

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Claudio José Leitão
..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 23 / 06 / 2010
.....
Claudio José Leitão
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Claudio José Leitão

**Efeito da Nitretação e da Cementação
na Deformação de Peças de
Aços Carbono e Baixa Liga**

Campinas, 2010.

Claudio José Leitão

Efeito da Nitretação e da Cementação na Deformação de Peças de Aços Carbono e Baixa Liga

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof^o Dr. Paulo Roberto Mei

Campinas
2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

L535e Leitão, Claudio José
 Efeito da nitretação e da cementação na deformação
 de peças de aços carbono e baixa liga / Claudio José
 Leitão. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

 Orientador: Paulo Roberto Mei.
 Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

 1. Nitruração. 2. Processo de endurecimento
 superficial. 3. Deformação. 4. Aço-carbono. 5. Ligas de
 aço. I. Mei, Paulo Roberto. II. Universidade Estadual de
 Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
 Título.

Título em Inglês: Effect of nitriding and carburizing on the distortion of carbon
 and low alloy steels

Palavras-chave em Inglês: Nitriding, Process of hardening, Deformation, Carbon
 steel, Alloy steel

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestrado em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Maria Clara Filippini Ierardi, Rodolfo Libardi

Data da defesa: 23/06/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

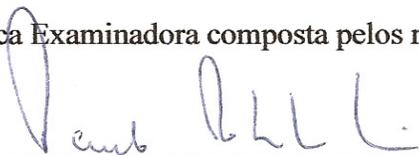
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Efeito da Nitretação e da Cementação
na Deformação de Peças de
Aços Carbono e Baixa Liga**

Autor: **Claudio José Leitão**
Orientador: **Profº Dr. Paulo Roberto Mei**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Paulo Roberto Mei, Presidente
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Maria Clara Filippini Ierardi
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Rodolfo Libardi
Universidade Metodista de Piracicaba

Campinas, 23 de junho de 2010

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ter sido concluído sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

À Andrea Leitão, minha amada esposa, por ser a muitas vezes meu “braço forte” e minha fonte de inspiração sobre o verdadeiro sentido de luta. Suas palavras de incentivo foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

A meus amados filhos, Eduardo Leitão e Pedro Leitão, um presente divino em minha existência.

A meu querido pai, Djalma Leitão (in memoriam) e a minha querida mãe Odette Leitão, que sempre estarão presentes na minha vida. Deixem-me sempre continuar em suas vidas, pois é dentro do meu peito que os carrego!

Ao meu orientador, Professor Dr. Paulo Roberto Mei, os maiores e mais sinceros agradecimentos. Em primeiro lugar, seu livro “Aços e Ligas Especiais”, despertou em mim uma paixão por tratamentos térmicos, levando-me inclusive a abertura de minha empresa, a Supertrat, em 1994. Sua confiança e orientação foram capazes de me fazer trilhar por um crescimento profissional que julgava impossível em tão pouco tempo.

Ao Professor Dr. Rodolfo Libardi, diretor da Lab-Teste, por me incentivar, apoiar e orientar no desenvolvimento do projeto.

Aos meus sócios Adilson Mestre Moreno e Enzo Sallati, que me ajudaram com os recursos de nossas empresas (Grupo ACE-Supertrat).

Ao programa de pós-graduação da Unicamp, pois me permitiu usufruir de toda sua excelência em ensino e pesquisa, com especial agradecimento a todo corpo docente.

Acima de tudo, agradeço a Deus!

“Nada detém um homem que quer chegar lá.
Os obstáculos que surgem servem apenas para
aumentar sua capacidade de realização, e o tornam
mais forte para alcançar o que quer que seja.”

Eric Butterworth

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo demonstrar que o processo de cementação, utilizado para o tratamento de componentes que necessitam de alta dureza superficial e de grande resistência ao desgaste pode, em alguns casos, ser substituído pelo processo de nitretação, trazendo algumas vantagens, entre as quais, a redução dos custos de fabricação. Este estudo aborda dados comparativos sobre as deformações geradas, durezas, e estruturas obtidas em corpos de prova tipo Navy “C” e corpos de prova tipo “Engrenagens” submetidas a processos de cementação, beneficiamento, nitretação gasosa e nitretação líquida.

Foram estudados outros fatores importantes do processo de nitretação, tais como, o efeito do beneficiamento prévio à usinagem e dos elementos de liga em peças de aços com 0,4 % de carbono, submetidos à nitretação gasosa e a verificação do efeito da nitretação líquida e da nitretação gasosa na espessura da camada branca formada, no perfil de dureza e na deformação de peças de aços carbono e baixa liga.

Os resultados obtidos mostram que os corpos de prova que passaram pelos processos de nitretação, chegaram a deformar cerca de dez vezes menos do que os processos de cementação, e que o custo do corpo de prova “engrenagem” que passou pelo processo de nitretação, ficou cerca de 40 % mais barato do que no processo de cementação.

Palavras chave: **Nitretação, cementação, deformação, aços carbono, aços baixa liga.**

Abstract

LEITÃO, Claudio J., Effect of nitriding and carburizing on the distortion of carbon and low alloy steels, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010. **xxx**. M. Sc. dissertation

This work demonstrates that the carburizing treatment applied to components that require high surface hardness and wear resistance, in some cases, can be replaced by nitriding, bringing some advantages like the reduction of manufacturing costs. This study obtained data about distortion, hardness and microstructures in Navy “C” samples and gears after carburizing (fooled by hardening and tempering), gas nitriding and liquid nitriding.

The use or not of hardening and tempering prior to machining was studied in samples submitted to gas nitriding process. Also the effect of alloying elements (chromium and molybdenum) on the thickness of white layer, case depth and distortion of 0.4 %C steel samples submitted to gas nitriding and liquid nitriding were studied.

The results showed that nitrided samples presented up to ten times less distortion than carburized samples, and the cost of gear manufacturing using nitriding can be up to 40% cheaper than using carburizing.

Key Words: Nitriding, carburizing, distortion, carbon steels, low alloy steels.

Lista de Ilustrações

2.1	Diagrama de equilíbrio Fe-N	4
2.2	Esquema típico das estruturas de uma camada nitretada	5
2.3	Influência da dureza do núcleo no perfil de dureza Vickers do aço 4140 nitretado a gás por 25 horas	6
2.4	Influência do teor de carbono sobre o coeficiente de difusão de nitrogênio a temperaturas de 450, 520 e 570 °C	7
2.5	Camada nitretada de aço carbono e o seu perfil de dureza	8
2.6	Influência da temperatura de nitretação na espessura da camada branca	9
2.7	Camada nitretada em aços ligados e seu perfil de dureza	11
2.8	Efeito de certos elementos de liga sobre a dureza após a nitretação	12
2.9	Influência de certos elementos de liga sobre a profundidade total nitretada	12
2.10	Profundidade da camada em função do tempo de nitretação a gás, à 525 °C	13
2.11	Influência da temperatura na profundidade nitretada do aço 7140	13
2.12	Efeito da nitretação na resistência à fadiga de um aço 15B21H	16
2.13	Nitrogênio atômico obtido pela dissociação térmica de amônia, e sua difusão na superfície do aço	18
2.14	Microestrutura típica da nitretação gasosa de um aço contendo 0,4% C, 1,6% Cr, 0,35% de Mo, e 1,13% Al	20
2.15	Microestruturas de um aço 4140 beneficiado, após nitretação de simples estágio e duplo estágio	21
2.16	Fotos de um forno de nitretação gasosa	22
2.17	Forno de retorta vertical	22
2.18	Forno tipo sino	23
2.19	Esquema do processo Tenifer	26
2.20	Comparação relativa sobre a quantidade da poluição gerada pelos processos de nitrocarbonetação líquida e em banho de sal	27
2.21	Dente de engrenagem distorcido após cementação, têmpera e revenimento	28
2.22	Comparativo do gradiente de dureza do dente de uma engrenagem nitretada (aço Nitralloy 135M) e de outra cementada e temperada (aço SAE 8620)	29
2.23	Custo de fabricação de uma engrenagem cementada, temperada e revenida	30
3.1	Fluxograma de atividades desenvolvidas para corpos de prova Navy “C”	32

3.2	Fluxograma de atividades desenvolvidas para corpos de prova “engrenagens”	33
3.3	Dimensões dos materiais recebidos para a confecção dos corpos de prova Navy “C” dos aços 1045, 4140 e 8620	31
3.4	Dimensões do material forjado para confecção das engrenagens de aços 8620 e 4140	31
3.5	Cortes efetuados nas engrenagens para a preparação metalográfica	35
3.6	Corte efetuado nos corpos de prova Navy “C” para a preparação metalográfica	35
3.7	Fragmento do corpo de prova navy “C”, utilizado para avaliações microestruturais da camada nitretada, perfil de dureza Vickers	36
3.8	Fragmento da engrenagem utilizado para avaliações microestruturais da camada nitretada, perfil de dureza Vickers	36
3.9	Corpos de prova de aços 1045, 4140 e 8620 antes do início do processo de beneficiamento	38
3.10	Engrenagem forjada de aço 4140 antes do tratamento térmico 1 (TT1).	38
3.11	Esquema do processo de beneficiamento (TT1) dos corpos de prova antes da usinagem e das engrenagens após forjamento	38
3.12	Diagrama ITT do aço 4140	39
3.13	Diagrama CCT do aço 4140	39
3.14	Diagrama ITT do aço 1045	40
3.15	Diagrama CCT do aço 1045	40
3.16	Diagrama ITT do aço 8620	41
3.17	Diagrama CCT do aço 8620	41
3.18	Esquema do processo de cementação, têmpera e revenimento (CTR) dos corpos de prova Navy “C” e da engrenagem do aço 8620	42
3.19	Corpos de prova Navy “C” e da engrenagem de aço 8620 antes do processo de cementação	42
3.20	Corpos de prova Navy “C” dos aços 1045, 4140, antes da têmpera e revenimento (TT2)	43
3.21	Esquema do processo de têmpera e revenimento (TT2) dos corpos de prova Navy “C” dos aços 4140 e 1045	43
3.22	Esquema do processo de nitretação líquida dos corpos de prova Navy “C” dos aços 1045, 8620 e 4140, e da engrenagem de aço 4140	44
3.23	Corpos de prova Navy “C” sendo colocados no banho de nitretação líquida	44
3.24	Disposição dos corpos de prova navy “C” na bandeja a ser utilizada no processo de nitretação gasosa.	46
3.25	Disposição da engrenagem de aço 4140 na carga do forno de nitretação gasosa	46
3.26	Desenho do corpo de prova tipo Navy “C”	47

3.27	Desenho do corpo de prova “engrenagem” de 75 dentes	47
3.28	Dimensões inspecionadas após usinagem dos corpos de prova Navy “C”	48
3.29	Máquina tridimensional utilizada nas medições com software Geopack da empresa Usicomp	48
3.30	Máquina medidora de engrenagens da empresa Eacial	49
3.31	Distância entre as impressões Vickers para as medidas de microdureza.	51
	PARTE I – CORPOS DE PROVA NAVY “C”	52
4.1	Inclusões e microestruturas das barras de aços utilizados, no estado de fornecimento	53
4.2	Microestruturas do núcleo dos aços utilizados após o beneficiamento (TT1).	54
4.3	Médias das deformações percentuais obtidas nos corpos de prova Navy “C” de aço 8620 nas diferentes cotas (A, B, C, D e E)	57
4.4	Médias das deformações percentuais obtidas, nos aços 1045 e 4140 após diferentes processos de nitretação, nas diferentes cotas (A, B, C, D e E)	58
4.5	Perfil de microdurezas de amostras de corpos de prova Navy “C” após a nitretação e a cementação	61
4.6	Valores da camada de difusão (NHT) para cada tipo de aço e processo utilizado	62
4.7	Microestruturas do aço 8620 observadas após diferentes tratamentos termoquímicos	63
4.8	Microestruturas do aço 8620 beneficiado e nitretado a gás (NGB)	64
4.9	Microestrutura do aço 8620 beneficiado e nitretado por meio líquido (NLB)	64
4.10	Microestruturas observadas após nitretação do aço 1045	65
4.11	Microestrutura do aço 1045 beneficiado e nitretado a gás (NGB)	65
4.12	Microestrutura do aço 1045 beneficiado e nitretado por meio líquido (NLB).	66
4.13	Microestrutura observada após nitretação no aço 4140	66
4.14	Microestrutura do aço 4140 beneficiado e nitretado a gás (NGB).	67
4.15	Microestrutura do aço 4140 beneficiado e nitretado por meio líquido (NLB)	67
4.16	Espessura da camada branca para os aços 8620, 1045 e 4140 submetidos a diferentes processos de nitretação	68
4.17	Espessura da camada branca versus dureza superficial, para os diferentes aços e processos de nitretação utilizados	69
4.18	Espessura da camada branca versus espessura da camada de difusão (NHT) para os diferentes aços e processos de nitretação utilizados	69
4.19	Espessura da camada branca versus deformação encontrada na medida “A” dos corpos de prova Navy “C”, para os diferentes aços e processos de nitretação utilizados	70

PARTE II ENGRENAGENS	72
4.20 Microestruturas das amostras do aço 4140 após o beneficiamento e antes da nitretação	72
4.21 Qualidade de engrenagens antes e após os tratamentos termoquímicos efetuados	73
4.22 Perfil de microdurezas das engrenagens após a nitretação e a cementação	75
4.23 Microestruturas observadas nos processos de nitretação gasosa e líquida	76
4.24 Variação da espessura da camada branca em função do processo de nitretação utilizado para o aço 4140	76
4.25 Comparação do custo total para a produção de uma engrenagem de aço usando diferentes tratamentos termoquímicos	77
4.26 Comparação do custo para a produção de uma engrenagem de aço usando diferentes tratamentos termoquímicos	78
4.27 Tabela resumo das propriedades relativas das engrenagens nas três condições de tratamento	79

Lista de Tabelas

2.1	Dados típicos da camada nitretada de aços carbono	9
2.2	Exemplos de algumas aplicações de aços carbono nitretados por meio líquido	10
2.3	Aplicações de aços ligados nitretados	14
2.4	Dados típicos da camada nitretada de alguns aços ligados	14
2.5	Profundidades de camada recomendadas para engrenagens nitretadas e para engrenagens cementadas e temperadas	30
3.1	Análise química via espectrometria de emissão óptica	34
3.2	Etapas do processo de nitretação gasosa com ciclo de 48 horas	45
	PARTE I – CORPOS DE PROVA NAVY “C”	52
4.1	Descrição das análises efetuadas em cada tipo de aço, como recebidos	52
4.2	Microestruturas e durezas após o beneficiamento (TT1), conforme o tipo de aço	54
4.3	Durezas superficiais (Rockwell “C”) após tratamentos térmicos nos corpos de prova Navy “C” dos aços 8620, 1045 e 4140	55
4.4	Variação dimensional obtida para os diferentes aços, tratamentos térmicos e termoquímicos	56
4.5	Microdurezas de amostras de corpos de prova Navy “C” após a nitretação e a cementação	60
4.6	Parâmetros dos diferentes tratamentos termoquímicos para os aços 8620, 1045 e 4140	71
	PARTE II - ENGRELAGENS	72
4.7	Microestrutura e dureza após o beneficiamento de amostras do aço 4140 antes da nitretação	72
4.8	Microdurezas das engrenagens nitretadas	74
4.9	Valores admissíveis de camada branca em função da classe da engrenagem	77

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

h	=	hora
H	=	Altura do dente da engrenagem
D	=	Coefficiente de difusão
N	=	Núcleo

Letras Gregas

γ	=	Austenita	
γ'	=	Gama linha	[Fe ₄ N]
α	=	Ferrita	
ϵ	=	Epsilon	[Fe ₂₋₃ N]
ξ	=	Eta	[Fe ₂ N]
μm	=	mícron	[10 ⁻⁶ m]

Abreviações

CB	=	Camada branca
CD	=	Controle dimensional
CTR	=	Cementar, temperar e revenir
DEF	=	Deformações
E-NGB	=	Engrenagem beneficiada nitretada em nitretação gasosa
E-NLB	=	Engrenagem beneficiada nitretada em meio líquido
E-CTR	=	Engrenagem cementada, seguida de têmpera e revenimento
MEV	=	Microscópio eletrônico de varredura
mm	=	Milímetros
MO	=	Microscopia ótica
NG	=	Nitretação gasosa não beneficiado
NGB	=	Nitretação gasosa beneficiado,
Ni	=	Camada de níquel eletrodepositada
NLB	=	Nitretação líquida beneficiado
TT1	=	Pré-beneficiamento
TT2	=	Têmpera e revenimento
ZD	=	Zona de difusão
ZT	=	Zona de transição

Siglas

ABNT	=	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DIN	=	Norma internacional alemã
DP	=	Diametral pitch
ICI	=	Imperial Chemical Industries
HRC	=	Dureza Rockwell “C”
HV	=	Dureza Vickers
MIT	=	Massachusetts Institute of Technology
NHT	=	Camada de difusão, ou espessura total da camada nitretada
SAE	=	Society of Automotive Engineers

Normas

DIN 3962	=	Tolerances for cylindrical gear teeth
DIN 50190	=	Profundidade de camada de difusão (NHT)
SAE J 417	=	Hardness Tests and Hardness Number Conversions

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
2	REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1	TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS	3
2.2	NITRETAÇÃO	4
2.2.1	AÇOS CARBONO	7
2.2.2	AÇOS LIGADOS COM ELEMENTOS FORMADORES DE NITRETOS	10
2.2.3	EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA	15
2.2.4	RESISTÊNCIA À FADIGA	16
2.2.5	CONTROLE DA PROFUNDIDADE DA CAMADA NITRETADA	17
2.2.6	TRATAMENTO DE ESTABILIZAÇÃO	17
2.3	NITRETAÇÃO GASOSA	17
2.3.1	NITRETAÇÃO DE SIMPLES E DUPLO ESTÁGIO	20
2.3.2	FORNOS DE NITRETAÇÃO GASOSA	22
2.4	NITRETAÇÃO LÍQUIDA	23
2.5	NITRETAÇÃO DE ENGRENAGENS	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	MATERIAIS	31
3.2	ANÁLISE DO MATERIAL	34
3.2.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	34
3.2.2	MICROSCOPIA ÓTICA	35
3.2.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	37
3.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS	37
3.3.1	TRATAMENTO TÉRMICO 1 (TT1)	37
3.3.2	CEMENTAÇÃO, TÊMPERA E REVENIMENTO (CTR)	42
3.3.3	TRATAMENTO TÉRMICO 2 (TT2)	43

3.3.4	NITRETAÇÃO LÍQUIDA	44
3.3.5	NITRETAÇÃO GASOSA	45
3.4	USINAGEM	47
3.4.1	USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA NAVY “C”	47
3.4.2	USINAGEM DAS ENGRENAGENS FORJADAS	47
3.5	CONTROLE DIMENSIONAL	48
3.5.1	CORPOS DE PROVA NAVY “C” APÓS USINAGEM	48
3.5.2	MEDIÇÃO DAS ENGRENAGENS APÓS USINAGEM	49
3.5.3	CORPOS DE PROVA NAVY “C” APÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS	49
3.5.4	ENGRENAGENS APÓS TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS	50
3.6	MEDIDA DE DUREZA	50
3.6.1	DUREZA BRINELL	50
3.6.2	DUREZA ROCKWELL “C”	50
3.6.3	MICRODUREZA VICKERS	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
	PARTE I – CORPOS DE PROVA NAVY “C”	52
4.1	MICROESTRUTURA DOS AÇOS UTILIZADOS NO ESTADO DE FORNECIMENTO	52
4.2	DUREZA E MICROESTRUTURAS APÓS TRATAMENTO TÉRMICO 1 (TT1)	53
4.3	DUREZAS APÓS O TRATAMENTO TÉRMICO 2 (TT2) E CEMENTAÇÃO (CTR)	55
4.4	CONTROLE DIMENSIONAL CORPOS DE PROVA NAVY “C”	55
4.5	MICRODUREZA APÓS OS PROCESSOS DE NITRETAÇÃO	59
4.6	ESTRUTURAS APÓS TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS	63
4.7	RESUMO DOS RESULTADOS EM CORPOS DE PROVA NAVY “C”	70
	PARTE II CORPOS DE PROVA ENGRENAGENS	72
4.8	DUREZAS E MICROESTRUTURAS APÓS O TRATAMENTO TÉRMICO 1 (TT1)	72
4.9	DEFORMAÇÕES MÉDIAS APÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS	73
4.10	MICRODUREZAS APÓS OS PROCESSOS DE NITRETAÇÃO E CEMENTAÇÃO	74

4.11	MICROESTRUTURA APÓS OS PROCESSOS DE NITRETAÇÃO	75
4.12	CUSTO DOS PROCESSOS	77
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	80
	REFERENCIAS	82
	ANEXO I - GRÁFICO GERADO NA MEDIDORA DE ENGRENAGEM APÓS FRESAMENTO DOS DENTES	87
	ANEXO II - GRÁFICO GERADO NA MEDIDORA DE ENGRENAGEM APÓS CTR	88

1 INTRODUÇÃO

O processo de cementação é largamente utilizado para a fabricação de componentes que necessitam de alta dureza superficial e de grande resistência ao desgaste, (como pinhões, engrenagens, eixos etc.) [COLPAERT, 2008], porém, devido às características do processo (temperaturas acima de 900 °C, resfriamento brusco, mudança de fases etc.), este tratamento termoquímico ocasiona, em geral, grandes deformações, que podem ser definidas como mudanças dimensionais irreversíveis e usualmente imprevisíveis em componentes, as quais são responsáveis pelo maior índice de sucateamento na indústria de manufatura atualmente.

A nitretação é outro processo termoquímico utilizado também em aplicações que requeiram elevadas durezas superficiais e grande resistência ao desgaste. Contudo, ao contrário da cementação, as deformações são mínimas, pois o processo é realizado a baixas temperaturas (350 a 575 °C) e não necessita de resfriamento rápido para produzir o endurecimento da camada nitretada [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005], [MEI, 2010].

Como os dois processos apresentam objetivos similares, há casos onde a nitretação poderia ser usada para substituir a cementação porém, esta mudança somente pode ser viabilizada quando se conhecer as diferenças de cada processo. O conhecimento das diferenças entre os processos tem muitos aspectos a serem considerados, tais como, comparações das deformações geradas, durezas superficiais, perfis das camadas endurecidas, custos de fabricação, dentre outros. É dentro deste aspecto que se insere este estudo. A observação dos dados obtidos, bem como, a revisão bibliográfica apresentada, permite uma orientação na escolha do processo de endurecimento mais adequado.

A prática profissional, no entanto, exigiu a pesquisa de outros fatores importantes do processo de nitretação, tais como, o efeito do beneficiamento prévio à usinagem e dos elementos de liga em peças de aços com 0,4 % de carbono, submetidas à nitretação gasosa e a verificação do efeito da nitretação líquida e da nitretação gasosa na espessura da camada branca formada, no perfil de dureza e na deformação de peças de aços carbono e baixa liga.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos principais do presente trabalho são:

a - Comparar a deformação gerada pelos processos de nitretação líquida e nitretação gasosa, com o processo de cementação seguida de têmpera e revenimento.

b - Identificar os custos de fabricação de uma engrenagem, considerando os processos de nitretação líquida, nitretação gasosa e cementação seguida de têmpera e revenimento.

c - Observar o efeito do beneficiamento prévio à usinagem e dos elementos de liga em peças de aços com 0,4 % de carbono, submetidos à nitretação gasosa.

d - Verificar o efeito da nitretação líquida e da nitretação gasosa na espessura da camada branca formada, no perfil de dureza e na deformação de peças de aços carbono e baixa liga.

Para atingir os objetivos serão executados os tratamentos de beneficiamento, cementação, têmpera e revenimento, nitretação gasosa e nitretação líquida, utilizando os aços ABNT 1045, 8620 e 4140.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS

Os tratamentos termoquímicos são processos que visam à adição, por difusão, de elementos químicos (carbono, nitrogênio e boro, entre outros) na superfície do aço. Como a difusão desses elementos é feita com o aquecimento do aço entre 300 e 1200 °C, o tratamento é denominado termoquímico [MEI, 2006].

O objetivo normalmente, é o de aumentar a dureza, ao mesmo tempo em que o núcleo do material se mantém dúctil, embora possa ser aplicado com outros propósitos, como o de aumentar a resistência à fadiga, à corrosão, à oxidação em altas temperaturas etc. Os processos termoquímicos mais utilizados são: cementação, nitretação, cianetação, carbonitretação, nitrocarbonetação, boretação e termorreação. Fatores como o potencial do meio e capacidade da peça absorver um determinado elemento químico, estão relacionados com a solubilidade e a difusão do elemento químico no aço [DOSSET, BOYER, 2006].

Uma diferença fundamental quando se comparam processos de difusão, como a cementação e a nitretação é que a primeira ocorre no campo austenítico onde a solubilidade dos intersticiais é superior. Já a nitretação é realizada no campo ferrítico, que possui uma baixa solubilidade para elementos de liga intersticiais como, por exemplo, o nitrogênio [VENDRAMIM, 2004].

Outro aspecto importante em um tratamento termoquímico é a solubilidade do elemento químico no aço. Pelo diagrama de equilíbrio Fe-N, figura 2.1, observa-se que a solubilidade do nitrogênio no ferro, é pelo menos, de duas a cinco vezes maior que a do carbono nas temperaturas de 20 e 590 ° C, respectivamente [SHEN, OH, LEE, 2006].

Verifica-se também que a solubilidade máxima de nitrogênio na austenia é 2,8 % em massa a 650 °C. Pelo diagrama de fases Fe-C, a solubilidade do carbono é de 2,06 % em massa a 1147 °C na austenita [WANKE, 2003].

2.2 NITRETAÇÃO

Nitretação é um processo de endurecimento superficial, que introduz nitrogênio na superfície do aço a temperaturas geralmente na faixa de 350 a 575 °C, ou seja, o aço continua na fase ferrítica (ou apresentando cementita, dependendo da composição da liga). Nitretação é, portanto, similar a cementação pelo fato de difundir um elemento químico na estrutura do aço, alterando sua composição química, porém o nitrogênio é difundido na ferrita, enquanto a cementação difunde o carbono na austenita [DAVIS, 2002].

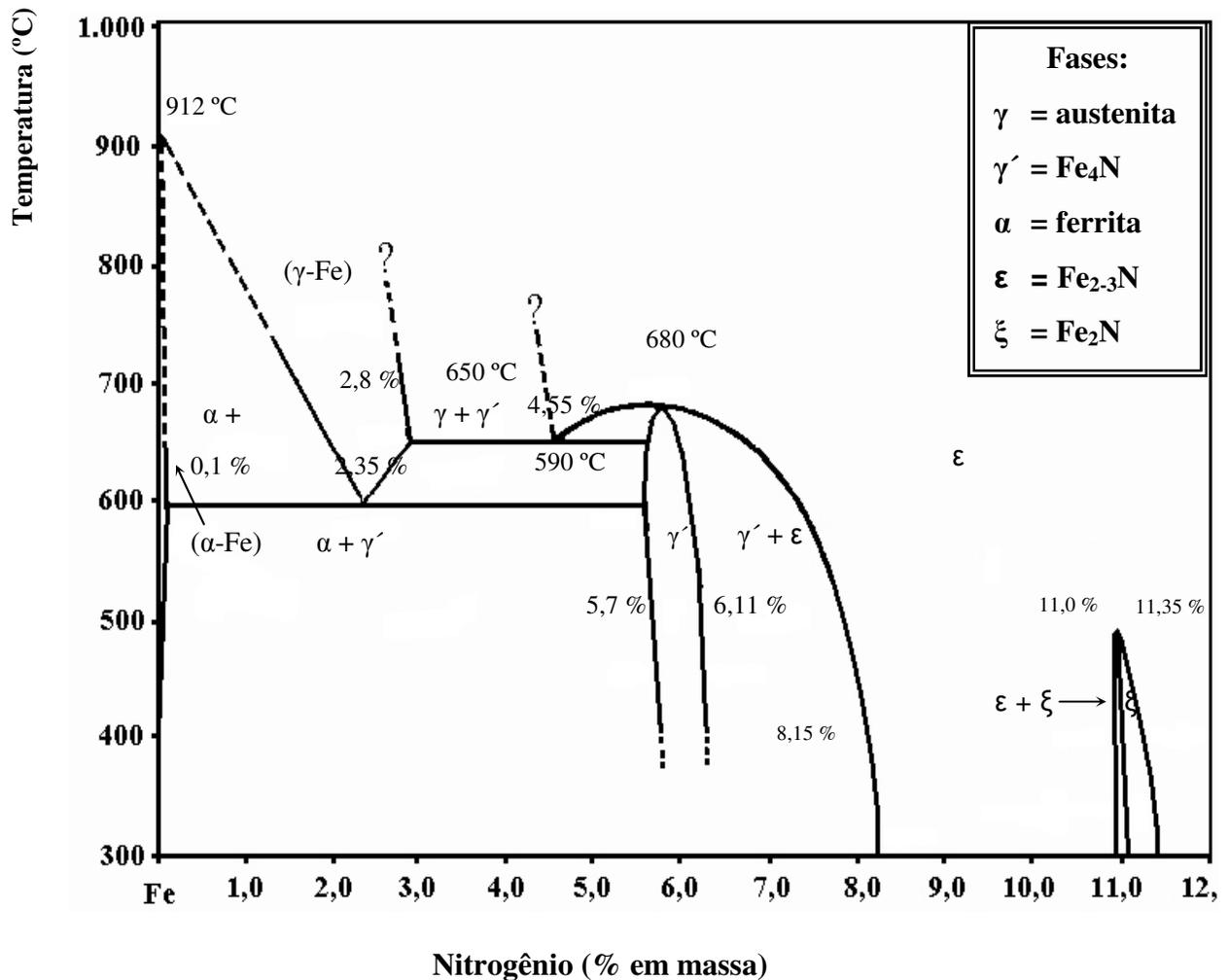


Figura 2.1 – Diagrama de equilíbrio Fe-N [BAKER et al., 1999].

A nitretação não necessita de aquecimento do aço até o campo austenítico nem de resfriamento brusco a partir da temperatura de tratamento para formar a camada endurecida, visto que o objetivo é a formação de nitretos e não de martensita como na cementação ou na têmpera. Isto significa que a nitretação pode ser realizada com um mínimo de distorções e excelente controle dimensional [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [SKONIESK, 2008].

A camada nitretada resultante dos processos de nitretação líquida e gasosa é composta de três regiões. Uma superficial, denominada de camada branca ou camada de compostos onde o termo “branca” está relacionado com a resistência ao ataque do reagente químico “nital” (ácido nítrico diluído em álcool) utilizado para examinar a camada nitretada [STRUERS, 2006]. Em seguida, tem-se a zona de difusão e logo abaixo a zona de transição [VATAVUK, et al., 2002]. A figura 2.2 ilustra uma típica camada nitretada.

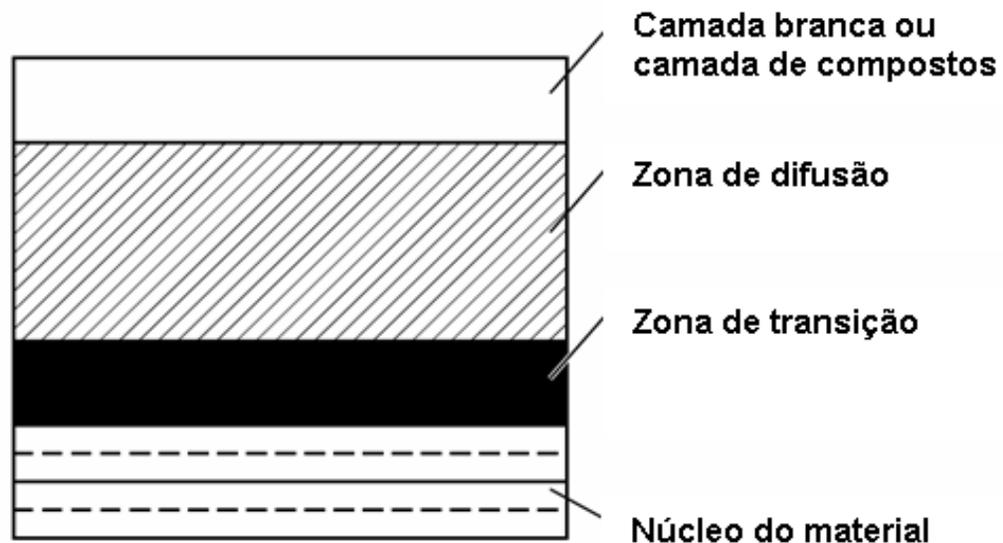


Figura 2.2 – Esquema típico das zonas de uma camada nitretada [PYE, 2005].

A camada branca é composta de nitretos de ferro (γ' -Fe₄N e/ou ϵ -Fe₂₋₃N) ou uma camada complexa de nitretos, envolvendo ferro e os elementos de liga. Esta camada é responsável pelas melhorias nas propriedades tribológicas e anticorrosivas [LEPPÄNEN, JONSSON, 1999]. A zona de difusão pode ser descrita como a microestrutura original do núcleo do metal, onde o nitrogênio pode ser encontrado intersticialmente dissolvido dentro da ferrita ou sob a forma de precipitados

de nitretos de ferro ou de outros elementos de liga presentes no aço tratado. Esta região é responsável pela melhora na resistência à fadiga [NIKOLUSSI, 2008]. A zona de transição é a passagem entre a zona de difusão e o núcleo do material. As distorções introduzidas pelo nitrogênio no reticulado aumentam sensivelmente a dureza da peça. A nitretação aumenta a dureza superficial, a resistência ao desgaste, a resistência à fadiga e a resistência à corrosão [SILVA, et al, 2007].

