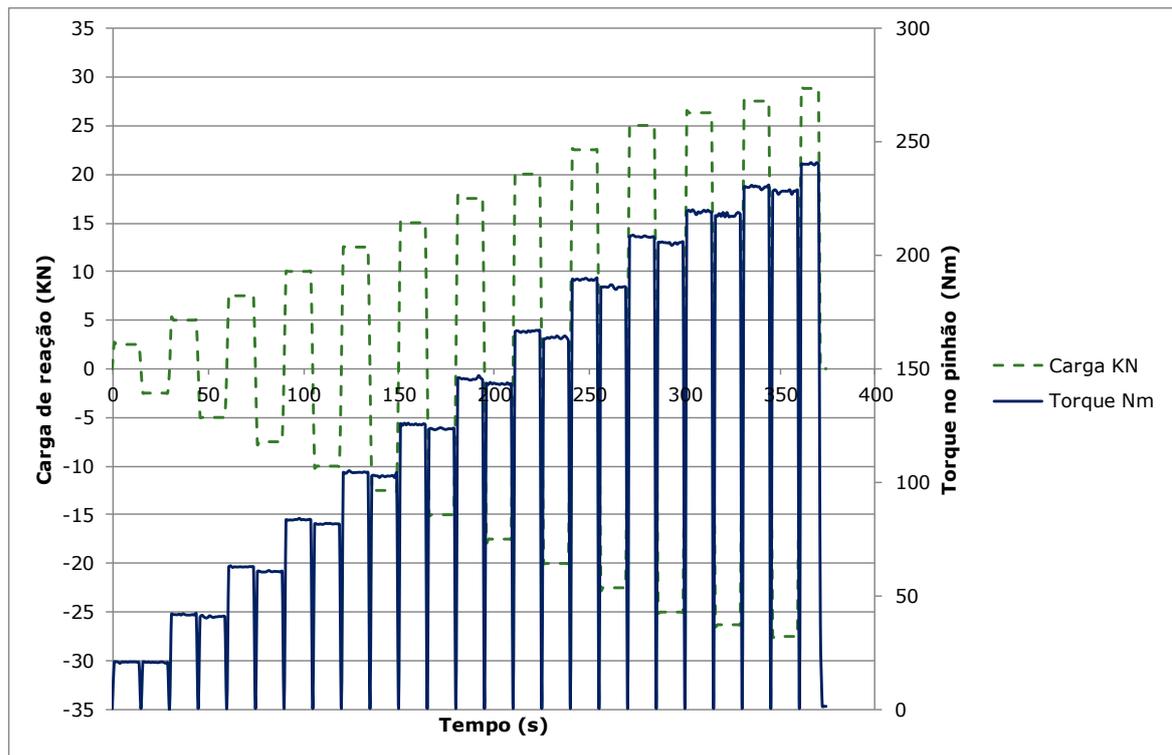


Figura 5.16 Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo, para o teste do pinhão aço SAE 5120 cementado com camada 0,45 mm, que rompeu com 28,25 kN de carga e torque aproximado de 240 Nm

5.4 Material de alta tenacidade

5.4.1 Aumento da tenacidade da engrenagem

Os resultados obtidos aprimorando o tratamento com o material SAE 5120 estavam próximos ao torque de 250 Nm que aprovaria o conjunto. Os testes confirmaram que a engrenagem com o núcleo mais dúctil aumentou a capacidade de carga. O pinhão se deformando e com algum início de ruptura, suportou elevadas cargas em seu dentado.

Nos testes com cementação o material SAE 5120 foi utilizado por ser de fácil obtenção no mercado e de grande utilização na fábrica onde se desenvolveu este trabalho. Entretanto, materiais com teores 1,5 e 2,0% de níquel do aço SAE 4320 são recomendados para aumentar a tenacidade de componentes (WISE 2000) (DOSSETT 2006), conforme mencionado na revisão bibliográfica.

