

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS – PPGE3M

VAGNER SARTORI

AVALIAÇÃO DA NITRETAÇÃO A PLASMA APLICADA A ESFERAS DE AÇO
INOXIDÁVEL PARA VÁLVULAS INDUSTRIAIS

Porto Alegre

2019

VAGNER SARTORI

AVALIAÇÃO DA NITRETAÇÃO A PLASMA APLICADA A ESFERAS DE AÇO
INOXIDÁVEL PARA VÁLVULAS INDUSTRIAIS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Porto Alegre

2019

VAGNER SARTORI

AVALIAÇÃO DA NITRETAÇÃO A PLASMA APLICADA A ESFERAS DE AÇO
INOXIDÁVEL PARA VÁLVULAS INDUSTRIAIS

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Orientador Dr. Alexandre da Silva Rocha

Prof. Coordenador Dr. Afonso Reguly

Aprovado em: 10/12/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mario Wolfart Junior – Instituto Federal Catarinense _____

Prof. Dr. Rafael Menezes Junior – Universidade Federal do Rio Grande do Sul _____

Prof. Dr. Tomaz Fantin de Souza – Instituto Federal do Rio Grande do Sul _____

Dedico este a DEUS, a meu falecido pai, a minha mãe e a minha esposa por estarem ao meu lado em todos os momentos e terem me apoiado sempre na escolha do melhor caminho a ser seguido e nas melhores decisões a serem tomadas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha Mãe Vanissa Bataglion Sartori, meu Pai Ilário Sartori (in memorian), que está olhando por mim lá de cima, e, em especial a minha esposa Anelise Machado Sartori por sempre estarem ao meu lado, me incentivando em todos os momentos, auxiliando nesta caminhada rumo a esta conquista e me indicando que o conhecimento e o estudo são os únicos bens que não podem ser perdidos e que levamos até o fim de nossas vidas.

A todos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado, em especial ao Eng. Mateus Faccio e Eng. Diogenes Teles pelo apoio na realização dos testes práticos e no auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao colega aluno de doutorado Leonardo Fonseca Oliveira e ao, também aluno de doutorado, Vitor Bonamigo Moreira pelos auxílios nos ensaios realizados nos laboratórios da UFRGS.

Ao Professor Dr. Alexandre da Silva Rocha pela sua orientação, dedicação e disponibilidade em auxiliar no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os Professores (as) do PPGE3M pelo conhecimento transferido neste período.

Ao apoio da empresa Micromazza, pela fabricação dos corpos de prova e esferas utilizadas neste trabalho, bem como disponibilização do ensaio de ciclagem.

RESUMO

Mudanças tecnológicas ocorrem a todo o momento, cada vez mais rápido e em todos os setores. Dessa forma, não seria diferente na exploração de petróleo. A busca por novos produtos ou simples mudanças que geram resultados significativos é um dos pilares de sustentação para a obtenção de ganhos em processos produtivos. Válvulas industriais desempenham um papel importante na indústria de exploração de petróleo, sendo um dos recursos tecnológicos sempre utilizados nas diferentes aplicações do setor. Estes dispositivos são responsáveis por realizar a abertura e fechamento para a passagem de fluidos em alta temperatura e pressão e são projetados para suportarem 20 anos de vida em serviço, seus componentes internos, construídos em aços inoxidáveis, necessitam apresentar propriedades como elevada resistência ao desgaste e corrosão. Tratamentos de nitretação são processos tecnológicos capazes de proporcionar em aços inoxidáveis o aumento de resistência ao desgaste e de dureza superficial, podendo proporcionar elevada vida útil dos componentes tratados. Desta forma, a proposta deste trabalho é realizar a nitretação a plasma nas esferas utilizadas nas válvulas com o intuito de obterem-se as melhorias desejadas. Para avaliar a influência dos tratamentos de nitretação foram realizados tratamentos em amostras cilíndricas e em esferas utilizadas nas válvulas industriais, as variáveis de processo foram temperatura de 400 °C e 500°C, mistura gasosa de 76% nitrogênio e 24% hidrogênio e tempo de tratamento de 5 horas. Nos corpos de prova foram realizados ensaios de microdureza superficial, corrosão, desgaste e perfil de microdureza. Nas esferas foram realizados ensaios de ciclagem. Os testes nos corpos de prova revelaram ganhos significativos em relação a desgaste e dureza. O material ASTM grau CA15 reduziu sua taxa de desgaste em 55%, o ASTM grau CF8 em 42% e o ASTM grau CF8M em 39%. Na dureza o acréscimo foi de 60% para o CA 15, 8% para o CF8 e 5% para o CF8M. Em contrapartida, a corrosão teve um leve aumento nos materiais nitretados, sendo de 12% para o CA15, 10% para o CF8 e 14% para o CF8M. Os ensaios de ciclagem demonstram resultados muito próximos do que os materiais de válvulas são submetidos em sua vida útil em serviço e, após 2000 ciclos, os materiais nitretados apresentam desempenho adequado para sua utilização em válvulas industriais.

Palavras-chave: Válvula industrial. Nitretação a plasma. Ciclagem. Desgaste.

ABSTRACT

Technological changes are happening every moment, faster and faster in all sectors. Therefore, it would not be seriously different in oil exploration. A search for new products or simple changes that yield results is one of the pillars of product process gains. Industrial valves play an important role in the oil exploration industry, being one of the technological resources always used in the different applications of the sector. These devices are responsible for opening and closing a fluid passage at high temperature and pressure and are designed to withstand 20 years of service life, their internal components, made of stainless steel, which are exposed to damage. caused by wear and corrosion. Nitriding treatments are technological processes capable of providing increased wear resistance and surface hardness in stainless steels, and can provide long service life of treated components. Thus, the purpose of this work is to perform plasma nitriding on the balls used in the valves in order to obtain the desired improvements. To evaluate the influence of nitriding treatments were performed treatments in cylindrical samples and spheres used in industrial valves, the process variables were temperature of 400 ° C and 500 ° C, gas mixture of 76% nitrogen and 24% hydrogen and time of treatment. 5 hour treatment. The specimens were tested for surface microhardness, corrosion, wear and microhardness profile. In the spheres cycling tests were performed. Testing on specimens revealed significant gains in wear and hardness. ASTM grade CA15 material reduced its wear rate by 55%, ASTM grade CF8 by 42% and ASTM grade CF8M by 39%. In hardness the increase was 60% for CA 15, 8% for CF8 and 5% for CF8M. In contrast, corrosion had a slight increase in nitrided materials, being 12% for CA15, 10% for CF8 and 14% for CF8M. Cycling tests demonstrate results very close to what valve materials undergo in their service life and, after 2000 cycles, nitrided materials perform well for use in industrial valves.

Keywords: Industrial valve. Plasma nitriding. Cycling. Wear

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Seleção e aplicação de diferentes tipos de válvulas.....	17
Figura 2 - Válvula de gaveta fabricada em aço carbono fundido	18
Figura 3 - Válvula de esfera.	18
Figura 4 - Esquema de funcionamento de válvula esfera instalada em uma tubulação.	19
Figura 5 - Efeito da nitretação sobre a resistência à fadiga, sendo as curvas B e D referentes a aços nitretados e curvas A e C referentes a aços temperados e revestidos	23
Figura 6 - Efeito do tempo de nitretação a gás sobre a espessura da camada nitretada.	24
Figura 7: Profundidade de nitretação obtida em aço na nitretação líquida a 570°C.....	25
Figura 8 - Efeito da nitretação líquida na resistência ao desgaste de aço 0,15 C nitretado comparado ao aço sem nitretação líquida.....	26
Figura 9 - Efeito da camada branca na fadiga de um aço nitretado 4140 e mergulhado em solução aquosa com 3% de NaCl.	29
Figura 10 - Perfil de dureza de uma camada nitretada.	30
Figura 11 - Equipamento básico de um sistema de nitretação a plasma.	31
Figura 12 - Equipamento industrial automatizado para nitretação a plasma.....	32
Figura 13 - Corpos de prova antes da nitretação a plasma.	45
Figura 14 - Protótipos em esferas.	46
Figura 15 - Nitretação a plasma.....	48
Figura 16 - Equipamentos utilizados para os ensaios cíclicos.....	52
Figura 17 - Trilhas de desgaste.....	56
Figura 18 - Perda de volume dos aços em μm^3 com e sem tratamento	56
Figura 19 - Taxa de desgaste (k) dos materiais com e sem tratamento	57
Figura 20 - Perfil de microdureza das amostras dos materiais.	58
Figura 21 - Protótipos de válvulas.....	59
Figura 22 - Válvulas desmontadas.....	59
Figura 23 – Esfera aço ASTM grau CF 8.....	60

Figura 24 - Esfera aço ASTM grau CF 8M.....	60
Figura 25 – Esfera aço ASTM grau CA 15.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aços baixa liga com alumínio aplicados na nitretação a gás.	22
Tabela 2 - Alguns dados da camada nitretada de diversos aços e ferros.....	34
Tabela 3 - Alguns dados da camada nitretada de diversos aços e ferros.....	35
Tabela 4 - Custos estimados de corrosão.	38
Tabela 5 - Tratamentos térmicos.	45
Tabela 6 - Composição química.	46
Tabela 7 - Parâmetros do ensaio de desgaste.	49
Tabela 8 - Valores de rugosidade antes do tratamento.....	53
Tabela 9 - Valores de rugosidade pós tratamento.....	53
Tabela 10 - Valores de microdureza pré tratamento em Vickers.	54
Tabela 11 - Valores de microdureza pós tratamento em Vickers.....	54
Tabela 12 - Ensaio de corrosão dos materiais sem tratamento.....	54
Tabela 13 - Ensaio de corrosão dos materiais com tratamento.....	55
Tabela 14 - Taxa de desgaste (k).....	57
Tabela 15 - Comparação dos resultados dos aços estudados	61
Tabela 16 - Ciclos máximos suportados.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>
C	Carbono
CH ₄	Metano
C ₂ H ₆	Etano
C ₃ H ₈	Propano
CO	Monóxido de carbono
ISO	<i>International organization for standardization</i>
N	Força Newton
NBR	Norma Brasileira da ABNT
MPa	Megapascal
Pa	Pascal
PMT	Pressão máxima de trabalho
Kgf/mm ²	Quilograma força por milímetros ao quadrado
K	Kelvin
HRC	Dureza Rockwell C

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	VÁLVULAS INDUSTRIAIS	16
3.2	MATERIAIS EMPREGADOS NA FABRICAÇÃO DE VÁLVULAS.....	17
3.3	VÁLVULAS INDUSTRIAIS DO TIPO ESFERA.....	19
3.4	PROTEÇÃO E ENDURECIMENTO DA SUPERFÍCIE.....	20
3.4.1	Tratamentos Termoquímicos	20
3.4.2	Nitretação	21
3.4.3	Nitretação à gás	21
3.4.4	Nitretação Líquida	24
3.4.5	Nitretação à Plasma	27
3.5	TESTES DE QUALIDADE	34
3.5.1	Ensaio de Dureza Aplicado a Superfície de Materiais Nitretados	34
3.5.2	Corrosão de Metais	37
3.5.2.1	Tipos de Corrosão	38
3.5.2.1.1	Ataque Uniforme	38
3.5.2.1.2	Corrosão em Frestas	39
3.5.2.1.3	Corrosão Galvânica	39
3.5.2.1.4	Corrosão por Pites	39
3.5.2.1.5	Corrosão Intergranular	39
3.5.2.1.6	Erosão-Corrosão	40
3.5.2.1.7	Corrosão Sob Tensão	40
3.5.2.1.8	Fragilização por Hidrogênio	41
3.5.3	Controle e Prevenção da Corrosão	41
3.6	AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS APLICADOS À NITRETAÇÃO PLASMA.....	42
3.7	AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX APLICADOS À NITRETAÇÃO À PLASMA.....	43
3.8	AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS APLICADOS À NITRETAÇÃO À PLASMA.....	44
4	METODOLOGIA	45
4.1	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	45
4.2	PREPARAÇÃO DOS PROTÓTIPOS.....	46

4.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS.....	46
4.4	ENSAIOS DE RUGOSIDADE NOS CORPOS DE PROVA.....	47
4.5	ENSAIOS DE DUREZA NOS CORPOS DE PROVA	47
4.6	NITRETAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	47
4.7	ENSAIOS DE CORROSÃO.....	48
4.8	ENSAIOS DE DESGASTE	49
4.9	PERFIL DE MICRODUREZA.....	50
4.10	ENSAIOS DE CICLAGEM	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1	ENSAIOS DE RUGOSIDADE NOS CORPOS DE PROVA.....	53
5.2	ENSAIOS DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL PÓS TRATAMENTOS.....	53
5.3	ENSAIOS DE MICRODUREZA PRÉ TRATAMENTO.....	53
5.4	ENSAIOS DE MICRODUREZA PÓS TRATAMENTO.....	54
5.5	ENSAIOS DE CORROSÃO.....	54
5.6	ENSAIOS DE DESGASTE.....	55
5.7	PERFIS DE MICRODUREZA.....	57
5.8	ENSAIOS DE CICLAGEM DAS VÁLVULAS	58
5.9	COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES MATERIAIS.....	60
6	CONCLUSÕES	62
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos muitos materiais estão sendo alterados para melhorar suas características e desempenho. A procura por novos materiais também se tem destacado no atual cenário. A adição ou combinação de diferentes materiais e a aplicação de tratamentos na superfície destes tem sido um dos recursos utilizados para a melhoria de suas propriedades.

Na produção de petróleo e gás vários desafios são encontrados, sendo o desgaste e corrosão os principais problemas encontrados com seus materiais. Os custos ocasionados pelas perdas através desses problemas são altos e, portanto, devem-se buscar alternativas para o combate a estes defeitos (KERMANI, 1996).

As válvulas industriais são muito utilizadas no setor de petróleo e gás e, portanto, sofrem desgastes excessivos devido a fluidos agressivos. Nestas válvulas, devido aos ciclos de abertura e fechamento, a esfera responsável pela vedação da válvula necessita possuir características que prolonguem sua vida útil, sua qualidade e segurança.

Na construção das esferas das válvulas industriais são utilizados aços inoxidáveis, estes materiais são versáteis e de grande importância, sendo aplicados além da indústria de petróleo e gás, nos setores farmacêuticos, alimentos, têxteis, celulose entre outros.

Estas esferas em serviço estão submetidas a elevadas temperaturas e diversas condições agressivas. Desta forma, seu revestimento superficial pode ser uma alternativa eficaz para auxiliar o material nestas condições e melhorar seu desempenho. (DAVIS, 2001).

A constante abertura e fechamento da esfera na válvula ocasiona formação de riscos, desgastes e deformações que irão comprometer seu funcionamento e acarretar vazamentos. Assim, um tratamento de endurecimento superficial é uma das alternativas para reduzir esta situação.

Entre os muitos tratamentos de endurecimento superficial existentes, um dos mais estudados e aplicados atualmente é o processo de nitretação a plasma.

Pesquisas têm mostrado a eficiência da aplicação da nitretação a plasma aços inoxidáveis, apresentando resultados como elevado aumento de dureza e resistência ao desgaste, podendo também ter bom controle das variáveis utilizadas. Este processo de endurecimento superficial ocasiona diversas vantagens, além das já citadas: processo ecologicamente correto, tempos e temperaturas de operação relativamente baixas, proporcionando menores custos e excelentes propriedades mecânicas (KRAUSS, 2005).

Este processo teve como pioneiro Bernard Berghaus, que analisou a aplicação da descarga luminescente para tratamentos superficiais, explorando o plasma em indústrias desde 1930 (BERGHAUS, 1937).

Portanto este trabalho buscou investigar a aplicação do processo de nitretação a plasma em esferas utilizadas nas válvulas industriais, com o intuito de aumentar sua dureza superficial e resistência ao desgaste sem perder suas características contra a corrosão.