Recomenda-se que todos os aços sejam beneficiados (temperados e revenidos) antes de serem nitretados (tanto na nitretação gasosa, quanto na nitretação líquida). A temperatura de revenimento deve ser pelo menos 30 °C mais alta do que a máxima temperatura a ser usada na nitretação. Nos aços baixa liga das séries 4100 e 4300, a dureza da camada nitretada é afetada consideravelmente pela dureza do núcleo do material. A figura 2.3 mostra a influência da dureza do núcleo no perfil de dureza Vickers do aço 4140 nitretado por 25 horas. Para se obter o máximo de dureza na camada, esses aços são mantidos com o máximo de dureza de núcleo, através do emprego da menor temperatura de revenimento admissível [PYE, 2005], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004]. Pode-se, no entanto, nitretar aços sem o devido beneficiamento, porém, os resultados irão variar muito conforme o estado de cada substrato.

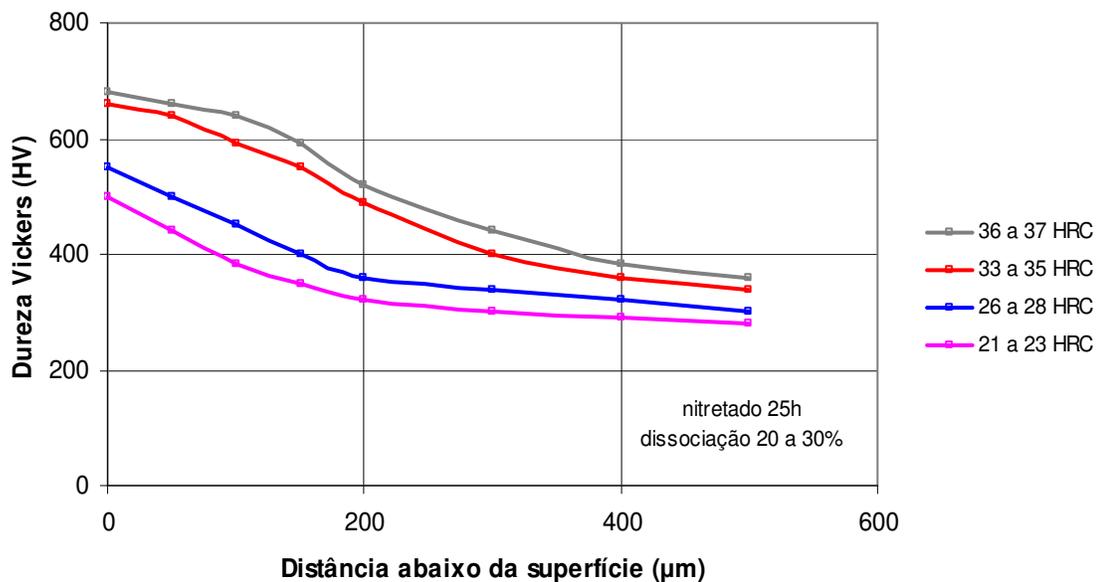


Figura 2.3 – Influência da dureza do núcleo no perfil de dureza Vickers do aço 4140 nitretado a gás por 25 horas [PYE, 2005].

2.2.1 AÇOS CARBONO

Todos os aços carbono são passíveis de nitretação, no entanto, aços com maiores concentrações de carbono apresentam uma diminuição na profundidade da camada de difusão, mesmo quando nitretados nas mesmas condições. A figura 2.4 mostra a influência do teor de carbono sobre o coeficiente de difusão de nitrogênio a temperaturas de 450, 520 e 570 °C [LEPPÄNEN, JONSSON, 1999].

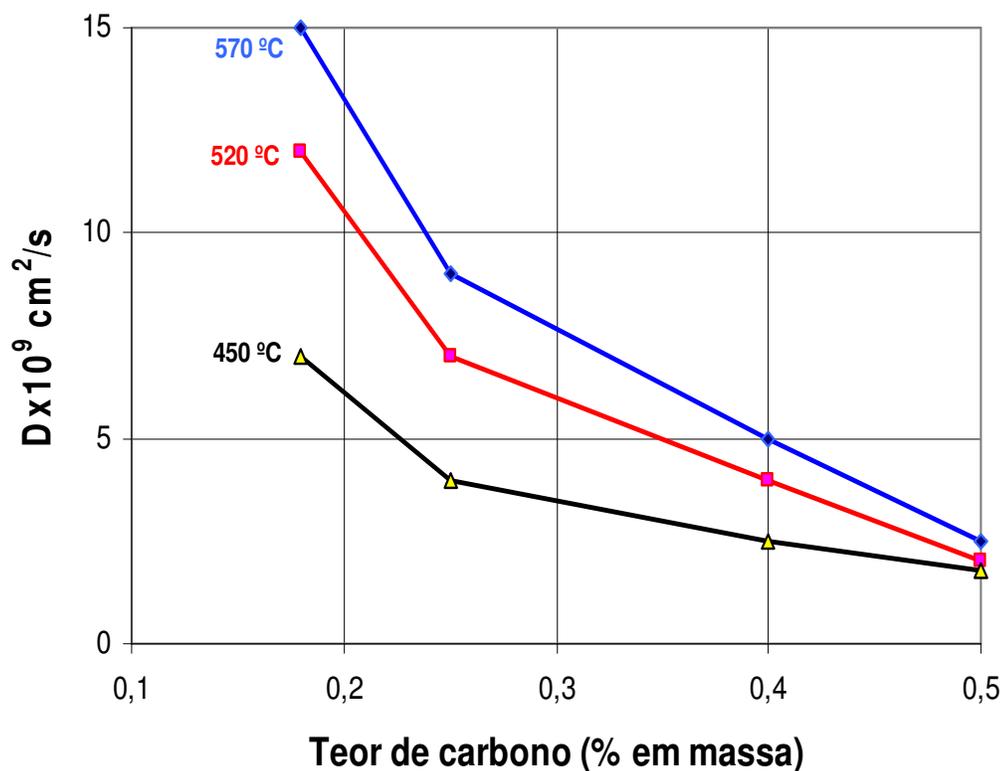


Figura 2.4 – Influência do teor de carbono sobre o coeficiente de difusão de nitrogênio a temperaturas de 450, 520 e 570 °C [LEPPÄNEN, JONSSON, 1999].

Quando elementos formadores de nitretos não estão presentes nos materiais ferrosos, a alta dureza da superfície e a resistência ao desgaste são atribuídas somente à presença da camada

branca, pois a dureza da zona de difusão é sutilmente maior do que a do núcleo, como mostra a figura 2.5. Portanto, em razão da dura camada branca estar apoiada sobre uma zona de difusão relativamente mole, aplicações que envolvem condições severas de carregamento ou pequenas áreas de contato não são recomendáveis para estes materiais nitretados [PYE, 2005], [MEI, 2010]. A camada branca responde também pelas propriedades de resistência à corrosão em determinados meios, como atmosferas úmidas e névoas salinas neutras [LEPPÄNEN, JONSSON, 1999]. A camada branca de aço baixo carbono nitretados e nitrocarbonetados oferecem proteções equivalentes àquelas proporcionadas pela eletrodeposição de níquel em atmosferas úmidas e em atmosferas de névoa salina neutra (não ácida) [TOTH, 2002]. A figura 2.6 mostra a influência da temperatura na espessura da camada branca.

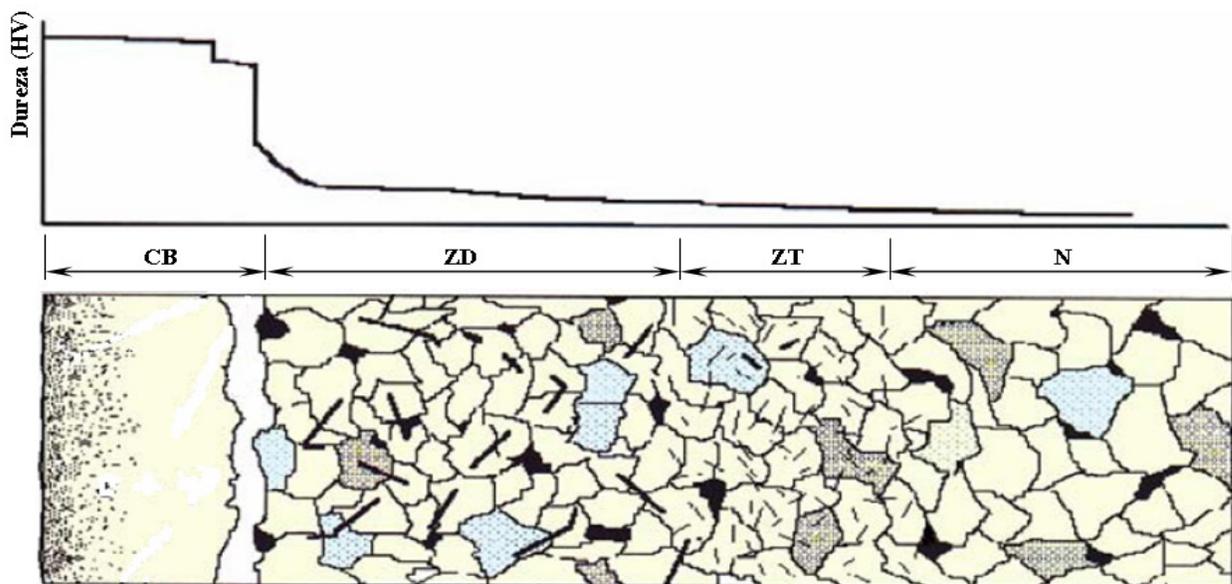


Figura 2.5 – Camada nitretada de aço carbono e o seu perfil de dureza. A estrutura consiste da camada branca (CB), zona de difusão (ZD), zona de transição (ZT) e o núcleo (N) [LILIENTAL, TYMOWSKI, TARFA, 2002].

Para efeito de comparação apresentam-se na tabela 2.1 dados típicos (dureza e espessura) da camada nitretada de aços carbono, enquanto que na tabela 2.2 são apresentadas aplicações típicas destes materiais.

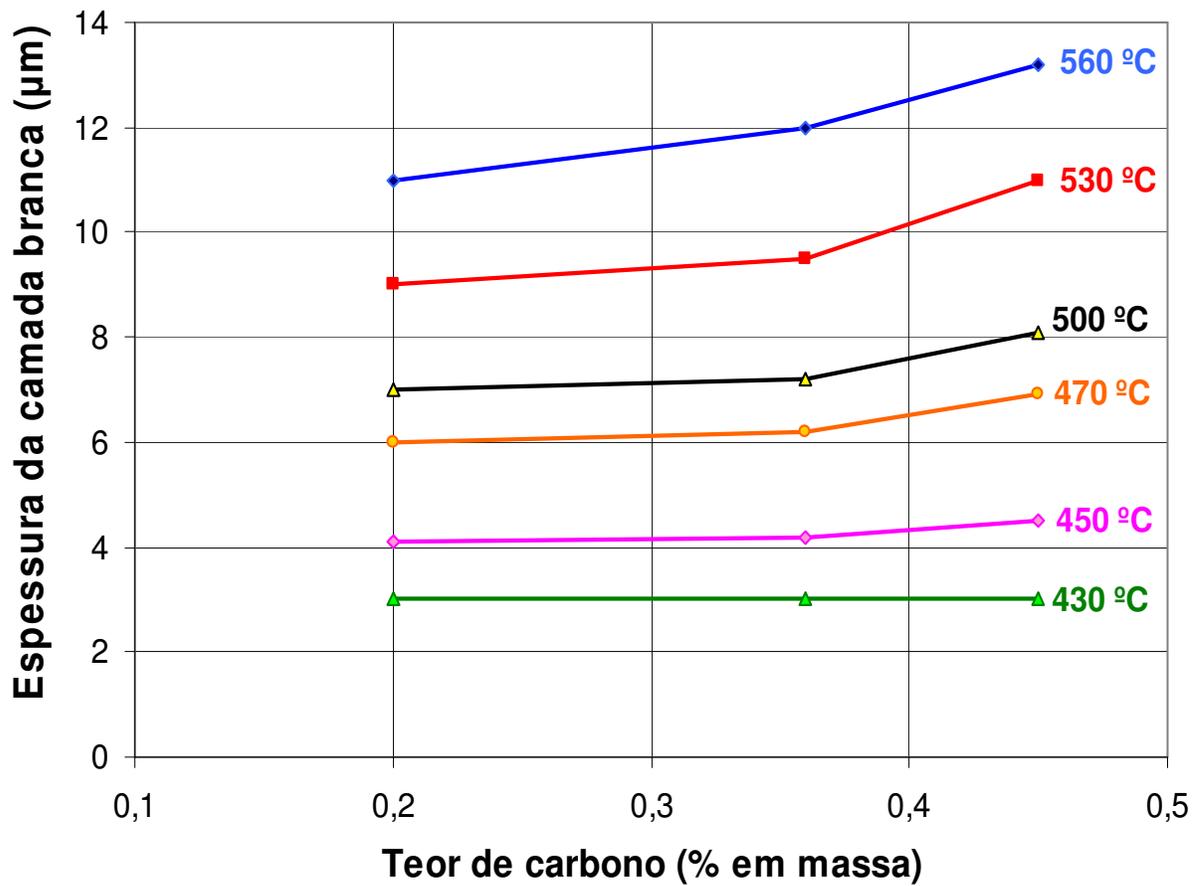


Figura 2.6 – Influência da temperatura de nitretação na espessura da camada branca, em função do teor de carbono do aço [CARDOSO, 1999].

Tabela 2.1 – Dados típicos da camada nitretada de aços carbono [TOTH, 2002].

AÇO	Dureza (Vickers)		Espessura da camada (µm)	
	Núcleo	Superfície	Branca	Total
1010	180	250 - 400	10 - 15	200 - 400
1038	190	250 - 400	10 - 20	200 - 300
1060	200	250 - 400	10 - 20	100 - 250

Tabela 2.2 – Exemplos de algumas aplicações de aços carbono nitretados por meio líquido. [TOTH, 2002].

AÇO	Aplicações típicas
1010	Buchas e mancais
1020	Eixos, mancais, tuchos luvas
1045	Eixos, amortecedores, moldes para plástico, guias, tuchos, cursores, luvas, mancais, balancins, cilindros hidráulicos

2.2.2 AÇOS LIGADOS COM ELEMENTOS FORMADORES DE NITRETOS

Os aços ligados mais utilizados para a nitretação podem ser divididos em três grandes grupos, todos nitretados na condição de temperado e revenido:

(I) Aços Nitralloy: aços contendo alumínio, que são normalmente utilizados em aplicações que exigem elevada dureza superficial [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005].

(II) Aços ligados: ao Cr-Mo ou Cr-Mo-V com 2,5 a 3,5 % de Cr, que apresentam dureza superficial elevada, porém, inferior à dos aços Nitralloy [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005].

(III) Aços de baixa liga: 1 % Cr e 0,2 % Mo (por exemplo), que apresentam após a nitretação uma dureza inferior aos anteriores [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005].

Observa-se na figura 2.7 que, a partir da superfície da camada nitretada de aços ligados, a dureza diminui gradativamente, em virtude do gradiente de concentração de nitrogênio, até chegar

ao valor da dureza do núcleo do aço. Neste caso, diferentemente do que ocorre para aços carbono, a zona de difusão serve como um apoio para a camada de compostos, sendo, conseqüentemente, uma região de transição entre uma camada muito dura (camada branca) e um núcleo relativamente mole. Portanto, tanto a camada branca, quanto a zona de difusão são responsáveis pelo aumento na resistência ao desgaste e dureza, ressaltando também que a camada branca tem um papel importante para a obtenção de propriedades anti-corrosivas [DAVIS, 2002], [LEPPÄNEN, JONSSON, 1999].

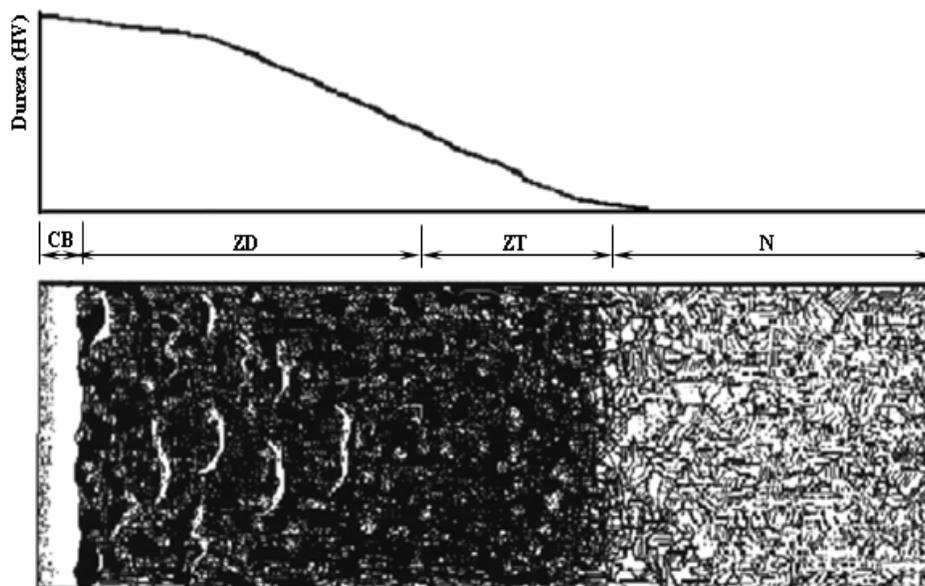


Figura 2.7 – Camada nitretada em aços ligados e seu perfil de dureza. A estrutura consiste da camada branca (CB), zona de difusão (ZD), zona de transição (ZT) e o núcleo (N) [LILIENTAL, TYMOWSKI, TARFA, 2002].

A dureza, assim como a espessura da camada nitretada, dependem, principalmente, dos elementos de liga no aço, do tempo e da temperatura do processo. As figuras 2.8 e 2.9 mostram a influência dos elementos de liga na dureza e na profundidade da camada. A figura 2.10 mostra a influência do tempo na espessura da camada para os aços 1040, 8640, 4140 e H11 e a figura 2.11 mostra a influência da temperatura na profundidade nitretada [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005].

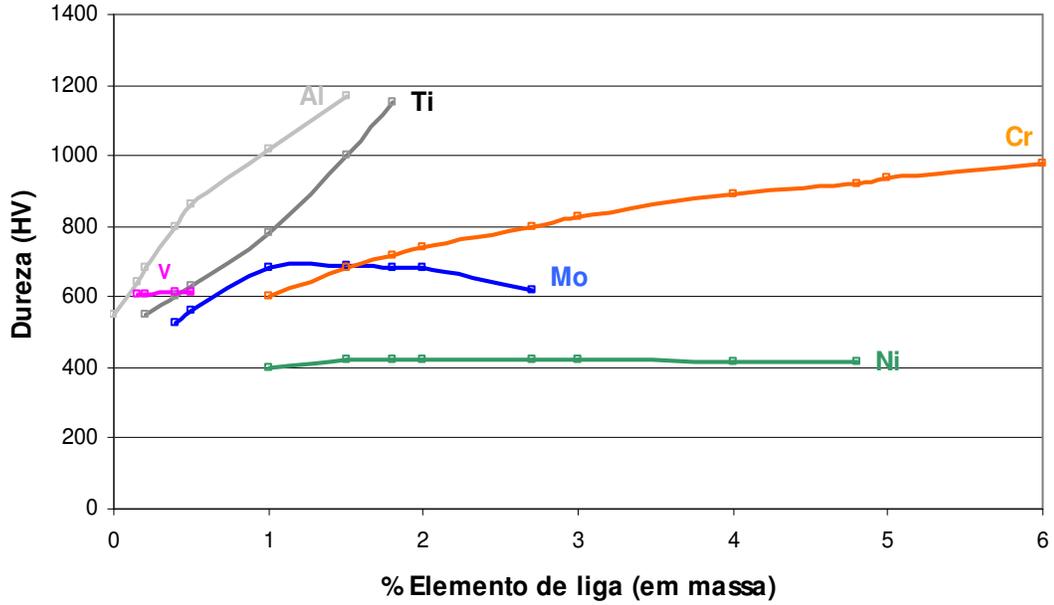


Figura 2.8 – Influência de Al, V, Ti, Mo, Cr, Ni na dureza após a nitretação. Liga base: 0,35 % C, 0,30 % Si, 0,70 % Mn [THELNING, 1984].

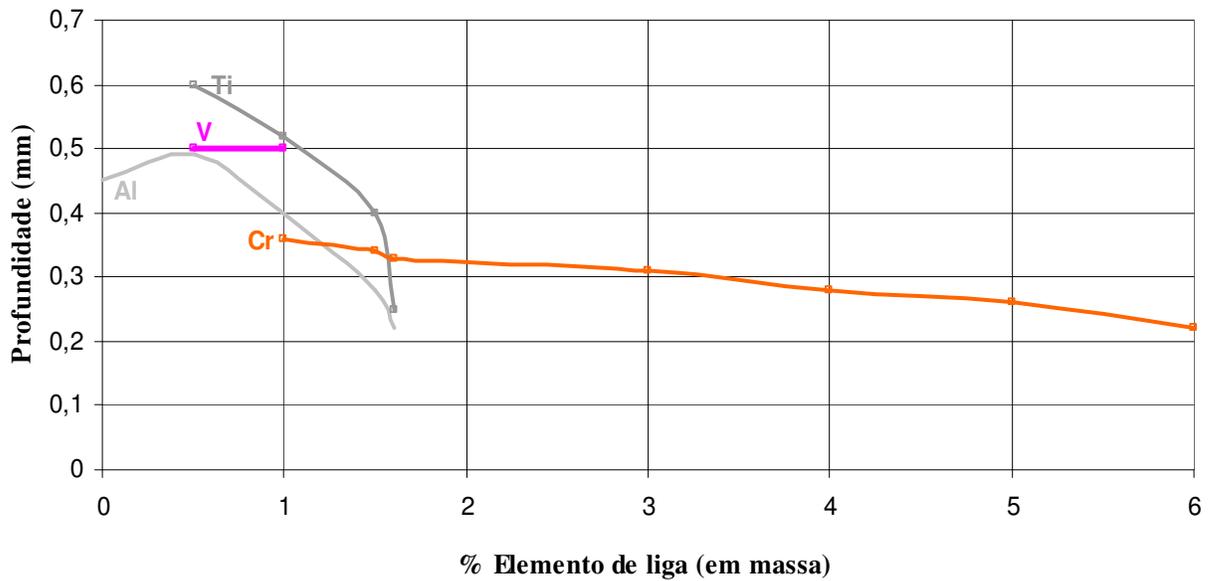


Figura 2.9 – Influência de Al, V, Ti, Mo, Cr, Ni sobre a profundidade total nitretada, medido a 400 HV. A nitretação foi realizada a 520 °C por 8h. Liga base: 0,35 % C, 0,30 % Si, 0,70 % Mn [THELNING, 1984].

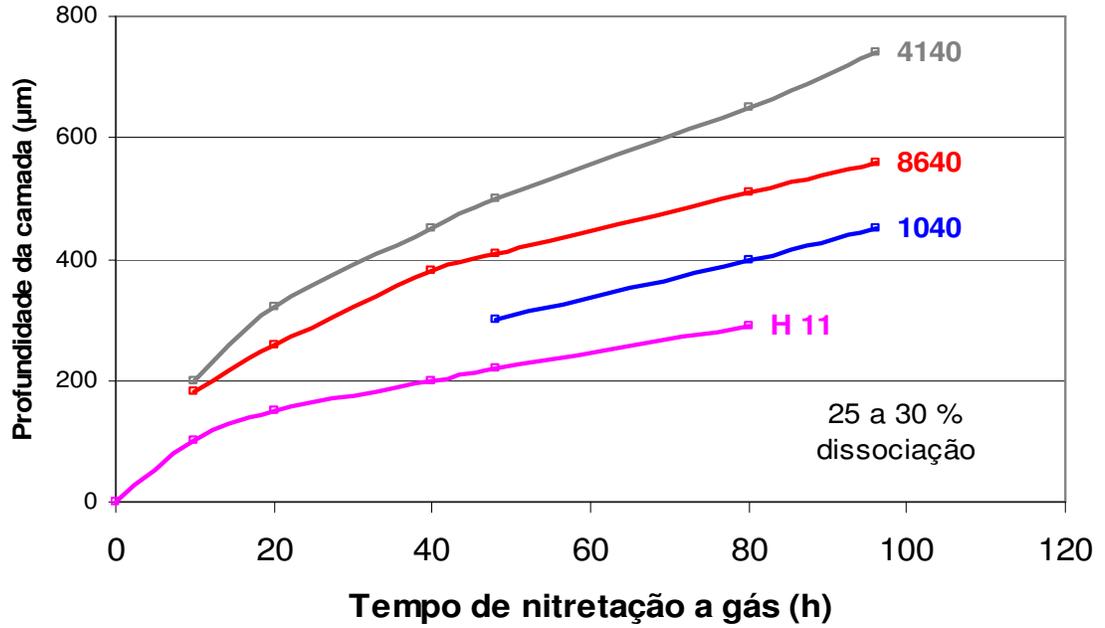


Figura 2.10 – Profundidade da camada nitretada em função do tempo de nitretação a gás, à 525 °C para vários tipos de aços [DAVIS, 2002].

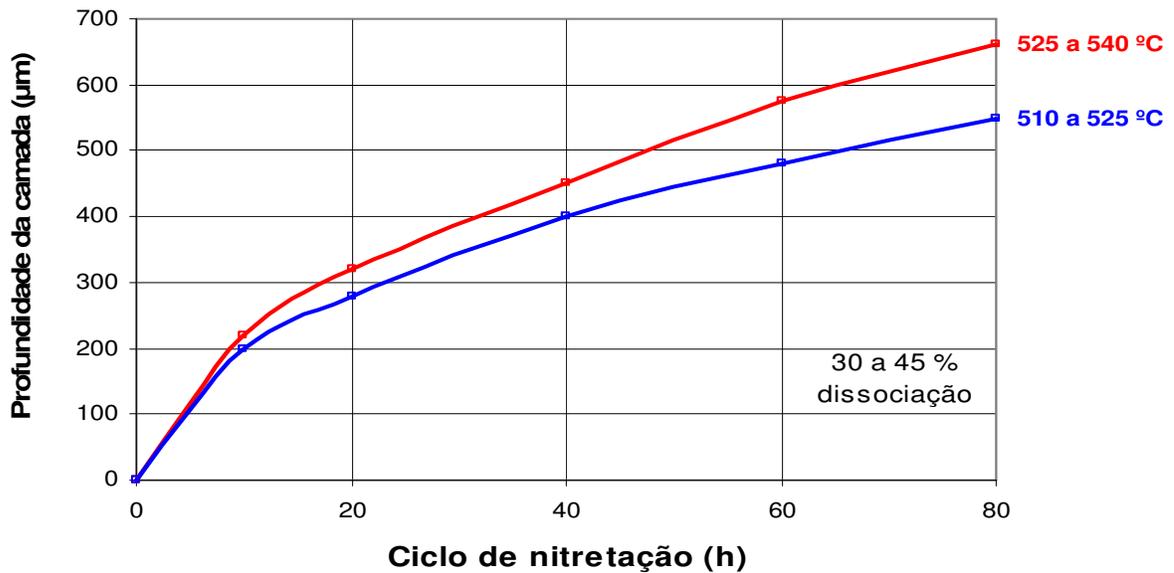


Figura 2.11 – Influência da temperatura de nitretação na profundidade nitretada do aço SAE 7140 [DAVIS, 2002].

A tabela 2.3 apresenta aplicações típicas dos aços ligados nitretados, enquanto a tabela 2.4, apresenta os dados típicos (dureza e espessura) da camada nitretada de aços ligados.

Tabela 2.3 – Aplicações de aços ligados nitretados [TOTH, 2002].

Material	Aplicações típicas
4140	Árvores comando de válvulas, virabrequins, moldes para plástico, cilindros hidráulicos, pinhões, engrenagens
M2	Brocas e fresas
H13	Moldes para plástico, guias, matrizes de extrusão de alumínio, matrizes de forja a quente, balancins, punções
D2	Matrizes para conformação a frio
Aço inoxidável austenítico	Anéis de pistão, válvulas
Aço inoxidável martensítico	Anéis de pistão

Tabela 2.4 – Dados típicos da camada nitretada de alguns aços ligados [TOTH, 2002].

Material		Dureza (Vickers)		Espessura da camada (μm)	
		Núcleo	Superfície	Branca	Total
Aços baixa liga	3310	210	500 – 700	10 - 20	100 - 400
	4140	300	650 – 800	10 – 20	100 – 400
	5132	300	600 – 700	10 – 20	100 – 400
Aços ferramenta	H 13	407	1000 – 1200	5 - 10	100 - 300
	D 2	646	900 – 1050	5 – 10	50 - 150
	D 3	513	850 – 1100	5 – 10	50 – 150
	M 2	820	1000 – 1250	< 5	20 - 100
Aços inoxidáveis	304	180	> 1000	-	50 – 100
	420	290	> 1000	-	50 - 100

2.2.3 EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA

O alumínio forma nitretos muito duros na superfície do aço quando nitretado. Aços contendo alumínio produzem camadas nitretadas de alta dureza e excelente resistência ao desgaste. No entanto, as camadas nitretadas apresentam também baixa ductilidade. Acima de 1% de alumínio a superfície pode começar a lascar sob condições de carga [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005].

O molibdênio forma nitretos estáveis na temperatura de nitretação e reduz o risco de fragilização da superfície na temperatura do processo [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004].

O cromo também forma nitretos estáveis na temperatura de nitretação, no entanto, altos teores de cromo encontrados em alguns aços inoxidáveis, podem torná-los mais difíceis de serem nitretados. A razão para isso é que o cromo reage com o oxigênio e forma uma barreira de óxido de cromo sobre a superfície do material a ser nitretado. É necessário então se quebrar a barreira de óxido de cromo na superfície e, em seguida, fazer a nitretação. No entanto, devido ao grande percentual de cromo disponível na superfície do aço, há dificuldade na difusão do nitrogênio, ocasionando uma camada mais fina, porém, geralmente, com altos valores de dureza superficial. Já os aços baixa liga contendo cromo fornecem camadas nitretadas com mais ductilidade, mas com menores durezas. No entanto, estes aços oferecem grande resistência ao desgaste e boas propriedades de resistência à corrosão [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004].

O vanádio é propício à formação de nitretos estáveis na camada formada na superfície do aço, além de aumentar a tenacidade da camada formada [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005].

O tungstênio permite ao aço reter sua dureza em altas temperaturas, sem qualquer perda de dureza superficial. Dependendo do teor de tungstênio e de sua composição, o aço nitretado é capaz de operar em temperaturas de até 590 °C sem qualquer perda significativa de dureza da superfície, além de ter aumentada sua característica de resistência ao desgaste [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005].

O silício é considerado um bom formador de nitretos. Entretanto, o silício não está geralmente presente em níveis elevados no aço. Ele está presente normalmente como um oxidante

ou um estabilizador. Não é normalmente visto em volumes suficientes para ser considerado um grande formador de nitretos [DAVIS, 2002], [PYE, 2005].

2.2.4 RESISTÊNCIA À FADIGA

O aumento da resistência à fadiga de alto ciclo dos aços ligados submetidos à nitretação é consequência do estado compressivo da superfície, decorrente da precipitação de nitretos de elementos de liga na zona de difusão [TERENT'EV, 2007].

A figura 2.12 mostra o efeito da nitretação na resistência à fadiga do aço 15B21H.

Em aços carbono, o aumento é maior se o nitrogênio estiver retido em solução sólida na matriz ferrítica. Esta retenção é obtida através do resfriamento rápido após o processo de nitretação. O potencial de aumento desta propriedade diminui com o aumento do teor de carbono na composição do aço [TOTH, 2002]. Componentes que necessitam de eletrodeposições de cromo e níquel podem ter até 60 % de redução no seu limite de resistência à fadiga, no entanto, a aplicação da nitretação antes do revestimento, minimiza esta redução [BANNANTINE, COMER, HANDROCK, 1989].