Amostras de aço SAE 4320 partindo de barras, foram produzidas amostras com a mesma especificação de cementação anteriormente usada para o aço SAE 5120, camada de 479 HV (0,35 a 0,50 mm), com dureza de núcleo máxima de 37 HRC (363 HV) e dureza superficial entre 51 e 55 HRC.

5.4.2 Resultados dos testes com pinhão de SAE 4320 cementado

Os pinhões de SAE 4320 passaram pelo mesmo processo dos outros pinhões testados e já mencionado em materiais e métodos. Verificou-se então dificuldade para manter a dureza de núcleo no máximo em 37 HRC (363 HV). Os diversos lotes fabricados e revenidos na temperatura de 400°C ficaram com a dureza de núcleo entre 38 e 40 HRC (372 e 392 HV), então se optou por testar com a dureza de núcleo nesta faixa. As demais características das amostras testadas eram: camada cementada da peça analisada iniciou com dureza de 560 HV a 0,1 mm e finalizou com 479 HV a 0,45 mm. A dureza superficial foi 53 HRC e a dureza de núcleo de 38 HRC (372 HV). A figura 5.17 mostra o perfil de dureza medida no pé do dente.

A análise da composição química (%) do lote de amostras do aço SAE 4320 é apresentada na tabela 5.3.

Tabela 5.3. Composição química do aço SAE4320

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
0,17-0,22	0,45-0,65	0,035 máx	0,040 máx	0,15-0,35	0.40-0.60	1,65-2,00	0.20-0.30
0,19	0.57	0.029	0.032	0.31	0.52	1.73	0.27

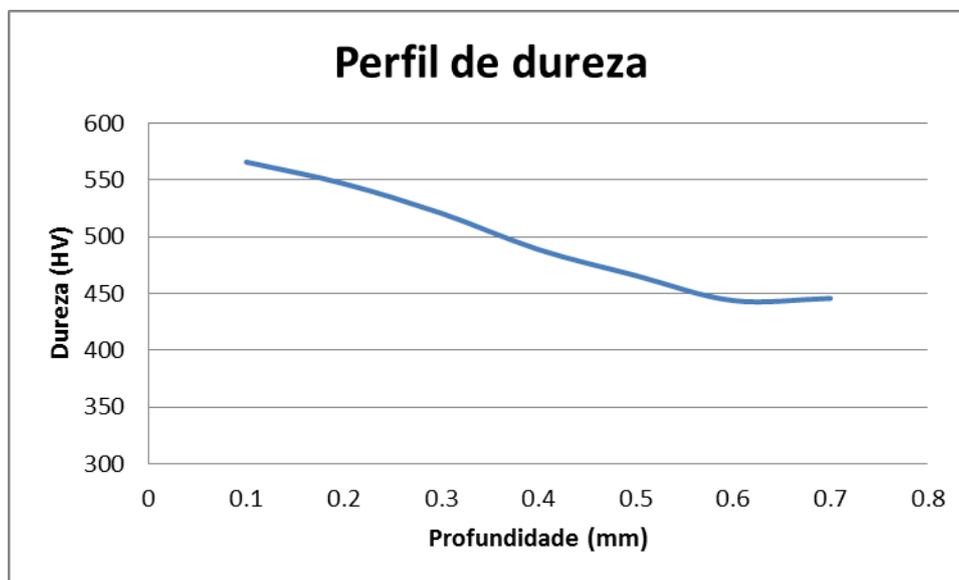


Figura 5.17 Perfil de dureza do aço SAE 4320 com camada cementada de 0,45 mm e revenido em 400°C.

As três amostras testadas chegaram à carga de 30 kN e torque de 250 Nm sem fratura, aprovando esta configuração. Dois mecanismos prosseguiram o teste sem interrupção e ambos quebraram com a carga de 31,25 kN e aproximadamente 260 Nm de torque. Os pinhões apresentaram rompimento perpendicular ao seu eixo, semelhante aos anteriormente testados. Porém, nos pinhões fraturados do último material um dente havia sido arrancado na sua base, e os demais dentes estavam com grandes trincas semelhantes às que provocaram o arrancamento de um deles.