Os ensaios realizados nos corpos de prova serviram para se obter melhores dados e parâmetros que corroboraram para a nitretação do protótipo da esfera. Desta forma nitretou-se a esfera e realizaram-se ensaios de ciclagem para verificar a real eficiência do produto nitretado em suas condições de serviço, sendo este o objetivo final deste estudo.

2 OBJETIVOS

a) Objetivo Geral

Verificar a eficiência da nitretação a plasma na vida útil de esferas de aço dos materiais inoxidáveis CA15, CF8 e CF8M, utilizados na fabricação de válvulas industriais.

b) Objetivos Específicos

- Estudar e descrever a aplicação geral dos tipos de válvulas utilizados na indústria do petróleo.
- Descrever a aplicação da nitretação em aços inoxidáveis.
- Realizar ensaios em materiais nitretados utilizados em esferas para válvulas industriais.
- Realizar o ensaio cíclico com o intuito de verificar a vida útil da esfera e sua real condição em serviço.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 VÁLVULAS INDUSTRIAIS

Válvulas são equipamentos muito utilizados em todos os processos industriais, representando em média 8% do custo total de uma instalação industrial e, no caso da indústria do petróleo e gás, alcançando 20 a 30% dos custos de tubulação (SILVA, 2008). As válvulas em uma instalação de petróleo estão diretamente ligadas a aspectos operacionais, segurança das instalações e pessoas, e ao meio ambiente. A Petrobras, por exemplo, investiu em compras diretas dos fabricantes de válvulas cerca de R\$ 957 milhões e em compras de terceiro mais de R\$ 1 bilhão nos últimos 5 anos (PETROBRAS / ABIMAQ, 2013).

Válvulas são equipamentos com a função de controlar e interromper a vazão de fluidos em encanamentos, sendo que existe uma gama muito grande de tipos de válvulas, cuja escolha depende da natureza da operação e, principalmente, das propriedades químicas e físicas do fluido utilizado (MACINTYRE, 1997).

Ainda de acordo com Macintyre, 1997 as válvulas podem ser classificadas da seguinte forma:

- **Válvulas de Bloqueio (*block-valve*):** São as que trabalham totalmente fechadas ou totalmente abertas. Permitem baixa queda de pressão quando totalmente abertas, pois tem uma vazão muito alta. As partes essenciais dessas válvulas são o corpo, castelo, haste, volante, sede e contra-sede.
- **Válvulas de Regulagem (*throttling valves*):** Servem para controlar o fluxo de fluido e conseguem trabalhar em qualquer posição. Mesmo estando totalmente abertas, ocorre perda de carga em função da geometria do corpo da válvula. Os tipos mais empregados são borboleta, globo, agulha e diafragma.
- **Válvulas de Segurança (*safety valves*):** Utilizam a energia do próprio fluido para sua operação. São aplicadas para alívio de pressão, com o objetivo de evitar sobre-pressão no sistema, garantindo assim segurança.
- **Válvulas de Retenção (*checkvalves*):** São válvulas que se fecham por diferença de pressão provocada pelo escoamento do líquido. Quando é interrompida ou alterada a direção do fluxo, a válvula veda automaticamente. Os tipos mais aplicados são as válvulas de retenção pistão, retenção portinhola e retenção esfera.

O dimensionamento, a seleção e o tipo são aspectos importantes para a escolha da válvula correta. Deve-se levar em consideração a perda de carga, tipo de fluido, temperatura, pressão, vazão, maneiras de acionamento, materiais e espaço para a instalação.

Na figura 1 estão relacionados os diversos tipos de válvulas, sendo explicadas suas diversas aplicações. (MATHIAS, 2008).

Figura 1- Seleção e aplicação de diferentes tipos de válvulas.

APLICAÇÕES									
TIPOS DE VÁLVULAS	Bloqueio de fluxo	Controle de Fluxo	Acionamento Rápido	Operações Frequentes	Passagem plena	Prevenção de refluxo	Alta pressão diferencial	Alívio de pressão	Fluidos viscosos
Gaveta	.				.		.		
Globo		.		.			.		
Retenção						.			
Guilhotina
Diafragma					
Mangote
Esfera
Borboleta
Macho
Segurança								.	
Controle			.	.			.		

Fonte: MATHIAS (2008)

3.2 MATERIAIS EMPREGADOS NA FABRICAÇÃO DAS VÁLVULAS

De acordo com Macintyre (1997) destacam-se os principais materiais utilizados na fabricação das válvulas industriais:

Ferro fundido cinzento e ferro fundido nodular: aplicados às válvulas de diâmetro até 200 mm, como as de gaveta, retenção, borboleta, globo, angulares, segurança e diafragma. Utilizadas em serviços com água, ar comprimido, gás, condensadores de vapor e líquidos em geral.

Aço-carbono fundido: aplicado às válvulas de gaveta, esfera, retenção com diâmetro de até 600 mm e em válvulas globo, angulares, segurança, redutores de pressão e controle até o diâmetro de 200 mm. Utilizadas em água, gás, vapor, óleo e ar em severas condições de pressão e temperatura.

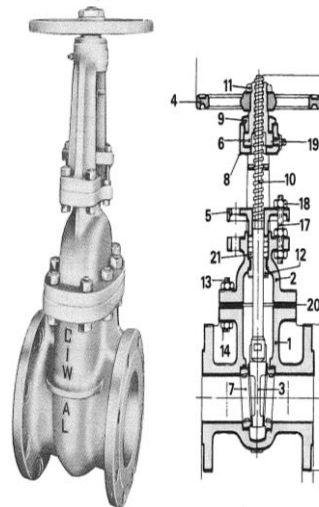
Aço forjado: aplicado às válvulas de gaveta, macho, globo, retenção, angulares, de segurança e agulha. Utilizadas em serviços de alta pressão e temperatura, com gases, líquidos inflamáveis, corrosivos, óleos e lubrificantes.

Bronze: aplicado às válvulas de gaveta, macho, globo, retenção, agulha e angulares. Utilizadas em líquidos de baixa pressão, água, ar comprimido, condensado, em vapor, pressões altas, óleos e líquidos inflamáveis.

Aços inoxidáveis: utilizados principalmente em válvulas esferas, borboletas, gavetas e globo.

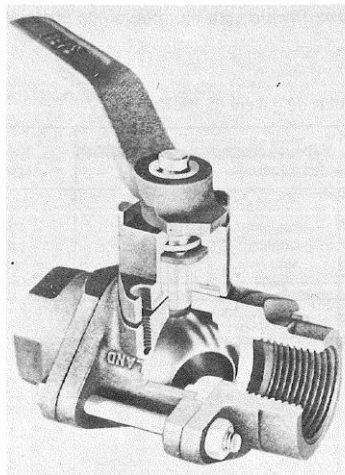
As figuras 2 e 3 mostram modelos de válvulas industriais.

Figura 2 - Válvula de gaveta fabricada em aço-carbono fundido



Fonte: Macyntire (1997)

Figura 3 - Válvula de esfera



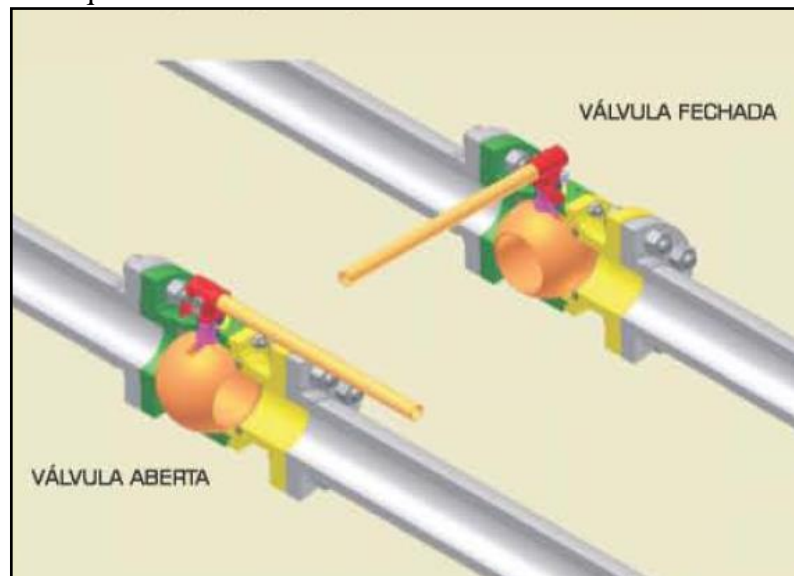
Fonte: Macintyre (1997)

3.3 VÁLVULAS INDUSTRIAIS DO TIPO ESFERA

Válvulas de esfera são para aplicações gerais, de fechamento rápido, amplamente utilizadas para vácuo, ar comprimido gases, vapor e líquidos. O fluxo é controlado através de uma esfera, possuindo uma passagem central localizada no corpo da válvula, sendo seu comando. Na sua posição aberta o furo da passagem da esfera fica alinhado com a tubulação possibilitando, dessa maneira, a vazão do fluido. No sentido fechado, o orifício da esfera fica contrário ao sentido do fluxo, bloqueando a passagem do fluido. (MACINTYRE, 1997).

A figura 4 mostra como funciona uma válvula esfera instalada em uma tubulação.

Figura 4 - Esquema de funcionamento de válvula esfera instalada em uma tubulação



Fonte: MNA (2012)

De acordo com o sistema de vedação, as válvulas esfera podem ser de dois tipos: flutuante ou trunnion. A do tipo flutuante é a mais aplicada, sendo mais utilizada para baixas pressões e em dimensões de até 8 polegadas. Esta válvula é constituída de uma esfera com duas sedes na entrada e na saída da mesma, com a parte interior composta por uma haste e uma esfera com o encaixe entre elas possibilitando liberdade de movimento da esfera para atuar com uma força mecânica sobre a vedação de saída na posição fechada. A diferença de pressão entre a entrada e saída da válvula produz uma força na esfera comprimindo a sede e, desta forma, produzindo vedação na saída do fluxo (MATHIAS,2008).

Mathias (2008) explica que a válvula esfera trunnion possui um eixo inferior chamado trunnion e um eixo superior que é uma haste. Estes eixos proíbem o movimento haxial da esfera impossibilitando que a pressão do fluido altere o torque operacional da

válvula e o desgaste do anel de vedação, suportando, dessa maneira, a força dinâmica exercida pelo fluido e possibilitando durabilidade ao sistema de vedação.

3.4 PROTEÇÃO E ENDURECIMENTO DA SUPERFÍCIE

Proteger a superfície é algo extremamente necessário. Os materiais precisam, dependendo de sua aplicação, atingir certas propriedades, como dureza, resistência á corrosão, a escoriações, ao desgaste, à fadiga, a temperatura, tenacidade entre outras. Uma das maneiras para auxiliar o material a atingir propriedades desejadas é a transformação da superfície.

Os tratamentos de endurecimento de superfícies afetam a superfície dos aços até uma certa profundidade, sempre mantendo a região central do material com as mesmas propriedades.

3.4.1 Tratamentos termoquímicos

São tratamentos que procuram endurecer a superfície dos aços por difusão de elementos químicos como carbono, boro, hidrogênio e nitrogênio, entre outros. Sua principal característica é o aumento da resistência ao desgaste e dureza da superfície, sempre mantendo o núcleo do material com as mesmas propriedades. (ASKELAND e WRIGHT, 2016).

Diferente da têmpera superficial, onde o endurecimento ocorre através da transformação da austenita em martensita, os tratamentos termoquímicos envolvem reações químicas, sendo que os meios para que ocorram as reações podem ser líquidos, gasosos, sólidos e a plasma. (ASKELAND e WRIGHT, 2016).

De acordo com Costa e Silva e Mei (2010) os processos de tratamentos termoquímicos mais aplicados são: nitretação, cianetação, cementação, cabonitretação, nitrocarbonetação, boretação e termorreação. Os fatores que influenciam no controle destes processos são:

- Potencial do meio (sólido líquido ou gasoso ou plasma) em que a peça fica imersa em um elemento químico;
- Capacidade da peça em absorver o elemento químico.

3.4.2 Nitretação

Na nitretação é introduzido nitrogênio na superfície do material, com o objetivo de formar nitretos e não de martensita como na cementação e na têmpera, sendo, dessa forma, as temperaturas relativamente baixas, não ocorrendo transformação de fase (KRAUSS, 2005).

E, segundo outro autor, a nitretação é um processo de introdução de nitrogênio na superfície do aço através do seu aquecimento a temperaturas entre 500 e 570° C com o intuito de formar uma camada dura de nitretos. Devido às temperaturas mais baixas que a cementação, este processo tem menor probabilidade de formar trincas e menor distorção no material. Após não é necessário têmpera para endurecimento da camada nitretada (COSTA E SILVA E MEI,2010).

Chiaverini (2003) cita que este tratamento termoquímico promove o endurecimento superficial através do nitrogênio que se difunde na superfície das peças indo para o seu interior, reagindo com elementos químicos presente nos aços e, dessa maneira, formando nitretos de elevada dureza e resistência ao desgaste. Os principais objetivos da nitretação são:

- Melhorar a resistência à fadiga;
- Melhorar a resistência à corrosão;
- Produzir superfícies de alta dureza, resistência ao desgaste e à escoriação.

Este processo produz uma camada superficial muito fina e, que em ensaio micro gráfico, é branca, com uma espessura pequena, geralmente inferior a 0,025 mm, mas com boa resistência à corrosão e ao engrupamento. Abaixo desta camada, existe uma camada escura que representa a alta dureza e é constituída de nitreto de ferro, nitretos dos elementos de liga e de compostos de ferro, carbono e nitrogênio. A dureza da camada nitretada vai depender dos elementos de liga presentes e do tipo do aço (CHIAVERINI, 2003).

Os processos de nitretação existentes são: nitretação a gás, nitretação líquida e nitretação à plasma.

3.4.3 Nitretação a gás

Na nitretação á gás utiliza-se como meio nitretante a amônia que se decompõe originando o nitrogênio. Ao chegar a um nível de saturação de nitrogênio na superfície do metal, nitretos são formados através da nucleação e crescimento e, com isso, o nitrogênio se difunde no interior do metal (SKONIESKY, 2008).

A nitretação a gás é aplicada em uma atmosfera de amônia em temperaturas entre 500 e 565° C.

De acordo com Costa e Silva e Mei (2010) são utilizados aços que contém elementos formadores de nitretos estáveis à temperatura de nitretação, como o cromo, alumínio e o vanádio e são classificados da seguinte forma:

- Aços baixa liga contendo alumínio;
- Aços ferramenta contendo 5% de cromo;
- Aços de baixo carbono ao cromo;
- Aços médio carbono ao cromo;
- Aços ferramenta endurecíveis ao ar;
- Aços rápidos tipo M2 e M4;
- Aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos;
- Aços inoxidáveis nitrônicos;
- Aços inoxidáveis austeníticos;
- Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.

A tabela 1 demonstra os aços alumínio de baixa liga utilizados na nitretação a gás. (COSTA E SILVA E MEI, 2010).

Tabela 1: Aços baixa liga com alumínio aplicados na nitretação a gás.