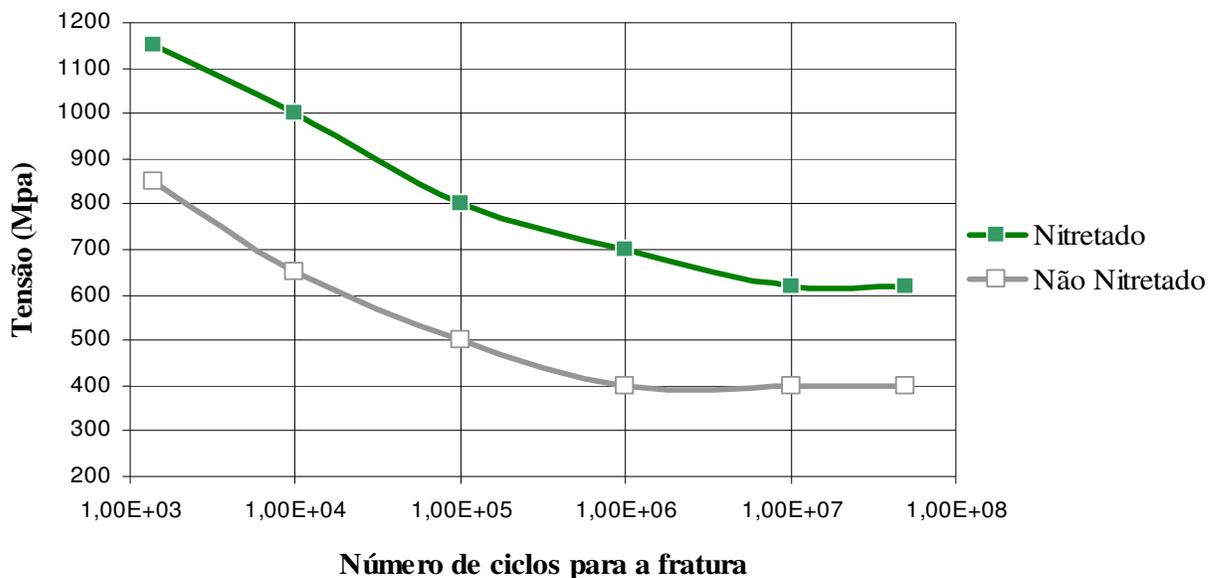


Figura 2.12 – Efeito da nitretação na resistência à fadiga do aço 15B21H. [MEI, 2010].

2.2.5 CONTROLE DA PROFUNDIDADE DA CAMADA NITRETADA

A profundidade da camada e a dureza superficial são os dois critérios mais usualmente solicitados para o controle das propriedades de uma peça nitretada, dependendo não somente da duração e outras condições de nitretação, mas também da composição do aço, estrutura anterior e dureza de núcleo.

2.2.6 TRATAMENTO DE ESTABILIZAÇÃO

Para se prevenir deformações, peças a serem nitretadas devem ser primeiro retificadas com dimensões próximas às finais, depois aquecidas a 565 °C por 1 hora (para alívio de tensões) e, finalmente, sofrerem o acabamento final de retífica, ou polimento final, para então serem nitretadas. Peças nitretadas e não retificadas depois da nitretação tem excelente estabilidade dimensional [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004].

2.3 NITRETAÇÃO GASOSA

A nitretação gasosa é um processo de endurecimento superficial onde o nitrogênio é introduzido na superfície de uma liga ferrosa através da permanência do metal a uma temperatura apropriada (abaixo de A_1 , do diagrama ferro-carbono, que é a temperatura de início de formação da austenita, para aços ferríticos), em contato com um gás fornecedor de nitrogênio, geralmente amônia. Para se obter a camada endurecida, não é necessário que se faça o resfriamento brusco a partir da temperatura do tratamento, a qual se situa entre 495 e 565°C, visto que o objetivo é a formação de nitretos e não de martensita, como na cementação [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005], [MEI, 2010].

A camada nitretada é formada pela difusão intersticial de átomos de nitrogênio no aço [CALLISTER, 2002], obtidos através da dissociação do gás amônia durante o aquecimento, de acordo com as seguintes reações: [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005].



O nitrogênio atômico e os componentes do hidrogênio mostrados na equação 2.1 são instáveis e se unem com outros átomos para formar moléculas, como mostrado nas equações 2.2 e 2.3. A difusão ocorre somente quando eles estão no estado atômico. A figura 2.13 mostra o nitrogênio atômico obtido pela dissociação térmica de amônia, e sua difusão na superfície do aço, criando as diferentes estruturas [SANTOS, 2003].

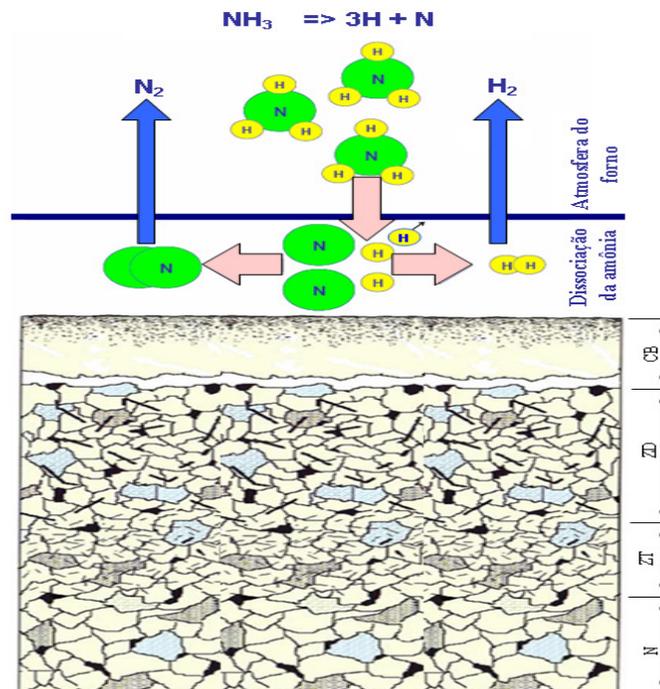


Figura 2.13 - Nitrogênio atômico obtido pela dissociação térmica de amônia, e sua difusão na superfície do aço, criando as diferentes estruturas, sendo a camada branca (CB), zona de difusão (ZD), zona de transição (ZT) e o núcleo (N) [LILIENTAL, TYMOWSKI, TARFA, 2002].

A amônia não dissociada é usada para medir a concentração de nitrogênio durante o processo. A taxa de dissociação pode ser expressa pela equação 2.4 e é normalmente mantida entre 10 e 35%, dependendo do aço a ser tratado e da espessura de camada branca desejada [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005].

$$\frac{\text{Quantidade de amônia dissociada}}{\text{Quantidade de amônia adicionada}} \times 100\% \quad (\text{eq. 2.4})$$

A camada nitretada formada possui duas zonas distintas e uma zona de transição. A região superficial é denominada de camada branca ou camada de compostos. Nos aços, a camada branca é composta de nitretos de ferro (γ' -Fe₄N e/ou ϵ -Fe_{2,3}N) ou uma camada complexa de nitretos, envolvendo ferro e os elementos de liga. A concentração de cada fase depende da composição química de cada aço, principalmente da concentração de carbono e da concentração de nitrogênio. Quanto maior o teor de carbono do aço, maior será a espessura da camada branca [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005].

A camada branca apresenta geralmente de 20 a 25 μm de espessura, podendo variar com o tempo e temperatura do processo, além da composição do gás. Uma camada branca excessivamente espessa é muito dura e frágil e pode lascar em uso. Uma retificação leve após a operação de nitretação pode removê-la [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005].

Há ainda processos de nitretação especiais destinados a reduzir a camada branca ou, torná-la menos frágil (a Figura 2.14 mostra uma típica camada de branca). Abaixo da camada branca encontra-se a zona de difusão, que é composta de nitretos estáveis formados pela reação do nitrogênio com elementos formadores de nitretos, tais como o alumínio, cromo, vanádio, molibdênio e de tungstênio. A espessura da zona de difusão é novamente dependente do tempo e da temperatura do processo, além da composição do gás, podendo chegar até 1 mm. Após a zona de difusão temos uma região de transição e em seguida o núcleo do aço, que consiste de martensita revenida. A dureza do núcleo é considerada a dureza obtida através do tratamento térmico anterior [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005].

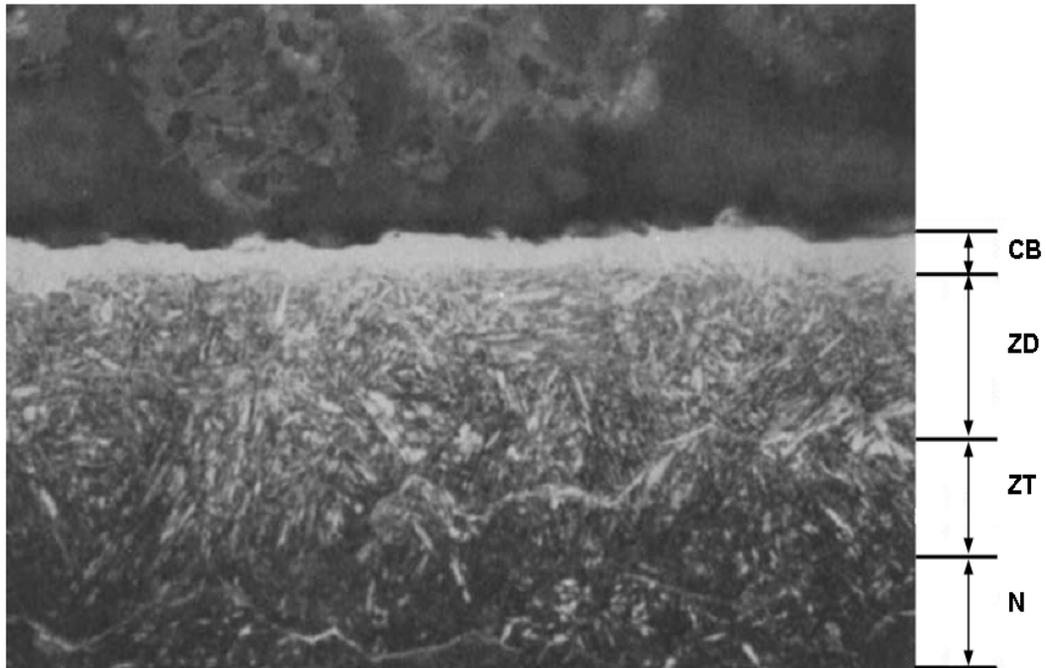
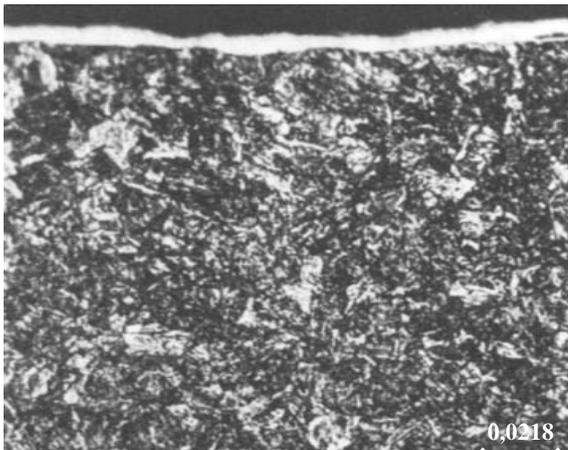


Figura 2.14 - Microestrutura típica da nitretação gasosa de um aço contendo 0,4% C, 1,6% Cr, 0,35% de Mo, e 1,13% Al. (A estrutura consiste da camada branca (CB), zona de difusão (ZD), zona de transição (ZT) e o núcleo (N), que apresenta microestrutura de martensita revenida, com dureza 30 HRC [PYE, 2005], [DAVIS, 2002]).

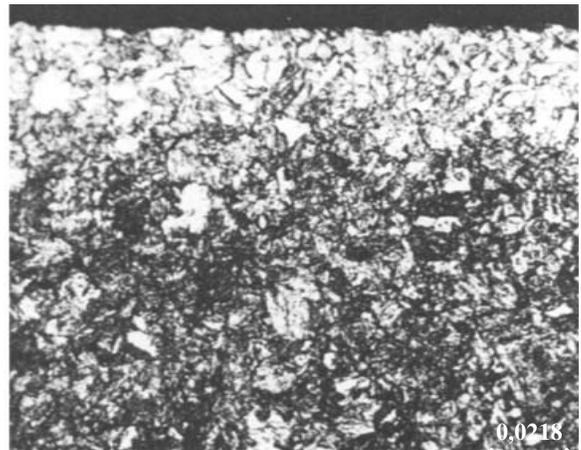
2.3.1 NITRETAÇÃO DE SIMPLES E DUPLO ESTÁGIO

Qualquer processo simples ou de duplo estágio pode ser empregado quando se nitreta com amônia anidra. No processo de simples estágio, a temperatura fica entre 495 e 525 °C, sendo usada uma taxa de dissociação entre 15 a 30 %. Esse processo produz uma camada frágil, rica em nitrogênio conhecida como camada branca na superfície da camada nitretada. O primeiro a estudar esta região foi Dr. Carl F. Floe do Massachusetts Institute of Technology (MIT), que não somente pesquisou a identificação da camada e suas características, mas também desenvolveu uma técnica de redução da espessura da camada branca. Hoje essa técnica é conhecida como o processo Floe, ou o processo de dois estágios [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004]. O primeiro

estágio do processo de duplo estágio é uma duplicação do processo de simples estágio com exceção do tempo, ou seja, utiliza-se uma temperatura de nitretação de cerca de 500 °C com 15 a 30 % de dissociação de amônia (isto é, uma atmosfera que contém 70 a 85 % amônia). Isto produzirá um composto rico em nitrogênio na superfície. Uma vez que o ciclo está completo, a temperatura do forno é aumentada para até 565 °C, com uma dissociação de gás aumentada para 75 a 85 % (ou seja, uma atmosfera que contém 15 a 25 % de amônia). Exceto para uma redução na quantidade de amônia consumida por hora, não há vantagem no uso do processo de duplo estágio, a não ser que a quantidade da camada branca produzida no processo de simples estágio não possa ser tolerada em uma peça ou a não ser que a quantidade de acabamento requerida após a nitretação seja substancialmente reduzida. Na figura 2.15 observam-se a estrutura superficial de uma peça nitretada em estágio simples (a) e outra em duplo estágio (b) [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005], [CHANDLER, 2000].



a) Nitretado a gás por 24 horas a 525 °C com 20 a 30 % de dissociação.



b) Nitretado a gás por 5 horas a 525°C com 20 a 30 % de dissociação seguido por um segundo estágio de 20 horas a 565 °C com 75 á 80 % de dissociação.

Figura 2.15 - Microestruturas de um aço 4140 beneficiado, após nitretação de simples estágio e duplo estágio: (a) simples estágio: camada branca 0,005 até 0,0075 mm. (b) duplo estágio: ausência de camada branca. Ataque 2 % nital e 400x [CHANDLER, 2000].

2.3.2 FORNOS DE NITRETAÇÃO GASOSA

Equipamentos de vários tipos são comuns em instalações de nitretação gasosa. As figuras 2.16 e 2.17 mostram um forno de retorta vertical. As peças a serem nitretadas são carregadas no cesto de trabalho, que é abaixado na câmara de aquecimento. A atmosfera é introduzida através do topo do forno e sai pela parte de baixo. O resfriamento é conseguido através do início de circulação e abertura da válvula, fazendo a atmosfera passar através de um tubo resfriado a água [TOTTEN, 2007].

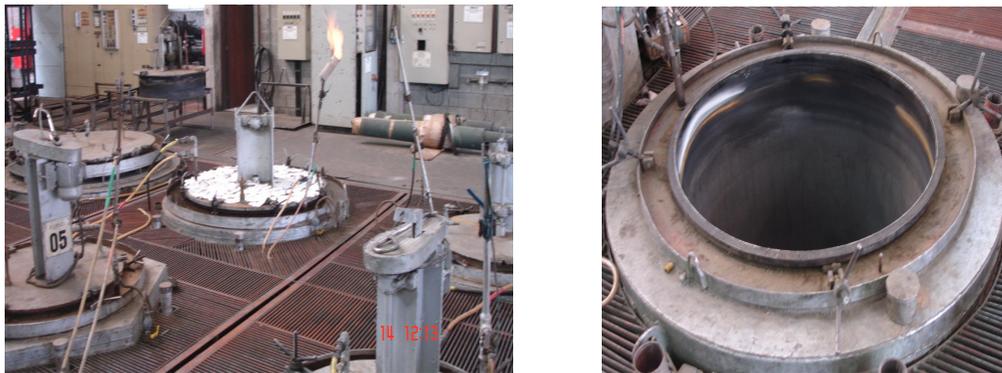


Figura 2.16 - Fotos de um forno de nitretação gasosa [METALTÉCNICA SUL, 2009].

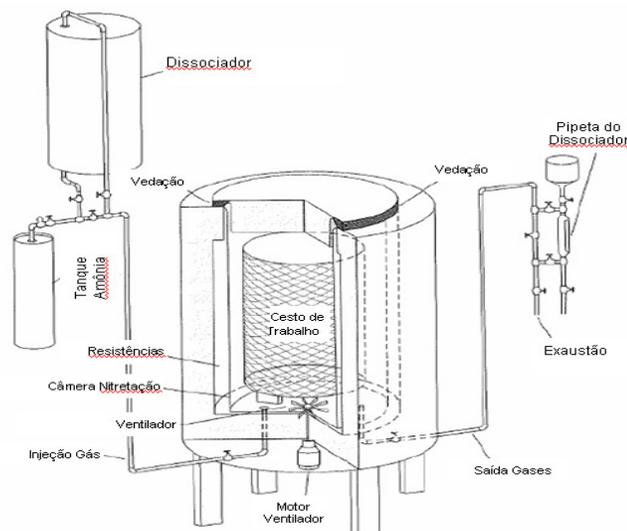


Figura 2.17 - Forno de retorta vertical [TOTTEN, 2007].

A figura 2.18 mostra um forno tipo sino, que apresenta uma base estacionária e é equipado com uma atmosfera de entrada e saída, termoelemento de controle, circulador e saídas para os controladores [TOTTEN, 2007].

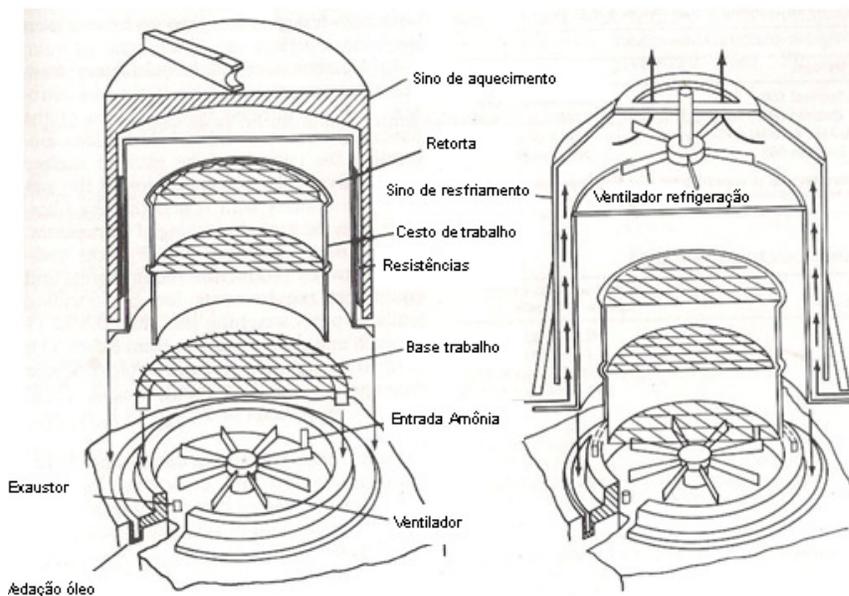


Figura 2.18 - Forno tipo sino mostrando a base estacionária sendo sobreposta pelo sino [DAVIS, 2002], [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005], [CHANDLER, 2000].

2.4 NITRETAÇÃO LÍQUIDA

Os processos de nitretação líquida (nitretação em banho de sais ou nitrocarbonetação ferrítica) foram inicialmente introduzidos a partir da década de 50. Duas empresas européias iniciaram o desenvolvimento, a ICI (Cassel Division of Imperial Chemical Industries) na Inglaterra, e a Durferrit Division of Degussa, na Alemanha. O primeiro processo desenvolvido foi o “Sulfinuz” da Imperial Chemical Industries Ltd. [ICI, 1964]. A Degussa desenvolveu seu processo “Tufftride”. Ambos são constituídos normalmente de uma mistura de cianetos e cianatos

de metais alcalinos. Tanto o processo Tufftride quanto o processo Sulfinuz se desenvolvem através de uma reação de oxidação e de uma reação catalítica, numa temperatura de, aproximadamente, 565 °C [EYSELL, 1990]. No caso do processo Tufftride, o cianeto de sódio é oxidado, gerando o sal de cianato, agente responsável pela ação nitretante, conforme a reação de oxidação da equação 2.4 [TOTH, 2002].



Esta reação pode ser realizada pela oxidação natural do banho (envelhecimento), tendo, no entanto, um difícil controle no conteúdo do cianato. Através da injeção de ar no banho de sais (aeração), que promove a agitação e estimula a atividade química, o processo pode ser acelerado e o teor de cianato melhor controlado [FUNATANI, 2004].

Os sais de cianato se decompõem em contato com a superfície do aço, conforme as reações catalíticas descritas nas equações 2.5 e 2.6, liberando nitrogênio e carbono, os quais se caracterizam por difundir-se no ferro [TOTH, 2002].



O teor de cianeto (CN) e de cianato (OCN) no banho de sais do processo Tufftride é de 42 a 50 % e 42 a 48 %, respectivamente. O processo Sulfinuz consiste de um banho fundido contendo, essencialmente, 8 a 12 % de cianeto de sódio, 15 a 25 % de cianato de sódio, 0,2 a 0,3 % de enxofre (presente na forma de sulfito de sódio) e o restante de carbonatos e cloretos. Uma reação adicional (equação 2.7), além da reação de oxidação da equação 2.4, ocorre dentro do banho devido a presença do sulfito de sódio [TOTH, 2002].



Conseqüentemente, o sulfito de sódio acelera a formação do radical cianato de sódio, favorecendo a uma nitrocarbonetação mais rápida, sem haver a necessidade de aeração externa no banho.

Considerações ambientais e o alto custo da neutralização dos efluentes contendo cianetos, aliado com a crescente competitividade na década de 70 dos tratamentos de nitrocarbonetação a gás, levaram as indústrias a desenvolverem processos livres de elementos tóxicos. Na Alemanha, a Degussa Company desenvolveu em 1975 um método com o objetivo de substituir o processo Tufftride. Chamado de New Tufftride, Tenifer 1 (TF-1) ou Melonite, este processo substitui o cianeto tóxico pelo tiocianato, que, como os cianetos, formam o cianato no banho. Além disso, a quantidade de cianeto que se forma durante o processamento é de 2 a 3 %, quantidade esta facilmente removida pelos métodos de neutralização [EYSELL,1990].

No processo Tenifer 1, o banho de sais fundidos é contido em cadinho revestido de titânio ou inonel, que reduz a contaminação do banho por compostos de ferro, evitando, assim, a formação de ferrocianetos $\text{Na}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, que causam porosidades na camada de compostos. O fluxo de ar dentro do banho é realizado com o auxílio de tubulações de titânio ou inonel que chegam até o fundo do cadinho [CARDOSO, 1999].

A seqüência do processo Tenifer 1 está apresentada na figura 2.19. Inicialmente, as peças são pré-aquecidas em ar para minimizar as perdas de calor e diminuir a possibilidade de formação de trincas e respingos. O processo de nitretação é comumente realizado a 565 °C por períodos de até 2 horas, uma vez que, para tempos prolongados, os sais têm forte ação corrosiva, aumentando consideravelmente a rugosidade e a porosidade da camada de compostos. O resfriamento pode ser realizado em água, óleo ou em banho de sais de nitritos e nitratos “AB1” na faixa de 330 a 400 °C (banho de têmpera oxidante). Com o resfriamento em sal AB1, a superfície é enriquecida de óxido de ferro (Fe_3O_4), conferindo uma coloração preta, uniforme e brilhante, que aumenta ainda mais a resistência à corrosão. [DURFERRIT, 2010].

Os processos de nitretação em banho de sais produzem camadas brancas de espessuras que variam entre 10 a 20 μm , constituídas essencialmente de carbonitreto ϵ ($\text{Fe}_{2-3}(\text{NC})$), devido ao

alto potencial de nitrogênio e carbono do banho de cianatos, e zonas de difusão contendo nitrogênio em solução sólida ou na forma de nitretos de ferro ou elementos de liga, no caso dos aços ligados [TOTH, 2002].

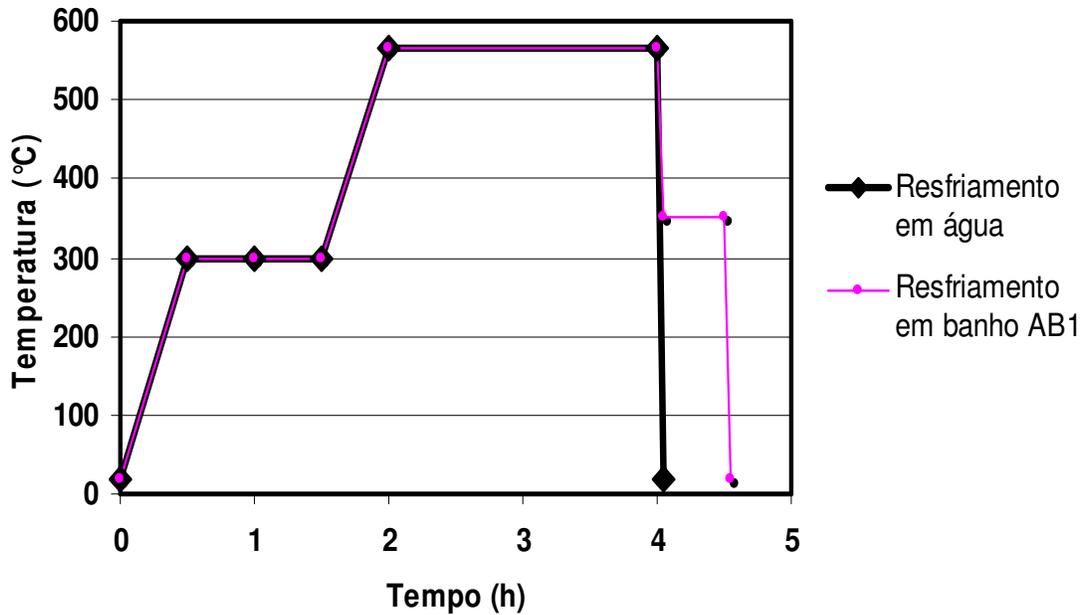


Figura 2.19 – Esquema do processo Tenifer [PYE, 2005].

Em geral, o uso da nitretação líquida e da nitretação gasosa é semelhante e, às vezes, idênticos. A nitretação gasosa pode ser preferida quando se deseja camadas nitretadas mais profundas e a nitretação líquida deve ser preferida para aços carbono [LEPPÄNEN, JONSSON, 1999]. Ambos os processos, no entanto, apresentam as mesmas vantagens de aumentar a dureza, com um mínimo de deformações, embora possam ser aplicados com outros propósitos, como o de aumentar a resistência à fadiga, à corrosão, à oxidação em altas temperaturas etc. [PYE, 2005].

O processo em banhos de sal, sempre foi taxado como um processo poluente, no entanto, sua evolução permitiu que praticamente não haja liberação de amônia, o que torna o processo muito mais ecológico e operacional, e dispensa a necessidade de equipamentos de exaustão e lavagem de gases [FUNATANI, 2004]. Para comprovar a afirmação, no ano de 2001, a

Universidade de Bremen, apoiado pelo Conselho de Pesquisa Alemão, desenvolveu um estudo sobre os aspectos ecológicos do banho de sal nitrocarbonetação conhecido como processo Tuffride, (Tenifer no Brasil) e o processo de nitrocarbonetação gasosa [DURFERRIT, 2002].

Para assegurar uma eficácia no estudo, considerou-se a nitrocarbonetação em banho de sal e a nitrocarbonetação gasosa em 1390 toneladas de virabrequins (135.000 peças) feitas a partir do aço 42CrMo4V em duas plantas adequadamente dimensionadas (forno de banho de sal de 0,75 m³, e forno a gás de 3,6 m³). O tratamento em fornos não adequados (muito grandes, com 6 m³) também foi incluído na análise dos processos à gás. Todos as fontes de energia, insumos e materiais envolvidos nos processos termoquímicos, voltando às suas origens (produção de energia, fabricação de materiais necessários), foram incluídos e relacionados com o número de peças tratadas. No entanto, devido à falta de dados confiáveis, a pré-lavagem (que é um processo caro e não ecologicamente correto), que é necessária antes da nitrocarbonetação gasosa, não foi incluído neste estudo. A figura 2.20, mostra a análise comparativa efetuada, a qual foi feita segundo o seguinte critério: “Pontos negativos foram dados para a utilização de materiais, substâncias e energia, também para os resíduos gasosos, efluentes e resíduos sólidos, que não fossem ecologicamente corretos” [DURFERRIT, 2002].

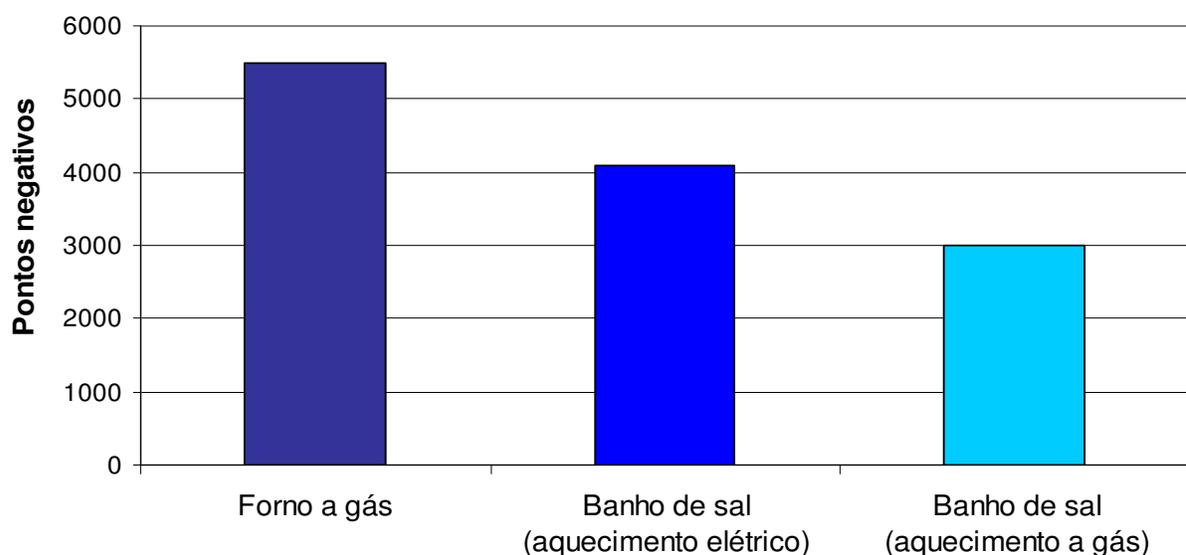


Figura 2.20 Comparação relativa sobre a quantidade da poluição gerada pelos processos de nitrocarbonetação líquida e em banho de sal [DURFERRIT, 2002].

2.5 NITRETAÇÃO DE ENGRENAGENS

A deformação é sempre um problema em todos os processos de tratamentos térmicos de engrenagens. A redução ou eliminação da deformação é um fator muito importante na sua construção [RAKHIT, 2000]. É sempre conveniente saber escolher o melhor, ou seja, em função das especificações propostas, produzir o mais barato possível e com a maior precisão, objetivando manter o poder de competitividade para uma mesma potência transferida. Com relação aos tratamentos térmicos, as engrenagens poderão ser cementadas, temperadas e revenidas, somente temperadas ou mesmo nitretadas [STIPKOVIC, 2000]. Nas engrenagens cementadas, temperadas e revenidas, as deformações são muito maiores do que as obtidas com a nitretação, além de poder ocorrer distorções do dente como a demonstrada na figura 2.21, a qual causará uma queda de resistência de um lado do flanco do dente, após o processo de retífica, diminuindo assim sua qualidade final [DAVIS, 2005].

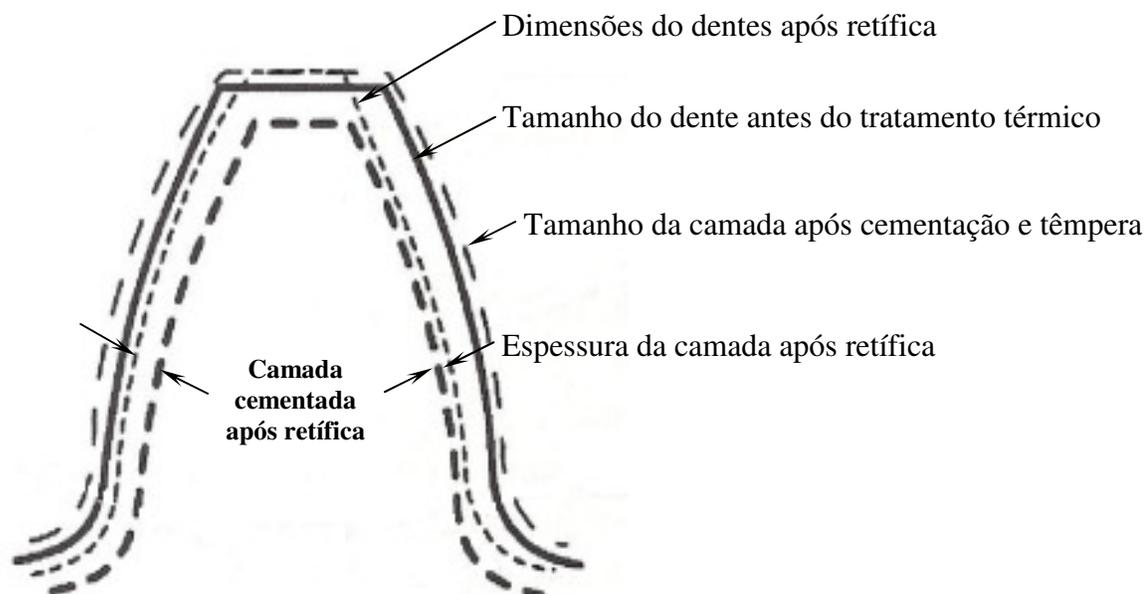


Figura 2.21 – Dente de engrenagem distorcido após cementação, têmpera e revenimento, resultando em maior remoção de sobremetal de um lado do dente [HOWES, 1993], [RAKHIT, 2000], [DAVIS, 2005].