Como padronizado nos testes anteriores e descrito em materiais e métodos, o terceiro mecanismo foi desmontado após o teste com 30 kN e 250 Nm. O pinhão apresentou deformações e princípio de trincas em todas as bases dos dentes, semelhante aos pinhões fraturados do mesmo lote. As trincas nos dentes se formaram pelo esforço de flexão. O pinhão ainda estava funcional, por isso, após a análise o teste prosseguiu e a

engrenagem quebrou exatamente como os seus iguais, na carga de 31,25 kN e aproximadamente 260 Nm. A figura 5.18 mostra o pinhão após rodar com 30 kN.



Figura 5.18 Imagem do pinhão de aço SAE 4320 cementado com 0,45 mm de camada, após ter rodado com carga de 30 kN e 250 Nm.

A figura 5.19 apresenta a micrografia da camada de uma amostra do mesmo lote, que atendeu ao requisito do teste de torque de quebra do pinhão.



Figura 5.19 A microestrutura da camada de cementada do aço SAE 4320

A figura 5.20 apresenta a evolução da carga e torque ao longo do tempo de um pinhão que chegou à carga de 31,25 kN.

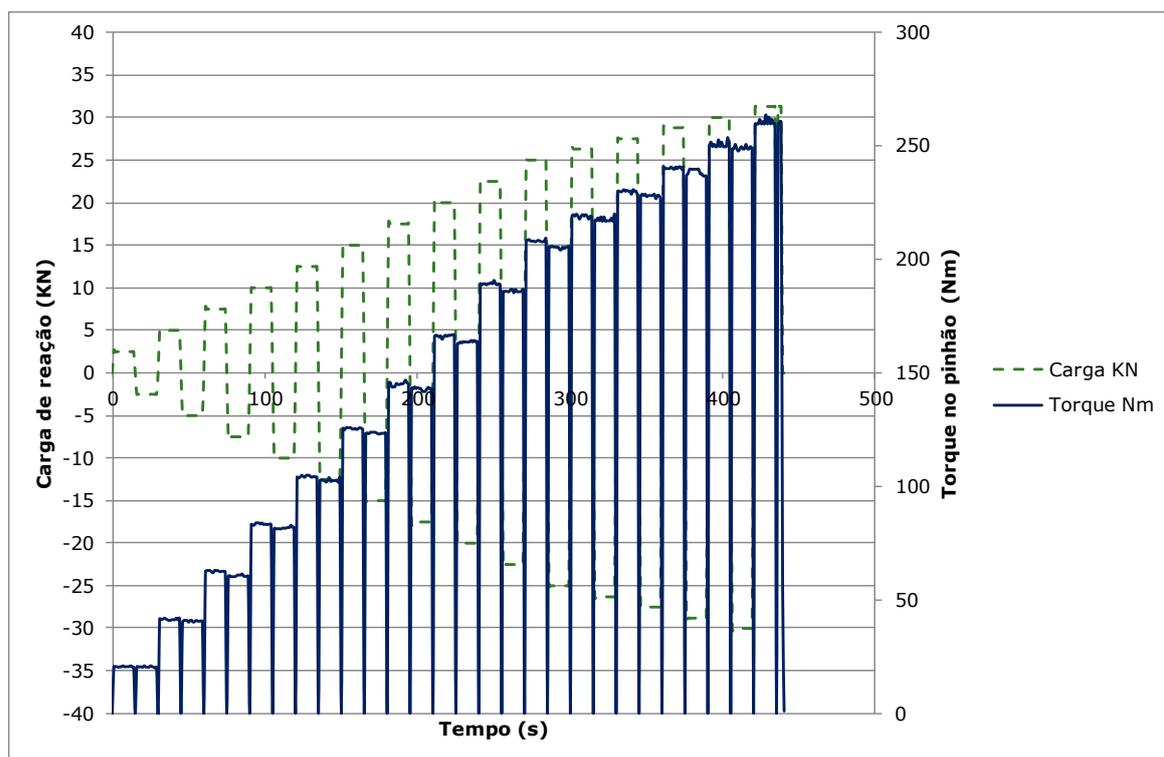


Figura 5.20 Curva de carga de reação na cremalheira e torque no pinhão ao longo do tempo para o teste do pinhão do aço SAE 4320 e revenido em 400°C.