Aço		Composição (% em peso)						
ABNT	Nitrallo y	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al
-	G	0,35	0,55	0,30	1,2	-	0,20	1,0
7140	135 M	0,42	0,55	0,30	1,6	-	0,38	1,0
	N	0,24	0,55	0,30	1,15	3,5	0,20	1,0
	EZ	0,35	0,80	0,30	1,25	-	0,20	1,0

Fonte: Adaptado de Costa e Silva e Mei (2010)

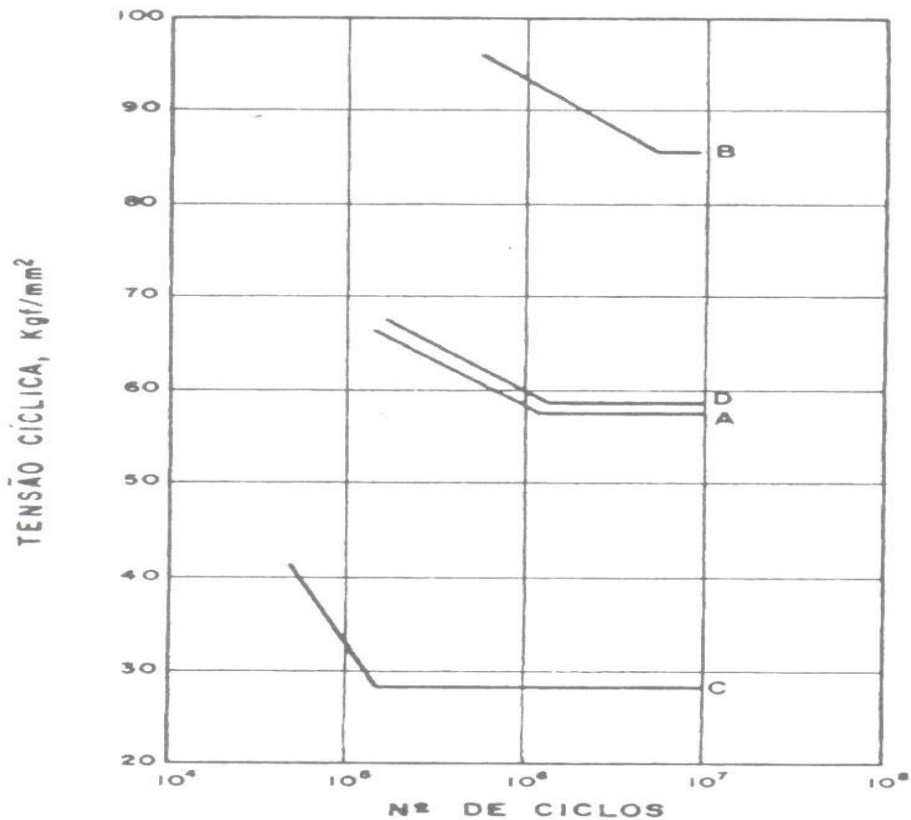
Junior (2010) explica que na nitretação gasosa o processo é controlado medindo-se o fluxo de amônia e especificando a porcentagem de associação, sendo que esta aumenta com o aumento da temperatura ou reduzindo o fluxo de amônia. Geralmente a dissociação fica entre 15 e 30%. O processo produz a camada frágil com muito hidrogênio, que é a camada branca seguida de uma zona de difusão. Uma maneira de minimizar a produção desta camada é a nitretação em dois estágios, consistindo em nitretar o material em 525°C com 20% de

dissociação da amônia entre 5 a 8 horas, seguido de uma outra nitretação em 550°C com uma dissociação da amônia entre 80 e 85%.

Ainda de acordo com o mesmo autor, na mistura gasosa pode-se adicionar outros elementos que alteram a composição da superfície e a cinética da nitretação. Acrêscimos de oxigênio, vapor de água e ar na atmosfera do forno aceleram o processo de nitretação, porém a adição de oxigênio diminui a dureza. Outras modificações na mistura gasosa também podem ser feitas através de gás natural, gás endotérmico ou gás exotérmico.

A figura 5 apresenta o efeito da nitretação sobre a resistência à fadiga referente a aços nitretados e aços temperados e revestidos.

Figura 5: Efeito da nitretação sobre a resistência a fadiga, sendo as curvas B e D referentes a aços nitretados e curvas A e C referentes a aços temperados e revestidos



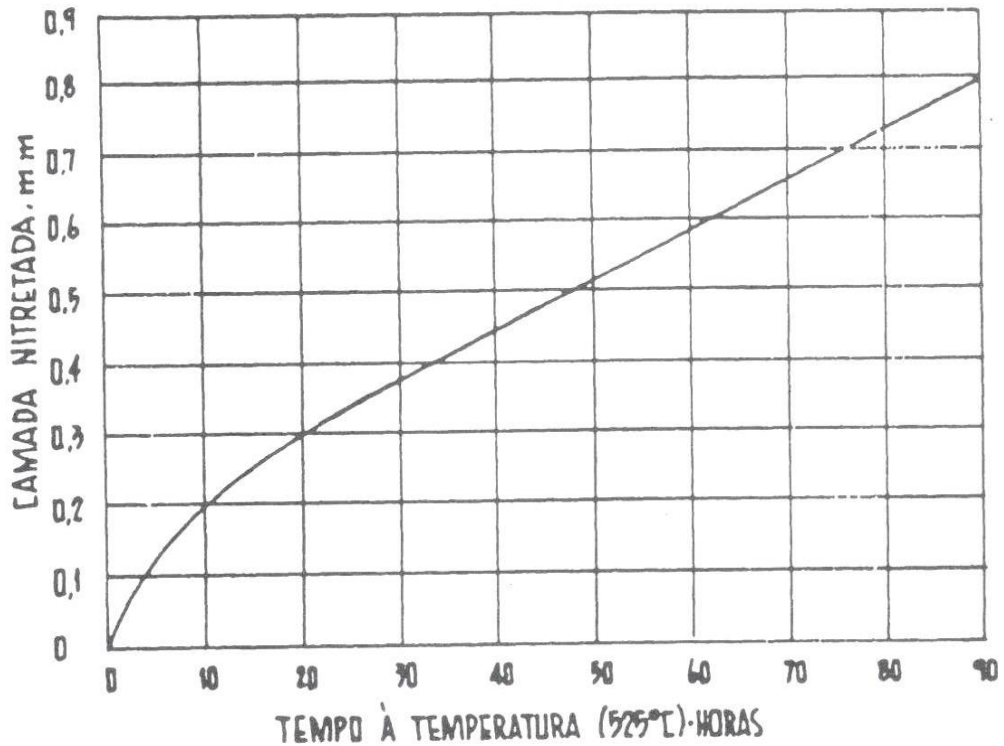
Fonte: Chiaverini (2003)

A difusão do nitrogênio, neste processo, é lenta, podendo demorar até 90 horas, variando normalmente entre 48 e 72 horas. Mesmo assim sua espessura não consegue ultrapassar 0,8 mm. Um dos inconvenientes de todo este tempo de operação é o crescimento do material. Porém, dependendo do tipo de material, pode-se avaliar este crescimento e

reduzi-lo na usinagem prévia a que serão submetidas às peças antes da nitretação (CHIAVERINI, 2003).

A figura 6 mostra o efeito do tempo de nitretação a gás sobre a espessura da camada.

Figura 6 - Efeito do tempo de nitretação a gás sobre a espessura da camada nitretada



Fonte: Chiaverini (2003)

3.4.4 Nitretação líquida

No processo da nitretação líquida o meio utilizado na nitretação é uma mistura de sais.

Este processo utiliza a mesma faixa de temperatura que a nitretação gasosa (entre 500 e 570° C), porém abaixo da temperatura de transformação do aço a ser tratado. Tanto a nitretação líquida quanto a gasosa são semelhantes, no entanto a líquida é mais aplicada quando se quer obter uma boa camada de compostos (JUNIOR,2010).

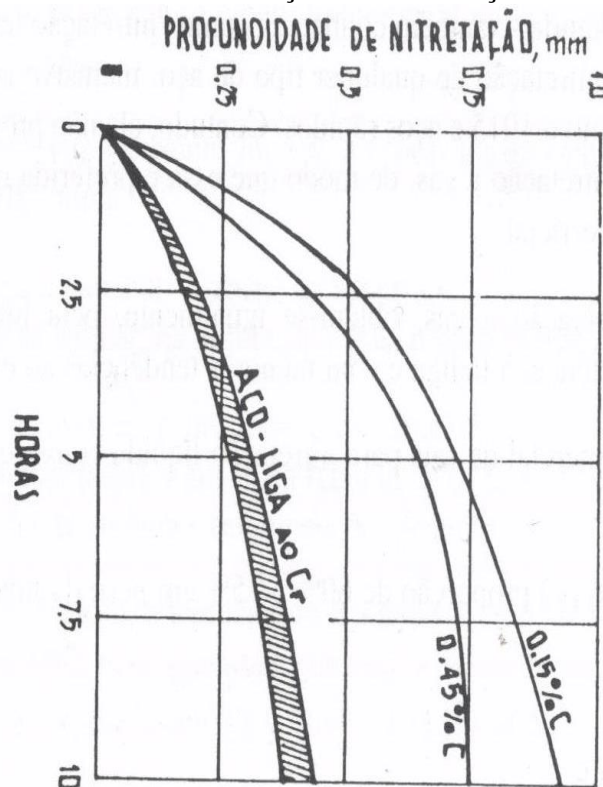
Ainda de acordo com Junior (2010) para se obter um bom resultado na nitretação líquida deve-se seguir os seguintes passos:

- O banho de sais deve ser envelhecido e o conteúdo de cianeto mantido constante;

- O banho deve ser analisado periodicamente e as composições restabelecidas, sendo eliminados os produtos de oxidação;
- As peças devem ser limpas, desengorduradas e pré-aquecidas;
- O banho não deve ser aquecido acima de 600° C;
- Depois de 3 ou 4 meses de operação deve-se trocar os sais.

Este processo de nitretação possibilita sua aplicação em qualquer tipo de aço, porém não consegue produzir camadas com espessuras iguais as da nitretação a gás. Suas camadas são de boa resistência à fadiga e poucas tendências ao engripamento. A figura 7 demonstra a profundidade de nitretação obtida em alguns aços (CHIAVERINI, 2003).

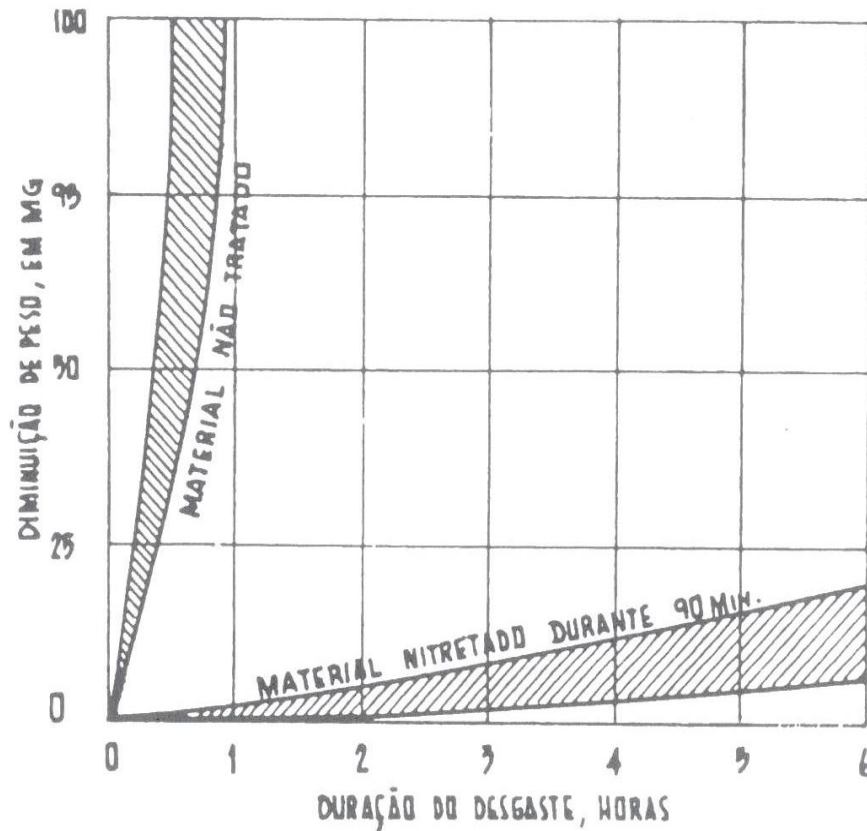
Figura 7 - Profundidade de nitretação obtida em aços na nitretação líquida a 570° C



Fonte: Chiaverini (2003)

A figura 8 indica o efeito da nitretação líquida sobre as propriedades de resistência ao desgaste.

Figura 8: Efeito da nitretação líquida na resistência ao desgaste do aço 0,15C nitretado comparado ao aço sem nitretação líquida



Fonte: Chiaverini (2003)

De acordo com Costa e Silva e Mei (2010), a grande vantagem da nitretação líquida sobre a nitretação a gás é que o tempo utilizado é menor, porém sua camada nitretada também é menor.

Chiaverini (2003) cita dois tipos de processos de nitretação líquida:

- Nitretação sob pressão: a amônia é introduzida sob pressão em um banho de cianeto-cianato mantido bem vedado. O ciclo médio do processo é de 24 horas podendo variar até 72 horas;
- Nitretação em banho arejado: quantidades de ar são bombeadas através do banho de sal. A agitação do banho provoca atividade química e o processo produz uma camada de nitrogênio de 0,30 mm de espessura em aço-carbono comum ou de baixo teor de liga em um ciclo de processo que dura em torno de 1 hora e 30 minutos.

A resistência a fadiga e ao desgaste aumenta bastante após a nitretação das peças, por isso o correto é resfriá-las rapidamente após a aplicação do processo com o intuito de manter o oxigênio em solução sólida na peça (COSTA E SILVA E MEI, 2010).

3.4.5 Nitretação a plasma

Este processo também é conhecido como nitretação iônica ou nitretação por descarga luminescente.

Em uma câmara à vácuo é criado plasma através da aplicação de um campo elétrico, íons de nitrogênio são acelerados na direção da peça. Os íons provocam aquecimento da peça e limpeza da superfície fornecendo o nitrogênio ativo para ser absorvido pelo aço. Este processo apresenta um melhor controle da composição química da camada, da uniformidade e provoca uma menor distorção nas peças. (COSTA E SILVA E MEI, 2010).

Ao ser aplicado a corrente elétrica na câmara à vácuo o gás é excitado e ionizado resultando em um brilho ou incandescência que cobre totalmente a carga. No início do processo a pressão é baixa para após se elevar rapidamente entre 265 a 665 Pa. Pelo bombardeamento dos íons a temperatura se eleva até a temperatura de tratamento, variando de acordo com a composição química, a mistura gasosa, a profundidade e composição da camada nitretada desejada. Onde ocorre uma reação química entre o aço e os íons de nitrogênio. Recomenda-se utilizar hidrogênio para a superfície das peças ficarem inteiramente desoxidadas tendo uma rápida difusão de nitrogênio na superfície do metal (CHIAVERINI, 2003).