Uma engrenagem pode ser nitretada quando se deseja aumentar sua vida útil sob cargas moderadas, ou seja, se sua utilização não for submetida a altas cargas de impacto ou tensões de contato acima de 1340 MPa. A camada nitretada apresenta uma queda de dureza mais acentuada do que a apresentada pela correspondente camada cementada. A figura 2.22 mostra o gradiente de dureza de uma engrenagem nitretada e outra cementada e temperada [DAVIS, 2005].

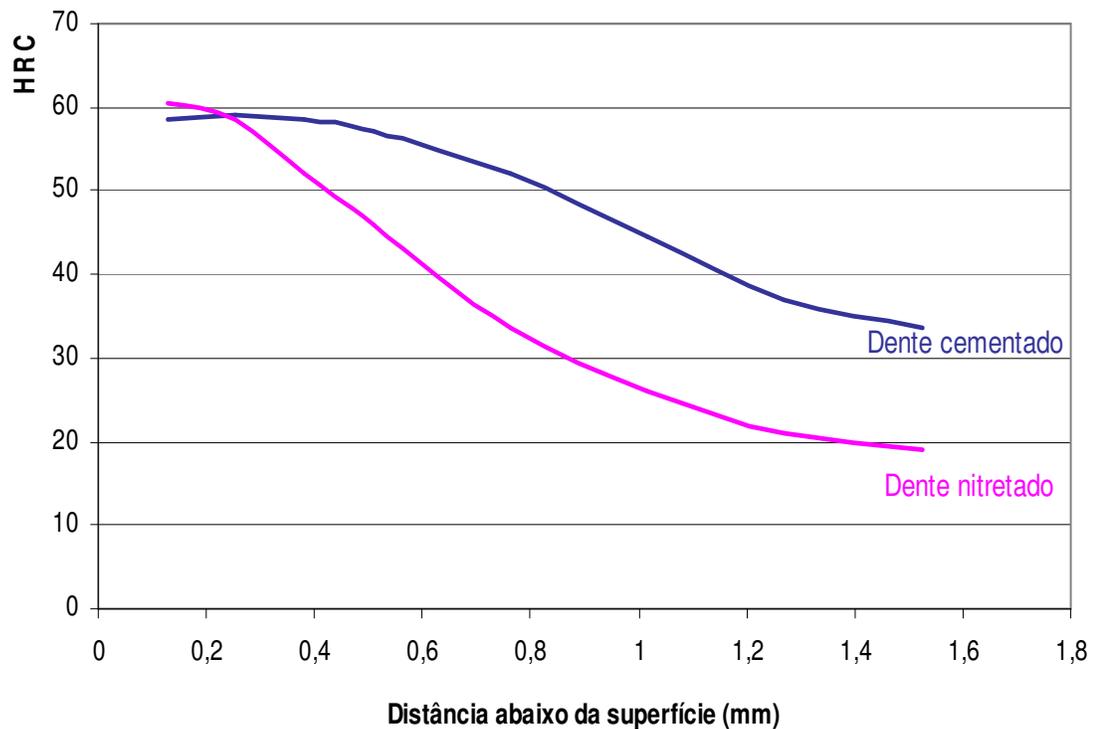


Figura 2.22 – Estudo comparativo do gradiente de dureza do dente de uma engrenagem nitretada (aço Nitralloy 135M) e de outra cementada e temperada (aço SAE 8620) [DAVIS, 2005].

Engrenagens nitretadas não requerem altas profundidades de camadas, como exigido nas engrenagens cementadas. A tabela 2.5 mostra as profundidades de camada recomendadas para engrenagens nitretadas e para engrenagens cementadas e temperadas [RAKHIT, 2000].

A nitretação de engrenagens é um processo particularmente útil quando a temperatura de trabalho é elevada (até, aproximadamente, 500 °C), pois não há queda de dureza da camada, como a que ocorre nos processos que geram estruturas martensíticas [RAKHIT, 2000].

Tabela 2.5 - Profundidades de camada recomendadas para engrenagens nitretadas e para engrenagens cementadas e temperadas. [DAVIS, 2005].

Diametral pitch (DP)	Profundidade da camada recomendada (mm)	
	Nitretada	Cementada e temperada
20	0,127 - 0,254	0,25 - 0,46
16	0,203 - 0,330	0,30 - 0,58
10	0,305 - 0,457	0,50 - 0,90
8	0,356 - 0,508	0,64 - 1,02
6	0,406 - 0,559	0,76 - 1,27
4	0,508 - 0,711	1,02 - 1,52
2	Não recomendado	1,78 - 2,54
1	Não recomendado	2,29 - 3,30

Os custos para a fabricação de uma engrenagem estão divididos em matéria prima, usinagem, tratamento térmico e usinagem final. O gráfico da figura 2.23 ilustra as divisões, segundo [DAVIS, 2005].

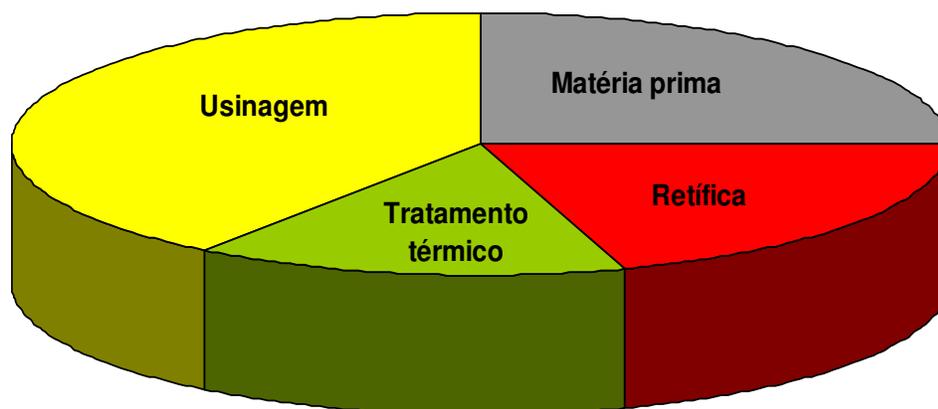


Figura 2.23 – Custo de fabricação de uma engrenagem cementada, temperada e revenida [DAVIS, 2005].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As metodologias utilizadas para o desenvolvimento do trabalho proposto são apresentadas nos fluxogramas das figuras 3.1 e 3.2.

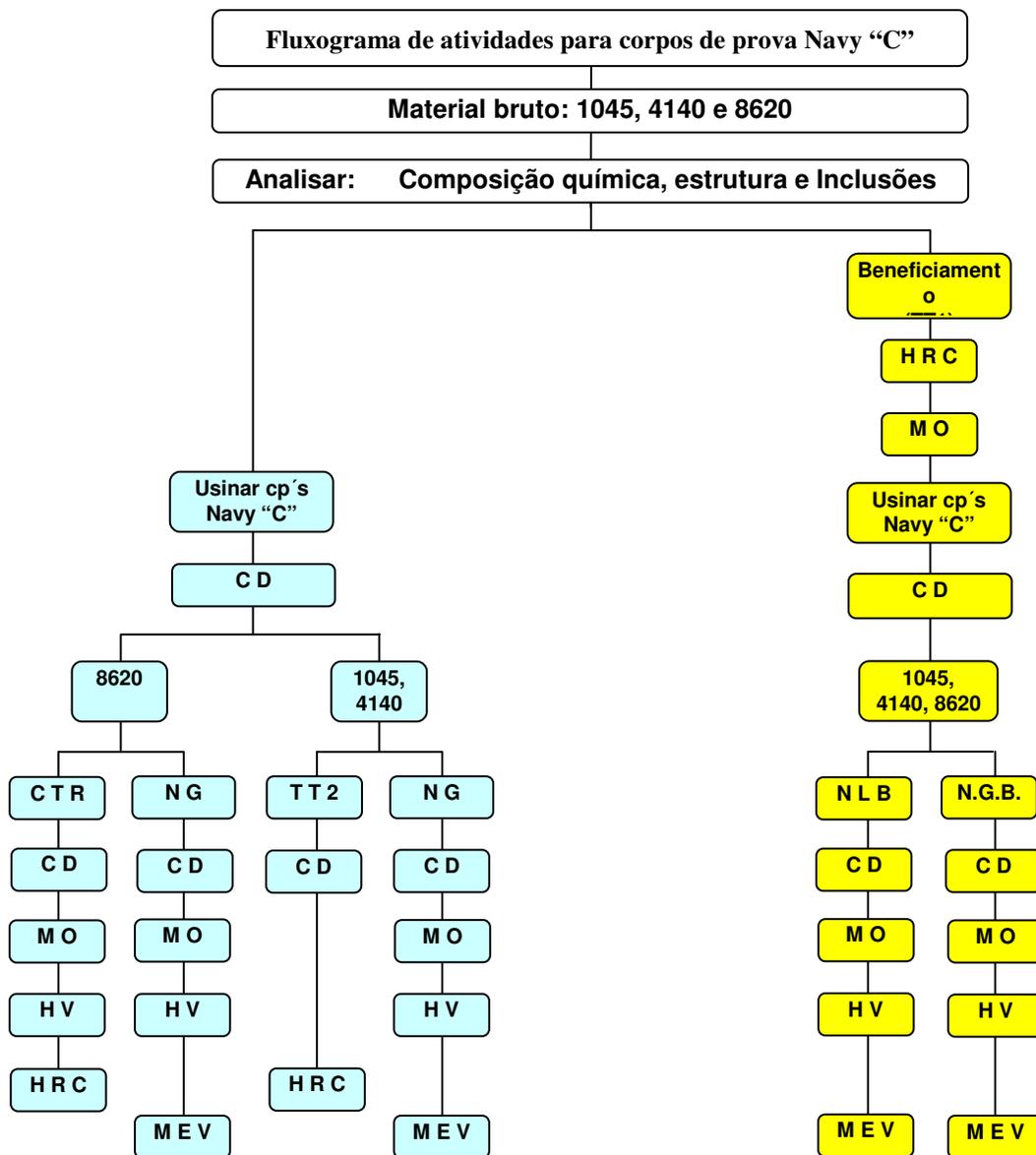


Figura 3.1 – Fluxograma de atividades desenvolvidas para corpos de prova Navy “C”. (CTR: cementar, temperar e revenir, TT1: pré-beneficiamento, TT2: têmpera e revenimento, NG: nitretação gasosa não beneficiado, NLB: nitretação líquida beneficiado, NGB nitretação gasosa beneficiado, MO: microscopia ótica, HV: dureza Vickers, HRC: dureza Rockwell “C”, MEV: microscópio eletrônico de varredura, CD: controle dimensional).

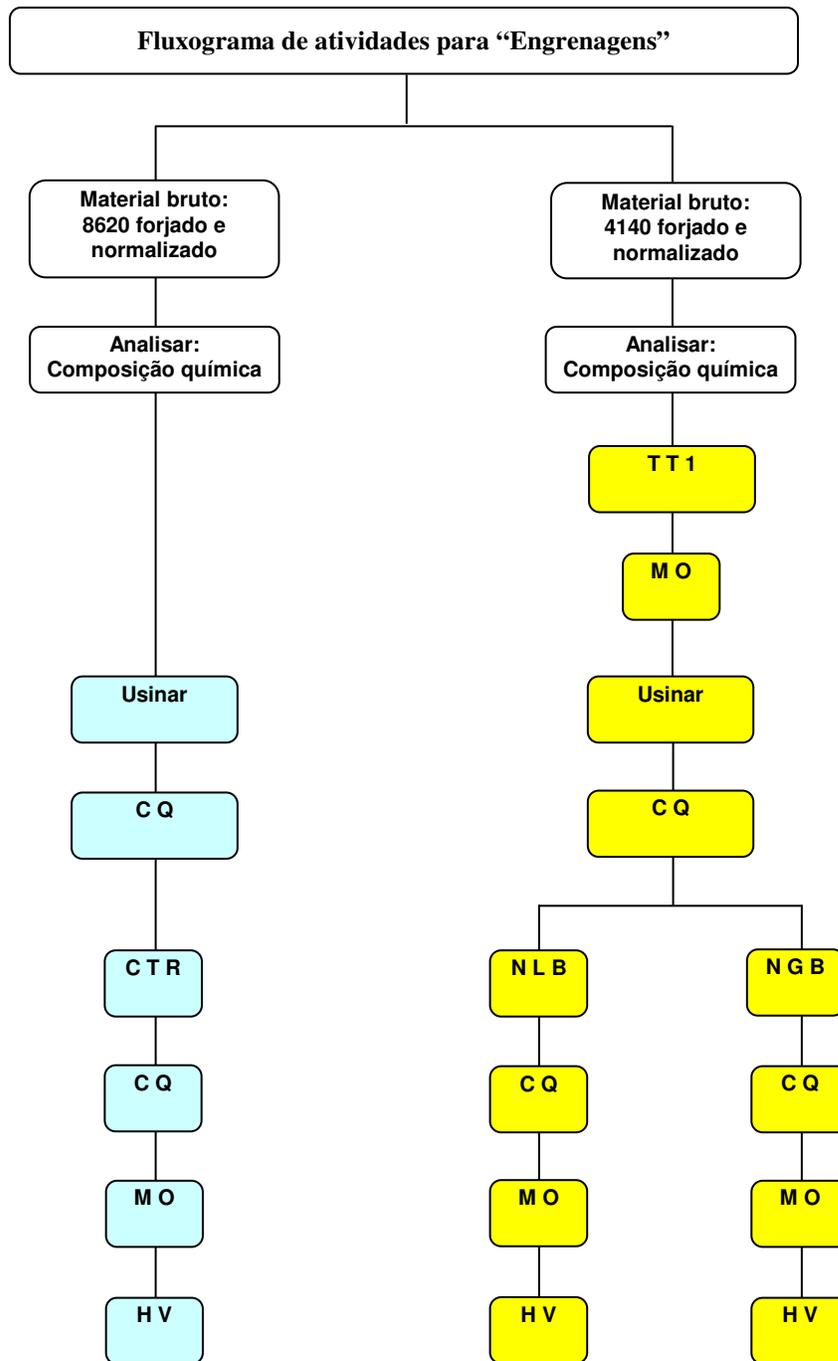


Figura 3.2 – Fluxograma de atividades desenvolvidas para corpos de prova “engrenagens” (CTR: cementar, temperar e revenir, NGB: nitretação gasosa beneficiado, NLB: nitretação líquida beneficiado, MO: microscopia ótica, HV: dureza Vickers, HRC: dureza Rockwell “C”, CQ: controle de qualidade).

3.1 MATERIAIS

Os aços 1045, 4140 e 8620 foram escolhidos em função de serem muito utilizados para a fabricação de componentes na indústria, além de serem facilmente encontrados em todo o Brasil.

Os aços 1045, 4140, 8620 utilizados para confecção dos corpos de prova tipo Navy “C” foram fornecidos conforme as dimensões da figura 3.3 sem tratamentos térmicos. A figura 3.4 mostra as dimensões do material forjado para a confecção das engrenagens de aços 8620 e 4140. As engrenagens foram feitas de aços diferentes, porque se o aço 4140 fosse cementado, os dentes ficariam totalmente endurecidos (o que os tornaria frágeis), e se o aço 8620 fosse utilizado para a nitretação, seu núcleo não apresentaria dureza satisfatória, o que tornaria os dentes frágeis.

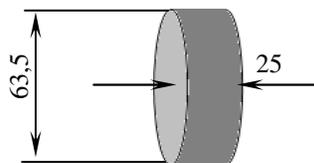


Figura 3.3 – Dimensões dos materiais recebidos para a confecção dos corpos de prova Navy “C” dos aços 1045, 4140 e 8620.

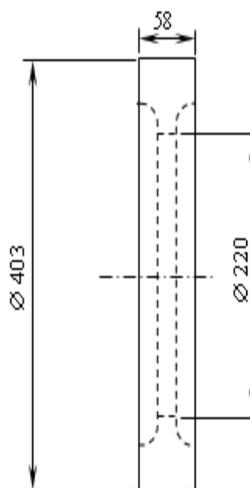


Figura 3.4 – Dimensões do material forjado para confecção das engrenagens de aços 8620 e 4140.

3.2 ANÁLISE DO MATERIAL

3.2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As composições químicas dos aços estudados, bem como os valores exigidos pela norma ABNT estão ilustrados na tabela 3.1, valores (E). Os aços utilizados para a confecção dos corpos de prova Navy “C” estão relacionados como valores (A), já para as engrenagens, os valores significam: E-NLB: engrenagem beneficiada nitretada em meio líquido, E-NGB: engrenagem beneficiada nitretada á gás, E-CTR: engrenagem cementada, seguida de têmpera e revenimento. Pode-se notar que os materiais apresentam suas composições dentro das faixas especificadas. As análises foram efetuadas em espectrômetro de emissão óptica, marca Spectro modelo “Espectromaxx”, da empresa Labteste.

Tabela 3.1 - Análise química via espectrometria de emissão óptica (% em massa).

	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al
8620 (E)	0,18 a 0,23	0,7 a 0,9	0,15 a 0,35	0,4 a 0,7	0,4 a 0,6	0,15 a 0,25	-	-
8620 (A)	0,2	0,82	0,25	0,48	0,50	0,20	0,003	0,018
8620 (E-CTR)	0,2	0,72	0,23	0,67	0,50	0,24	0,003	0,032
1045 (E)	0,43 a 0,5	0,6 a 0,9	-	-	-	-	-	-
1045 (A)	0,45	0,66	0,17	0,05	0,06	0,01	0,001	0,005
4140 (E)	0,38 a 0,43	0,75 a 1,0	0,15 a 0,35	--	0,8 a 1,1	0,15 a 0,25	-	-
4140 (A)	0,38	0,82	0,28	0,04	0,90	0,18	0,005	0,022
4140 (E-NLB)	0,37	0,82	0,26	0,094	1,03	0,19	0,003	0,014
4140 (E-NGB)	0,41	0,99	0,26	0,032	0,95	0,19	0,010	0,020

3.2.2 MICROSCOPIA ÓTICA

Para a avaliação da microestrutura e das inclusões dos aços a serem utilizados para a confecção dos corpos de prova, foram cortadas amostras (figuras 3.5 e 3.6), de cada classe de aço, sendo posteriormente embutidas em baquelite e preparadas com lixamento em granas 120, 180, 320, 400, 600 e 1000, o polimento foi realizado com abrasivo de pasta diamantada de 2-4 μm e 0-1 μm .

As microestruturas das camadas nitretadas e cementadas das engrenagens e dos corpos de prova Navy “C”, foram avaliadas nas regiões mostradas nas figuras 3.7 e 3.8.



Figura 3.5 – Cortes efetuados nas engrenagens para a preparação metalográfica.



Figura 3.6 – Corte efetuado nos corpos de prova Navy “C” para a preparação metalográfica.

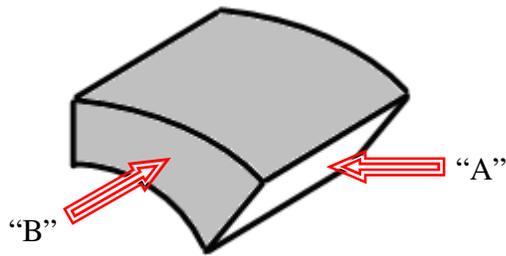


Figura 3.7 – Fragmento do corpo de prova Navy “C”, utilizado para avaliações microestruturais da camada nitretada, perfil de dureza Vickers (região “A”) e de dureza externa (região “B”).

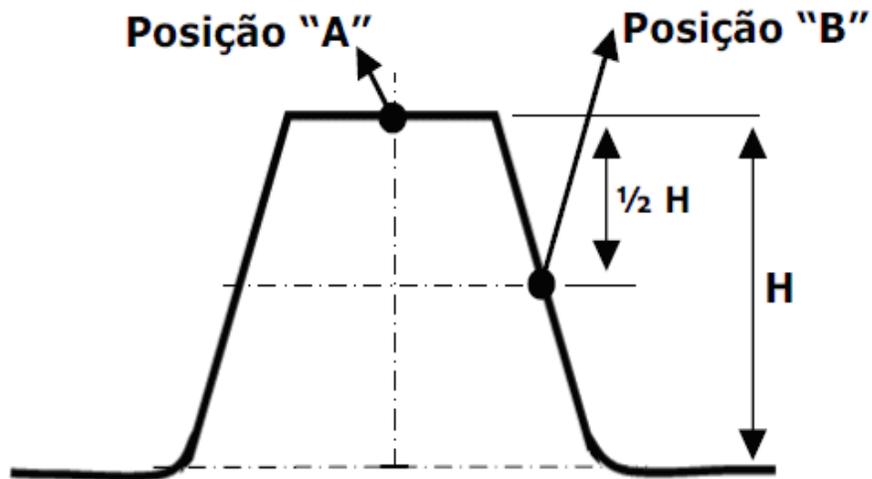


Figura 3.8 – Fragmento da engrenagem utilizado para avaliações microestruturais da camada nitretada, perfil de dureza Vickers (posição “B”) e de dureza externa (posição “A”). [ALBAN, 1993].

Após o corte, os fragmentos (figuras 3.7 e 3.8) foram embutidos em baquelite, lixados (granos 220, 320, 400, 600 e 1000) e polidos com pasta diamantada de (6, 3 e 1 μm). O ataque foi feito com nital 3% (concentração de ácido nítrico diluído em álcool etílico) por, aproximadamente, 10 segundos. Os ensaios foram realizados em um microscópio Nikon, com capacidade de aumento de até 1000x da empresa Labteste.

3.2.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Os ensaios por meio de microscopia eletrônica de varredura foram realizados no Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp através de um Microscópio Eletrônico de Varredura IBM, fabricante JEOL JXA-840 A. Antes de serem analisados, os corpos de prova foram recobertos por uma fina camada de ouro, a fim de melhorar a qualidade das imagens captadas pelo MEV.

3.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS

3.3.1 TRATAMENTO TÉRMICO 1 (TT1)

O tratamento térmico TT1, na realidade um beneficiamento (têmpera e revenimento) foi executado antes da usinagem, em dez corpos de prova de cada aço (1045, 4140, 8620). A figura 3.9 mostra os aços antes do início do processo. Também foram beneficiadas duas engrenagens forjadas de aço 4140. A figura 3.10 mostra uma engrenagem forjada antes do tratamento térmico. A figura 3.11 mostra os ciclos efetuados. As austenitizações foram feitas seguindo as orientações dos diagramas ITT e os diagramas CCT foram utilizados para a determinação dos resfriamentos (figuras: 3.12 e 3.13 do aço 4140, figuras 3.14 e 3.15 do aço 1045 e figuras 3.16 e 3.17 do aço 8620). A austenitização foi feita em um forno tipo banho de sal a 850 °C. Para os aços 4140 e 8620 a têmpera foi feita em banho de sal Durferrit AS-140 a 180 °C [DUBAL et al., 1999] e para o aço 1045 a têmpera foi efetuada em salmoura a 20 °C. A salmoura foi utilizada no aço 1045, para se evitar pontos moles, recorrentes das bolhas formadas por vapor durante o resfriamento em água. O revenimento foi feito a 600 °C em todas as amostras, para estabilizar a estrutura dos aços antes do processo de nitretação, ou seja, garantir que todas as transformações ocorram neste processo, visto que as nitretações ocorreram em temperaturas menores (565 °C na nitretação líquida e 510 °C na nitretação gasosa) [CHANDLER, H, 2000].

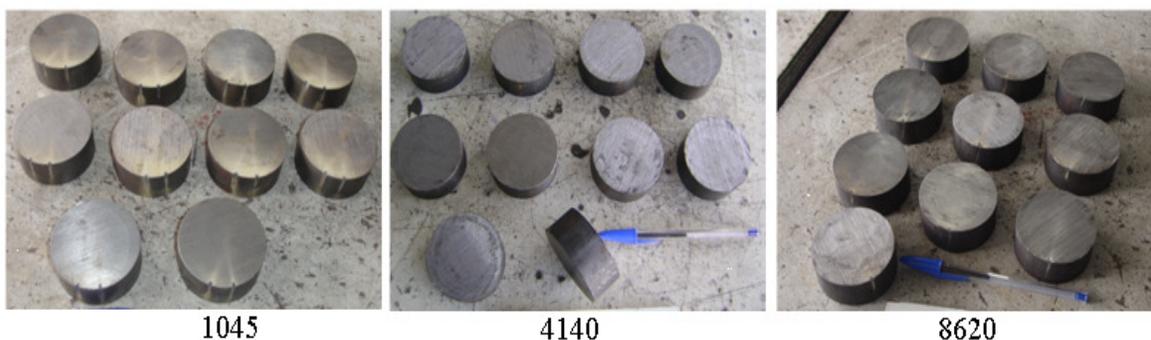


Figura 3.9 – Corpos de prova de aços 1045, 4140 e 8620 utilizados para o tratamento térmico 1 (TT1).



Figura 3.10 – Engrenagem forjada de aço 4140 antes do tratamento térmico 1 (TT1).

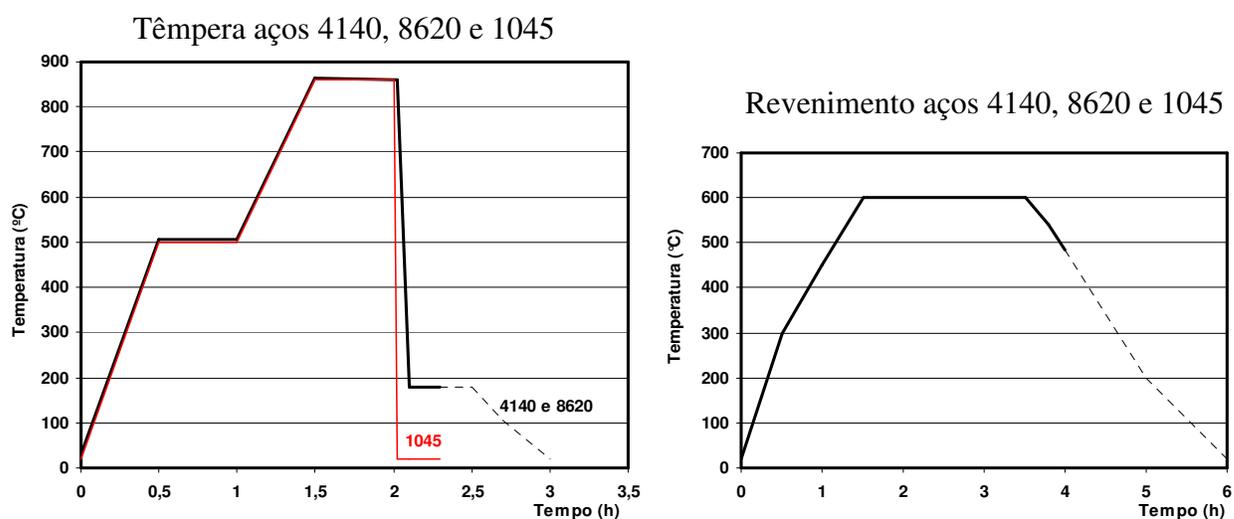


Figura 3.11 - Esquema do processo de beneficiamento (TT1) dos corpos de prova antes da usinagem e das engrenagens após forjamento.

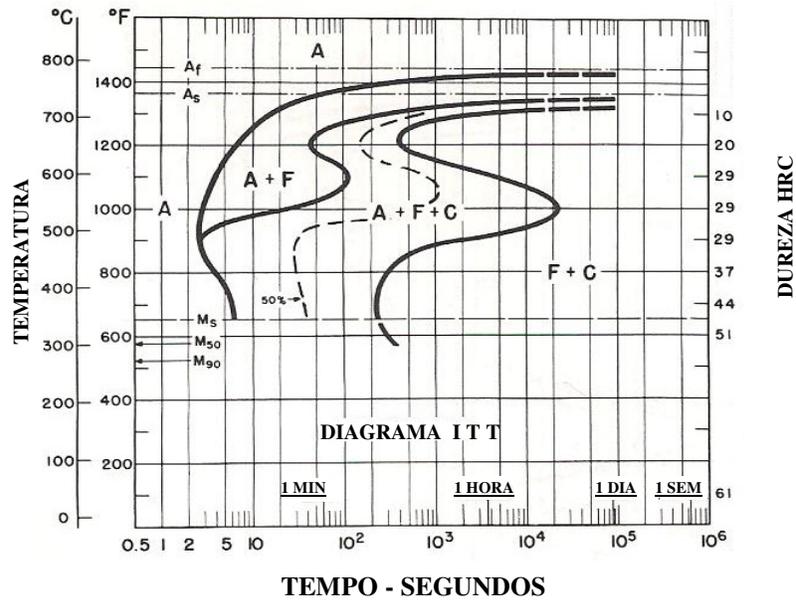


Figura 3.12 – Diagrama ITT do aço 4140. C= 0,37 %, Mn= 0,77 %, Cr= 0,98 %, Mo= 0,21 %. Tamanho de Grão 7 a 8. Austenitizado a 843 °C [VOORT, 1991, p 34].

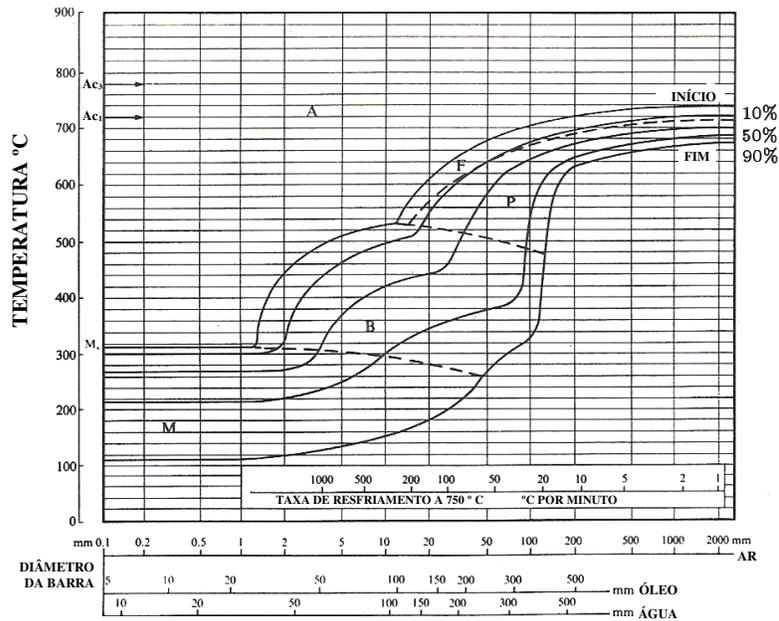


Figura 3.13 – Diagrama CCT do aço 4140. C= 0,37 %, Mn= 0,77 %, Cr= 0,98 % Cr, Mo= 0,21 %. Tamanho de Grão 7 a 8. Austenitizado a 843 °C. [VOORT, 1991, p 424].

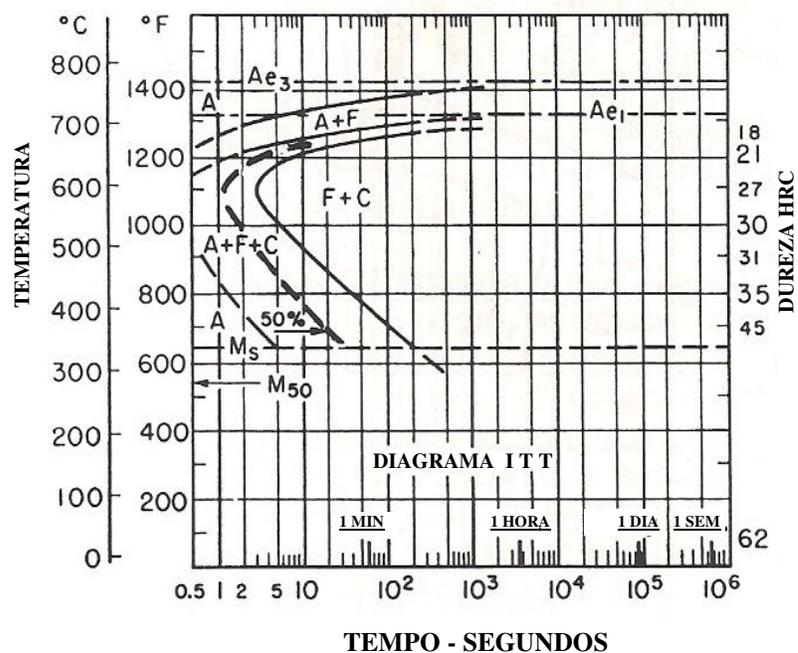


Figura 3.14 – Diagrama ITT do aço 1045-1050. C= 0,47 %, Mn= 0,57 %, Cu= 0,06 %. Tamanho de Grão: 50 % 8 e 50 % 5. Austenitizado a 843 °C. [VOORT, 1991, p 14].