5.5 Resumo dos resultados

A tabela 5.4 apresenta todos os resultados encontrados neste trabalho, sendo que apenas a última condição com aço SAE 4320 foi aprovada no teste “torque de quebra do pinhão”. O teste com SAE 5120 e 0,45 mm de espessura de camada tiveram dois resultados, duas amostras chegando ao torque de 230 Nm e uma aos 240 Nm.

Tabela 5.4 Resumo do resultado dos testes:

Aços	Camada cementada (mm)	Camada temperada (mm)	Temperatura revenido (°C)	Dureza em 0,1mm da superfície (HV)	Dureza núcleo (HRC)	Carga da quebra (kN)	Torque da quebra (Nm)
SAE 5140	não aplicável	2	-	622	-	17,5	150
SAE 8640	não aplicável	2	-	-	-	17,5	150
SAE 4340	não aplicável	2	-	-	-	17,5	150
SAE 5120	0,75	não aplicável	230	570	38	22,5	190
	0,65	não aplicável	400	520	36	25	210
	0,45	não aplicável	400	550	36	2 - 27,50 1 - 28,75	2 - 230 1 - 240
SAE 4320	0.45	não aplicável	400	530	38	31,75	260

5.6 Análise do comportamento em fadiga

A fratura verificada no teste com as últimas amostras permite fazer uma estimativa com relação aos limites de fadiga do par engrenado. Com a fratura caracterizada pelo rompimento por flexão dos dentes nas suas bases (BOINARDI 2006), tem-se a ruptura ocorrendo devido à tensão de tração no pé do dente. Seguindo a metodologia de cálculo proposta por Henriot (HENRIOT 1968) e apresentada na revisão bibliográfica, a força trativa e a tensão no pé do dente são dados por:

$$F_t = 2000 \cdot T / 2 \cdot r, \text{ (HENRIOT 1968) onde:}$$

- T é o torque na engrenagem;
- r é o raio primitivo.

O torque máximo de trabalho é 40Nm, e o torque suportado pelo pinhão foi 250 Nm, sendo então a razão igual a 0,16. Com este resultado pode-se considerar vida infinita para os pinhões conforme o último o nível aprovado, visto que a tensão de tração na base do dente é diretamente proporcional ao torque aplicado. “Na prática, admite-se com boa aproximação, que a razão entre o limite de resistência à fadiga e o limite de resistência à tração é aproximadamente 0,5” (GARCIA 2000).

O requisito do teste de torque de quebra do pinhão aprova os itens do mecanismo de direção com uma segurança para fadiga bem mais elevada que os limites teóricos. O aumento de capacidade de carga obtido com as melhorias implantadas confere ao mecanismo a capacidade de absorver elevados esforços (comparados aos de uso normal da aplicação) sem a quebra e, por consequência, mantém uma grande segurança para os limites de resistência à fadiga.

5.6 Análise quantitativa de processo

Os processos de cementação/têmpera/revenido com o aço SAE 4320, atenderam aos requisitos de aprovação no teste de torque do mecanismo de direção. No início deste trabalho, iniciou-se com o aço SAE 5140 temperado e revenido por indução, que tem custos menores, tanto de material quanto de processo. A mudança de processo de tratamento teve ainda uma consequência inesperada, o pinhão, que possui um diâmetro médio de 19mm, e um comprimento de 212mm, empenava após o tratamento térmico de cementação/têmpera/revenido. O batimento das peças ficava em média 0,7 mm no centro do corpo, sendo 0,1mm o máximo aceitável para não comprometer as características geradas no processo de retífica. Adotou-se então o processo de desempenho após tratamento térmico, que aumentou ainda mais o custo.