Junior (2010) explica o sucesso da nitretação a plasma através das seguintes vantagens:

- Controle de camada: Sua estrutura é controlada através das variáveis do processo, podendo produzir facilmente uma camada fina e tenaz ou uma camada espessa;
- Baixa temperatura de tratamento: Com temperaturas abaixo de 300° C é possível realizar o processo, evitando distorções dimensionais;
- Uniformidade na espessura da camada: A descarga do plasma é uniforme em toda a superfície da peça;
- Tempo de tratamento menor: A duração do seu processo é menor comparado aos outros processos de nitretação. Este menor tempo deve-se a transferência mais efetiva de nitrogênio do plasma para a superfície da peça e à existência de outras espécies ativas no plasma;
- Nitretação de partes das peças: Através de um isolamento de partes das peças consegue-se aplicar o processo somente onde necessário;

- Possibilidade de desnitreção: Consegue-se através de um tratamento em plasma aplicando apenas hidrogênio como atmosfera em fluxo contínuo, que forma amônia retirando o nitrogênio da peça e sendo levado para fora do sistema;
- Economia: A energia e o gás saem mais baratos que os outros processos de nitreção. A transferência de calor por condução e convecção é baixa proporcionando um rendimento do aquecimento a plasma que pode chegar a 80% e a manutenção do equipamento tem um custo menor;

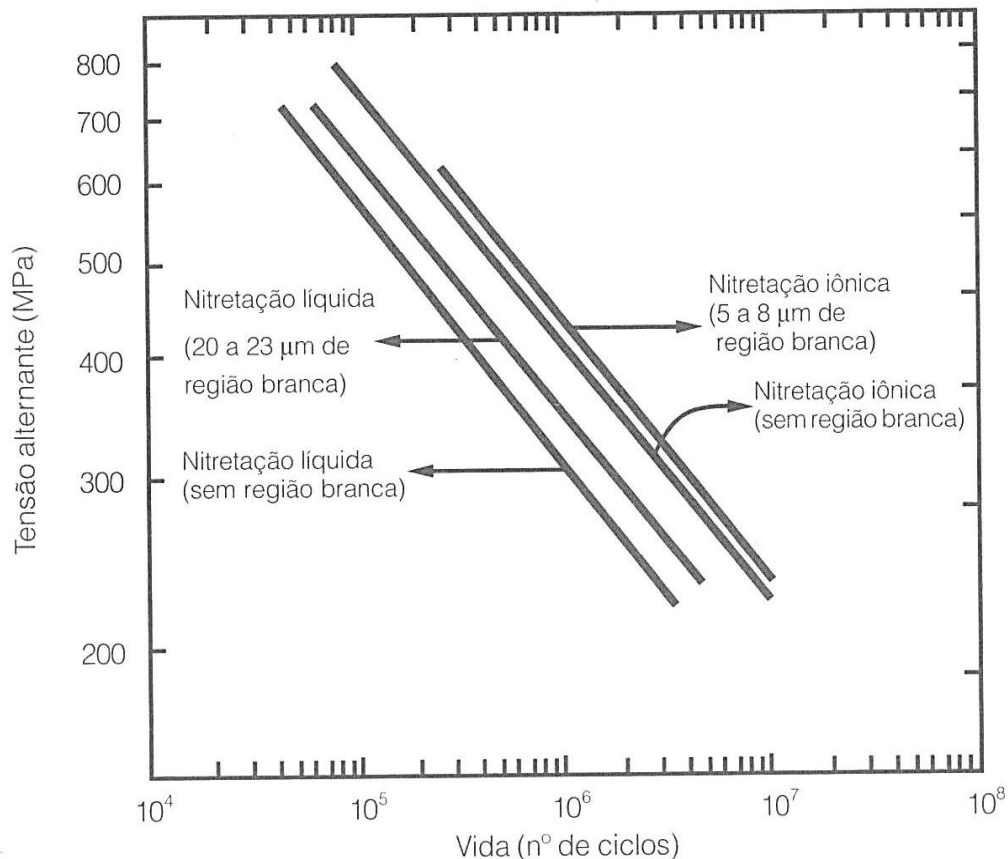
No entanto, o mesmo autor cita também algumas desvantagens inerentes ao processo de nitreção a plasma:

- Efeito em cátodo oco: Ocorrem em peças com geometria complexa. Com o aumento da densidade do plasma em algumas partes que possuem pequenos furos ou concavidades levam ao acréscimo da concentração de elétrons secundários nesta parte. O aumento desta densidade afeta a temperatura da peça e a taxa de sputtering na superfície (processo de desarranjo e ejeção de átomos da superfície);
- Abertura de arcos catódicos: Se o confinamento do plasma em partes complexas da peça gerar uma densidade de corrente superior àquela existente na descarga anômala haverá a abertura de arcos. Isto significa uma queda de potencial ocasionando a extinção do plasma e, por outro lado, se o equipamento for de alta potência, ocorrerá uma fusão localizada podendo danificar as peças;
- Efeito da razão A/V : Superaquecimento em partes de peças com uma maior relação entre a área superficial e o volume (A/V);
- Penetração do plasma em pequenos furos: Para nitretar peças com pequenos furos existe um limite de diâmetro abaixo do qual o plasma não penetrará;
- Taxa de aquecimento: Se a temperatura da peça for baixa, a faixa de densidade de corrente para a descarga anômala é estreita e ocasionará um plasma com risco de abertura de arco. Se a temperatura da peça for alta a faixa de densidade de corrente para a descarga anômala será alargada e o plasma será estável sem o risco de abertura de arcos. No entanto em baixa pressão haverá uma baixa taxa de aquecimento tornando o processo inviável.

Para se aquecer a peça da melhor forma é necessário aumentar a pressão gradativamente até a peça atingir uma temperatura alta.

Costa e Silva e Mei (2010) citam que a camada nitretada pode ser dividida em duas regiões: camada branca e de difusão. O que afeta a dureza da região branca são os elementos de liga formadores de carbonetos (Al, Mo, Cr, Ti, V entre outros). A formação dessa região branca depende do tipo de gás utilizado. A fase ϵ composta de Fe_2-3N é aplicada quando se deseja resistência ao desgaste e à fadiga e a fase γ' (Fe_4) tem menor resistência ao desgaste e menor dureza, porém uma tenacidade melhor sendo aplicada com maior frequência em peças sujeitas a cargas severas ou choques. A região branca também acarreta redução no coeficiente de atrito e melhora a resistência à fadiga em ambientes corrosivos. A figura 9 mostra o efeito da região branca na fadiga de um aço.

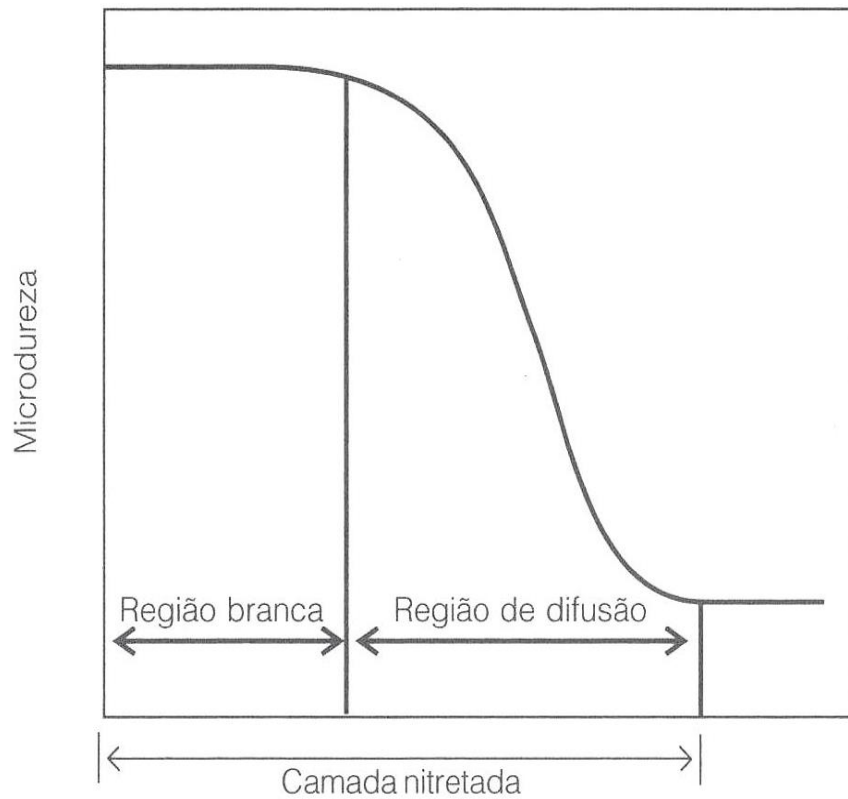
Figura 9 - Efeito da camada branca na fadiga de um aço nitretado 4140 mergulhado em solução aquosa com 3% NaCl



Fonte: Costa e Silva e Mei (2010)

Na figura 10 está especificado o perfil de dureza de uma camada nitretada dividida nas regiões branca e de difusão.

Figura 10 – Perfil de dureza da camada nitretada



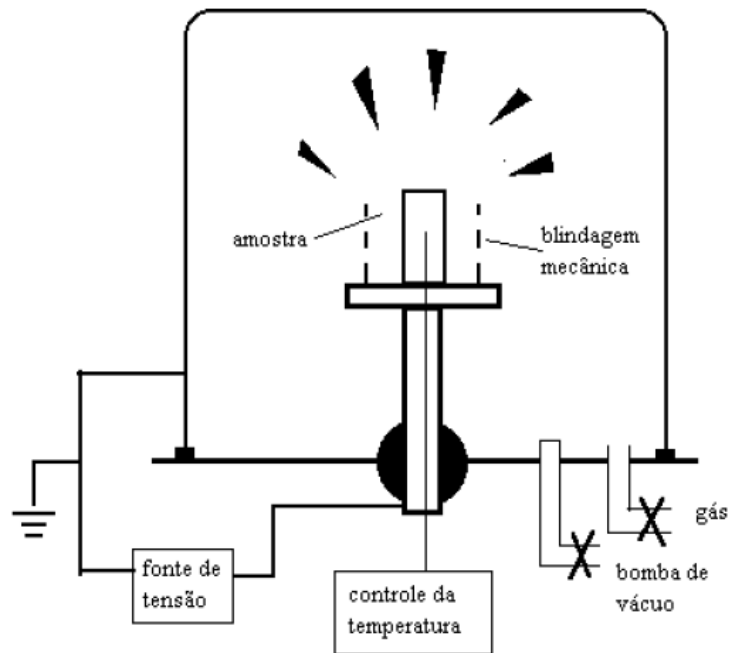
Fonte: Costa E Silva e Mei (2010)

A análise de um perfil de dureza de um aço baixo carbono microligado e nitretado a plasma mostra que na camada branca a dureza atinge valores elevados, sendo estes relacionados a fração volumétrica de γ' (Fe_4N) e ϵ (Fe_{2-3}N), sendo que neste caso a região branca é apenas 1% de toda a camada nitretada. A situação em que se encontrará a material nitretado é dependente dos elementos de liga. Em aços carbono a região de difusão apresentará dureza igual ao substrato (região da peça sem nitretação). Mas a região branca que se formará terá excelente resistência ao desgaste e poderá ser aplicada em peças sujeitas a cargas leves (COSTA E SILVA E MEI, 2010).

Na nitretação o aço é submetido a uma atmosfera rica em nitrogênio em um ambiente com vácuo através de uma diferença de potencial ionizando o gás e gerando um bombardeamento iônico ocasionando difusão de nitrogênio (Kempski, 2014).

Na figura 11 é apresentado o equipamento do sistema de nitretação a plasma, onde a fonte de potência possui uma saída com tensão máxima de 1500 V e uma corrente que consegue fornecer energia para aquecer a peça entre 300° e 600° C.

Figura 11: Equipamento básico de um sistema de nitretação a plasma



Fonte: Junior (2010)

Este equipamento é básico para a aplicação da nitretação a plasma. No entanto, projetos de novos equipamentos estão sendo estudados atualmente com a ideia da melhoria do processo e eliminação dos problemas existentes, melhorando também na parte operacional e econômica.

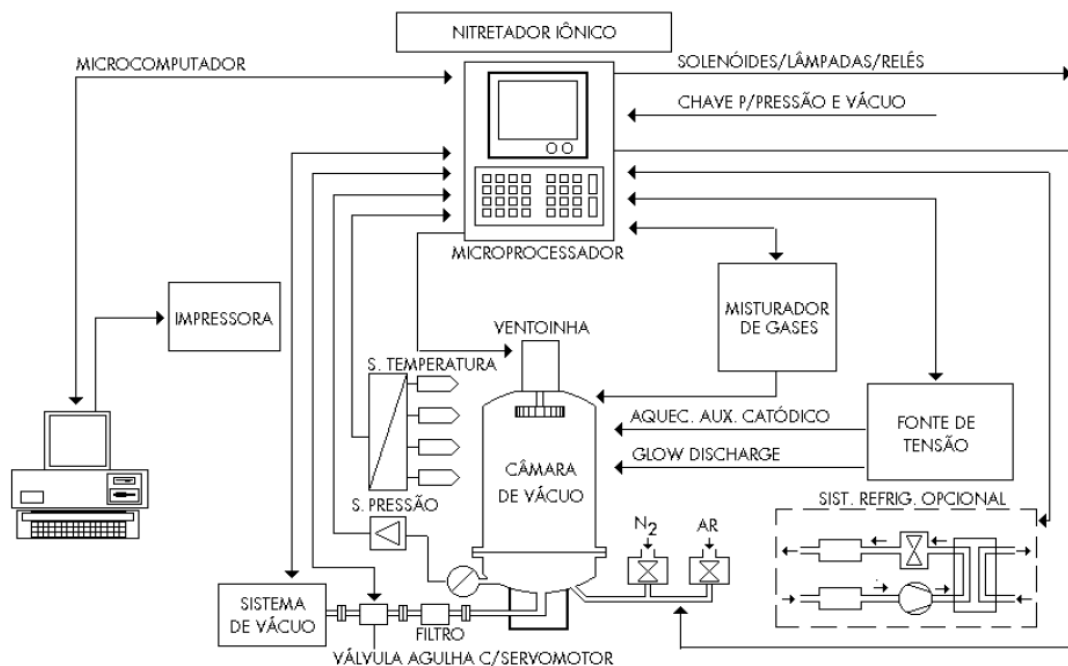
Junior (2010) cita os avanços com a introdução de novos equipamentos para o processo da nitretação a plasma:

- Geração de potência: com os equipamentos novos ocorre a detecção do problema do arco e sua interrupção instantânea;
- Automação: Com um controle automático do processo, os parâmetros são mais bem controlados. Com a automação melhora a aquisição dos dados necessários, a manutenção do equipamento e pode-se criar uma interface deste processo com outros, como, por exemplo, a movimentação de materiais, sistema de alarmes, abertura e fechamento de reatores. Com um software o operador acompanha em uma tela e controla os parâmetros do processo, que são eles: duração, pressão, temperatura, taxa de aquecimento e composição da mistura;
- Método de aquecimento: A taxa de aquecimento é um grande problema. A solução encontrada é a aplicação de um aquecimento auxiliar. Os tipos de sistemas podem ser utilizados para o aquecimento auxiliar: convecção,

radiação e aquecimento direto por plasma. A convecção é aplicada diretamente em um reator a uma pressão inferior a atmosférica em nitrogênio puro. A radiação é realizada em baixa pressão onde não exista convecção significativa. O aquecimento direto por plasma é aplicado em atmosfera de hidrogênio a uma pressão de 10 torr com o plasma apenas pulsado com frequência de 1000 e 10000 Hz sem outro aquecimento auxiliar.

A figura 12 cita um equipamento de nitretação a plasma totalmente automatizado.

Figura 12: Equipamento industrial automatizado para nitretação a plasma



Fonte: Junior (2010)

O processo da nitretação a plasma apresenta diversas propriedades além das encontradas nos processos convencionais de nitretação, sendo um processo versátil. Além das variáveis do processo, a composição química do material a ser nitretado tem forte influência sobre a camada formada. O carbono nos aços aumenta a espessura da camada de compostos e reduz a zona de difusão. A presença de elementos formadores de nitretos como Ti, Cr, V e Mo influenciam tanto na espessura da camada como nas propriedades dos aços nitretados. Indústrias de componentes aeronáuticos, mecânica de alta precisão, mecânica geral, extrusores, matrizes para injeção de plástico e de conformação a frio, equipamentos agrícolas, ferramentas, buchas e válvulas são algumas das aplicações da nitretação a plasma. (JUNIOR, 2010).