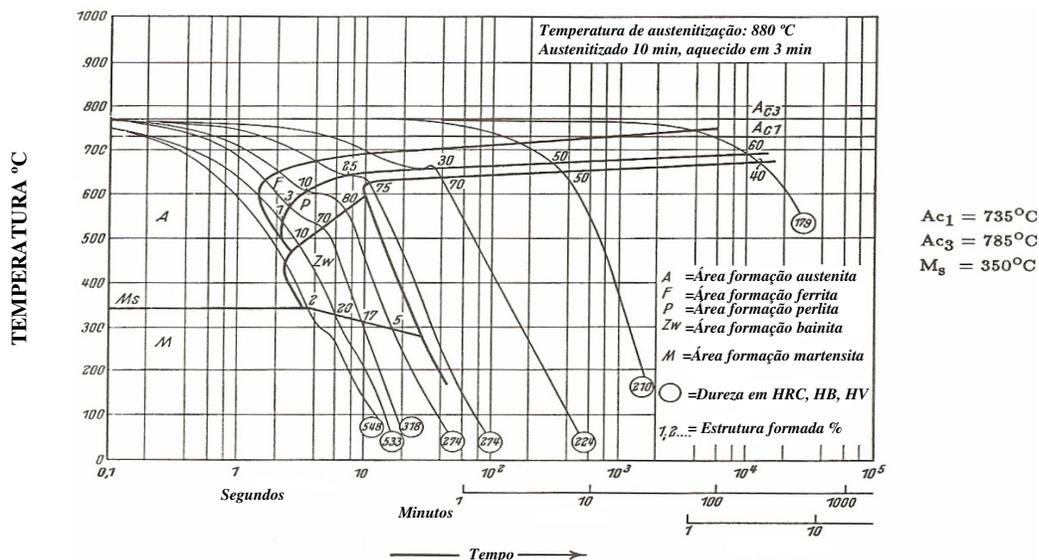


Figura 3.15 – Diagrama CCT do aço 1045. C= 0,44 %, Mn= 0,66 %, Si= 0,22 %, P= 0,022 %, S= 0,029 %, Cr= 0,15 %, V= 0,02 %. Austenitizado a 880 °C. [VOORT, 1991, p 118].

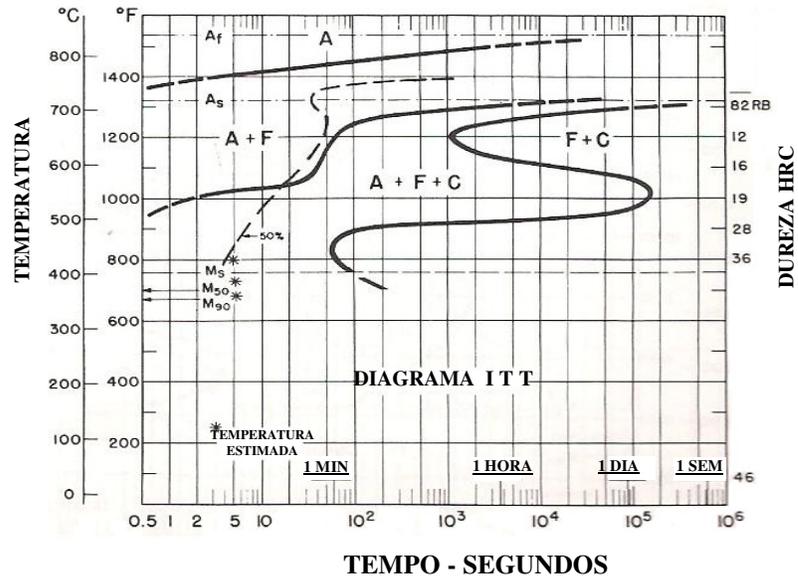


Figura 3.16 – Diagrama ITT do aço 8620. C= 0,18 %, Mn= 0,79 %, Ni= 0,52 %, Cr= 0,56 %, Mo= 0,19 %. Tamanho de Grão: 9 a 10. Austenitizado a 899 °C. [VOORT, 1991, p 36].

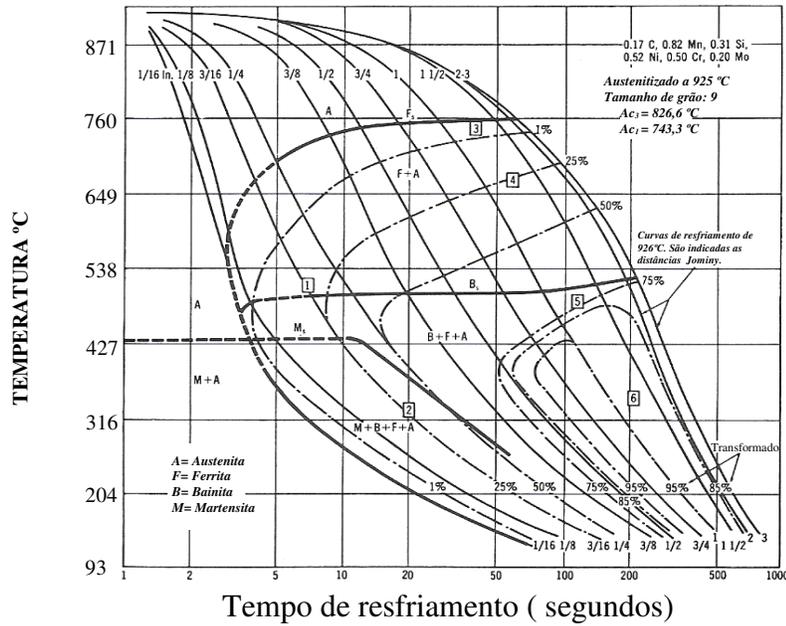


Figura 3.17 – Diagrama CCT do aço 8620. C= 0,17 %, Mn= 0,82 %, Ni= 0,52 %, Cr= 0,50 %, Mo= 0,20 %. Tamanho de Grão: 9. Austenitizado a 925 °C. [VOORT, 1991, p 550].

3.3.2 CEMENTAÇÃO, TÊMPERA E REVENIMENTO (CTR)

Os corpos de prova Navy “C” e uma engrenagem de aço 8620 foram cementados em um forno tipo banho de sal, utilizando o sal Durferrit C-97, com potencial de carbono de 0,8 %, seguida de resfriamento em banho de sal Durferrit AS 140 a 180 °C. O revenimento foi feito a 180 °C para manter a dureza acima de 60 HRC. A figura 3.18 mostra os ciclos efetuados. A figura 3.19 mostra os corpos de prova Navy “C” e da engrenagem antes do processo de cementação.

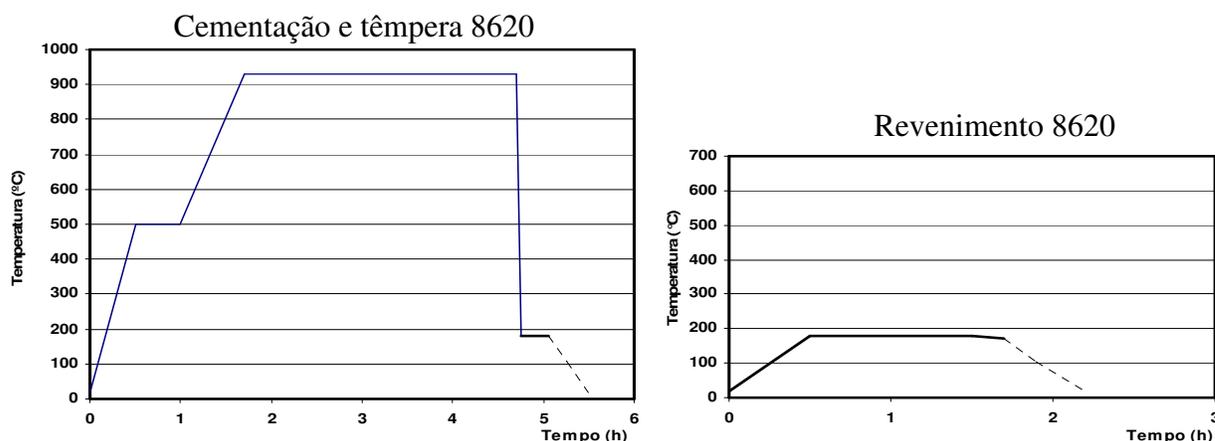


Figura 3.18 - Esquema do processo de cementação, têmpera e revenimento (CTR) dos corpos de prova Navy “C” e da engrenagem do aço 8620.



Figura 3.19 - Corpos de prova Navy “C” e engrenagem de aço 8620 antes do processo de cementação.

3.3.3 TRATAMENTO TÉRMICO 2 (TT2)

O tratamento térmico TT2, têmpera e revenimento, foi executado nos corpos de prova dos aços 1045 e 4140, para verificar a deformação que sofreriam se fossem submetidos a um processo de cementação, onde seria necessário o beneficiamento (tempera e revenimento) posterior. A figura 3.20 mostra os corpos de prova antes do início do processo. A figura 3.21 mostra os ciclos efetuados. A austenitização foi efetuada em um forno tipo banho de sal a 850 °C. Para o aço 4140 a têmpera foi feita em banho de sal Durferrit AS-140 a 180 °C, para o aço 1045 a têmpera foi efetuada em salmoura a 20 °C. A salmoura foi utilizada no aço 1045, para se evitar pontos moles, recorrentes das bolhas formadas por vapor durante o resfriamento em água, e para ter o maior valor de dureza superficial possível. O revenimento foi feito a 180 °C, com a intenção de aliviar as tensões do material após a têmpera e não provocar queda na dureza.



Figura 3.20 - Corpos de prova Navy “C” dos aços 1045 e 4140, antes da têmpera e revenimento (TT2).

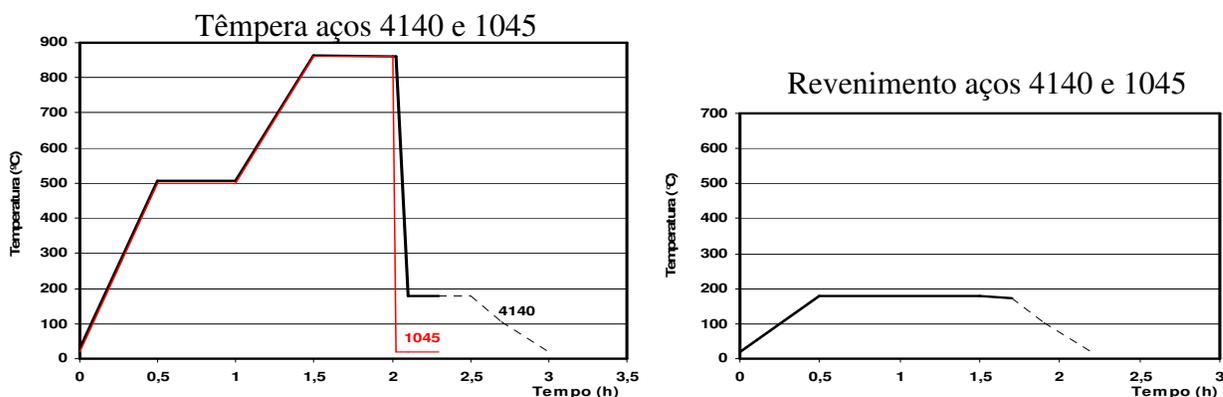


Figura 3.21 - Esquema do processo de têmpera e revenimento (TT2) dos corpos de prova Navy “C” dos aços 4140 e 1045.

3.3.4 NITRETAÇÃO LÍQUIDA

Três corpos de prova (beneficiados) Navy “C” dos aços 8620, 1045 e 4140 e uma engrenagem (beneficiada) de aço 4140 foram nitretados por 90 minutos a 565 °C, em um banho de sal com 33 % de cianato e 3 % de cianeto, usando o processo Durferrit-Tenifer e resfriados em banho de sal a 180 °C (aços 8620 e 4140) ou resfriados em salmoura (aço 1045). A figura 3.22 mostra os ciclos utilizados e a figura 3.23 mostra a foto de corpos de prova Navy “C” sendo colocados no banho de nitretação líquida.

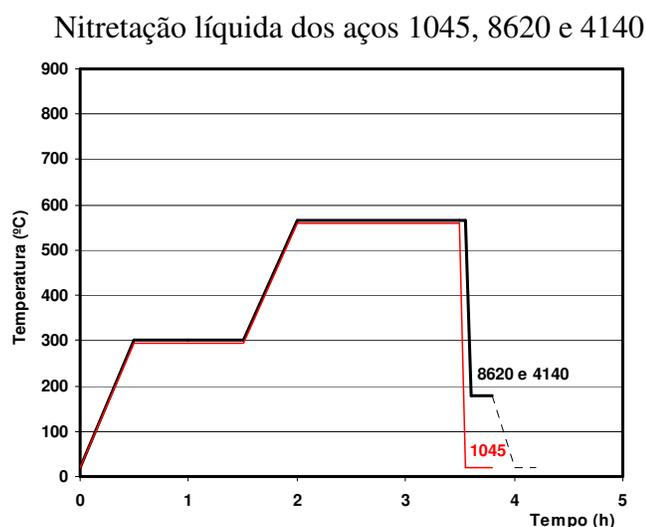


Figura 3.22 - Esquema do processo de nitretação líquida dos corpos de prova Navy “C” dos aços 1045, 8620 e 4140, e da engrenagem de aço 4140.



Figura 3.23 - Corpos de prova Navy “C” sendo colocados no banho de nitretação líquida.

3.3.5 NITRETAÇÃO GASOSA

Seis corpos de prova (beneficiados) Navy “C” dos aços 8620, 1045 e 4140 e uma engrenagem (beneficiada) do aço 4140, além de mais seis corpos de prova (não beneficiados) Navy “C” dos aços 8620, 1045 e 4140, passaram por um processo de nitretação gasosa a 510 °C utilizando uma seqüência de operações definidas na tabela 3.2. A figura 3.24 mostra a disposição dos corpos de prova Navy “C” na carga do forno e a figura 3.25 mostra a disposição da engrenagem na carga.

Tabela 3.2 – Etapas do processo de nitretação gasosa com ciclo de 48 horas.

Fase	Dissociação Amônia (%)	Pressão (torr)	Tempo (h)
Lavar peças com thinner	--	--	--
Colocar peças no dispositivo	--	--	--
Colocar peças no forno	--	--	--
Purgar	10	--	0,5
Aquecer ate 510 °C	10	14,71	10
Nitretar a 510 °C	20	14,71	30
Nitretar a 510 °C	30	14,71	18
Ligar ventilador, resfriar até 90 °C	5	14,71	10
Quando chegar a 90 °C, retirar as peças	--	--	1
Total	--	--	69,5

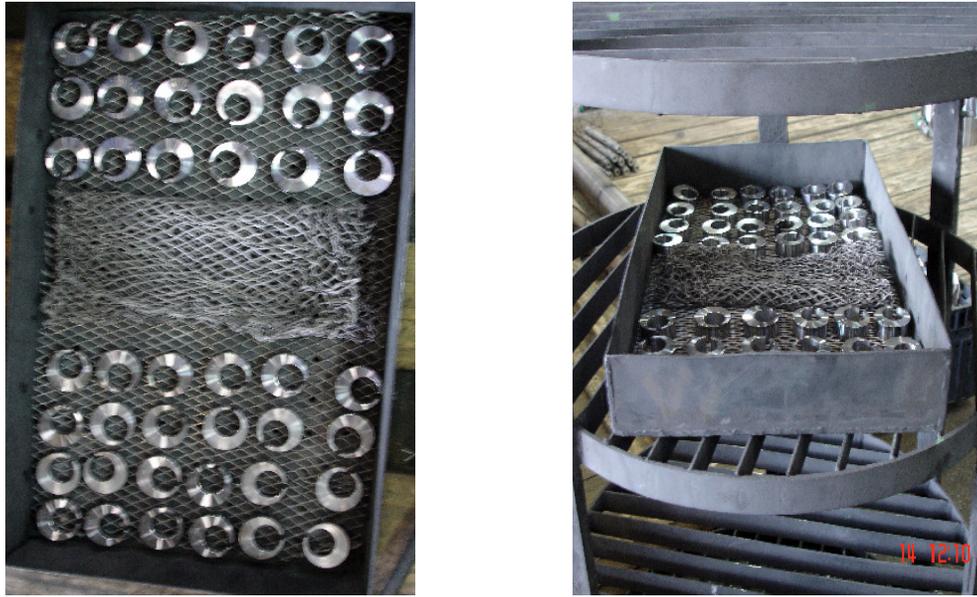


Figura 3.24 - Disposição dos corpos de prova navy “C” na bandeja a ser utilizada no processo de nitretação gasosa.



Figura 3.25 - Disposição da engrenagem de aço 4140 na carga do forno de nitretação gasosa.

3.4 USINAGEM

3.4.1 USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA NAVY “C”

Os corpos de prova tipo Navy “C” foram usinados conforme o desenho da figura 3.26.

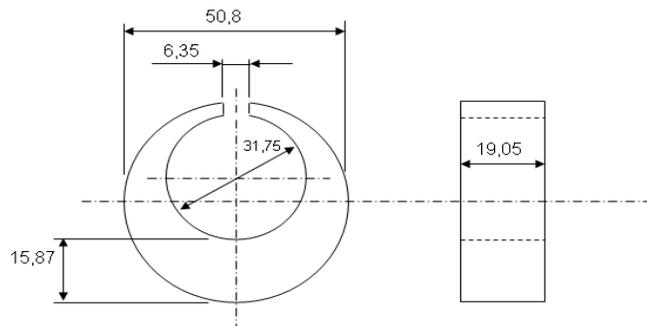


Figura 3.26 - Desenho do corpo de prova tipo Navy “C” [HARDIN, BECKERMANN, 2010].

3.4.2 USINAGEM DAS ENGRENAGENS FORJADAS

As engrenagens de aço 4140 foram usinadas após o beneficiamento conforme o desenho da figura 3.27. A engrenagem de aço 8620 foi usinada sem o beneficiamento.

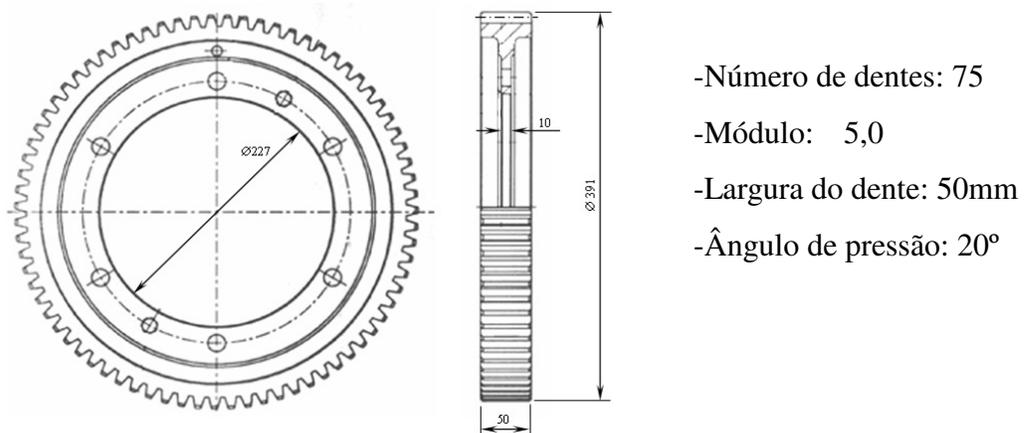


Figura 3.27 - Desenho do corpo de prova “engrenagem” de 75 dentes.

3.5 CONTROLE DIMENSIONAL

3.5.1 CORPOS DE PROVA NAVY “C” APÓS USINAGEM

Os corpos de prova Navy “C” foram medidos nas dimensões, A, B, C, D e E, conforme desenho da figura 3.28. As medições foram feitas em uma máquina de medição tridimensional Mitutoyo (figura 3.29) na empresa Usicomp.

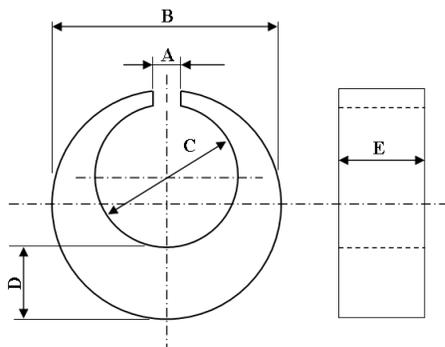


Figura 3.28 – Dimensões inspecionadas após usinagem dos corpos de prova Navy “C”.



Figura 3.29 – Máquina tridimensional utilizada nas medições com software Geopack da empresa Usicomp.

3.5.2 MEDIÇÃO DAS ENGRENAGENS APÓS USINAGEM

As engrenagens foram medidas e avaliadas conforme a norma DIN 3962 de 1978 (tolerances for cylindrical gear teeth) [GEMAQUE, 2004], a qual define as tolerâncias dimensionais para os dentes de engrenagens e um índice de qualidade, que varia desde a menor qualidade (12) até a de maior precisão (qualidade 1). As medições foram efetuadas em uma medidora de engrenagens universal Mahr GMX 400 (figura 3.30), na empresa Eacial.



Figura 3.30 – Máquina medidora de engrenagens da empresa Eacial.

3.5.3 CORPOS DE PROVA NAVY “C” APÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS

Todos os corpos de prova Navy “C” foram medidos após os tratamentos térmicos e termoquímicos, nas dimensões, A, B, C, D e E, conforme descrição do item 3.5.1.

3.5.4 ENGRENAGENS APÓS TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS

As engrenagens foram medidas e avaliadas após os tratamentos termoquímicos, conforme item 3.5.2.

3.6 MEDIDA DE DUREZA

3.6.1 DUREZA BRINELL

As medidas de dureza Brinell foram efetuadas após o recebimento dos materiais brutos. As medições foram efetuadas em durômetro Britest com esfera de tungstênio de 10 mm e carga de 3000 kgf, na empresa ACE-Supertrat [CHANDLER, 2004].

3.6.2 DUREZA ROCKWELL “C”

As medidas de dureza Rockwell “C” foram efetuadas após o beneficiamento (TT1), item 3.3.1, após o processo de cementação seguida de têmpera e revenimento (CTR), item 3.3.2 e de têmpera e revenimento (TT2), item 3.3.3. As medições foram efetuadas em durômetro Wolpert modelo Dia Testor 2 RC na empresa ACE-Supertrat.

3.6.3 MICRODUREZA VICKERS

As medidas de microdureza Vickers (HV) foram executadas em microdurômetro Precision da empresa ACE-Supertrat. As análises foram efetuadas nas regiões indicadas pelas figuras 3.7 e 3.8. Os ensaios foram efetuados com carga de 500 g (HV 0,5). Para a determinação do perfil de dureza Vickers, os ensaios partiram de 50 μm da superfície, depois de 100 em 100 μm em direção ao núcleo. Foram feitas três impressões (figura 3.31) tomando-se depois a média dessas medidas [GARCIA, SPIN, SANTOS, 2000].



Figura 3.31 – Distância entre as impressões Vickers para as medidas de microdureza.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

PARTE I – CORPOS DE PROVA NAVY “C”

4.1 MICROESTRUTURA DOS AÇOS UTILIZADOS NO ESTADO DE FORNECIMENTO

A figura 4.1 mostra as inclusões e as microestruturas encontradas nos aços 8620, 1045, 4140 e 8550 como recebidos. A tabela 4.1 mostra uma descrição das análises efetuadas em cada tipo de aço. A coluna de dureza HV, trata-se de uma conversão da dureza Brinell encontrada.

Tabela 4.1 – Caracterização dos materiais, como recebidos.

	Inclusões conforme (ASTM E 45-05)	Microestrutura	Tamanhos de grão conforme (ASTM E 112-96)	Dureza HB	Dureza* HV
8620	Óxidos, série grossa, nível 2 ½	Ferrita e 30 % de perlita	Ferrita: 7,5 Perlita: 7,0 a 8,0	165	173
1045	Sulfetos, série grossa, nível 2 ½	Ferrita e 55 % de perlita	Ferrita: 7,0 a 8,0 Perlita: 6,5 a 7,5	219	230
4140	Óxidos, série grossa, nível 1 ½	Ferrita, perlita e ferrita acicular	Não avaliado	258	272

*Valores foram convertidos utilizando a norma SAE J 417 de Dezembro 1983, para aços.

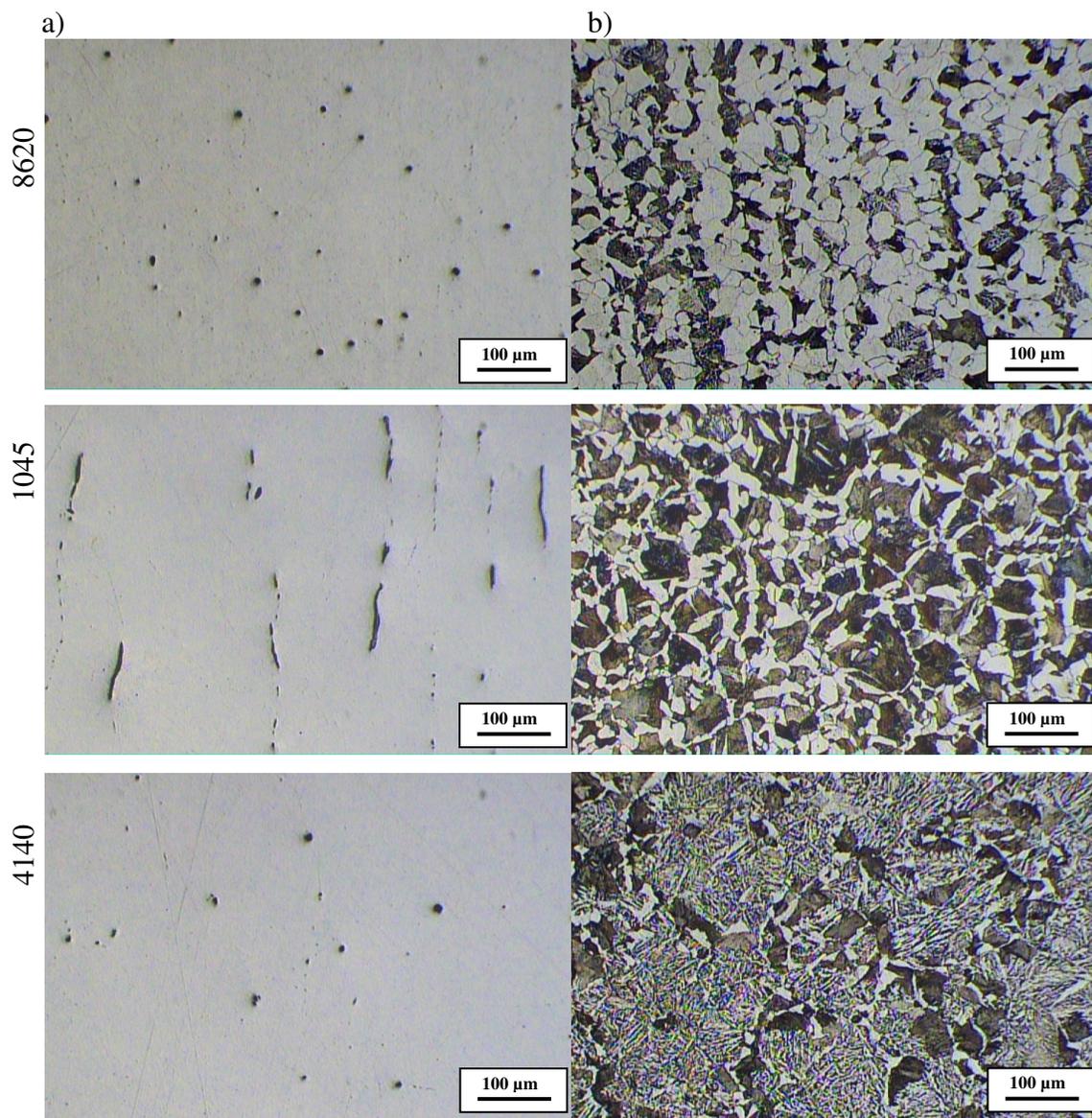


Figura 4.1 – Inclusões e microestruturas das barras de aço utilizadas, no estado de fornecimento, a) Sem ataque, só com polimento. b) Ataque com Nital 3%. [BRAMFITT, LAWRENCE, 2004].

4.2 DUREZA E MICROESTRUTURAS APÓS O TRATAMENTO TÉRMICO 1 (TT1)

As microestruturas e as durezas obtidas após o beneficiamento (TT1) realizado nos aços são mostradas na tabela 4.2 e na figura 4.2.

Tabela 4.2 – Fases presentes e durezas após o beneficiamento (TT1), conforme o tipo de aço. [MEI, 2010].

Tipo Aço	Estado	Microestrutura No núcleo	Dureza superficial (HRC)	Dureza núcleo (HRC)
8620	Após TT1	Martensita revenida e ferrita	26 ±1	15 ±1
1045	Após TT1	Ferrita, perlita e ferrita de Widmanstätten	28 ±1	24 ±1
4140	Após TT1	Martensita revenida	36 ±1	35 ±1

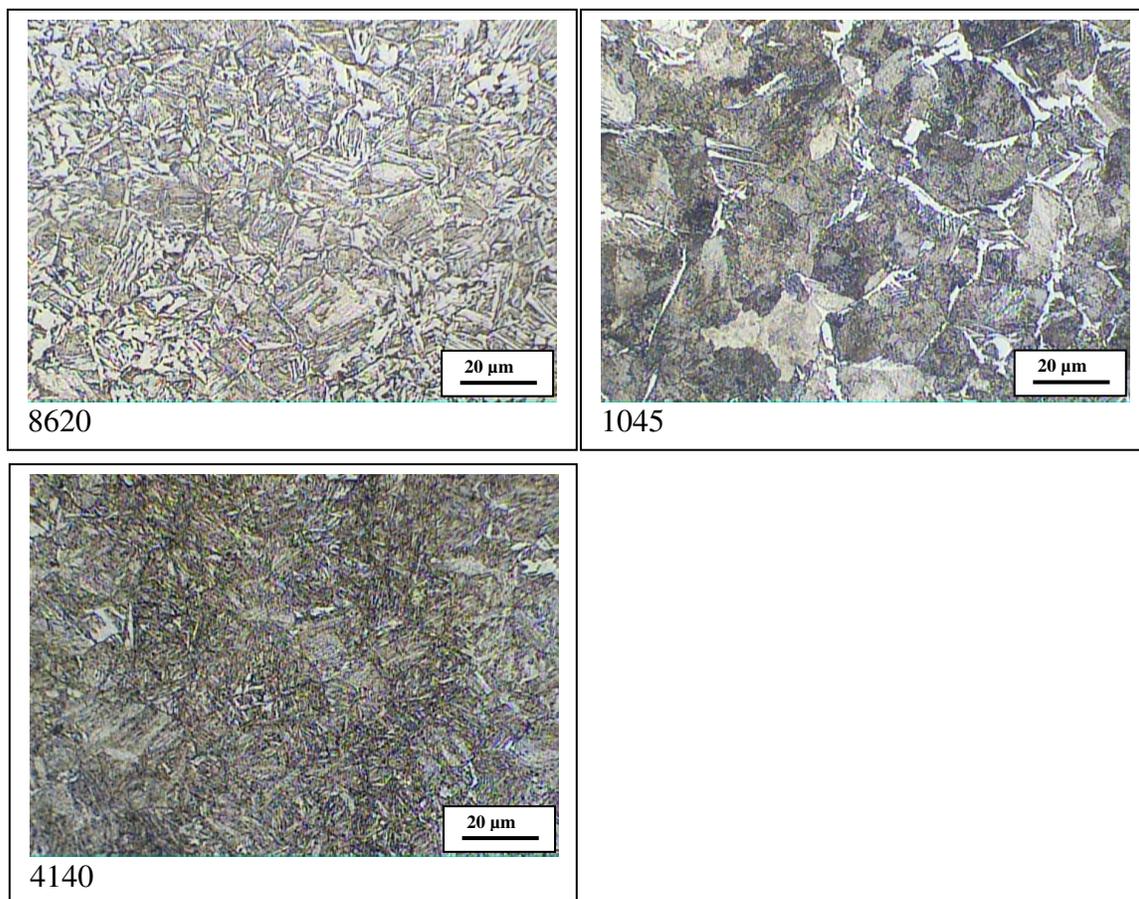


Figura 4.2 – Microestruturas do núcleo dos aços utilizados após o beneficiamento (TT1).

4.3 DUREZAS APÓS O TRATAMENTO TÉRMICO 2 (TT2) E CEMENTAÇÃO (CTR)

A tabela 4.3 mostra os resultados de dureza encontrados após os processos de cementação, têmpera e revenimento (CTR) e de têmpera e revenimento (TT2), realizados nos corpos de prova Navy “C”.

Tabela 4.3 – Durezas superficiais (Rockwell “C”) após tratamentos térmicos nos corpos de prova Navy “C” dos aços 8620, 1045 e 4140.

Aço	Estado	Dureza superficial
8620	Após CTR	63 ±1
1045	Após TT2	63 ±1
4140	Após TT2	63 ±1

Os tratamentos CTR e TT2, foram efetuados com o objetivo de que suas durezas superficiais fossem iguais. Para tanto, o aço 1045 teve que ser resfriado em salmoura, enquanto que os aços 8620 e 4140 foram resfriados em banho de sal a 180 °C.

4.4 CONTROLE DIMENSIONAL CORPOS DE PROVA NAVY “C”

A tabela 4.4 apresenta as variações dimensionais obtidas para os aços 8620, 1045 e 4140 nos diferentes tratamentos termoquímicos utilizados.