A mudança de tratamento térmico de indução para cementação aumentou o custo do pinhão em 20%, mas o atendimento do requisito do teste de torque de quebra do pinhão era mandatório para o projeto e condição de negócio. Por isto, a montadora é atualmente abastecida com mecanismos montados com pinhões de aço SAE 4320, camada cementada de 479 HV (0,35 a 0,50), dureza superficial de 51/55HRC, e dureza de núcleo 40 HRC (392 HV) máximo, desenvolvidos pelo trabalho aqui apresentado. Reduções de custo em outras peças e renegociações de preço baseadas nas mudanças de tecnologia de processo foram realizadas para manter o mesmo nível de negócio.

6 CONCLUSÕES

As adequações do tratamento térmico e material da engrenagem do mecanismo de direção aumentaram a resistência no teste de torção em 67%. Os testes mostraram que grandes melhorias no desempenho das engrenagens podem ser obtidas com a adequação do tratamento térmico ou termoquímico às dimensões, aplicação e teste da peça. Um notável aumento de capacidade de carga da engrenagem foi obtido com a manutenção do núcleo dúctil e a otimização da relação entre a espessura da camada cementada com a dimensão do núcleo que priorizavam a ductilidade, assim como, a utilização do aço com teor elevado de níquel que aumenta a tenacidade. Todos estes fatores levaram ao atingimento do requisito mandatório para o mecanismo de direção de suportar a sequência de carga até os 250 Nm sem falha funcional.

A maior capacidade de carga do pinhão obtida neste trabalho proporciona ganhos para a segurança veicular. O automóvel suportará um nível de impacto nas rodas semelhante ao que ocorre em determinados acidentes, e se manterá funcional, permitindo o controle direcional do veículo.

7 PROPOSTA PARA PRÓXIMO TRABALHO

No mercado automobilístico os fornecedores de autopeças são continuamente demandados por reduções de custo. Estas demandas normalmente geram ações de pesquisas e muitas vezes investimento em novas tecnologias, e são fundamentais para a sustentabilidade do negócio pela competitividade de produtos e processos.

Neste cenário, a proposta para o novo trabalho objetiva redução de custo no processo de fabricação do pinhão do mecanismo de direção. Em função da alta temperatura para execução da cementação e da têmpera do pinhão, os seus dentes sofrem deformações no flanco útil e necessitam de uma operação de retífica posterior ao tratamento (BOINARDI 2006) (SUGIANTO 2009). Além disto, a forma esbelta da peça faz com que ela tenha algum nível de empenamento prejudicial à próxima operação de retífica e se não for corrigida para os testes funcionais e no desempenho perceptível pelo usuário no veículo. Ações sobre o empenamento foram muito trabalhadas durante o desenvolvimento. Diversas disposições e acondicionamentos das peças durante o tratamento termo-químico foram testados na fase de desenvolvimento, mas nenhuma eliminou a necessidade de controle 100% sobre as peças e operação de desempenho em praticamente 60% delas. A proposta é utilizar nitretação e fazer todo o desenvolvimento e adequação deste processo ao pinhão. O processo proposto, não necessita alcançar a temperatura de austenitização, e assim, evita as indesejáveis deformações nos dentes e empenamento do corpo do pinhão.

Na comparação direta de custos, a nitretação é mais cara que a cementação, porém após a primeira, não são necessários os processos de retífica e desempenho para correção de

forma da engrenagem, gerando redução de investimento e redução no custo total da peça pela eliminação dos processos subsequentes.

8 REFERÊNCIAS

APPLE C.A., KRAUSS G. **Microcracking and Fatigue in a Carburized Steel.** Metallurgical Transactions, Volume 4, p.1195, May 1973.

BAYRAKCEKEN H. **Failure analysis of an automobile differential pinion shaft.** Engineering Failure Analysis, Volume 13, p.1422-1428, 2006.

BOINARDI M., D'ERRICO F., TAGLIABUE C. **Influence of carburizing and nitriding on failure of gears – A case study.** Engineering Failure Analysis, Volume 13, p.312-339, 2006.

CANALE L., MESQUITA R., TOTTEN G. **Sources of failures in carburized and carbonitrided components.** ASM International, Failure Analysis of Heat Treated Steel Components, p.177-240, 2008.