Junior (2010) cita tratamentos de aços e suas propriedades de camada para se ter um melhor entendimento das vantagens do processo:

- Ferro fundido e aços carbono: Se elementos de liga substitucionais não estão constituídos no material, apenas uma camada de compostos com uma fase ϵ -Fe₂-3(C)N e uma zona de difusão através de solução sólida de nitrogênio e carbono em Fe ou uma matriz perlítica com carbonitretos é apresentada. Esta camada é densa, compacta e cristalina, com excelente resistência ao desgaste e geralmente mais aplicada para cargas menores e com grande área de contato. Alguns exemplos desta aplicação são: pistões hidráulicos e confecção de virabrequins;
- Aços ferramenta: Uma camada de difusão com no máximo 300 μm e uma dureza aproximada de 1200 Hv é obtida. Aços AISI M2 e aços AISI H11 são exemplos da nitretação em aços ferramenta;
- Aços de baixa liga: Os aços de baixa liga são nitretados para formarem uma junção de uma camada de compostos e uma zona de difusão. A espessura da zona de difusão tem relação aos elementos de liga presentes. Estes aços nitretados são utilizados, principalmente, em pinos de direção e esferas de rolamentos;
- Aços inoxidáveis: Aços com um maior acúmulo de elementos formadores de nitretos como o Cr são analisados para se obter uma camada de difusão. Nestes aços geralmente se alcança uma dureza de 1200 Hv com uma espessura de camada de 80 μm ;
- Aços maraging: São nitretados por plasma para elevar a resistência a fadiga e ao desgaste e reduzir o coeficiente de atrito. São para aplicações como moldes para fundição de Al e Zn e matrizes para extrusão a frio.

A tabela 2 mostra valores de profundidade de camada, dureza e tipo de camada de compostos obtida na superfície.

Tabela 2 - Alguns dados da camada nitretada de diversos aços e ferros.

Material	Dureza do núcleo (Vickers)	Dureza da superfície (Vickers)	Espessura da camada de compostos (um)	Espessura da camada total (um)
Aço carbono				
1010	180	250-400	10-15	375-750
1038	200	250-400	10-15	375-750
Aços baixa liga				
3310	210	500-700	7,5-10	300-375
4140	300	550-650	5-7,5	375-625
Aço rápido				
M2	820	900-1200		25-100
Aço inoxidável				
304	180	950-1200		75-125
420	290	900-1100		125-250
Ferro fundido				
Cinzento	260	350-400	10-15	125
Nodular	260	400-600	10-15	125-250

Fonte: Adaptado de Junior (2010)

3.5 TESTES DE QUALIDADE

São muitos os testes que devem ser realizados tanto no substrato do material quanto na camada de nitretação aplicada na peça. Estes visam sempre verificar e melhorar a qualidade do material nitretado.

Estes testes são uma das etapas mais importantes dos processos de fabricação e, igualmente, para a proteção da superfície de peças (GOBBI, 2009).

Através destes ensaios consegue-se verificar a composição química do material, verificação de sua estrutura, determinação das propriedades mecânicas, controle dimensional e, principalmente, para a proteção da superfície, a sua qualidade.

Os principais testes aplicados na superfície de materiais para o controle de qualidade na aplicação da nitretação são: dureza, rugosidade, aderência, profundidade de camada e resistência à corrosão (SIRIN et al, 2008).

3.5.1 Ensaio de dureza aplicado a superfície de materiais nitretados

Chicot, D. et. al, (2006) expressa dureza como sendo a resistência a deformação plástica de um material através da aplicação de um indentador sobre ele. A indentação consiste em utilizar uma carga conhecida e padronizada sobre a superfície de um material e medir a deformação plástica residual.

- Ensaio muito utilizado nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas, na especificação e na comparação de materiais. Este teste pode ser dividido em três tipos, sendo eles: por penetração, por choque e por risco. Souza (1982) define assim os tipos:
- Dureza de penetração: a dureza por penetração denominada dureza Brinell é a mais aplicada atualmente. Consiste em comprimir uma esfera de aço sobre a superfície polida, plana e limpa através de uma carga durante um certo tempo. A compressão ocasionará uma impressão no metal, sendo medido o seu diâmetro. As esferas geralmente usadas têm diâmetros de 1, 2, 5 e 10 mm. A tabela 3 mostra as variações obtidas na dureza Brinell usando-se cargas e diâmetros diversos.

Tabela 3 - Alguns dados da camada nitretada de diversos aços e ferros

Material	Diâmetro esfera (mm)	Diâmetro impressão (mm)	Carga (Kgf)	Dureza Brinell
Aço A	10	6,3	3000	85
	7	4,4	1470	85
	5	3,13	750	87
	1,19	0,748	42,5	86
Aço B	10	4,75	3000	159
	7	3,33	1470	158
	5	2,35	750	163
	1,19	0,567	42,5	158
Aço C	10	3,48	3000	306
	7	2,43	1470	308
	5	1,75	750	302
	1,19	0,411	42,5	311

Fonte: Adaptado de Souza (1982)

- O segundo tipo de dureza por penetração é denominado dureza Rockwell: A dureza Rockwell (HR) tem seu resultado lido diretamente na máquina de ensaio, sendo mais rápido e com menores probabilidades de erros. Este teste é baseado na profundidade de penetração de uma ponta, menos a recuperação

elástica devido à retirada de uma carga maior e da profundidade que a aplicação da carga menor ocasiona. Seus penetradores são do tipo esférico ou cônico.

- Outra dureza por penetração é a dureza Vickers: O penetrador é uma pirâmide de diamante de base quadrada com um ângulo de 136° entre as faces opostas. Esta dureza independe da carga, pois o número de dureza obtido é o mesmo com qualquer carga aplicada.
- Dureza por choque: é um ensaio que produz impressão em um corpo de prova por meio de um penetrador que pressiona a superfície plana, sendo este choque produzido por um pêndulo ou por queda livre de um êmbolo. A impressão é pequena e consegue medir durezas de peças já usinadas ou acabadas.
- A dureza por risco praticamente não é aplicada em metais. Este ensaio utiliza vários tipos de minerais e outros materiais são utilizados para riscar o outro. A dureza por risco é definida como a carga em que um diamante no ângulo de 90° produziria um risco de 0,01mm de largura em um material qualquer.

Souza (1982) explica que o ensaio de dureza é o único que não causará destruição da peça e têm extrema importância na especificação do produto. Estes produtos são os seguintes:

- Engrenagens: o ensaio realizado é o ensaio Rockwell;
- Parafusos: Pode-se medir a dureza tanto na escala Brinell quanto Rockwell;
- Esferas e rolamentos: Utiliza-se a dureza Rockwell;
- Arruelas: Ensaio de dureza Rockwell;
- Porcas: Ensaio Brinell ou Rockwell;
- Rodas de avião: Ensaio de dureza Shore;
- Ferramentas: São controlas pelo ensaio de dureza Rockwell na maioria das vezes. E dureza Brinell na minoria dos casos;
- Peças soldadas: Dureza Vickers ou Rockwell;
- Controle de tratamento térmico: O ensaio de dureza é muito aplicado nas peças com tratamento térmico para saber se a peça foi tratada corretamente.

3.5.2 Corrosão de metais

Smith (2003) define corrosão como sendo a deterioração de um material ocasionada pelo ataque químico através do meio em que se encontra. A velocidade da corrosão depende da temperatura, da concentração dos reagentes e dos produtos, dos esforços mecânicos e da erosão. A maioria dos metais são corroídos por efeito da água e da atmosfera.

Callister (2002) explica que as variáveis referentes ao ambiente de corrosão podem ter influência significativa sobre as propriedades de corrosão dos materiais que estão em contato com o ambiente. As taxas da maior parte das reações químicas aumentam em razão do aumento da temperatura, sendo que isto também é válido para a maior parte dos casos de corrosão. O acréscimo na concentração do componente corrosivo acarreta, em vários casos, em aumento da taxa de corrosão.

A corrosão geralmente tem início na superfície do material. O grande problema deste processo é que se estima em termos econômicos que 5% da receita de um país industrializado são gastos com manutenção, prevenção ou substituição de produtos contaminados. A corrosão em metais ocasiona uma perda significativa de materiais por dissolução (corrosão) ou através da formação de incrustação ou película de material não-metálico (oxidação) (CALLISTER, 2002).

Gentil (1996) cita que a corrosão é frequente em diversas atividades como as indústrias petrolíferas, químicas, petroquímicas, naval, de construção civil, nos meios de transportes aéreo, ferroviário, automobilístico, entre outros. As perdas da corrosão são classificadas em diretas e indiretas, sendo elas:

Perdas diretas:

- Custos de substituição dos equipamentos ou peças que sofreram corrosão, incluindo-se mão de obra e energia;
- Custos e manutenção dos processos de proteção.

As perdas indiretas são mais complicadas de se calcular, porém segue algumas:

- Paralisações acidentais para substituição de um tubo corroído;
- Perda de eficiência;
- Perda de produto, como perdas de água, gás, óleo através de tubulações corroídas;
- Contaminação de produtos;
- Superdimensionamento nos projetos;

- Interrupção de comunicações;
- Questões de segurança como ocasionar fraturas em automóveis, aviões, trens, pontes que podem levar a perda de vidas;
- Preservação de monumentos históricos.

Na tabela 4 Gentil (1996) estima os custos da corrosão ocorridos no ano de 1993, comparados com o produto nacional bruto, incluindo apenas gastos com reposição de materiais.

Tabela 4: Custos estimados de corrosão

País	PNB	Corrosão (US\$ bilhões)
EUA	6300	220,5
Japão	4200	147,0
Alemanha	1750	61,25
França	1280	44,8
Inglaterra	1000	35,0
Itália	1000	35,0
Canadá	550	19,25
Espanha	550	19,25
Brasil	507,4	17,76
China	420	14,7

Fonte: Adaptado de Gentil (1996)

3.5.2.1 Tipos de Corrosão

As diversas maneiras de ocorrer a corrosão são classificadas de acordo com a forma em que ela se manifesta. Callister (2002) explica os diferentes tipos.

3.5.2.1.1 Ataque uniforme

É uma forma de corrosão eletroquímica que ocorre ao longo de uma superfície exposta ocasionando incrustação. Bons exemplos são a ferrugem no aço e no ferro, o escurecimento e a perda de brilho em pratarias. É a forma de corrosão que mais ocorre.

3.5.2.1.2 Corrosão em frestas

É consequência de diferenças na concentração dos íons ou dos gases dissolvidos na solução eletrolítica e entre duas regiões da mesma peça metálica. Um exemplo deste tipo ocorre em recessos e frestas ou em depósitos de produtos de corrosão ou sujeira onde a solução se torna estagnada e com a existência de exaustão localizada do oxigênio dissolvido.

A corrosão em frestas pode ser prevenida através de juntas soldadas no lugar de junções rebitadas ou aparafusadas, utilização sempre de juntas não absorventes e remoção de depósitos acumulados.

3.5.2.1.3 Corrosão galvânica

Ocorre quando dois metais ou ligas com composições diferentes são acopladas eletricamente e expostas a um eletrólito. O metal menos nobre irá se expor a corrosão e o outro metal será protegido. Por exemplo: tubulações de cobre e aço unidas ocorre a corrosão no aço na vizinhança da junção entre os tubos.

Existem maneiras para se reduzir significativamente as consequências da corrosão galvânica, sendo elas: selecionar metais próximos um do outro na série galvânica, isolar eletricamente metais diferentes e conectar um terceiro metal como forma de proteção catódica.

3.5.2.1.4 Corrosão por pites

Neste tipo de corrosão localizada se formam pequenos buracos ou pites no material. Um pite pode iniciar com um defeito na superfície como um arranhão ou uma pequena avaria. Aços inoxidáveis são bem suscetíveis a este tipo de corrosão, porém adicionando-se 2 % de molibdênio a resistência aumenta significativamente.

3.5.2.1.5 Corrosão intergranular

Ocorre geralmente no contorno de grãos para algumas ligas e em ambientes específicos. É a corrosão que, normalmente, acontece em aços inoxidáveis. Acredita-se que o tratamento térmico realizado no aço a uma temperatura entre 500 e 800 °C possibilita a formação de carbeto de cromo, sendo que tanto o cromo quanto o carbono se deslocam por

difusão para os contornos de grãos formando os precipitados, ocasionando, dessa forma, uma zona pobre em cromo ficando suscetível à corrosão.

Para se proteger o aço, podem-se adotar as seguintes formas: reduzir o teor de carbono no aço abaixo de 0,03%, realizar tratamento térmico em temperatura elevada e adicionar um elemento de liga de outro metal tal como o titânio ou nióbio, por apresentarem maior tendência em formas carbonetos do que o cromo.

3.5.2.1.6 Erosão-corrosão

Ocorre através de um ataque químico e da abrasão mecânica ou desgaste devido a passagem de um fluido. Normalmente essa corrosão ocasiona ranhuras de superfície e de ondulações com contornos.

Com o aumento da velocidade do fluido aumenta a taxa de corrosão. Este tipo de corrosão é mais encontrada em tubulações, rotores, palhetas de turbinas, válvulas e bombas.

Uma das principais formas de redução da erosão é a alteração do projeto eliminando efeitos de turbulência e da colisão do fluido. A aplicação de outros tipos de materiais resistentes a erosão também é um meio de reduzir seus efeitos.

3.5.2.1.7 Corrosão sob tensão

É a ação combinada de uma tensão de tração aplicada e de um ambiente corrosivo. Trincas são formadas e direcionadas perpendicularmente a tensão ocasionando uma falha. A corrosão sob tensão pode resultar, também, por uma tensão residual através de várias mudanças de temperaturas e de uma contração desigual. E os produtos de corrosão sólidos e gasosos podem, da mesma forma, provocar tensões internas.

Para se reduzir ou eliminar a corrosão sob tensão tem-se que diminuir a tensão aplicada através da redução da carga externa ou aumento da área de seção reta no sentido perpendicular a tensão ou usando um tratamento térmico para recozer e eliminar tensões térmicas residuais.

3.5.2.1.8 Fragilização por hidrogênio

Quando o hidrogênio penetra no interior de um material ocorre uma redução na ductilidade e no seu limite de resistência a tração ocorrendo o processo chamado de fragilização por hidrogênio.

Este processo é parecido com a corrosão sob tensão, pois um metal dúctil experimenta uma fratura frágil quando exposto a uma tensão de tração ou uma atmosfera corrosiva.

Existem alguns fatores que ocasionam a fragilização por hidrogênio. São eles: decapagem de aços pela ação do ácido sulfúrico, eletro galvanização e atmosferas com hidrogênio e temperaturas altas como na aplicação de soldas e tratamentos térmicos, compostos com enxofre e arsênio e sulfeto de hidrogênio.

Para a prevenção ou redução da fragilização por hidrogênio existem técnicas a serem utilizadas, sendo elas: redução do limite de resistência à tração do material frente ao tratamento térmico, retirada da fonte de hidrogênio e substituição do material por uma liga mais resistente à fragilização.

3.5.3 Controle e Prevenção da corrosão

Smith (2003) explica os diferentes métodos de controle e prevenção da corrosão:

- Seleção de materiais metálicos: Utilização de materiais resistentes à corrosão levando-se em conta a questão financeira e qualidade dos materiais;
- Materiais não-metálicos: Materiais cerâmicos apresentam boa resistência à corrosão e às altas temperaturas, porém são frágeis e têm pouca resistência aos esforços de tração. Devido a isto os materiais não metálicos são usados, na maioria das vezes, na forma de proteção, juntas de vedação e revestimentos;
- Revestimentos metálicos: Têm o objetivo principal de separar um metal do ambiente corrosivo. Muitos materiais são protegidos através de uma fina camada de revestimento e muitas vezes com a aplicação de várias camadas;
- Revestimentos inorgânicos: Em algumas aplicações é vantajoso utilizar um revestimento inorgânico como a cerâmica com o intuito de se obter acabamento durável;

- Revestimentos orgânicos: Vernizes, tintas lacas e outros materiais poliméricos orgânicos são aplicados para a proteção de metais em ambientes corrosivos;
- Concepção mecânica: No projeto deve-se levar em consideração propriedades mecânicas, elétricas e térmicas dos materiais;
- Alteração de ambiente: Os melhores métodos para se diminuir a corrosão por meio de alterações de ambientes incluem-se: redução da velocidade dos líquidos, redução da temperatura, remoção do oxigênio dos líquidos, redução das concentrações de ions e adição de inibidores de corrosão;
- Proteção catódica: é o fornecimento de elétrons ao metal que se pretende proteger. Estes são fornecidos da seguinte forma: fonte exterior de corrente contínua e formação de um par galvânico;
- Proteção anódica: É o processo que consiste em criar condições de passivação formando filmes protetores sobre as superfícies dos materiais. Sua vantagem consiste em poder utilizá-la em quaisquer condições de corrosão e sua desvantagem é a complexidade da instrumentação e o alto custo.