O controle dimensional dos corpos de prova Navy “C” é apresentado na figura 4.3 para o aço 8620, após cementação, têmpera e revenimento e após nitretação líquida e gasosa. Observa-se que a amostra cementada apresentou deformações superiores às amostras nitretadas. Isto porque após a cementação a peça precisa ser temperada e revenida, o que aumenta muito as deformações se comparadas as de peças somente nitretadas, onde não são necessários a têmpera e o revenimento posterior. [KNERR, ROSE, FILKOWSKI, 2004], [PYE, 2005], [MEI, 2010].

Tabela 4.4 – Variação dimensional obtida para os diferentes aços e tratamentos térmicos e termoquímicos utilizados.

		Variação dimensional (%)				
Aço	Processo	A	B	C	D	E
8620	CTR	4,64	0,17	0,18	0,04	0,26
	NG	-0,80	0,03	-0,05	0,08	0,08
	NGB	-0,50	0,05	-0,05	0,07	0,03
	NLB	-0,48	0,05	-0,05	0,07	0,03
		Variação dimensional (%)				
Aço	Processo	A	B	C	D	E
1045	TT2	6,91	0,56	0,72	0,88	0,43
	NG	-0,89	0,03	-0,10	0,03	0,02
	NGB	-0,76	0,02	-0,16	0,11	0,07
	NLB	-0,73	0,02	-0,15	0,11	0,07
		Variação dimensional (%)				
Aço	Processo	A	B	C	D	E
4140	TT2	6,02	0,31	0,12	0,18	0,25
	NG	-1,09	0,10	0,07	0,18	0,06
	NGB	-0,66	0,13	0,01	0,20	0,06
	NLB	-0,61	0,13	0,01	0,18	0,06

Na figura 4.4 observa-se que peças dos aços 1045 e 4140 que sofreram um beneficiamento depois de usinadas (TT2) apresentaram uma distorção muito maior que peças que sofreram beneficiamento anterior à usinagem (NGB e NLB). Isto indica que este beneficiamento prévio à usinagem estabilizou melhor a estrutura, pois o revenimento foi realizado a 600 °C, ou seja, numa temperatura superior a da nitretação líquida (565 °C) e gasosa (510 °C). Assim, as transformações que poderiam ocorrer na peça durante a nitretação já haviam ocorrido no revenimento anterior, a uma temperatura mais elevada.

Em relação à peças beneficiadas anteriormente à usinagem não se observou diferença na deformação usando os processos de nitretação líquida (NLB) ou gasosa (NGB) indicando que estes processos são equivalentes nas deformações geradas nas peças.

Observa-se também que não houve diferença significativa nas deformações de peças submetidas à nitretação com beneficiamento anterior à usinagem (NGB e NLB) e seu beneficiamento (NG). Isto indica que, em termos de deformações, o beneficiamento anterior à usinagem não é significativo para peças dos aços 1045 e 4140 que serão nitretadas via líquida ou

gasosa. Esses dois aços tinham praticamente o mesmo teor de carbono (em torno de 0,4 %), com a diferença que o aço 4140 também tem em sua composição química 0,8 % Cr e 0,2 % Mo. Isto significa, que nestes casos, não houve efeito significativo destes 2 elementos de liga na deformação de peças nitretadas ou em meio líquido ou gasoso.

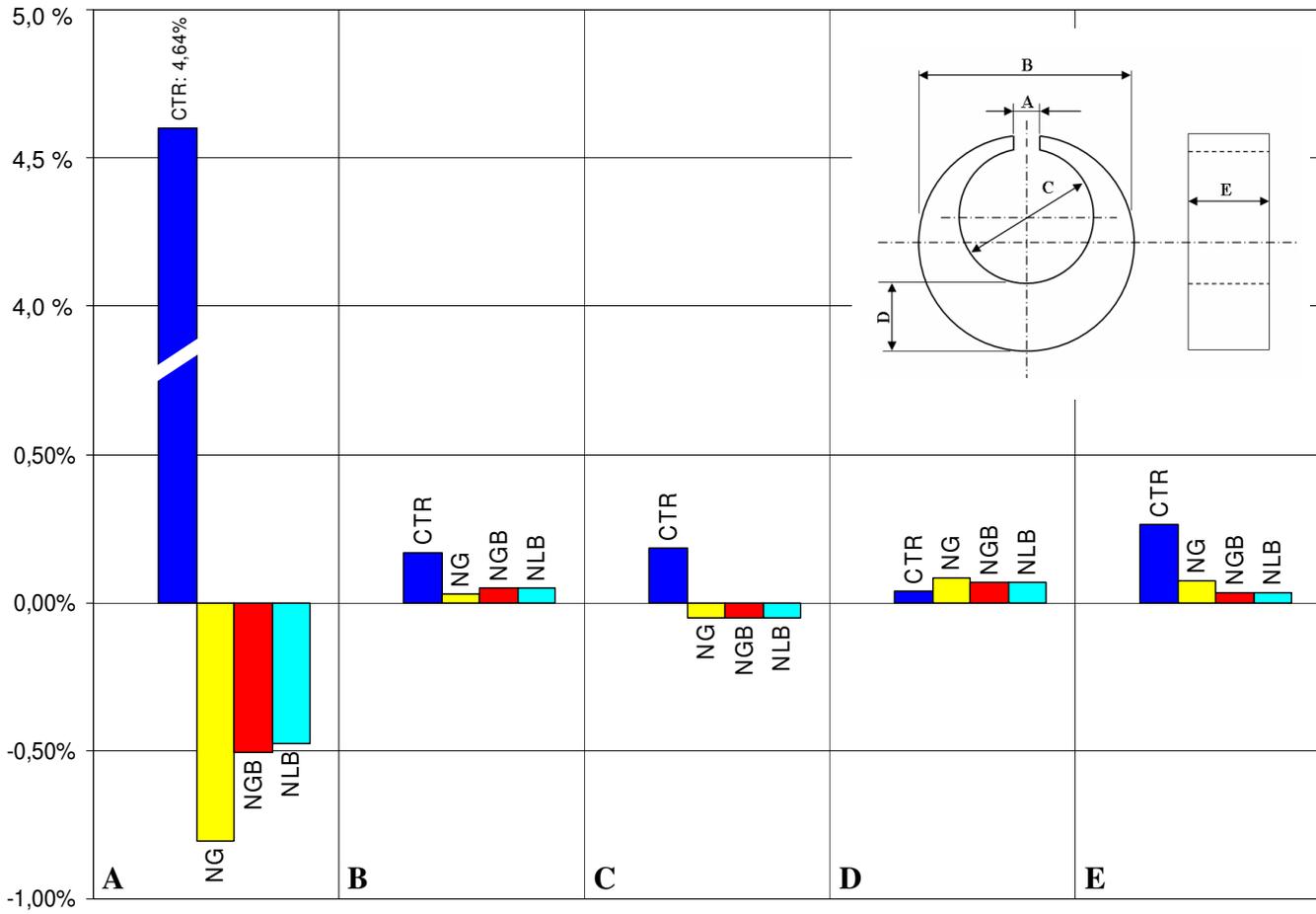


Figura 4.3 - Médias das deformações percentuais obtidas nos corpos de prova Navy “C” de aço 8620 nas diferentes cotas (A, B, C, D e E). (CTR: Cementado, temperado e revenido, NG: nitretação gasosa, não beneficiado, NGB: nitretação gasosa beneficiado (TT1), NLB: nitretação líquida. beneficiado (TT1).

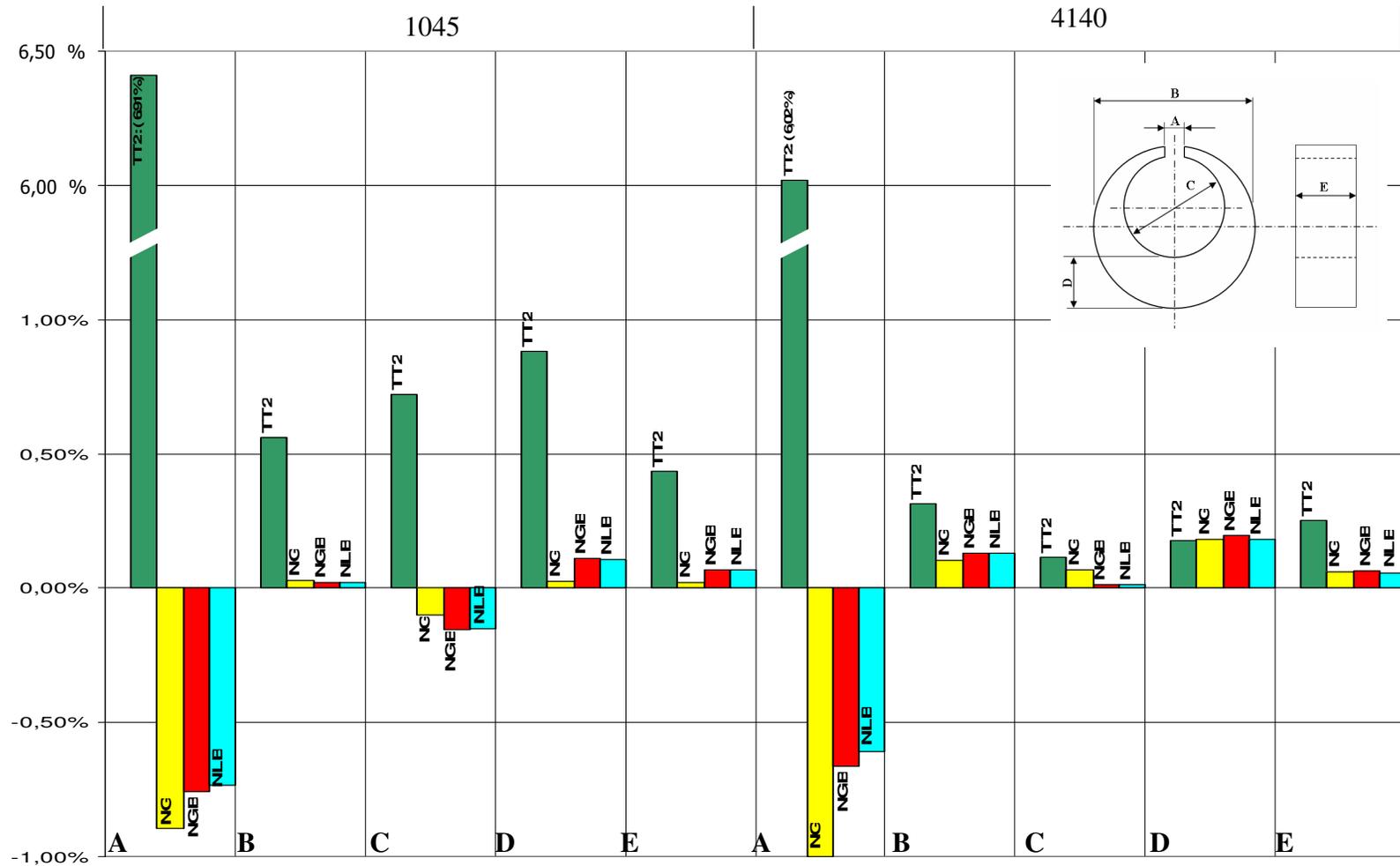


Figura 4.4 - Médias das deformações percentuais obtidas nos aços 1045 e 4140 após diferentes processos de nitretação, nas diferentes cotas (A,B,C, D e E). (TT2: temperado e revenido após usinagem do corpo de prova, NG.: nitretação gasosa, não beneficiado, NGB.: nitretação gasosa beneficiado (TT1), NLB: nitretação líquida, beneficiado (TT1).

4.5 MICRODUREZA APÓS OS PROCESSOS DE NITRETAÇÃO

Na tabela 4.5 e na figura 4.5 observa-se as medidas de durezas superficiais e dos perfis de dureza em amostras Navy “C” dos diferentes aços submetidos a distintos tratamentos de nitretação e cementação. No aço 8620 que sofreu todos os processos termoquímicos, a dureza superficial alcançada na cementação foi praticamente a mesma alcançada pela nitretação líquida, porém na cementação a profundidade em que a dureza é mantida para o interior da peça é muito maior. Uma dureza de 550 Vickers é mantida até 0,7 mm de profundidade na cementação enquanto que na nitretação a dureza só é mantida até 0,3 mm na nitretação gasosa. O aço 4140 apresentou valores de dureza Vickers superficial até duas vezes maiores do que os encontrados no aço 1045, em função da presença dos elementos formadores de nitretos em suas estruturas (cromo e molibdênio), visto que ambos tem teores de carbono próximos. Observando os 3 aços nota-se que em relação aos processos de nitretação, as maiores durezas superficiais foram atingidas com a nitretação líquida, entretanto foi a que apresentou menores camadas endurecidas.

A especificação da “camada de difusão” obedece à norma DIN 50190, que define profundidade de camada de difusão (NHT) como a profundidade de camada onde a dureza está 50 HV_{0,5} acima da dureza do núcleo. Assim, tem-se a seguinte expressão [SANTOS, 2003]:

$$\text{Camada de Difusão (NHT)} = \text{Dureza de núcleo} * + 50 \text{ HV}$$

(*) medido em HV_{0,5}

Na figura 4.6 observa-se a espessura da camada de difusão (NHT) para os 3 aços (8620, 1045 e 4140) submetidos a diferentes processos de nitretação. Nota-se, de uma maneira geral, que a espessura da camada de difusão foi maior no aço 8620, o qual possui um teor maior de elementos de liga (níquel, molibdênio e cromo), depois no aço 4140 que possui a adição de molibdênio e cromo e, finalmente, as menores camadas foram observadas no aço 1045, sem esses elementos de liga. Assim, fica claro que a espessura da camada de difusão é bastante sensível à adição de elementos de liga como Ni, Mo e Cr.

Tabela 4.5 – Microdurezas de amostras de corpos de prova Navy “C” após a nitretação e a cementação. (NG: nitretação gasosa não beneficiado, NGB: nitretação gasosa beneficiado, NLB: nitretação líquida beneficiado, CTR: cementação têmpera e revenimento).

		(HV1)	(HV 0,5)								
AÇO=>		8620	8620			1045			4140		
LOCAL		CTR	NG	NGB	NLB	NG	NGB	NLB	NG	NGB	NLB
Superfície=>		772	645	670	753	434	450	560	740	820	832
Distância da superfície (mm)	0,05	806	610	624	645	394	404	412	699	788	730
	0,1	809	610	602	605	391	396	412	674	772	581
	0,2	798	507	542	399	341	398	333	685	735	490
	0,25	783	425	487	388,5	336,5	371	310	646,5	636	451
	0,3	771	343	432	378	332	344	303	608	537	412
	0,4	725	289	373	303	330	328	282	405	390	341
	0,5	625	286	327	278	264	313	274	326	338	321
	0,6	573	203	301	256	266	303	262	303	317	
	0,7	522	186	298	233	264	297		315	293	
	0,8	476		280		267	294		293	279	
Núcleo		286	182	241	226	259	259	259	284	275	280

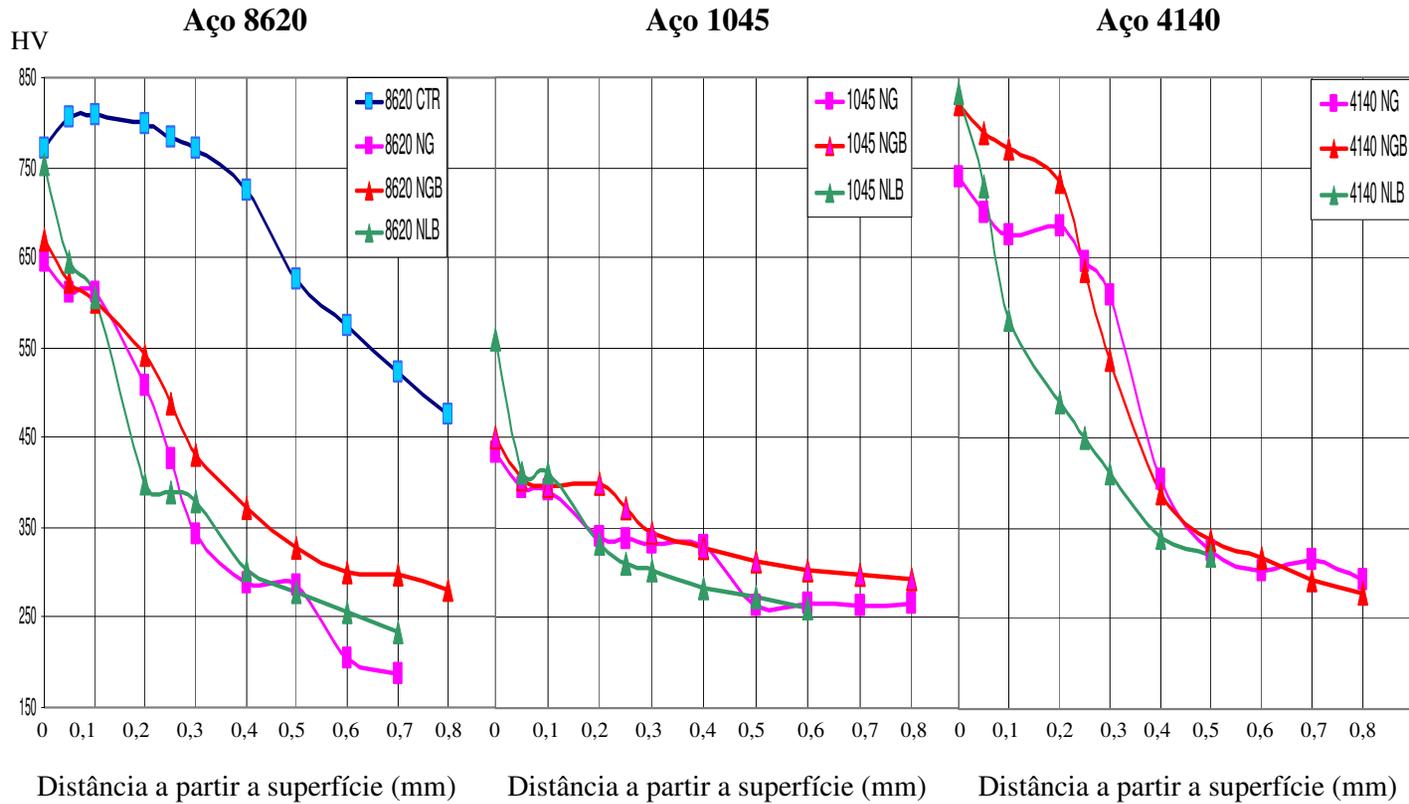


Figura 4.5 – Perfil de microdurezas de amostras de corpos de prova Navy “C” após a nitretação e cementação. (CTR: cementação, têmpera e revenimento, NG: nitretação gasosa não beneficiado, NGB: nitretação gasosa beneficiado, NLB: nitretação líquida beneficiado), de aços 8620, 1045 e 4140.

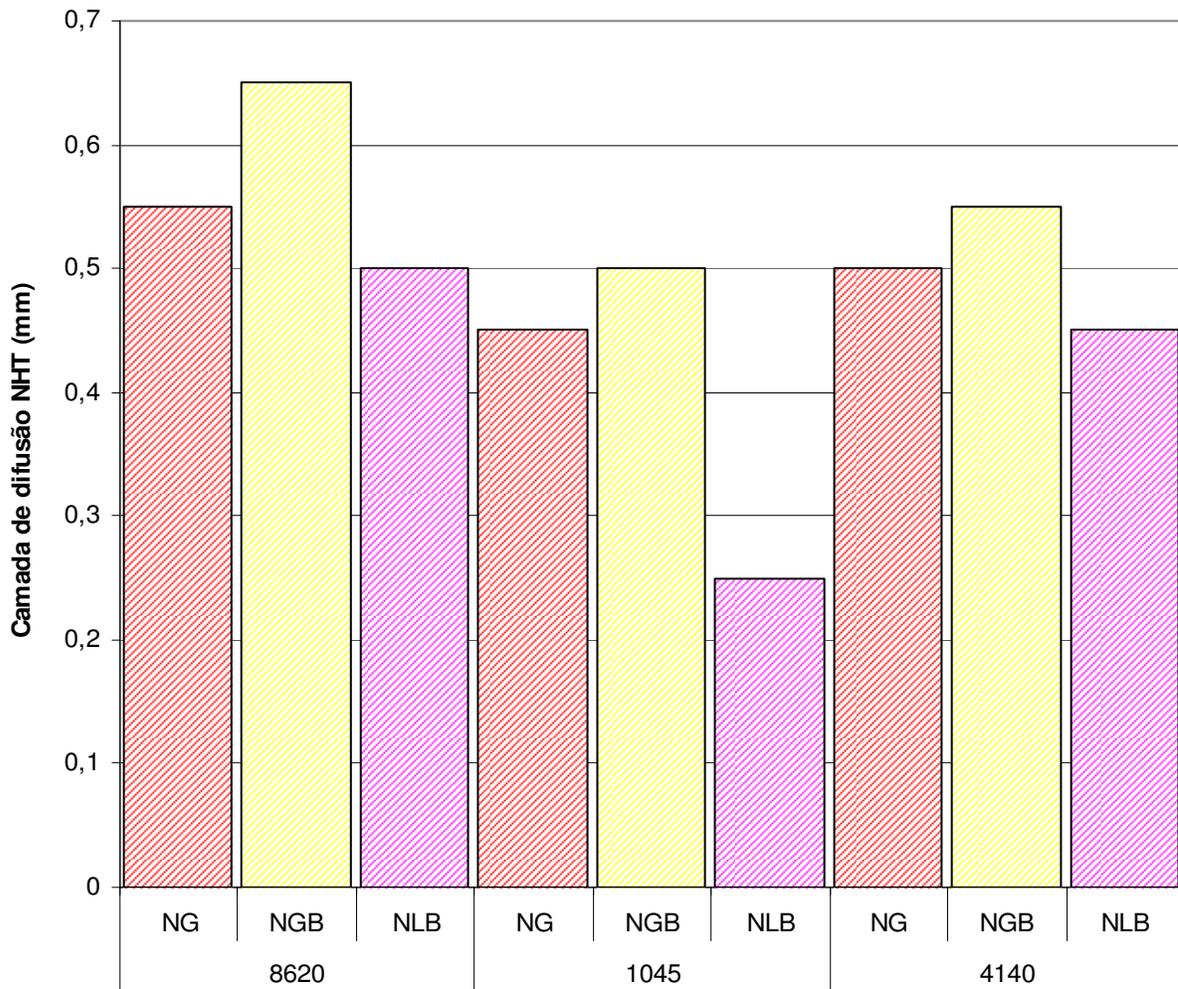


Figura 4.6 - Valores da camada de difusão (NHT) para cada tipo de aço e processo utilizado, onde: (NG: nitretação gasosa não beneficiado, NGB: nitretação gasosa beneficiado, NLB: nitretação líquida beneficiado).

Nota-se também na figura 4.6, para os três aços, que a nitretação líquida produziu sempre menores espessuras de camada de difusão que a nitretação gasosa. Embora a temperatura fosse maior na nitretação líquida que na gasosa (565 e 510 °C, respectivamente) o tempo de nitretação foi muito maior na nitretação gasosa que na líquida (48 contra 1,5 horas, respectivamente) e isto deve ter sido a causa da formação de uma espessura maior da camada endurecida por nitretos e nitrogênio em solução sólida. O beneficiamento prévio à usinagem (TT1) favoreceu o aumento da espessura da camada de difusão nos corpos de prova nitretados a gás.

4.6 ESTRUTURAS APÓS TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS

As figuras 4.6 a 4.19 mostram as diferentes estruturas observadas através de microscopia ótica e MEV e a espessura da camada branca em função do processo de nitretação utilizado, para os aços 8620, 1045 e 4140.

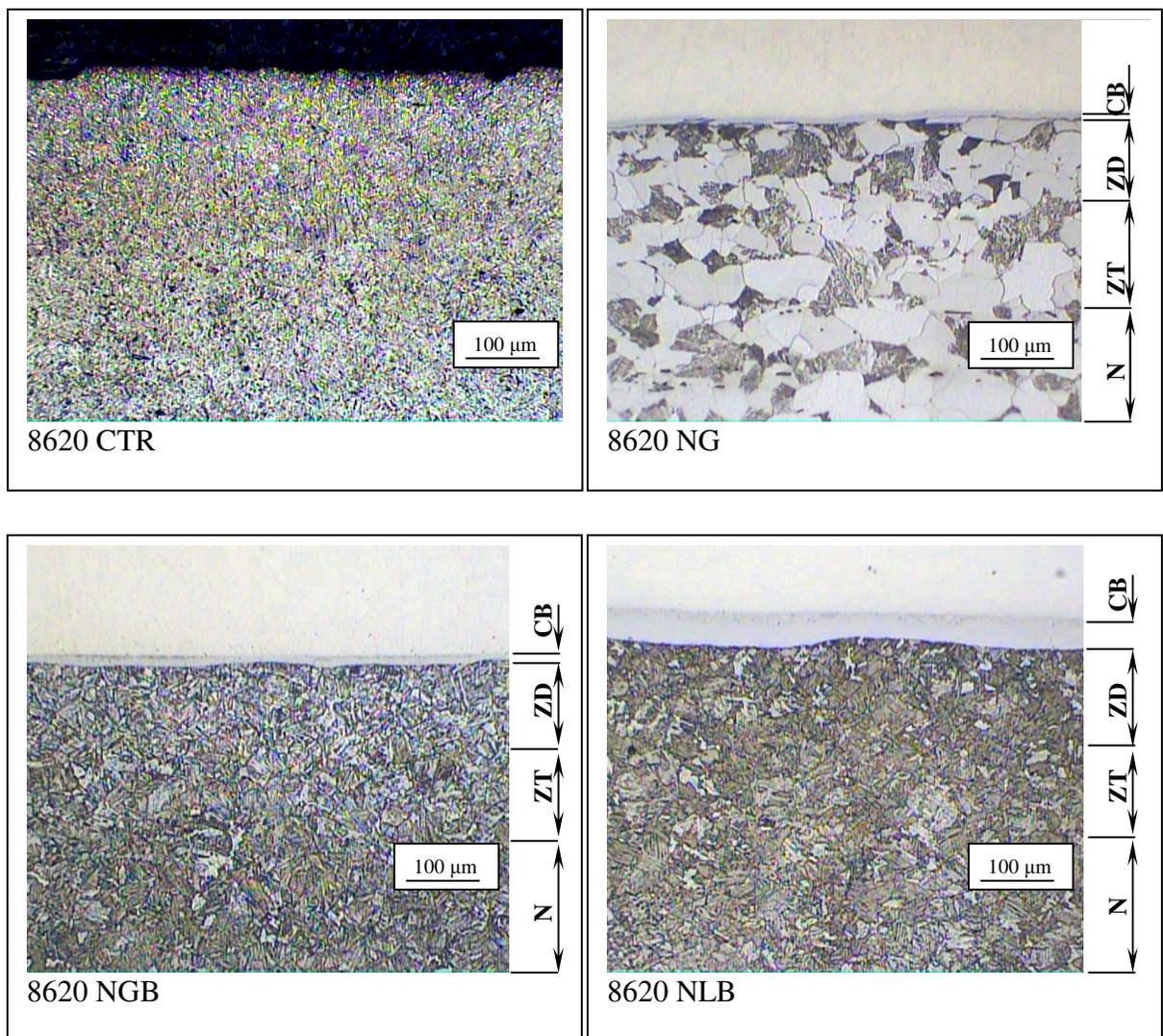


Figura 4.7 – Microestruturas do aço 8620 observadas após diferentes tratamentos termoquímicos. Ataque nital 3% por 10 segundos.

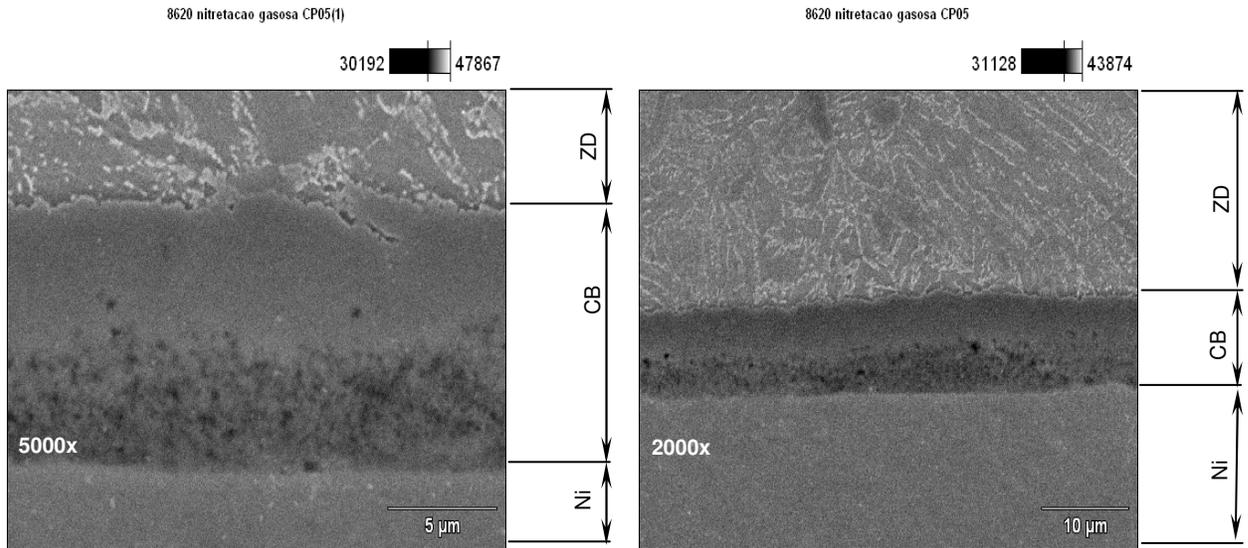


Figura 4.8 – Microestruturas do aço 8620 beneficiado e nitretado a gás (NGB). Ataque nital 3% por 10 segundos.

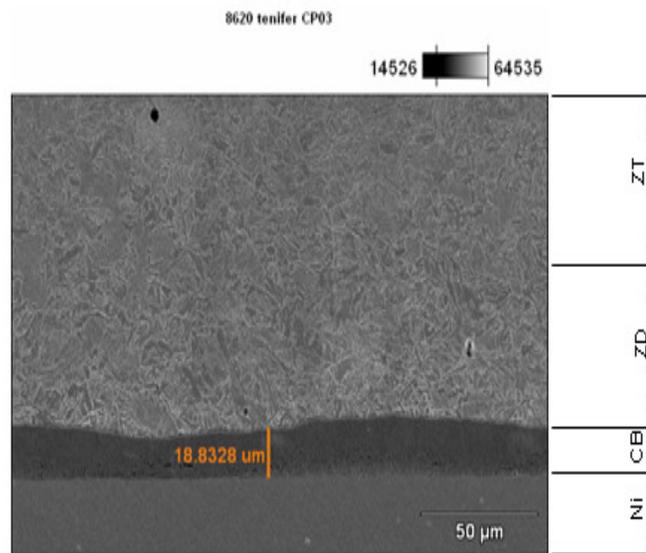


Figura 4.9 – Microestrutura do aço 8620 beneficiado e nitretado por meio líquido (NLB). Ataque nital 3% por 10 segundos.

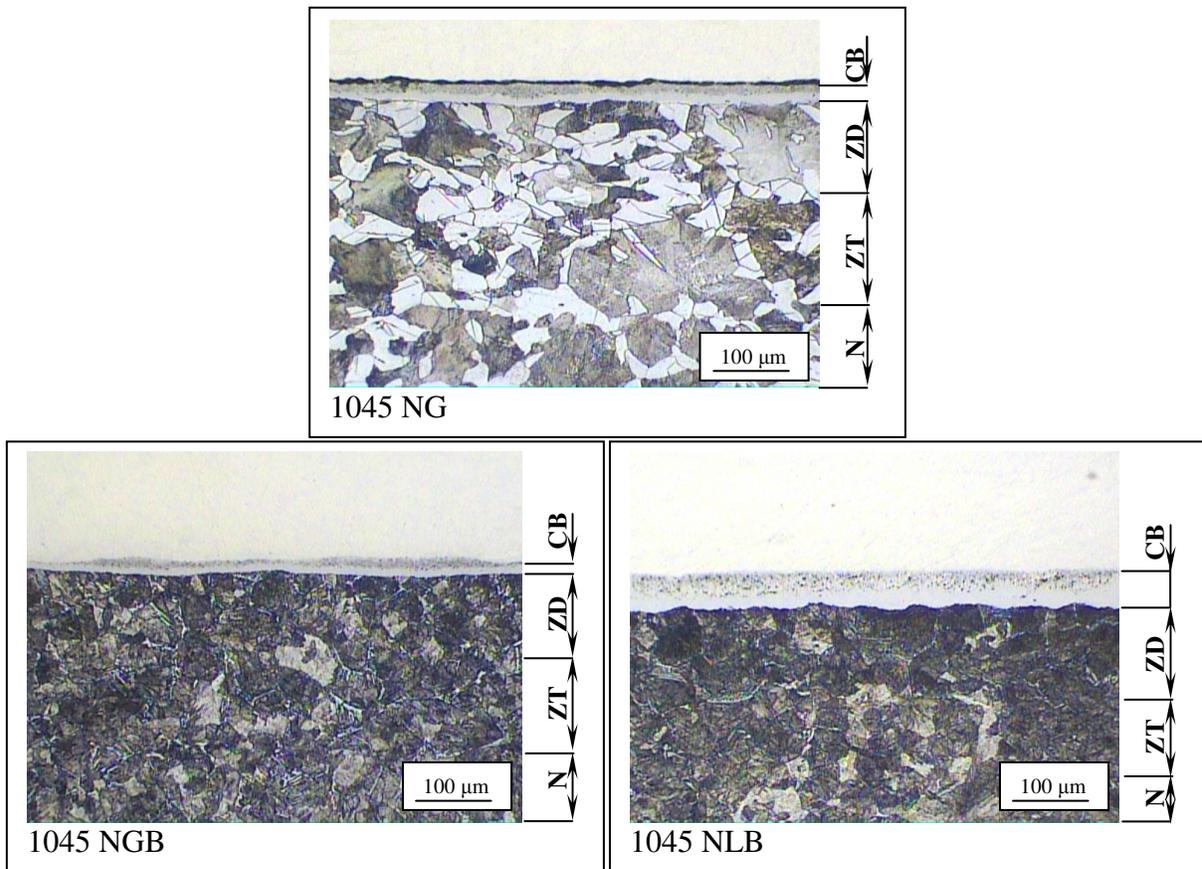


Figura 4.10 – Microestruturas observadas após nitretação do aço 1045. Ataque nital 3% por 10 segundos.