CHANDLER H. **Heat treater's guide: Practices and Procedures for Irons and Steels.** ASM International, p.342 e 397, 1994.

DHB COMPONENTES AUTOMOTIVOS SA. Manual de treinamento de sistema de direção, Porto Alegre, 2001.

DOSSETT J., BOYER H. **Practical Heat treating – Second Edition.** ASM International, 2006.

FARFÁN S., RUBIO G. C., CERVANTES H.T., MESMACQUE G. **High cycle fatigue, low cycle fatigue and failure modes of a carburized steel.** International Journal of Fatigue, Volume 26, p.673-678, 2004.

GARCIA A., SPIM J.A., DOS SANTOS C.A. **Ensaaios dos Materiais**, 1º Edição, Editora LTC, 2000.

GENEL K., DERMIKOL M. **Effect of case depth on fatigue performance of AISI 8620 carburized steel.** Journal of Fatigue, p.207-212, 1999.

GENEL K. **Estimation method for fatigue limit of case hardened steel.** Surface and coat technology, Volume 194, p.91-95, 2005.

HAYDEN H., FLOREEN S. **The ductility and toughness of Iron-Nickel alloys in liquid mercury.** Philosophical magazine. Volume 20, issue 163, 1969.

HENRIOT G. **Traité théorique et Pratique des engrenages.** 4ª Edição. Paris: Dunod, Volume 1, 1968.

HERRING D. H. **The Embrittlement Phenomena in Hardened & Tempered Steel.** <<http://vacaero.com/information-resources/the-heat-treat-doctor/630-the-embrittlement-phenomena-in-hardened-a-tempered-steel.html>> Acesso em 20 Mar. 2014

HOLM T. **Gas Carburizing and Carbonitriding. Furnace Atmospheres 1.** AGA AB.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 6336**, 2006

JIANPING J., GUANG M. **Investigation on the failure of the gear shaft connected to extruder.** Engineering failure analisys. Volume 15, p. 420-429, 2006.

Materials Engineer. Alloying of Steels. Metallurgical Consultants. <<http://www.materialsengineer.com/E-Alloying-Steels.htm>> Acesso em 20 Mar. 2012.

Nickel Institute (INCO). Six Reasons for Specifying Nickel Carburizing Steels (1203). <http://www.nickelinstitute.org/TechnicalLiterature/INCO%20Series/1203_SixReasonsForSpecifyingNickelCarburizingSteels.aspx> Acesso em 13 Abr. 2014.

NORTON R. **Projeto de máquinas. Uma abordagem integrada.** 2ª Edição. Bookman, 2004.

PRESTON S. **Fatigue crack Initiation and Growth from a Gas carburized surface.** Materials Transactions, JIM, Volume.34, p.27 - 32, 1993.

SANDOR L., FERREIRA I. **Uma metodologia para a avaliação dos gradientes de tenacidade à fratura ao longo da camada cementada do aço Aço SAE 5115.** Revista Matéria, Volume 11, p.111 – 124, 2006.

SANDOR L., POLITORI I., GONÇALES C., UEHARA A., LEAL C., SATO M., FERREIRA I. **Fatigue crack propagation in a Nine steel, Type SAE43XX, from 0.2 to 1.00% C, for the simulation of fatigue behavior in a carburized layer of SAE4320.** Procedia Engineering, Volume 2, p.735-742, 2010.

STROHAECKER T. **Mecânica da fratura**, PPGEM:UFRGS, 2005.

SUGIANTO A., NARAZAKI M., KOGAWARA M., SHIRAYORI A., KIM S.Y., KUBOTA S. **Numerical simulation and experimental verification of carburizing-quenching process of SCr420H steel helical gear.** Journal of materials processing technology. Volume 209, p.3597-3609, 2009.

TOTTEN G.E., BATES C.E., CLINTON A. **Handbook of Quenchants and Quenching Technology ASM International**, 1993.

WISE J.P., KRAUSS G., MATLOCK D.K. **Microstructure and fatigue resistance of carburized steel.** ASM International. 20th ASM Heat Treating Society Conference Proceedings, 2000.