3.6 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS APLICADOS A NITRETAÇÃO A PLASMA

Segundo Krauss (1990) aços inoxidáveis austeníticos são ligas a base do sistema Fe-Cr-Ni com uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) obtida através da adição de elementos estabilizadores da fase austenítica, como o manganês, níquel e nitrogênio. Este tipo de material apresenta geralmente valores entre 16 a 25% de cromo, 1 a 2% de manganês, 8 a 20% de níquel e carbono inferior a 0,08%.

Estes aços são muito aplicados em diversas áreas pois têm ótima resistência a corrosão e propriedades como boa ductilidade, elevada tenacidade e conformabilidade, porém tem como desvantagens pouca resistência ao desgaste e baixa dureza (WASHKO e AGGEN, 1993).

Os aços inoxidáveis austeníticos podem ser utilizados nas indústrias químicas, alcooleira, petroquímica, prospecção de petróleo e em indústrias farmacêuticas e têxteis.

Apresentam baixa resistência ao desgaste e um tratamento na superfície do material é uma alternativa para melhorar esta característica (MANFRINATO, 2006).

Esta baixa resistência ao desgaste torna praticamente indispensável o seu endurecimento superficial através da engenharia de superfícies, sendo uma das maneiras de melhorar esta deficiência a aplicação da nitretação a plasma a baixa temperatura, tornando possível também o aumento da dureza do material.

Borges et al. (2000) cita que a nitretação a plasma atualmente tem sido muito aplicada em aços inoxidáveis austeníticos devido a remoção dos óxidos superficiais e ativação da superfície possibilitando camadas nitretadas mais profundas e uniformes. Também se obtém alta dureza superficial e aumento da resistência a corrosão.

WOLFART (2006) cita a formação de uma fase chamada “S” ou austenita expandida para auxiliar a manter a resistência à corrosão e que a temperatura de nitretação tem significativa influência sobre as características encontradas no tratamento dos materiais.

Em aços inoxidáveis a realização da nitretação a plasma em temperaturas acima de 450°C tende a melhorar em parte suas propriedades tribológicas (resistência ao desgaste, corrosão e coeficiente de atrito), pois reduz a resistência à corrosão. Por isso a temperatura tem grande influência no processo, sendo demonstrado que o melhor é realizar a nitretação em baixa temperatura ocasionando consequente melhora nas propriedades de corrosão, atrito, dureza e desgaste (ROLINSKI, 1987).

DAVIS (2001) explica claramente que a nitretação a plasma em aços inoxidáveis austeníticos possui maior resistência ao desgaste e a corrosão do que o material não nitretado.

3.7 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX APLICADOS A NITRETAÇÃO A PLASMA

Aços inoxidáveis duplex recebem este nome por possuírem ligas com duas fases, sendo aproximadamente 50% austenítica e 50% ferrítica.

Pohl (1995) descreve que estes aços têm como elementos principais o ferro, cromo e níquel e possuem um mínimo de 10,5% de cromo para elevar sua resistência a corrosão, possuindo diversas vantagens, tais como: boa resistência mecânica, resistência a corrosão e reduz o risco de sensitização.

Estes materiais têm sido amplamente utilizados em ambientes com presença de ácidos oxidantes como, por exemplo: indústria química, petrolífera, geração de energia, papel e petróleo.

Em algumas aplicações necessita-se de boas propriedades tribológicas. A dureza dos aços inoxidáveis duplex nestes casos é muito baixa, portanto, tanto para aumento de dureza, coeficiente de atrito e resistência a corrosão, um bom tratamento na superfície do material é de grande valia, sendo a nitretação a plasma uma boa alternativa.

3.8 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS APLICADOS A NITRETAÇÃO A PLASMA

Aços inoxidáveis martensíticos são comumente utilizados em aplicações biomédicas, em meios corrosivos, indústria petroquímica e indústria alimentícia devido a sua alta resistência a corrosão, dureza e resistência mecânica.

Estes aços também são bastante aplicados quando necessárias boas resistências mecânicas e condições moderadas de corrosão como peças em peças de válvulas, turbinas a vapor, eixos, peças da indústria química, de petróleo e material ferroviário (WOLFART, 2006).

Pinedo (2004) explica que uma das vantagens destes aços é a possibilidade de endurecimento por tratamento térmico de têmpera e revenimento e, dependendo de sua aplicação, o endurecimento superficial para melhorar sua resistência ao desgaste torna-se necessário. Com isto a nitretação a plasma surge como boa possibilidade.

Alguns estudos têm comprovado a eficiência da nitretação em aços martensíticos a baixas temperaturas para melhorar suas propriedades superficiais.

Dobrzanski et al (2005) demonstra que estudos comprovam que a nitretação a plasma em temperaturas baixas ocasionam a formação de uma fase nomeada de martensita ou austenita expandida, fornecendo aos materiais maior resistência a corrosão e ao desgaste.

4. METODOLOGIA

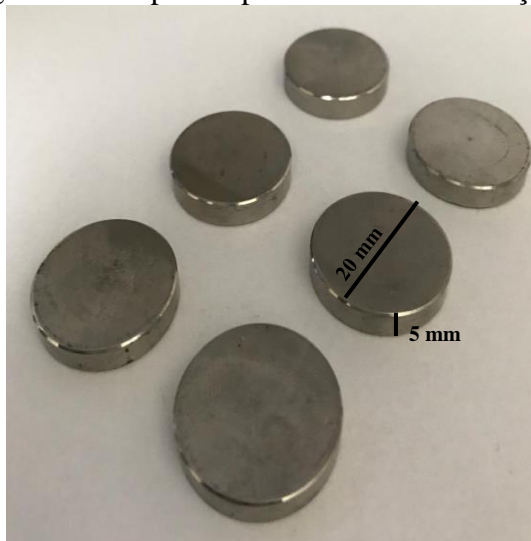
4.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os materiais utilizados são: Aço martensítico ASTM A 17 CA 15, aço austenítico ASTM A 351 CF 8 e o aço austenítico ASTM A 351 CF 8 M. Os corpos de prova foram fabricados em formato de cilindros, com espessura de 5 mm e diâmetro de 20 mm. Receberam tratamentos térmicos, foram lixados, polidos, e preparados para serem aplicados os ensaios antes do tratamento de nitretação a plasma e, após este processo, os outros ensaios foram realizados e analisados.

Previamente foram realizadas medições de rugosidade superficial, dureza e composição química dos materiais.

Na figura 13 está uma imagem dos corpos de prova.

Figura 13: Corpos de prova antes da nitretação a plasma



Fonte: Autor

A tabela 5 resume os tratamentos térmicos recebidos por cada tipo de material.

Tabela 5 - Tratamentos térmicos

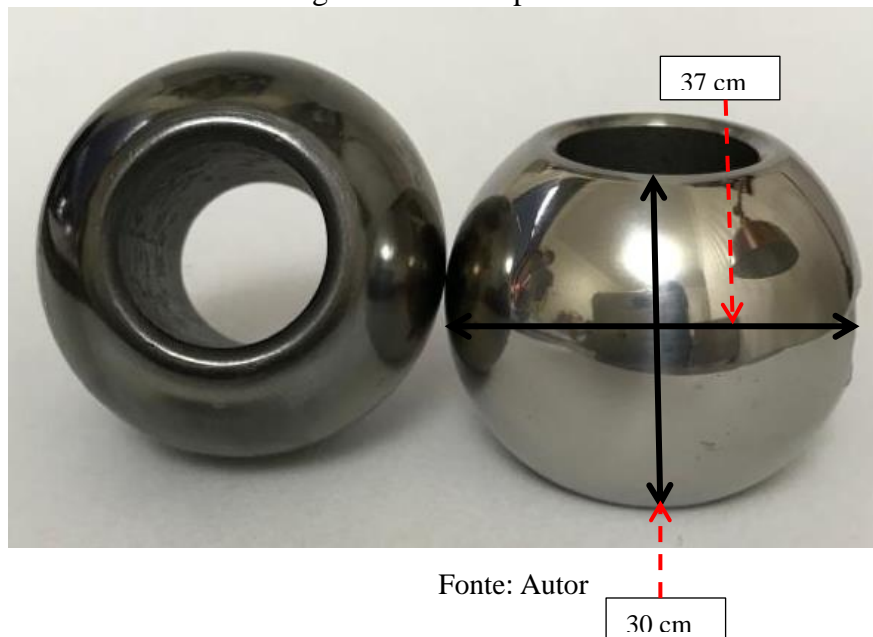
Material	Tratamento térmico
Aço inoxidável CA15	Normalização, têmpera e revenimento
Aço inoxidável CF8	Solubilização
Aço inoxidável CF8M	Solubilização

4.2 PREPARAÇÃO DOS PROTÓTIPOS

Foram fabricados protótipos das esferas, sendo eles, lixados, polidos e microfundidos para receberem a nitretação a plasma. As esferas têm as mesmas características e propriedades dos corpos de prova.

Na figura 14 estão as imagens das esferas dos materiais.

Figura 14: Protótipos em esferas



4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS

A composição química dos materiais estudados foram avaliadas pelo equipamento de espectrometria de emissão óptica Spectro Max. Os resultados foram comparados com os dados referentes às normas de cada material. São elas: para o aço inoxidável CA 15 é ASTM A17, para os aços inoxidáveis CF 8 e CF 8 M é ASTM A351.

As respectivas composições químicas dos principais elementos dos materiais estão exemplificadas na tabela 6 em percentuais.

Tabela 6 - Composição Química

MATERIAL	C	Cr	S	P	Mn	Mo	Ni	Si
CA 15	0,189	11,94	0,0045	0,0306	0,237	0,0126	0,196	0,415
CF 8	0,103	18,25	0,0092	0,0327	0,812	0,754	8,74	1,26
CF 8 M	0,06	18,08	0,0045	0,0341	0,903	2,01	9,14	1,05

4.4 ENSAIOS DE RUGOSIDADE NOS CORPOS DE PROVA

A rugosidade tem papel importante na qualidade superficial das peças, sendo muito útil na conformação de metais. Segundo Schaeffer (2004), no forjamento o atrito ocasiona formação de rebarba e o preenchimento total da cavidade do molde.

Nesta etapa foram medidas as rugosidades superficiais nos corpos de prova antes e após a nitretação a plasma. Os parâmetros utilizados foram Ra, Rq e Rz. A rugosidade Ra é a média, a rugosidade Rq é a quadrática média e a rugosidade Rz é a média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial.

Os valores de rugosidade foram obtidos através de um rugosímetro digital portátil pela média de três medições em cada uma das condições de superfície. Os parâmetros de medição seguem a norma ISO 1997, sendo o percurso total de medição de 8 mm e o comprimento de amostragem de 0,25 mm.

4.5 ENSAIO DE DUREZA NOS CORPOS DE PROVA

As medições de microdureza superficial foram realizadas através da variação de cargas na superfície. As cargas aplicadas foram de 25 g, 50 g e 100 g, com indentador vickers pelo tempo de 10 segundos.

4.6 NITRETAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A nitretação a plasma foi realizada em dois corpos de prova de cada tipo de material, sendo dois do aço inoxidável CA 15, dois do aço inoxidável CF8 e dois do aço inoxidável CF 8 M.

Os parâmetros de tratamento aplicados no processo foram: para o aço martensítico CA 15: sputtering de 30 minutos de argônio e hidrogênio e tratamento por 5 horas com uma mistura de 76 % de nitrogênio e 24 % de hidrogênio a uma temperatura de 500 °C. E para os aços austeníticos CF 8 e CF 8 M o sputtering também foi de 30 minutos de argônio e hidrogênio, tratamento com mistura de 76% de nitrogênio e 24% de hidrogênio a uma temperatura de 400°C. Para todos os tratamentos a pressão for de 3 mbar.

Na figura 15 há imagens do equipamento de nitretação aplicando o tratamento nas peças.

Figura 15 – Nitretação a plasma



Fonte: Autor

4.7 ENSAIOS DE CORROSÃO

Para o ensaio de corrosão foi utilizado o teste de polarização potenciodinâmica para se encontrar uma taxa e um potencial de corrosão.

O ensaio foi realizado em um potenciostato Autolab PGSTAT 302, com o software Nova 1.11, utilizando uma célula eletroquímica de três eletrodos. O eletrólito utilizado foi uma solução aquosa de NaCl 0,5 mol/L. O eletrodo de referência foi o Ag/AgCl e um contra eletrodo de platina. A amostra em que o ensaio foi aplicado tinha uma área de contato de 0,636 cm² exposta ao eletrólito, sendo este o eletrodo de trabalho. Os testes foram aplicados após uma hora da montagem das células para se ter uma hora de exposição ao eletrólito.

O potencial de circuito aberto de cada célula de trabalho foi medido pelo tempo de 60 segundos. A taxa de varredura de 0,001V/s variou entre os valores de -0,3 V até +0,3 V em relação ao OCP medido para cada célula, ocasionando uma corrente resultante no sistema por causa de cada potencial aplicado. Sendo o tempo de medida de OCP (potencial de circuito aberto) de 10 minutos.

Os ensaios foram realizados nos corpos de prova com e sem tratamento de nitretação com o intuito de obter-se valores comparativos.

4.8 ENSAIOS DE DESGASTE

O desgaste de metal a seco caracteriza-se por ser um processo de deformação com a consequente separação de partes do material deformado (SOUZA, 2011).

Pode também ser classificado como um dano causado a uma superfície sendo ocasionado pela perda de material causado pela interação mecânica entre superfícies, podendo vir a causar falhas em componentes (ASTM INTERNATIONAL, 2016 a).

As amostras com e sem tratamento de nitretação foram submetidas a ensaios de desgaste do tipo esfera-sobre-plano (*ball-on-flat*). Este processo é aplicado para mensurar o coeficiente de atrito e outras propriedades relacionadas ao desgaste de materiais. O ensaio foi realizado através de movimento linear recíproco com uma esfera de alumina com diâmetro de 4,76 mm. Os parâmetros deste ensaio estão descritos na tabela 7.

A esfera de alumina apresenta uma dureza de aproximadamente 2000HV. Em cada ensaio a esfera era rotacionada para que este não ocorresse no mesmo lugar. Foram aplicados quatro testes em cada peça para garantir uma melhor confiança nos resultados.

Tabela 7 - Parâmetros do ensaio de desgaste

Parâmetros	Dados
Força normal aplicada	3 N
Frequência	4 Hz
Tempo de desgaste	30 minutos
Tamanho da trilha	4 mm
Temperatura	22±5°C

As trilhas de desgaste foram analisadas através do interferômetro perfilômetro Bruker Contour Elite, analisando-se as áreas das seções transversais de cada trilha obtida com o uso do software ImajeJ para encontrar a perda de volume.

Para se obter a perda de volume aplicou-se a equação citada pela norma ASTM G133 (ASTM INTERNATIONAL, 2016 b):

$$V_f = A.L \quad (1)$$

Onde

V_f é o volume desgastado em mm³;

A é a área média da seção transversal da trilha de desgaste em mm² e

L é o comprimento da trilha de desgaste em mm.