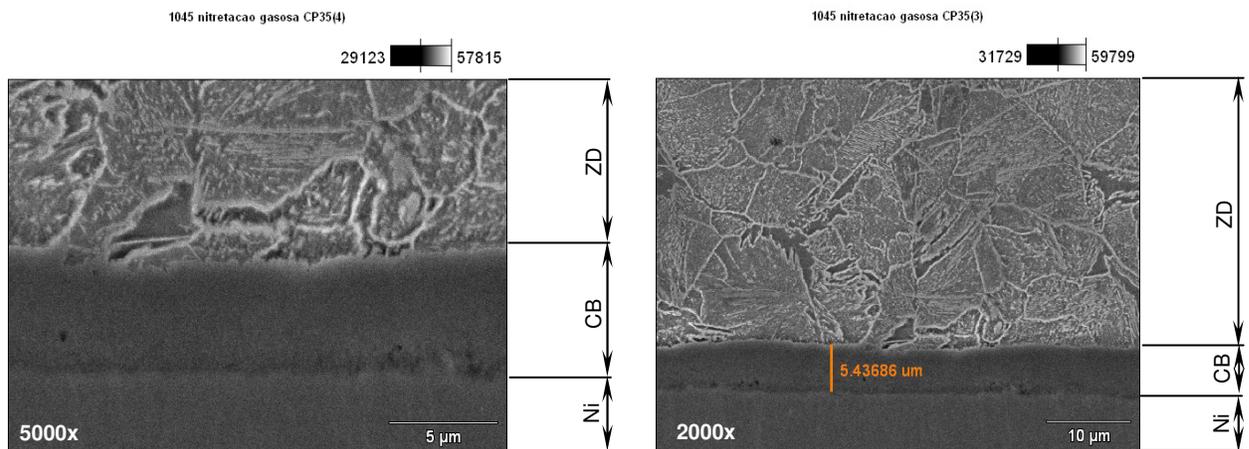


Figura 4.11 – Microestrutura do aço 1045 beneficiado e nitretado a gás (NGB). Ataque nital 3% por 10 segundos.

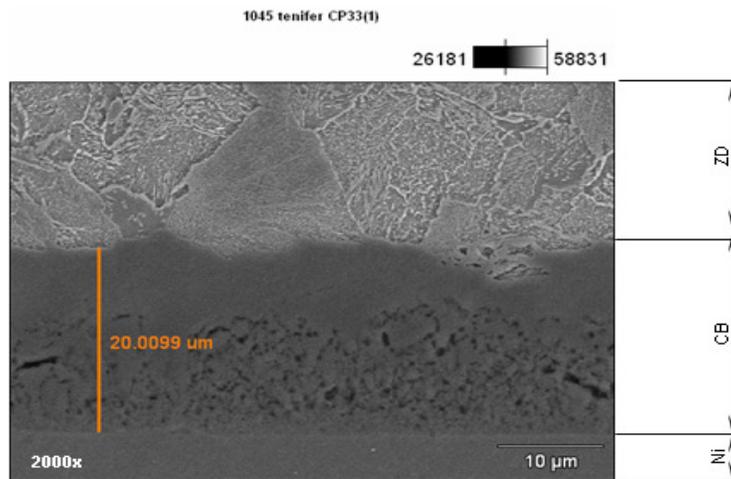


Figura 4.12 – Microestrutura do aço 1045 beneficiado e nitretado por meio líquido (NLB). Ataque nital 3% por 10 segundos.

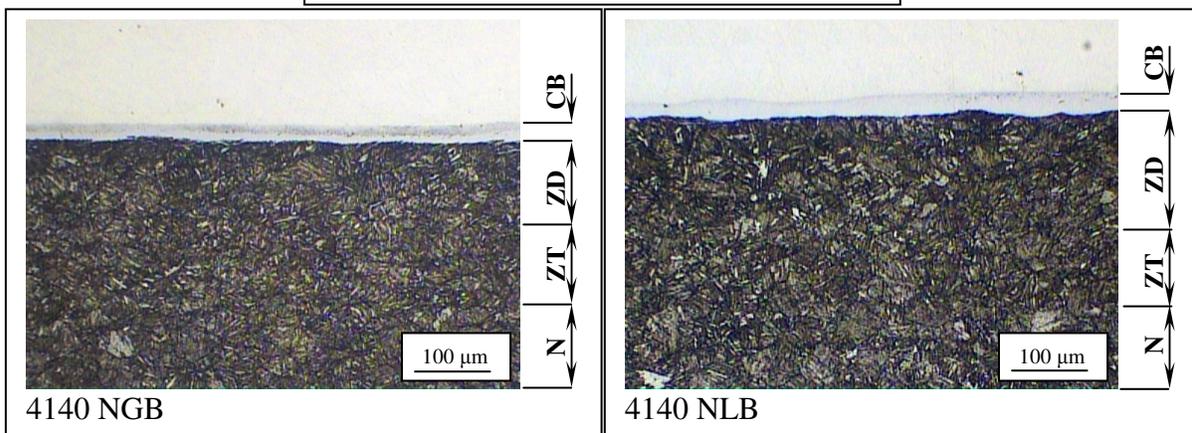
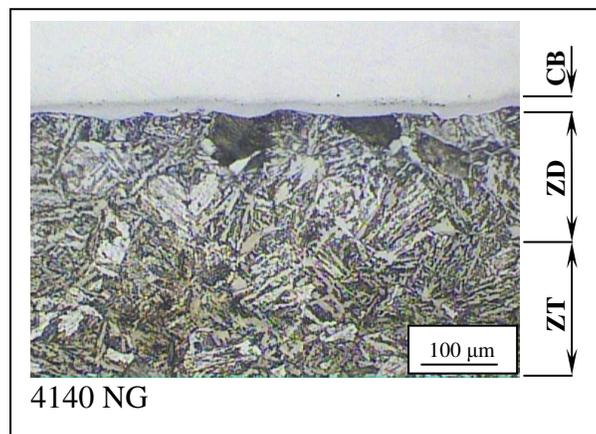


Figura 4.13 – Microestrutura observada após nitretação no aço 4140. Ataque nital 3% por 10 segundos.

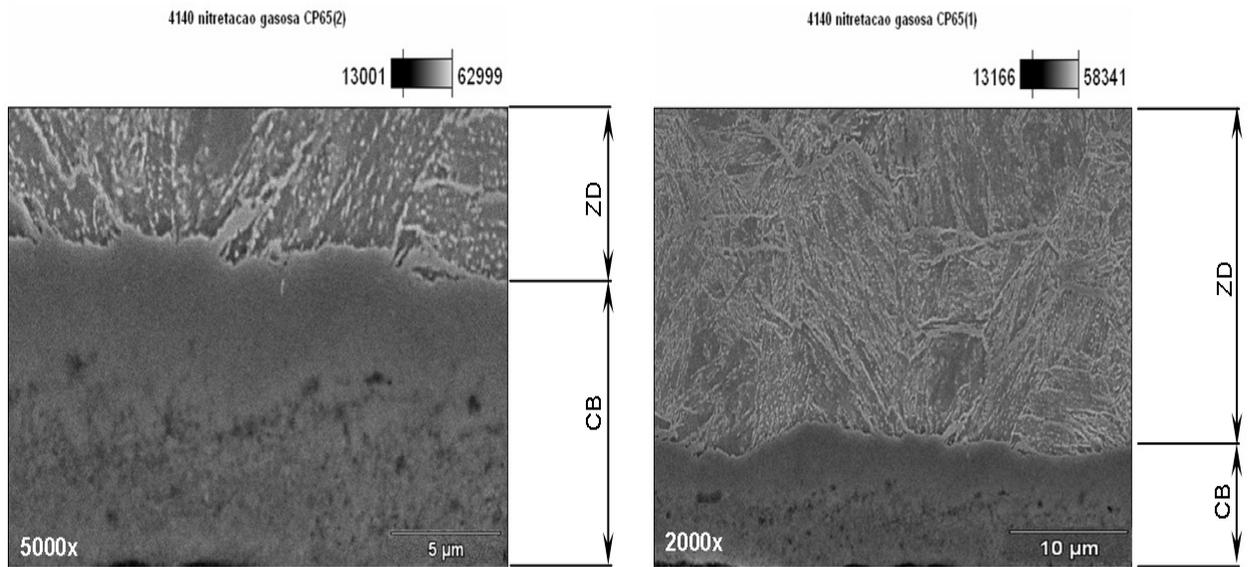


Figura 4.14 – Microestrutura do aço 4140 beneficiado e nitretado a gás (NGB). Ataque nital 3% por 10 segundos.

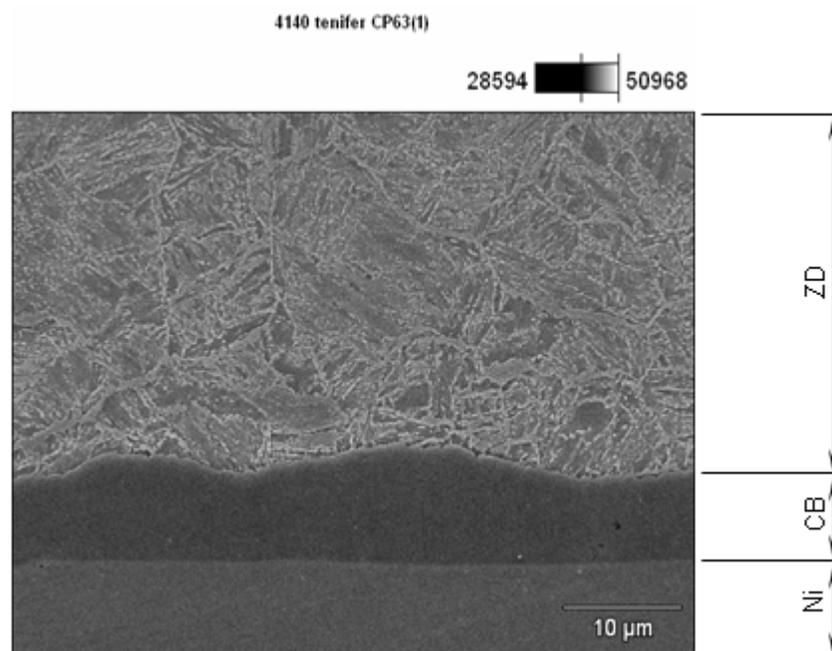


Figura 4.15 – Microestrutura do aço 4140 beneficiado e nitretado por meio líquido (NLB). Ataque nital 3% por 10 segundos.

A figura 4.16 mostra a espessura da camada branca para os três aços ensaiados. Observa-se que as maiores camadas nos três aços ocorreram na nitretação líquida, indicando que a maior temperatura do processo (565 contra 510 °C para nitretação líquida e gasosa, respectivamente) favoreceu a formação da camada de nitretos. Nas amostras nitretadas a gás a utilização ou não de beneficiamento prévio à usinagem das peças praticamente não alterou a espessura da camada branca para os três aços estudados.

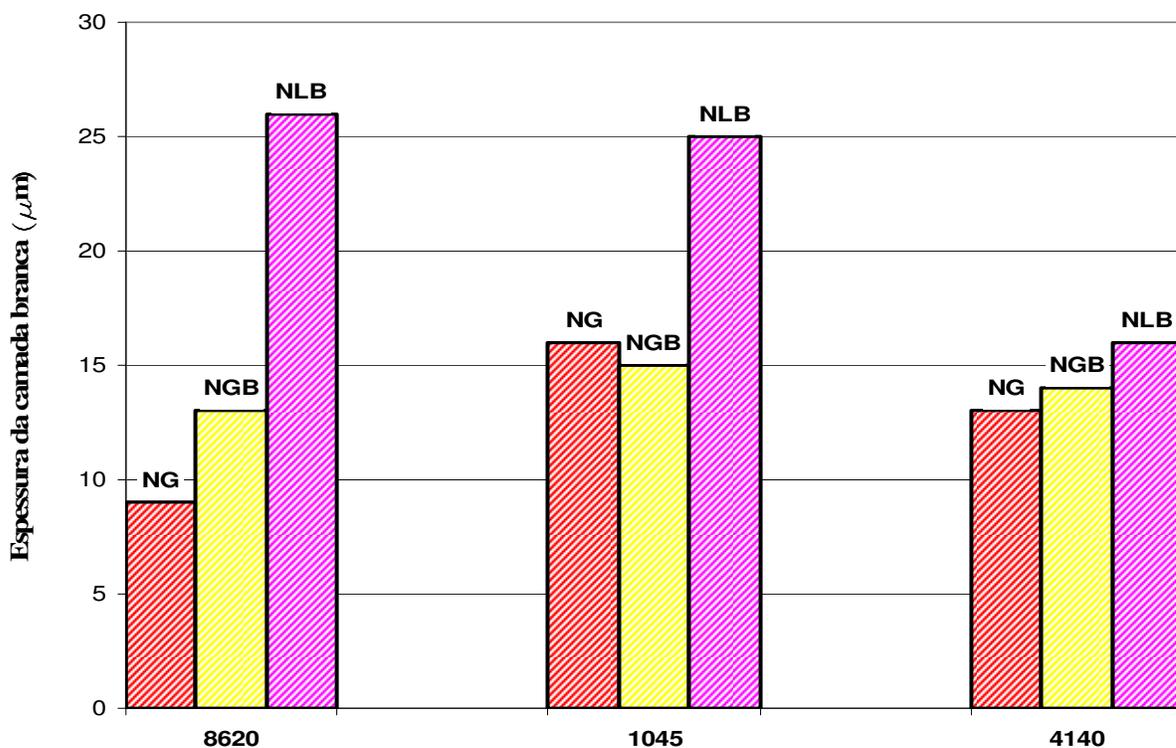


Figura 4.16 – Espessura da camada branca para os aços 8620, 1045 e 4140 submetidos a diferentes processos de nitretação.

Não se observou uma correlação entre a espessura da camada branca e os parâmetros avaliados; espessura da camada de difusão (NHT), dureza superficial e deformação da medida “A” do corpo de prova Navy “C” (figuras 4.17 a 4.19).

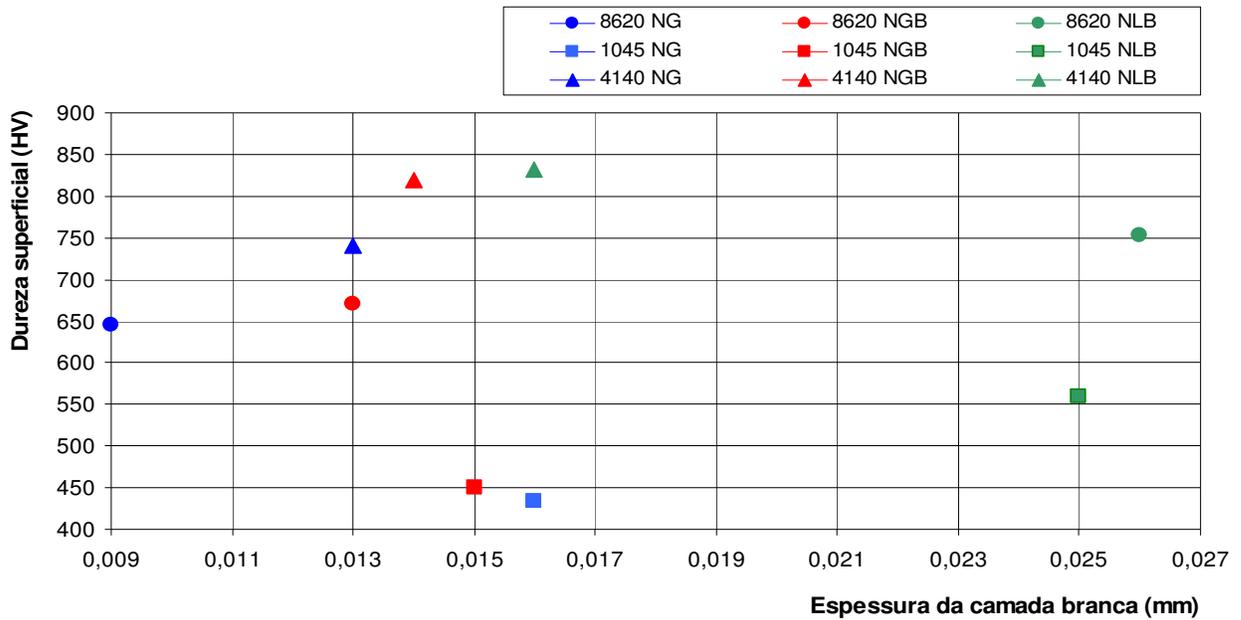


Figura 4.17 – Espessura da camada branca versus dureza superficial, para os diferentes aços e processos de nitretação utilizados.

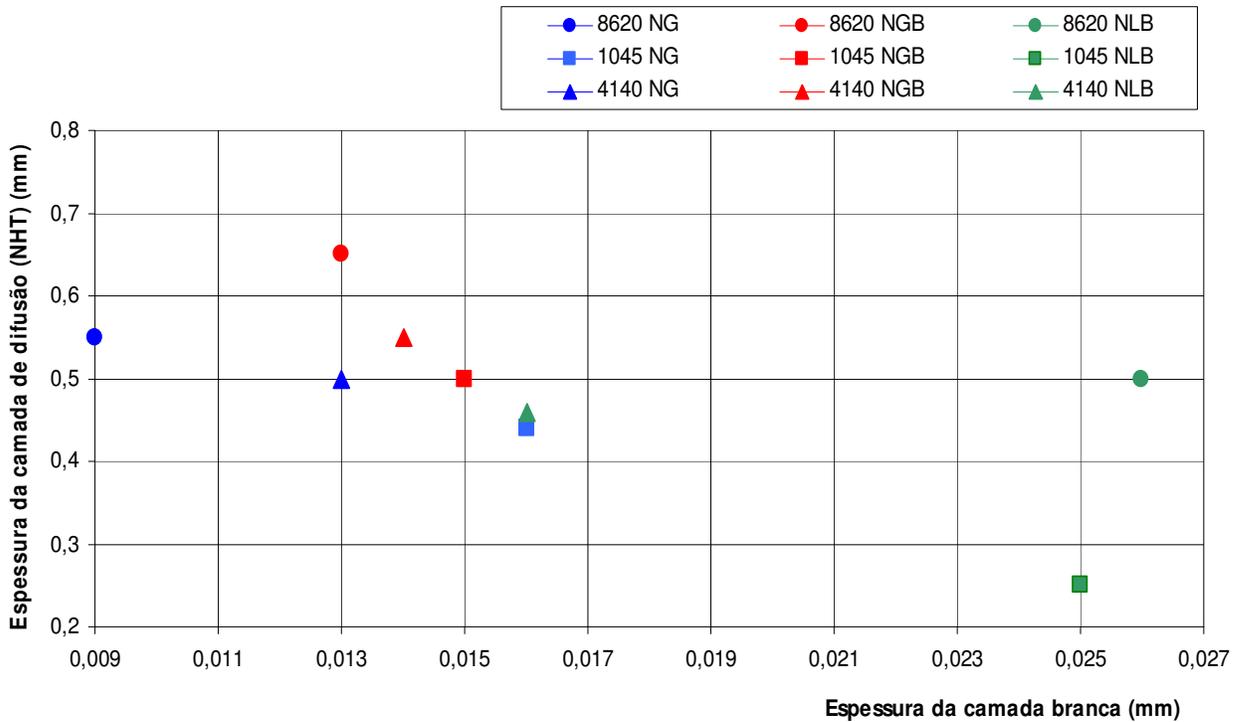


Figura 4.18 – Espessura da camada branca versus espessura da camada de difusão (NHT) para os diferentes aços e processos de nitretação utilizados.

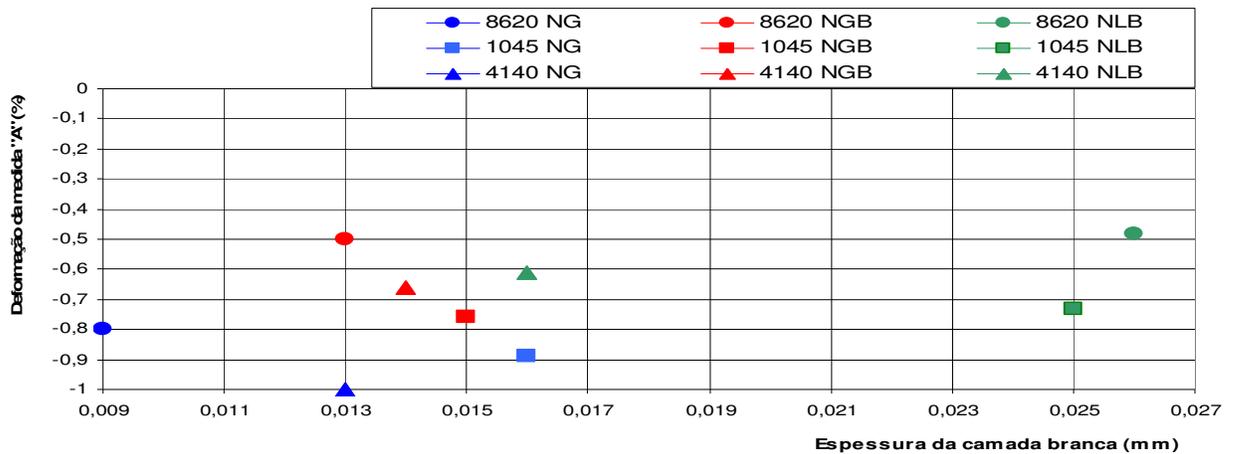


Figura 4.19 – Espessura da camada branca versus deformação encontrada na medida “A” dos corpos de prova Navy “C”, para os diferentes aços e processos de nitretação utilizados.

4.7 RESUMO DOS RESULTADOS EM CORPOS DE PROVA NAVY “C”

Pela tabela 4.6 observa-se que para o aço 8620 a cementação produziu maior dureza superficial e profundidade de camada endurecida, além de ter empregado um menor tempo de processo que a nitretação líquida, porém apresentou uma deformação em “A” 10 vezes maior que na nitretação gasosa ou líquida.

Na nitretação gasosa, para todos os aços, o uso do beneficiamento prévio à usinagem resultou em maior dureza superficial e ligeiro aumento da camada de difusão (NHT), sem alteração na profundidade endurecida (PHV_{500}), mas com redução da deformação em “A” nas peças nitretadas. Por outro lado, aumentou em 10 % o tempo total de processamento, passando de 70 para 78 horas (NG e NGB).

Para todos os aços, em peças beneficiadas previamente a usinagem, a nitretação líquida (NLB) aumentou a dureza superficial e a camada branca, reduziu a profundidade endurecida, mas não alterou a deformação em “A” em relação à nitretação gasosa (NGB). Porém apresentou um tempo muito menor de processo que a nitretação gasosa (12 e 78 horas, respectivamente).

Tabela 4.6 – Parâmetros dos diferentes tratamentos termoquímicos para os aços 8620, 1045 e 4140. Onde: A: deformação percentual da medida “A” dos corpos de prova Navy “C”, DS: dureza Vickers superficial, PHV₅₀₀: profundidade endurecida com dureza acima de 500 Vickers, NHT: espessura da camada de difusão (mm).

Processo	Parâmetros	A Ç O		
		8620	1045	4140
CTR	A (%)	4,64	--	--
	DS (HV)	772	--	--
	PHV ₅₀₀	0,7	--	--
	Tempo (h)	7	--	--
NG	A (%)	- 0,8	- 0,89	- 1,09
	DS (HV)	645	434	740
	PHV ₅₀₀	0,2	0	0,3
	Tempo (h)	70	70	70
	NHT (mm)	0,55	0,45	0,50
	CB (µm)	8	16	13
NGB	A (%)	- 0,50	- 0,76	- 0,66
	DS (HV)	670	450	820
	PHV ₅₀₀	0,2	0	0,3
	Tempo (h)	78	78	78
	NHT (mm)	0,65	0,50	0,55
	CB (µm)	13	15	14
NLB	A (%)	- 0,48	- 0,73	- 0,61
	DS (HV)	753	560	832
	PHV ₅₀₀	0,1	0	0,1
	Tempo (h)	12	12	12
	NHT (mm)	0,50	0,25	0,45
	CB (µm)	26	25	16

Em relação aos aços com mesmo teor de carbono (~0,4 %) nitretados via líquida ou gasosa, a adição de elementos de liga (molibdênio e cromo) no aço 4140 aumentou muito a dureza superficial e a profundidade endurecida, aumentou um pouco a camada de difusão e provocou uma pequena redução na camada branca, quando comparado ao aço 1045, que não possui tais elementos de liga. As deformações em “A” ocorridas nos aços 1045 e 4140 foram semelhantes em todos os processos de nitretação utilizados.

PARTE II – “ENGENAGENS”

As engrenagens foram feitas de aços 4140 e 8620 e submetidas a três tipos de tratamentos. Neste capítulo, cada processo será identificado pelas seguintes siglas:

E-NLB	Engrenagem beneficiada e submetida à nitretação líquida
E-NGB	Engrenagem beneficiada e submetida à nitretação gasosa
E-CTR	Engrenagem não beneficiada e submetida à cementação seguida de têmpera e revenimento

4.8 DUREZAS E MICROESTRUTURAS APÓS O TRATAMENTO TÉRMICO 1 (TT1)

A microestrutura e dureza obtidas nas amostras de aço 4140 após o processo de beneficiamento realizado (TT1) são mostradas na tabela 4.7 e na figura 4.20.

Tabela 4.7 - Microestrutura e dureza após o beneficiamento de amostras de aço 4140 antes da nitretação

Amostra usada depois na:	Microestrutura	Dureza núcleo (HRC)
Nitretação líquida	Martensita revenida	27 ±1
Nitretação gasosa	Martensita revenida	28 ±1

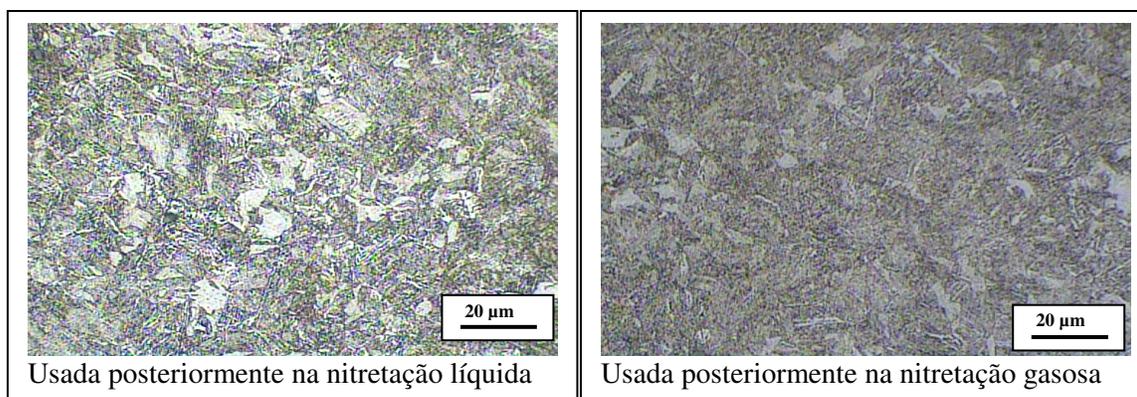


Figura 4.20 – Microestruturas das amostras do aço 4140 após o beneficiamento (região do núcleo) e antes da nitretação. Ataque nital 3% por 10 segundos.

4.9 DEFORMAÇÕES MÉDIAS APÓS TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS

Foi realizado o controle dimensional das engrenagens, antes e após os tratamentos térmicos e termoquímicos. Na figura 4.21 observa-se que as engrenagens dos aços 8620 e 4140 foram usinadas para obterem a mesma qualidade (nível 7). Posteriormente a engrenagem do aço 8620 foi submetida à cementação seguida de têmpera e revenimento (E-CTR), e as engrenagens de aço 4140 foram submetidas à nitretação líquida (EB-NL) e à nitretação gasosa (EB-NG). Observa-se que a engrenagem que passou pelo processo de cementação seguida de têmpera e revenimento obteve a pior qualidade (12). Em seguida a engrenagem que passou pelo processo de nitretação gasosa obteve qualidade 9 e por fim, a engrenagem que passou pelo processo de nitretação líquida, praticamente não deformou, pois apresentou a mesma qualidade (7).

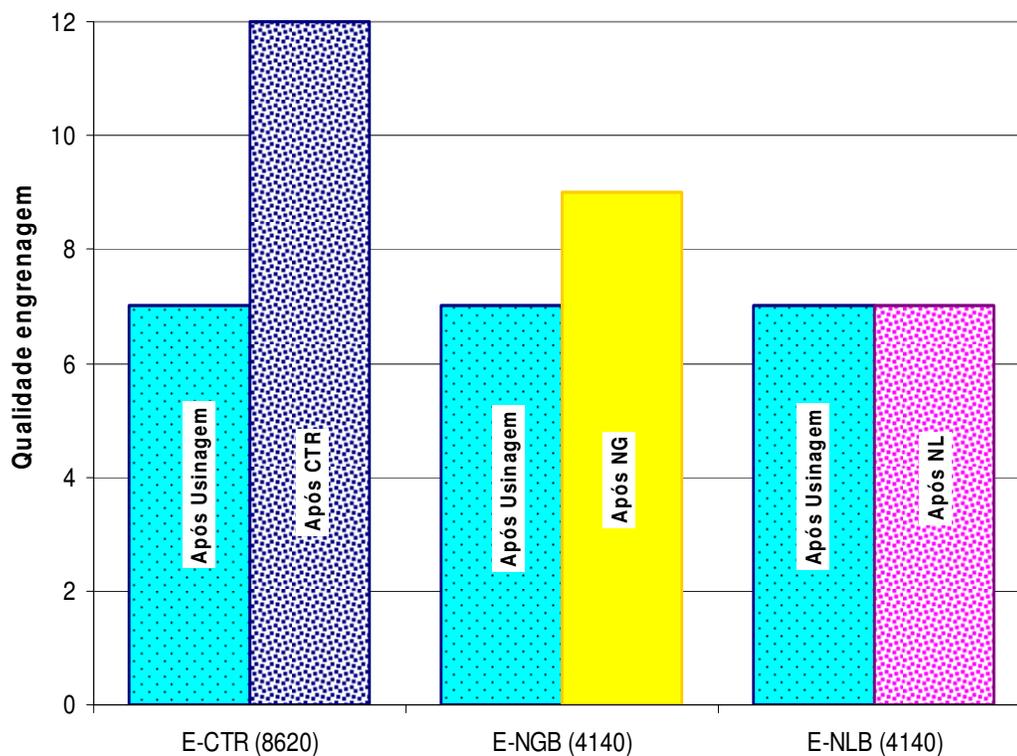


Figura 4.21 – Qualidade de engrenagens antes e após os tratamentos termoquímicos efetuados.

4.10 MICRODUREZAS APÓS OS PROCESSOS DE NITRETAÇÃO E CEMENTAÇÃO

Na tabela 4.8 observa-se as medidas de dureza superficial (posição “A” da figura 3.8), na figura 4.31 é mostrado o gráfico dos perfis de dureza obtidos nos processos de nitretação gasosa e líquida (posição “B” da figura 3.8). Verifica-se que os valores da camada nitretada, ou seja, a dureza de núcleo da engrenagem mais 50 HV, conforme norma DIN 50190, [SANTOS, 2003], encontrados ficaram em: 0,5 mm para a nitretação gasosa e 0,25 mm para a nitretação líquida. No caso da engrenagem cementada foi encontrada uma camada efetiva de 1,15 mm, ou seja, a profundidade na qual se encontrou o valor de 513 HV [PARRISH, 1999].

Tabela 4.8 – Microdurezas das engrenagens nitretadas.

		4140 E-NGB	4140 E-NLB	8620 E-CTR
		HV_{0,5}	HV_{0,5}	HV₁
Superfície=>		670	725	792
Distância da superfície (mm)	0,05	635	625	805
	0,1	590	490	809
	0,2	575	451	805
	0,25	550	329	802
	0,3	537	-	796
	0,4	390	-	787
	0,5	342	-	773
	0,6	-	-	727
	0,8	-	-	621
	1,0	-	-	571
	1,1	-	-	513
NÚCLEO		292	279	327

A cementação produziu uma dureza superficial maior que a nitretação líquida ou gasosa (792, 725 e 670 HV, respectivamente) e uma profundidade de camada endurecida (com dureza acima de 500 Vickers) muito maior que a nitretação gasosa e líquida (1,1; 0,32 e 0,1 mm, respectivamente).