Para determinar a taxa de desgaste utilizou-se a equação citada por Santos (2015) desenvolvida na teoria sobre desgaste de Archard e analisa o volume perdido com a força do ensaio e o comprimento total de deslizamento:

$$K = \frac{V_f}{F_N \times L} \quad (2)$$

Onde

K é a taxa de desgaste em mm³/Nm;

V_f é o volume desgastado em mm³;

F_N é a força normal utilizada no ensaio tribológico, em N e

L equivale ao comprimento total no ensaio tribológico em m.

4.9 PERFIL DE MICRODUREZA

Os perfis de microdureza foram realizados com o intuito de se obter a dureza da região próxima à superfície e revelar a profundidade da camada nitretada. As medidas foram aplicadas com cargas de 0,1 kg e com deslocamento de aproximadamente 20 μm em direção ao núcleo e 70 μm de espaçamento lateral.

Estas medições foram feitas de acordo com a norma NBR-6672 que indica que o centro de cada impressão e a borda da próxima impressão deve ser no mínimo 2,5 vezes o comprimento médio das duas diagonais, sendo realizadas de maneira em que não ocorressem interferências nos resultados.

4.10 ENSAIOS DE CICLAGEM

Esse ensaio consiste na submissão de uma válvula esfera a ciclos de abertura e fechamento, simulando de maneira acelerada sua utilização. A válvula avaliada é do tipo NPS 3/4 CL 800 e foram observados o desempenho e o comportamento da utilização de uma esfera com tratamento superficial de nitretação. Os ciclos de abertura e fechamento consistem em tomadas de pressão a montante (entrada) da válvula utilizando-se pressão máxima de trabalho (PMT) de 138,9 kgf/cm², sendo que a cada 30 segundos e 50 ciclos foram feitas paradas para medição de vazamentos. Os ensaios de ciclagem da válvula foram realizados a temperatura ambiente e extrema máxima conforme parâmetros normativos de operação, sendo de 150°C. Assim a válvula em questão foi submetida a diversas condições críticas para comprovar sua eficiência perante sua real situação de operação.

Para a realização deste ensaio a válvula foi montada com a esfera nitretada e, desta forma, consegue-se verificar seu desempenho em uma situação muito próxima em que o produto é submetido em serviço.

Os ensaios aplicados foram hidrostático e pneumático.

No ensaio hidrostático o líquido utilizado é água em temperatura ambiente e a válvula é limpada com ar comprimido e solvente. A pressão é aumentada gradativamente até atingir o máximo de 138,9 kgf/cm².

No ensaio pneumático é utilizado o ar como elemento para testar a vedação e a válvula é, também, limpada com ar comprimido e solvente e sua pressão é aumentada gradativamente até atingir o máximo de 138,9 kgf/cm².

Para este ensaio a norma NBR 15827 (2018) - Válvulas industriais para instalações de exploração, produção, refino e transporte de produtos de petróleo – Requisitos de projeto e ensaios de protótipo (número de ciclos), cita a quantidade máxima de ciclos a serem testados, ou seja, 2000 ciclos e o mínimo de 500 ciclos. No entanto todos os protótipos foram ciclados com o máximo de ciclos.

A tendência do número de acionamentos em 20 anos de serviço das válvulas é de no máximo 200, sendo que os protótipos de válvulas que atenderem a estes quesitos obtêm uma confiabilidade de 98% e uma vida útil de 20 anos.

Após a montagem da esfera nitretada na válvula, esta foi instalada na bancada de testes, padronizadas conforme a norma de válvulas em questão. O equipamento configurado para a realização do ensaio possui um manômetro modelo Standard digital 0-600 kgf/cm², marca Naka, para tomada de pressão, painel para controle de pressão modelo MVA 057 e um atuador pneumático modelo ATM 0075. A figura 16 mostra o equipamento montado para a realização do ensaio.

Figura 16: Equipamento utilizado para os ensaios cíclicos

Atuador Pneumático

Manômetro

Imagem 02: Sistema de ensaio



Fonte: Laboratório Técnico Micromazza



Jusante

Válvula

Pressão a montante

Fonte: Micromazza PMP

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ENSAIOS DE RUGOSIDADE NOS CORPOS DE PROVA

Os valores da rugosidade especificada para cada material estão exemplificados na tabela 8. Sendo estes medidos antes da aplicação do tratamento de nitretação. São valores normais de um aço sem tratamento.

Tabela 8 - Valores de rugosidade antes do tratamento

Material	Rugosidade
CA 15	0,33 μm /Ra
CF 8	0,43 μm /Ra
CF 8 M	0,45 μm /Ra

5.2 ENSAIOS DE RUGOSIDADE PÓS TRATAMENTO

A nitretação a plasma ocasiona alterações na superfície dos materiais. Portanto foram medidas, também, as rugosidades dos corpos de prova após o tratamento. Os valores estão especificados na tabela 9. Nota-se alterações superficiais em todos os materiais estudados. Isto porque a nitretação promove estas mudanças.

Tabela 9 - Valores de rugosidade pós tratamento

Material	Rugosidade
CA15	1 μm /Ra
CF8	0,22 μm /Ra
CF8M	0,49 μm /Ra

5.3 ENSAIOS DE MICRODUREZA PRÉ-TRATAMENTO

Como sendo um dos objetivos da nitretação a plasma ocorrerá, também, mudanças em relação à microdureza dos materiais. Todas as medições alcançaram níveis maiores ao anterior ao tratamento.

Para este ensaio foram aplicadas cargas de 25 gramas, 50 gramas e 100 gramas, sendo que a aplicação da carga foi de 10 segundos. Diversas medidas foram realizadas com o intuito de se obter dados mais precisos.

Na tabela 10, estão as médias desses dados.

Tabela 10 - Valores de microdureza pré-tratamento em vickers.

Material	100 g	50 g	25 g
CA 15	264,2	270,31	270,44
CF 8	336,38	336,23	364,11
CF 8M	291,68	333,25	347,50

5.4 ENSAIOS DE MICRODUREZA PÓS-TRATAMENTO

Nos ensaios de microdureza após a realização do tratamento de nitretação a plasma foram utilizados os mesmos critérios que se aplicação no material sem a nitretação.

Nesses valores observam-se aumentos significativos e estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11 - Valores de microdureza pós-tratamento em vickers

Material	100 g	50 g	25 g
CA15	610,65	693,48	712,14
CF8	336,86	384,52	395
CF8M	319,16	338,12	351

5.5 ENSAIOS DE CORROSÃO

Para os ensaios de corrosão os valores estão especificados na tabela 13 para os materiais sem tratamento e na tabela 12 para os materiais com o tratamento de nitretação a plasma.

Tabela 12 - Ensaio de corrosão dos materiais sem tratamento

Material	Potencial de Corrosão/Volts	Taxa de Corrosão/ano
CA 15	-86,66 ml/V	0,00095 mm/ano
CF 8	-79,33 ml/V	0,00084 mm/ano
CF 8M	-73,33 ml/V	0,00111 mm/ano

Tabela 13 - Ensaio de corrosão dos materiais com tratamento

Material	Potencial de Corrosão/Volts	Taxa de Corrosão/ano
CA 15	-478 ml/V	0,0779 mm/ano
CF 8	-282 ml/V	0,00837 mm/ano
CF 8M	-272 ml/V	0,00779 mm/ano

Nota-se que, ao contrário do que se esperava, os materiais com o tratamento de nitretação a plasma obtiveram aumento tanto na taxa como no potencial de corrosão. Esta aceleração da corrosão provavelmente é devido às modificações superficiais causadas pelo tratamento de nitretação a plasma através dos parâmetros aplicados, tais como temperatura, pressão e tempo de tratamento, ao processo, gerando uma camada porosa como a formação de multifases (Chiaverini, 2003). Para os aços inoxidáveis, os nitretos de cromo são indesejáveis, por promover um empobrecimento de cromo na matriz, tendo, dessa forma, redução na resistência a corrosão (LIN, 2012).

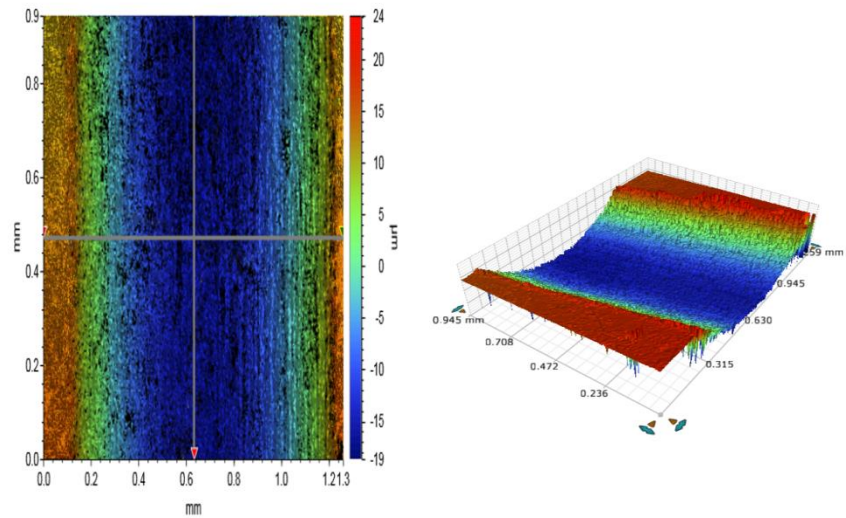
Portanto a temperatura na nitretação tem uma significativa influência sobre o comportamento da corrosão em aços inoxidáveis. Assim, a resistência a corrosão destes aços diminui com o aumento da temperatura no processo, devido a precipitação de nitretos de cromo (LEI et al, 1995)

Entretanto, para atestar isto, outros ensaios seriam necessários. Mas, nestes casos, os aumentos não são tão significativos e não afetaram o desempenho final dos protótipos montados nas válvulas.

5.6 ENSAIOS DE DESGASTE

A figura 17 mostra a perfilometria das trilhas de desgaste de diferentes corpos de prova.

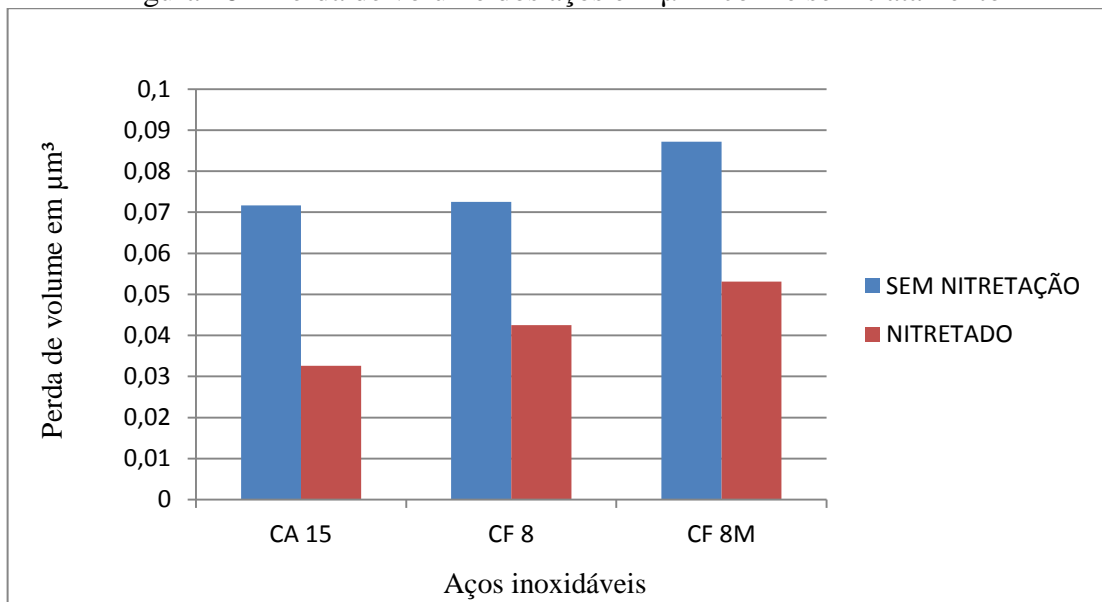
Figura 17 – Trilhas de desgaste



Fonte: Autor

Em todos os casos estudados houve melhora na taxa de desgaste dos materiais nitretados sendo, com isso, obtido um ganho na resistência ao desgaste.

A figura 18 exemplifica os dados da perda de volume de cada material. Os dados são apresentados em μm^3 .

Figura 18 – Perda de volume dos aços em μm^3 com e sem tratamento

Fonte: Autor

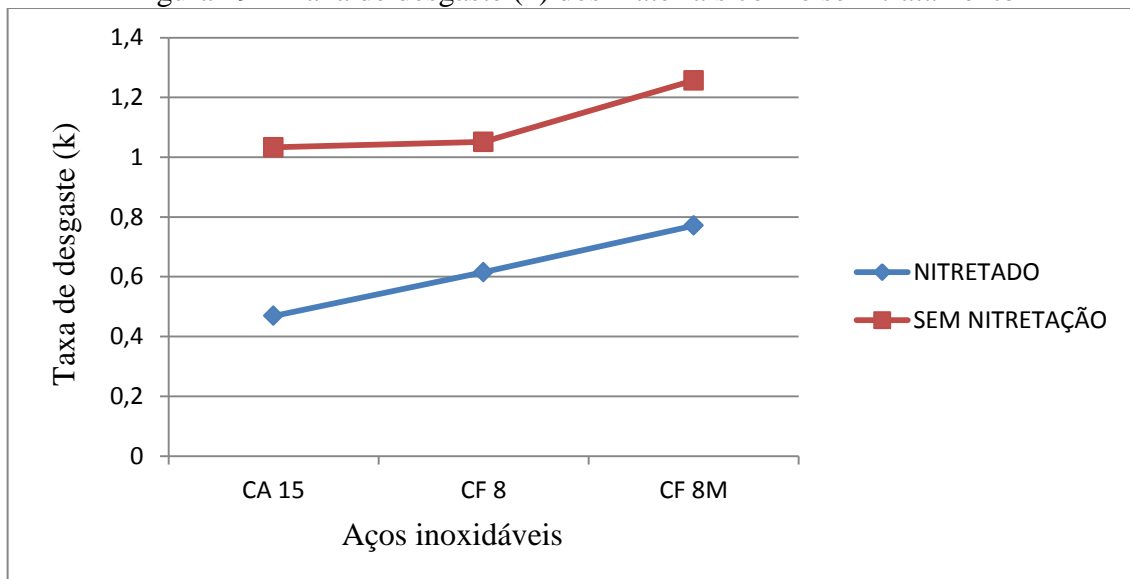
Nota-se que em todos os casos, os materiais com o tratamento de nitretação obtiveram uma perda de volume menor comparado aos materiais sem o tratamento. Assim, percebe-se alterações devido a nitretação a plasma, melhorando a resistência ao desgaste.

Na tabela 14 estão exemplificados os dados da taxa de desgaste (K) calculada, para cada material no sistema tribológico investigado e na figura 19 os mesmos valores expostos em gráfico.