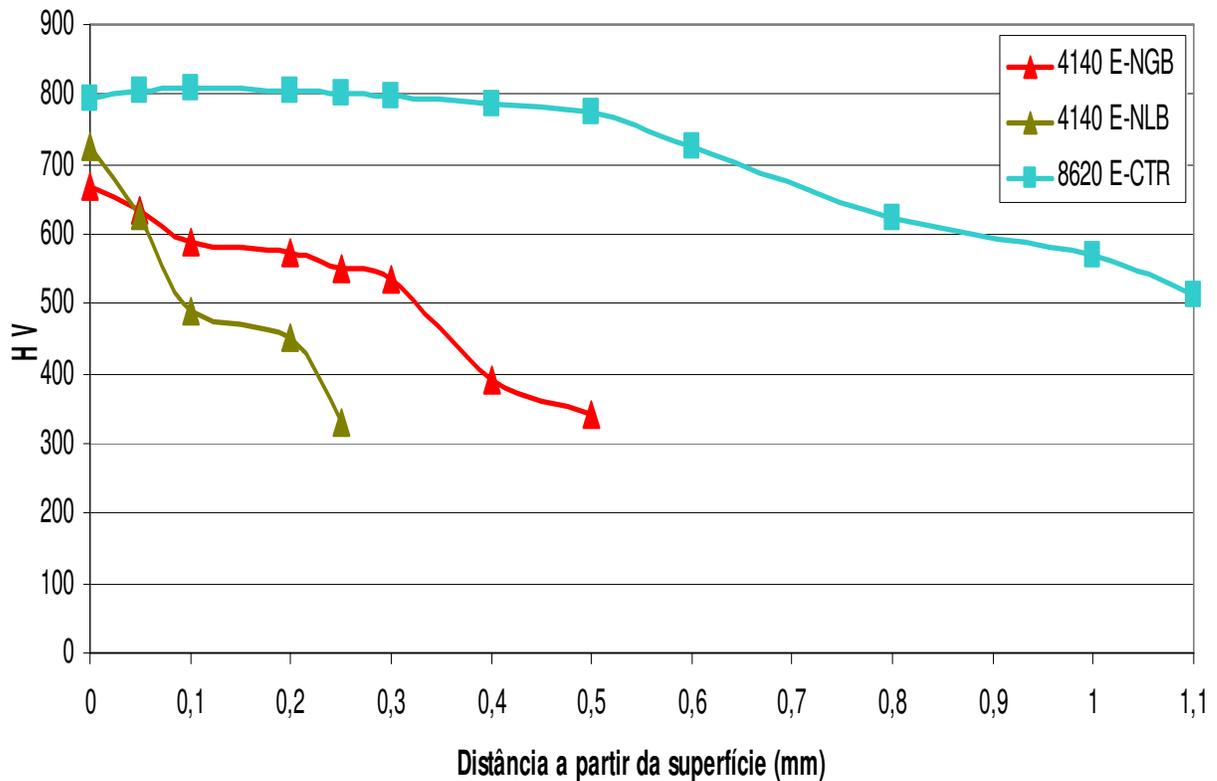


Figura 4.22 – Perfil de microdureza das engrenagens após a nitretação e a cementação.

4.11 MICROESTRUTURA APÓS OS PROCESSOS DE NITRETAÇÃO

A figura 4.23 mostra as diferentes microestruturas observadas através de microscopia ótica, para os processos de nitretação gasosa e nitretação líquida. A figura 4.24 mostra a variação da espessura da camada branca, em função do processo de nitretação utilizado.

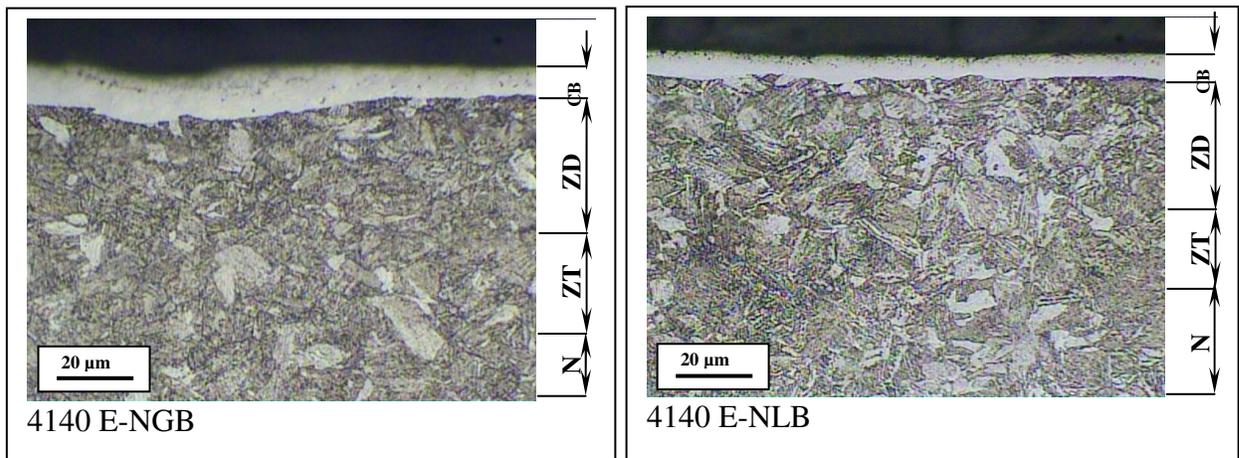


Figura 4.23 - Microestruturas observadas nos processos de nitretação gasosa e líquida. Ataque nital 3% por 10 segundos.

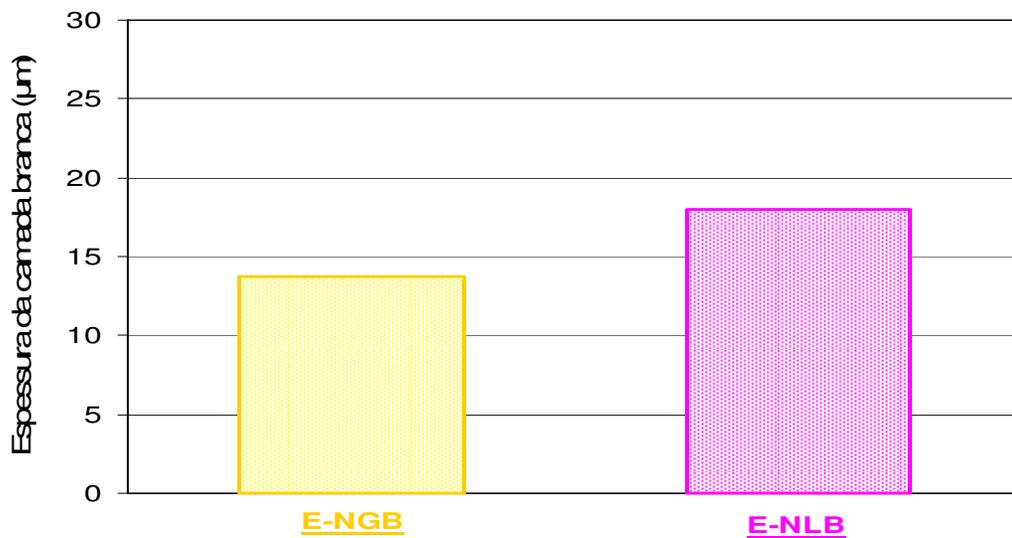


Figura 4.24 – Variação da espessura da camada branca em função do processo de nitretação utilizado para o aço 4140.

Observa-se que a nitretação líquida forneceu uma maior espessura da camada branca que a nitretação gasosa. A tabela 4.9 mostra as camadas brancas admissíveis para cada classe de fabricação das engrenagens [RAKHIT, 200]. Portanto, os valores encontrados tanto para a nitretação gasosa (13 µm) quanto para a nitretação líquida (18 µm), se encaixariam nos parâmetros da qualidade classe “B” (abaixo de 20 µm).

Tabela 4.9 - Valores admissíveis de camada branca em função da classe da engrenagem [RAKHIT, 200].

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

4.12 CUSTO DOS PROCESSOS

A figura 4.25 mostra a comparação dos custos envolvendo a confecção de engrenagens de acordo com o tipo de tratamento térmico utilizado. Na figura 4.26, são mostrados as composições dos custos apresentados para cada processo. Nota-se que o custo sofre grande influência do processo de acabamento final (retífica). Nesta situação, por exemplo, a engrenagem cementada ficou cerca de 40 % mais cara que a nitretada.

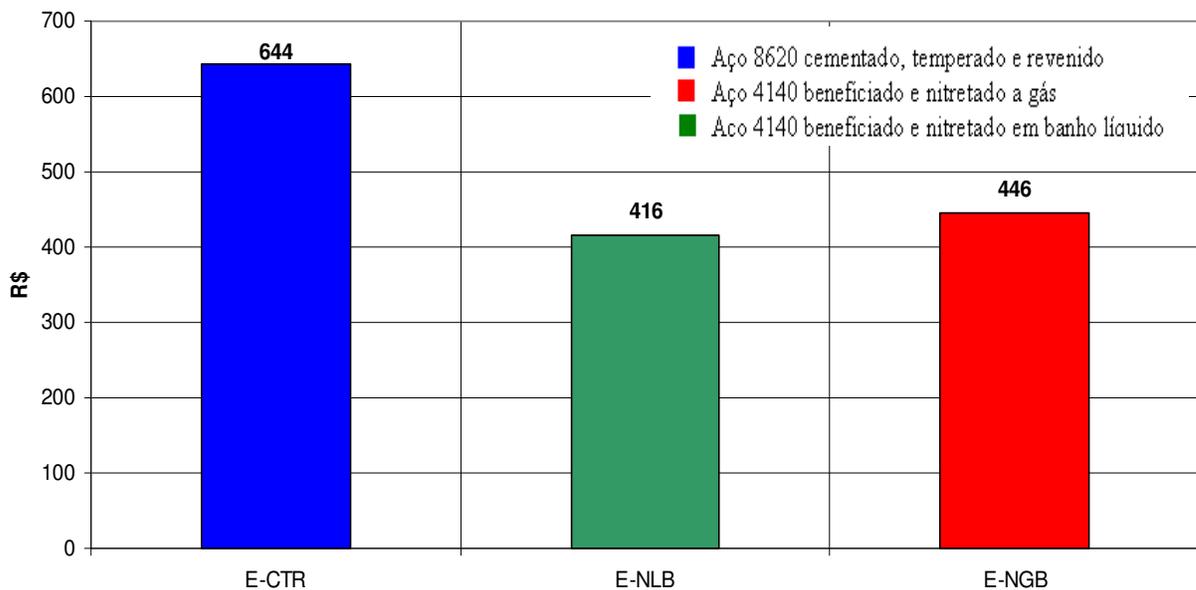
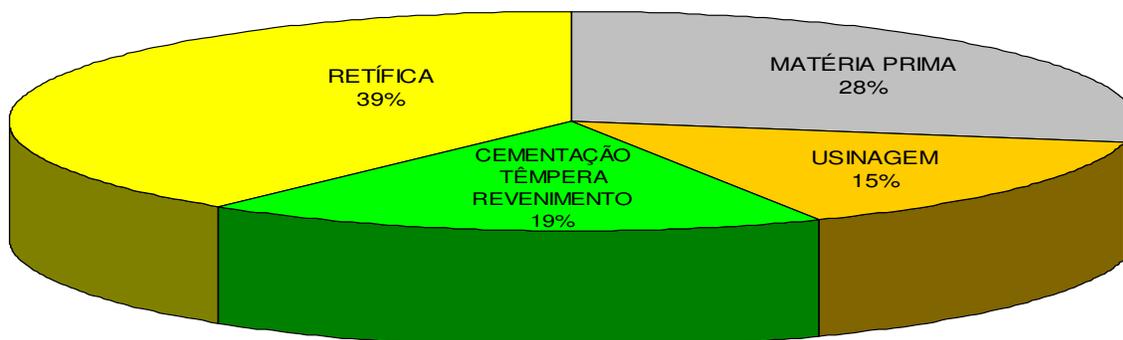
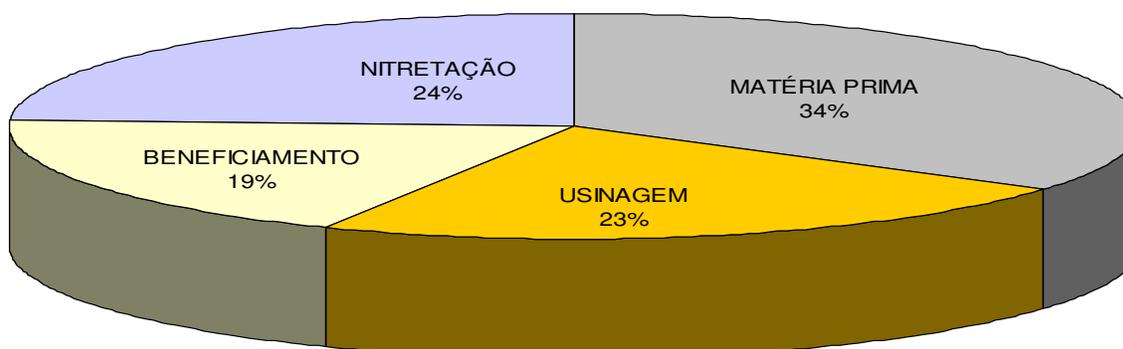


Figura 4.25 – Comparação do custo total para a produção de uma engrenagem de aço usando diferentes tratamentos termoquímicos. (Este custo foi calculado levando-se em conta os valores disponíveis no grupo ACE-Supertrat, para o mês de maio de 2010).

Engrenagem aço 8620 cementada e temperada (R\$ 644,00)



Engrenagem aço 4140 nitretada em banho (R\$ 416,00)



Engrenagem aço 4140 nitretada á gás (R\$ 446,00)

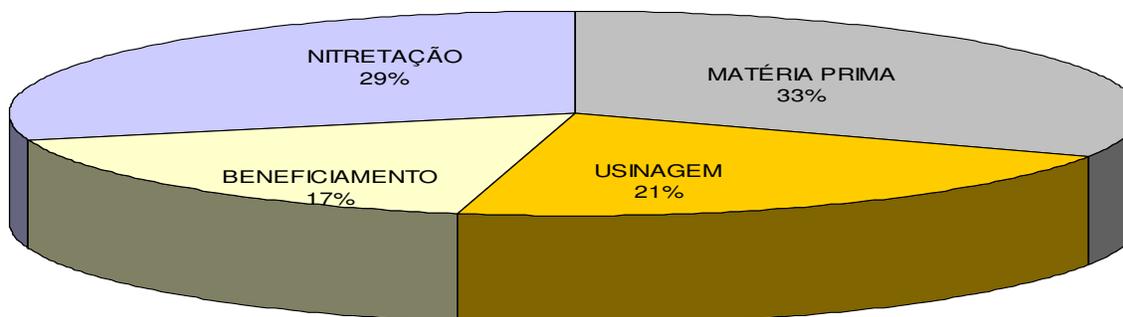


Figura 4.26 – Comparação do custo para a produção de uma engrenagem de aço usando diferentes tratamentos termoquímicos. Este custo foi calculado levando-se em conta os valores disponíveis no grupo ACE-Supertrat, para o mês de maio de 2010.

Através da análise da figura 4.27, pode-se observar que:

- Os processos de nitretação líquida ou gasosa são mais adequados que a cementação quando se objetiva a diminuição das deformações em engrenagens, além de serem mais econômicos do que o processo de cementação seguida de têmpera e revenimento. No entanto, deve-se atentar que este processo não deve ser utilizado quando as tensões de contato forem acima de 1340 MPa [DAVIS, 2005].

- O processo de cementação, ao mesmo tempo em que apresentou a maior profundidade endurecida e a maior dureza superficial, apresentou também a maior deformação e o maior custo.

- O processo de nitretação líquida apresentou o menor custo e a menor deformação, porém a menor profundidade endurecida.

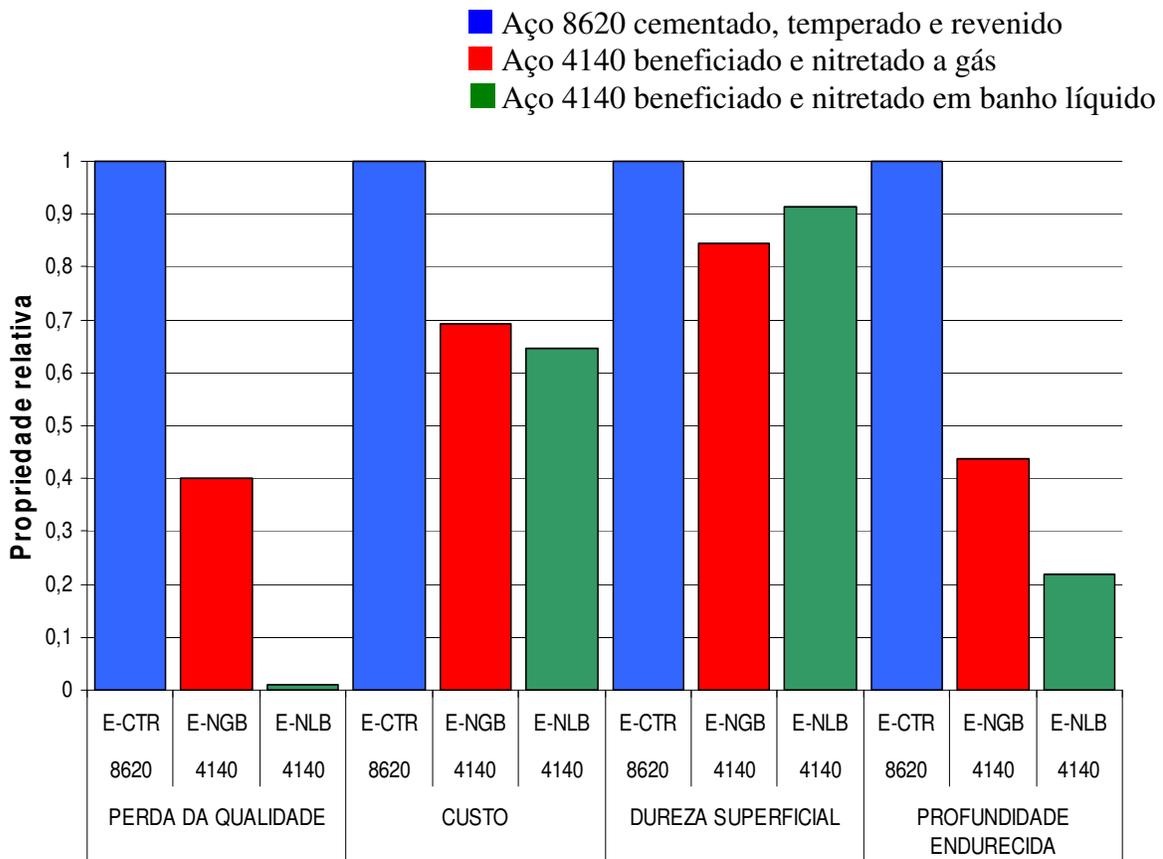


Figura 4.27 – Tabela resumo das propriedades relativas das engrenagens nas três condições de tratamento.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Em relação aos corpos de prova “Navy C” dos aços 8620, 1045 e 4140 que foram cementados, temperados e revenidos e também nitretados pelo processo líquido e gasoso conclui-se que:

- Para o aço 8620 a cementação produziu maior dureza superficial e profundidade de camada endurecida, além de ter empregado um menor tempo de processo que a nitretação líquida, porém apresentou uma distorção 10 vezes maior que na nitretação gasosa ou líquida.

- Para todos os aços nitretados, o uso do beneficiamento prévio à usinagem resultou em maior dureza superficial e ligeiro aumento da camada de difusão (NHT), sem alteração na profundidade endurecida (PHV₅₀₀), mas com redução da distorção. Por outro lado aumentou em 10 % o tempo total de processamento (passou de 70 para 78 horas).

- Para todas as amostras de aço beneficiadas previamente a usinagem, a nitretação líquida aumentou a dureza superficial e a camada branca, reduziu a profundidade endurecida, mas não alterou a distorção em relação à nitretação gasosa. Porém apresentou um tempo muito menor de processo que a nitretação gasosa (12 e 78 horas, respectivamente).

- Em relação aos aços com mesmo teor de carbono (~0,4 %) a adição de elementos de liga (molibdênio e cromo) no aço 4140 aumentou muito a dureza superficial e a profundidade endurecida, aumentou um pouco a camada de difusão com pequena redução na camada branca quando comparado ao aço 1045, que não possui tais elementos de liga. As deformações ocorridas nos aços 1045 e 4140 foram semelhantes em todos os processos de nitretação utilizados.

- Em relação a engrenagens fabricadas com os aços 8620 e 4140 que foram cementadas, temperadas e revenidas e também nitretadas pelo processo líquido e gasoso conclui-se que:

- Os processos de nitretação líquida ou gasosa são mais adequados que a cementação quando se objetiva a diminuição das deformações em engrenagens, além de serem cerca de 30 % mais econômicos do que o processo de cementação

- O processo de cementação, ao mesmo tempo em que apresentou a maior profundidade endurecida e a maior dureza superficial, apresentou também a maior deformação e o maior custo.

- O processo de nitretação líquida, por outro lado, apresentou o menor custo e a menor deformação, porém a menor profundidade endurecida.

Para trabalhos futuros seria interessante estudar os seguintes itens:

- A resistência à corrosão da nitretação gasosa e líquida
- A difração de raio “x” da camada nitretada, para poder identificar o tipo de nitretos formados.

Referências

ALBAN, L. E. – **Systematic Analysis of Gear Failures**. USA: ASM International. 4ª ed. 1993, 232p.

BRAMFITT, B.L.; LAWRENCE, S.J.; Metallography and Microstructures of Carbon and Low-Alloy Steels, Metallography and Microestruturas. In: Voort, G. V. **ASM Handbook Volume 9**. USA. ASM International. 1ª ed. 2004, 1184p.

BAKER, H. et al. **ASM Handbook Volume 3 - Alloy Phase Diagrams - USA**. ASM International. 3ª ed 1999. cap 2, p.2•198.

BANNANTINE, J.A.;COMER, J.J.; HANDROCK, J.L., Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, USA, Prentice Hall,1989, 266p

CALLISTER, W.D. Difusão. In: CALLISTER, W.D. **Ciência e engenharia de materiais, uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002, cap. 5, p. 63-106.

CARDOSO, P. A. S. L. – Influência dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento no proceso de nitretação em banho de sais no aço rápido AISI M-2. 1999. Dissertação (Mestrado) – Instituto de pesquisas nucleares. Ipen São Paulo.

CHANDLER, H. **Hardness Testing Second Edition**. USA: ASM International, 2004, 192p.

CHANDLER, H. **Heat Treater's Guide – Practices and Procedures for Irons and Steels**. USA: ASM International, 2ª ed, 2000, 903p.

COLPAERT, H; SILVA, A.L. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Edgard Blücher, 2008, 672p.

DAVIS, J.R. **Gear Materials, Proprieties, and Manufacture**, USA: ASM International, 2005. 339p.

DAVIS, J.R. - Nitriding – In: **Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics**. USA. ASM International, 2002, cap. 6, p. 141-194.

DOSSET, J.L.; BOYER, H.E. - Case Hardening of Steel – In: **Practical Heat Treating: Second Edition**. USA. ASM International, 2006, cap. 8, p. 141-158.

DUBAL, G.P. et al. Modern Applications for SALT Bath Heat Treating of Automotive Components. In: **The 1st International Automotive Heat Treating Conference**. USA. ASM International, 1999, p. 90-95.

DURFERRIT, Ecological Assessement of Nitrocarburizing. Alemanha, 2002, 2p.

DURFERRIT, **Nitretação em Banho de Sal Durferrit TF 1 (BR) Processo Tenifer**. Disponível em: http://www.durferrit.com.br/downloads/04_Nitreta%C3%A7%C3%A3o%20-%20processo%20TENIFER.pdf. Acesso em 05 junho de 2010.

EYSELL, F.W. – Comparação entre os Atuais Processos de Nitretação e Campos de Aplicação. São Paulo: (Folheto técnico Brasimet), 1990, 19p.

FUNATANI, K. Low Temperature salt bath nitriding steels. *Metal Science and Heat Treatment*, v. 46, pp 277-281, 2004.

GARCIA, A.; SPIN J.A.; SANTOS C.A. - Ensaio de Dureza. In: GARCIA, A.; SPIN J.A.; SANTOS C.A. **Ensaios dos Materiais**. São Paulo: LTC, 2000, cap. 4, p.66-89.

GEMAQUE, M.J.A. **Abordagem para Solução de um Problema Metrológico na Indústria – Medição de Engrenagens** – 2004. 132p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

HARDIN, R.A., BECKERMANN, C. **Simulation of Heat Treatment Distortion**. Disponível em: <http://www.engineering.uiowa.edu/~becker/documents.dir/HeatTreat05.pdf>. Acesso em: 06 junho de 2010.

HOWES, M.A.H. Factors Affecting Distortion in Hardened Steel Components. In: TOTTEN, G.E.; BATES C.E.; CLINTON N.A. **Conference Proceedings - Quenching and Distortion Control**. USA: ASM International, 1993, p.251-258.

ICI (Imperial Chemical Industries Ltd.) - Manual of heat treatment and case hardening, United Kingdom, 7th edition, 1964.

KNERR, C.H.; ROSE, T.C.; FILKOWSKI, J.H. – Gas Nitriding - In: **ASM Handbook Vol 4. Heat Treating**. USA. ASM International. 6^a ed, 2004. p.387-409.

LEPPÄNEN, R.; JONSSON, H.; **Properties of Nitrided Components: A Result of the Material and the Nitriding Process**. Technical Report of the Ovako Steel. 1/1999. Disponível em: <http://www.ovako.com/Data/r1585/v1/Technical_Report_1_1999.pdf>. Acesso em: 04 junho de 2010.

LILIENTAL, W.K.; TYMOWSKI, G.J.; TARFA, N. **Melhorando Propriedades Mecânicas Superficiais de Ligas Ferrosas através da Nitretação a Gás Controlada e Automática**. Nitrex Metal Inc. s/n., tradução Vendramin, J. C. Combustol. São Paulo, 12 p., 2002.

MEI, P.R.; SILVA, A.L.C. **Aços e Ligas Especiais**, São Paulo: Edgard Blücher, 2010. 664p.

NIKOLUSSI, M. **Cementite in the Fe-N-C system**. 2008. 177p. Tese (Doutorado) – Institut Für Metallkunde der Universität Stuttgart.

PYE, D. **Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing**. USA: ASM International. 2^a ed, 2005. 256 p.

RAKHIT, A.K. - **Heat treatment of gears, a practical guide for engineers**, USA: ASM International , 2000, 209p).

SANTOS C.E.Z. **Simulação termodinâmica dos processos de nitretação, nitrocarburação e carbonitretação gasosas**. 2003. 120p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SHEN, Y.Z.; K.H. Oh; D.N. LEE. Nitrogen strengthening of interstitial free steel by nitriding in potassium nitrate salt bath. *Materials Science and Engineering*, A 434, pp. 314–318, 2006.

SILVA, F. J. et al Erosão corrosão do aço ABNT 8550 nitretado. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo, v.3, n.4, p. 46-51, abr.-jun. 2007.

SKONIESK Adão F. O. – **Influência da mistura gasosa nos processos de nitretação e nitrocarbonetação a plasma do aço 4140**. 2008. 109p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal Rio Grande do Sul, 2008.

STIPKOVIC, M. F. - Cuidados na escolha do processo de fabricação de engrenagens cilíndricas retas e helicoidais. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, pp.57-65, 2000.

STRUERS, Metallographic preparation of nitrided and nitrocarburised components. Dinamarca, 2006, 6p.

TERENT'EV, V.F. et al. **The effect of nitriding on fatigue strength of structural alloys**. Disponível em: http://www.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/mechanika/mechtu_64/Vilys264.pdf. Acesso em 13 maio de 2010.

THELNING, K.E. **Nitriding, Steel and its Heat Treatment**. 2nd ed., USA, Butterworths, 1984, p. 492-544.

TOTH, H. J. **Estudo comparativo de técnicas de ataque metalográfico para aços carbono nitretados**. 2002. 66p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Nucleares, Ipen, São Paulo.

TOTTEN, G.E. **Steel Heat Treatment, Metallurgy and Technologies**. USA: CRC Press, 2007, 2nd ed, 834 p.

VATAVUK, J. et al. - Efeito da nitretação gasosa nas propriedades mecânicas dos aços ferramenta para trabalho a frio AISI D2 e D6. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*. p.10. 2002.

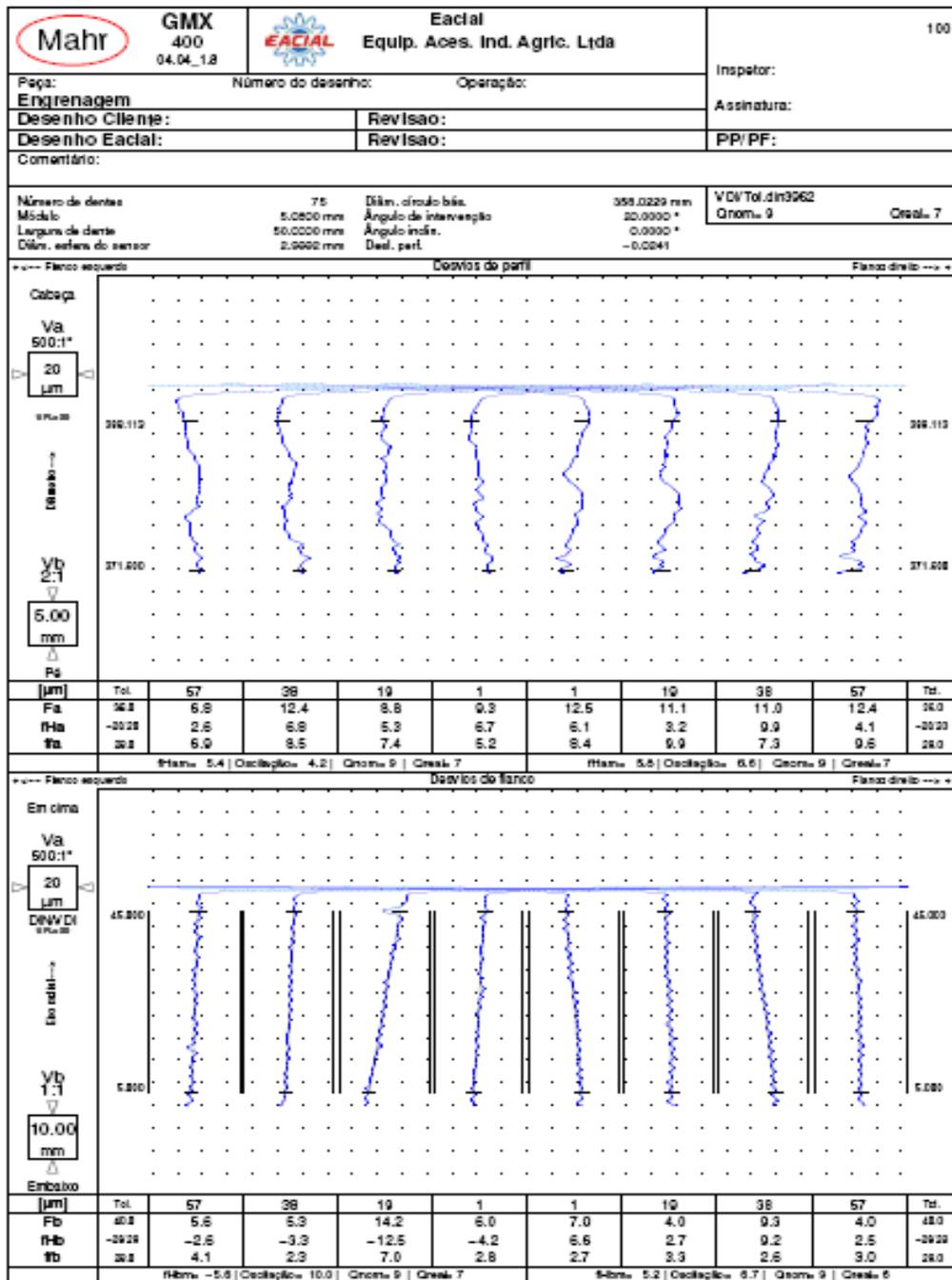
VENDRAMIM, J.C. Efeito da Nitretação na resistência a fadiga do aço CrSiV utilizado na fabricação de molas para indústria automotiva. 2004. 130 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

VOORT, G.F.V. Atlas of time temperature diagrams. USA: ASM International, 1ª ed, 1991, 903p.

WANKE, C.H. Influência da Temperatura e da Atmosfera do Plasma na Nitretação Iônica do Aço Rápido M2 Convencional e Sinterizado. 2003. 81p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina.

ANEXO I

Gráfico gerado na medidora de engrenagem após fresamento dos dentes.



ANEXO II

Gráfico gerado na medidora de engrenagem após a CTR.