Tabela 14 - Taxa de desgaste (k)

Material	Com nitretação (mm ³ /Nm)	Sem nitretação (mm ³ /Nm)	Taxa de redução (%)
CA 15	0,469	1,033	0,548
CF 8	0,615	1,051	0,414
CF 8M	0,771	1,257	0,386

Figura 19 – Taxa de desgaste (k) dos materiais com e sem tratamento



Fonte: Autor

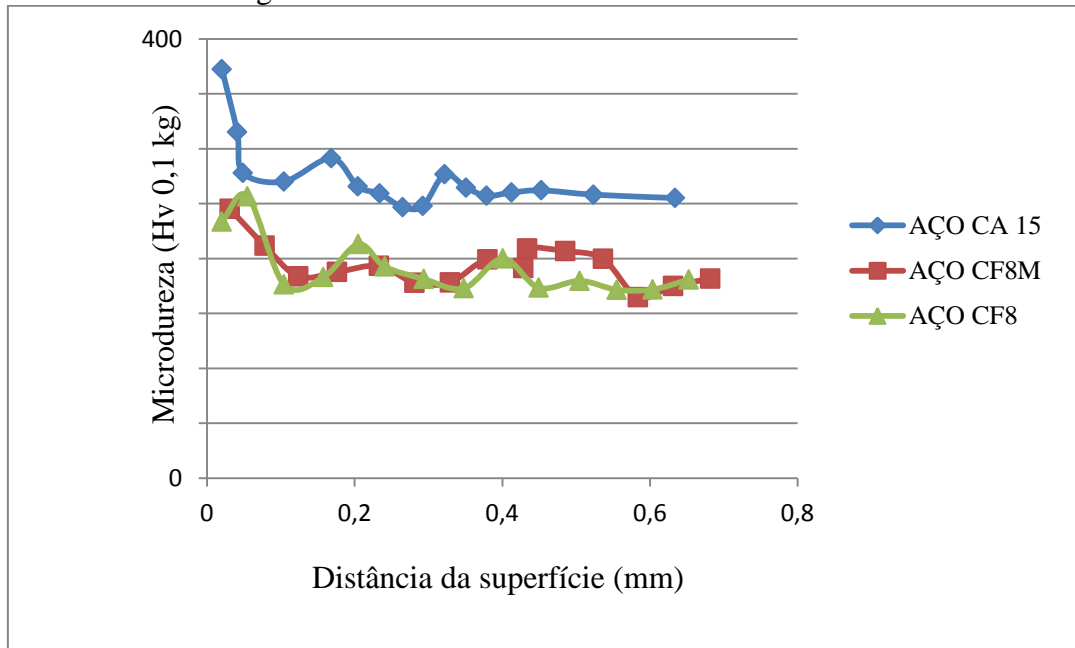
Verifica-se uma taxa de desgaste menor em todos os materiais nitretados. Com isso o tratamento se torna eficaz neste quesito.

5.7 PERFIS DE MICRODUREZA

Os perfis de microdureza superficial estão expostos na figura 20.

Os materiais estudados apresentam propriedades mecânicas adequadas para sua aplicação, sendo que a engenharia de superfícies está sendo aplicada com o intuito de otimizar sua durabilidade, como pode-se observar pelo perfil de microdureza que a região mais próxima da superfície apresenta um incremento de dureza em todos os materiais.

Figura 20 - Perfil de microdureza das amostra dos materiais



Fonte: Autor

5.8 ENSAIOS DE CICLAGEM DA VÁLVULA

A figura 21 mostra os protótipos das válvulas montadas com as esferas, sendo o protótipo 1 do material CF 8, o 2 do CF 8M e o 3 do CA 15 e a figura 22 as válvulas desmontadas.

Figura 21 - Protótipos de válvulas



Fonte: Autor

Figura 22 – Válvulas desmontadas



Fonte: Autor

Em todas as etapas do ensaio cíclico, sendo divididas a cada 50 ciclos, os materiais obtiveram êxito nos testes, não sendo constatados vazamentos, atingindo os 2000 ciclos propostos pela norma em questão.

As esferas, após os ensaios de ciclagem, mostraram marcas de uso normais inerentes aos testes, não sendo constatado nenhum desgaste expressivo que possa comprometer sua aplicação, conforme identificam as imagens abaixo.

Figura 23 - Esfera CF 8



Fonte: Autor

Figura 24 - Esfera CF 8M



Fonte: Autor

Figura 25 - Esfera CA 15



Fonte: Autor

5.9 COMPARAÇÕES ENTRE OS DIFERENTES MATERIAIS

Analisando-se todos os materiais estudados verifica-se ganhos em praticamente todos, exceto nos ensaios de corrosão. A tabela abaixo mostra os resultados comparando os 3

aços estudados. Nota-se que a corrosão obteve ganho, o que significa aumento da taxa e portanto é um ponto negativo. Na ciclagem todos os materiais atingem os valores citados pela norma ABNT NBR 15827/18. Na tabela 15 estão explícitos estes dados.

Tabela 15 – Comparação dos resultados dos aços estudados

Material	Microdureza (aumento)	Desgaste (redução)	Ciclagem	Corrosão (aumento)
CA 15	60%	55%	2000 ciclos	12%
CF 8	8%	42%	2000 ciclos	10%
CF 8M	5%	39%	2000 ciclos	39%

Exceto pelo ensaio de corrosão o material CA 15 obteve os melhores resultados nos testes realizados. Mas o acréscimo em corrosão revela-se um valor não muito significativo em se tratando de aços inoxidáveis.

Pelo ensaio de ciclagem, todos os aços inoxidáveis obtiveram os mesmos resultados. Dessa forma, foram realizadas novamente estes ensaios nos materiais. Nos mesmos parâmetros utilizados anteriormente. Na tabela 16 estão expostos estes dados.

Tabela 16 – Ciclos máximos suportados

Material	Quantidade de ciclos suportados até vazar
CA 15	5863
CF	5270
CF 8 M	5125

Os resultados da ciclagem indicam que o material CA 15 suportou a maior quantidade de ciclos e também foi o material que apresentou os mesmos resultados nos outros ensaios, o que pode indicar uma correlação com a ciclagem. Indicando que bons resultados em ensaios indicam um bom rendimento na prática.

6 CONCLUSÕES

Todos os materiais utilizados neste trabalho são, dentre outras aplicações, utilizados na fabricação de esferas para válvulas industriais. São eles: CA 15, CF 8 e CF 8M, que atingiram os objetivos propostos.

Nos ensaios de dureza, todos os corpos de prova elevaram seus valores significativamente devido a aplicação da nitretação a plasma. Os valores de desgaste medidos através do sistema de *ball on flat* reduziram em praticamente 50 % em todos os três materiais. Sendo este ensaio com grande relevância para a utilização das válvulas, seus dados atingiram os objetivos e corroboram a aplicação da nitretação como sendo de grande valia.

Em termos de corrosão das peças, foram encontrados valores de taxas de corrosão, observando-se que neste quesito houve acréscimo da taxa nos materiais nitretados. Muito provavelmente devido à temperatura de nitretação utilizada no tratamento que, segundo LEI et al.(1995), tem uma significativa influência sobre o comportamento à corrosão e sobre as características tribológicas dos aços inoxidáveis. Portanto, a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis diminui com o aumento da temperatura de processo, sendo esse comportamento atribuído à precipitação de nitretos de cromo. Dessa forma, talvez, temperaturas mais baixas reduzam esta taxa. Mas, estes dados não são tão significativos, pois mesmo assim suportariam a vida útil da esfera em serviço.

Os ensaios de ciclagem conduzidos nos materiais em primeiro momento suportaram todos os mesmos 2000 ciclos citados pela norma utilizada, obtendo resultados máximos de durabilidade, indicando um período de vida útil superior a 20 anos. Após, as esferas foram cicladas novamente, até o seu vazamento. O aço CA 15 obteve melhores resultados, seguido pelo CF 8 e o CF 8 M. Em praticamente todos os ensaios o CA 15 conseguiu melhores resultados, constatando, dessa maneira, como o melhor material dos três em estudo para a aplicação em válvulas do tipo esfera.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nitretar esferas com outros materiais.

Aplicar a nitretação variando diversas temperaturas para verificação da menor taxa de corrosão possível.

Nitretar esferas de outras dimensões.

Analisar a viabilidade econômica do processo de nitretação em esferas.

Comparar a nitretação com algum outro processo de tratamento de superfícies utilizado em aços inoxidáveis.

REFÊRENCIAS

ARCHARD, J. F.; HIRST, W. **The Wear of Metals under Unlubricated Conditions**. Proc. Roy. Soc. Lond, [s.1.], v. A236, p. 397- 410,1956.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6672**: materiais metálicos – dureza vickers. Rio de Janeiro: ABNT, 1981.

ASM HANDBOOK. **Surface Engineering**. v. 5. ASM: Handbook Committee, 1994.

ASKELAND, D. R; WRIGHT, W.J. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3º edição. São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15827**: válvulas industriais para instalações de exploração, produção, refino e transporte de produtos de petróleo - requisitos de projeto e ensaio de protótipo. Rio de Janeiro : ABNT, 2018.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G40-15: Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**. ASTM INTERNATIONAL, [s.1], v. G40-15, p. 1-9, 2016.a.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G133-05: Standard Test Method for Linearly Reciprocation Ball-on-flat Sliding Wear**, 2016.b.

BERGHAUS, B. **Procédé at appareil permettant d'obtenir des impulsions de courant de courte durée dans une installation de soudure branchée sur une source de courant continuo ou alfernatif**, FR814662, 1937.

BORGES C. F. M.; HENNECKE S.; PFENDER E. **Decreasing Chromiun Precipitation in AISI 304 Stainless Steel During the Plasma-nitriding Process, Surface and Coating Technology**, v. 1123, p. 112-121,2000.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC. 2002.

CARRERA-ESPINOZA, R., FIGUEROA LOPEZ, U., MARTÍNEZ-TRINDAD, J. , et al.

Tribological behavior of borided AISI 1018 steel under linear reciprocation sliding conditions. *Wear*, n. 362-363, pp.1-7, September, 2016.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento.** São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.

CHIAVERINI, V. **Tratamentos Térmicos das Ligas Metálicas.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Metais, 2003.

CHICOT, D., MERCIER, D., ROUDET, F., SILVA, K., STAIA, M. H., LESAJE J. **Comparison of instrumented Knoop and Vickers hardness measurement on various soft materials and hard ceramics.** *Journal of the Europe Ceramic Society*, 2006. Disponível em www.sciencedirect.com. Acesso em jan. 2019.

COSTA E SILVA, A., L., da e MEI, Paulo Roberto. 2010. **Aços e Ligas Especiais.** São Paulo: Blucher, 2010.

DAVIS, J., R. **Surface Engineering or Corrosion and Wear Resistance.** Ohio, USA. ASM International, 2001, 288p.

DOBRAZANSKI, L. A., BRYTAN, Z., GRANDE, M. A., ROSSO, M., PALLACICINI, E. J. **Properties of vacuum sintered duplex stainless.** Gliwince Poland, Institute of Engineering Materials and Biomaterials. Silesian University of Technology, Materials Processing Technology, 2008.

GENTIL, V. 1996. **Corrosão.** Rio de Janeiro: LTC. 1996.

GOBBI, V. J. **Influência da nitretação a plasma na resistência ao desgaste microabrasivo do aço ferramenta AISI D2.** 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência Mecânicas). Brasília,DF, 2009.

JUNIOR, C. A. **Nitretação a plasma - Fundamentos e Aplicações.** Rio de Janeiro: UFRN, 2010.

KEMPSKI, L. A.; SANTOS, G. R.; BOFF, U.; ROCHA, A. S.; ROSA, G. C. **Ensaio tribológicos para obtenção do coeficiente de atrito de um aço ferramenta com tratamentos superficiais de nitretação a plasma e revestimento TiCN.** São Paulo. 69º Congresso Anual da ABM – International, 2014.

KERMANI, M.B e HARROP, D. **Society of Petroleum Engineers. The Impact of Corrosion on the Oil and Gas Industry.** Bahrain, 1996.

KRAUSS, G., STEELS, **Heat Treatment and Processing Principles.** ASM International, Ohio, second edition, 1990.

KRAUS, G., STEELS: **Processing, Structure and Performance.** ASM – American Society for Metals, 2005. 559 p.

LEI, M.K.; ZHANG, Z.L. **Plasma source ion nitriding - a new low-temperature, low-pressure nitriding approach.** Journal of Vacuum Science and Technology. v. 13, p. 2986-2990, 1995.

LEPICKA, Magdalena; GRADZKA-DAHLE, Malgorzata. **Direct Current and Pulsed Direct Current Plasma Nitriding of Ferrous Materials a Critical Review.** Acta Mechanica et Automatica, [s.1.], v. 10, n. 2, p. 150-158, 2016. Disponível em: [<http://www.degruyter.com/view/j/ama.2016.10.issue-2/ama-2016-0024/ama2016-0024.xml>].

LIN, Y.H.; LAN, W.C., OU, K.L., LIU, C.M., PENG, P.W. **Hemocompatibility evaluation of plasma-nitrided austenitic stainless steels at low temperature.** Surface & Coatings Technology, v. 206, p. 4785–4790, 2012.

MATHIAS, A. C. 2008. **Válvulas: Industriais, segurança, controle: tipos, seleção, dimensionamento.** São Paulo : Artliber, 2008.

MACINTYRE, Joseph Archibald. 1997. **Equipamentos Industriais e de Processo.** Rio de Janeiro: LTC. 1997.

M.D. MANFRINATO. **Influência da nitretação a plasma no comportamento em fadiga dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e 316.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MNA. **Válvulas Esfera - Catálogo Técnico.** São Paulo : Lupatech, 2012. Catálogo Técnico. **PETROBRAS / ABIMAQ.** Encontro com fabricante de válvulas. São Paulo : Petrobras, 2013. Apresentação.

OLIVEIRA, C.K.N.; CASTELLETI, L.C.; NETO, A. L.; TOTTEN, G. E.; HECK, S.C.

Production and Characterization of Boride Layers on AISI D2 tool steel, Vacuum, v. 84, p. 792-796, 2010.

PINEDO, E. C. **Nitretação por plasma de aços inoxidáveis**. Revista Metalurgia e Materiais. 2004.

POHL, M. **The Ferrite/Austenite Ratio of Duplex Stainless Steel**. Z Met., v.86, 9. 97-102, 1995.

ROLINSKI, E. **Effect of Plasma Nitriding Temperature on Surface Properties of Austenitic Stainless Steel**. Surface Engineering, v. 3, n.1, p. 35-40, 1987.

Santos, G. R.Dos. **Caracterização e Avaliação do Comportamento Tribológico do Aço DIN X100CrMoV8-1-1 com Tratamento Duplex**. 2015. Tese (Dourado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SKONIESKY, Adão Felipe Oliveira. **Influência da Mistura Gasosa no Processo de Nitretação e Nitrocarbonetação a Plasma do Aço AISI 4140**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. Segunda Edição. Imprensa Livre, 2004.

SILVA, Osmar José Leite da. 2008. **Válvulas Industriais**. Rio de Janeiro: Qualitymark:Petrobras, 2008.

SMITH, William F. **Princípio de Ciência e Engenharia dos Materiais**. Portugal: McGRAW-HILL. 2003.

SINHA, A. K. **Boriding (Boronizing)**. ASM Handbook. Materials Park, Ohio: ASM International, 1991.v.4, p. 437- 447.

SIRIN, Sule Yildiz et al . **Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel**. Materials Characterization. Vol. 59, Edição 4, abr. 2008, p. 351-358.

SOUZA, C. J. **Desgaste Abrasivo em Compósitos Metal/Cerâmicos: Estudo Aplicado ao Desenvolvimento de Coroas de Perfuração.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. Ouro Preto. 2011.

SOUZA, S. A. de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos.** Fundamentos teóricos e práticos. São Paulo: Edgar Blucher. 1982.

TENÓRIOA, J. G.; VASCONCELOS, A.J.; MAGNO, I. B.; SOARES, E. F.; ROCHA, O. L. **Têmpera por Indução Eletromagnética Aplicada em Virabrequim de Motocicleta.** 2015.

WASHKO, S.D.; AGGEN, G. **Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys. Wrought Stainless Steels.** ASM International. ASM Handbook. Volume 01 – Ed. 10. 1993.

JUNIOR, W. M.; **Nitreção a Plasma do Aço ABNT 316 L em Baixas Temperaturas.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.