

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Estudo da caracterização metalográfica, da
corrosão e dureza dos aços inoxidáveis CF8M, AISI
316L e AISI 420 utilizados em válvulas de segurança
na indústria offshore brasileira**

Bruno Cesar Gomes
Rodrigo Arêas Ferreira

Prof(a). Orientadora: Cristiane Maria Basto Bacaltchuk

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2015**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Estudo da caracterização metalográfica, da corrosão
e dureza dos aços inoxidáveis CF8M, AISI 316L e
AISI 420 utilizados em válvulas de segurança na
indústria offshore brasileira**

Bruno Cesar Gomes
Rodrigo Arêas Ferreira

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof(a). Orientadora: Cristiane Maria Basto Bacaltchuk

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2015**

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

À minha família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao CEFET/RJ, seu corpo docente, direção e administração que deram a oportunidade de vislumbrar um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Aos professores responsáveis pelo laboratório de materiais, que concederam a oportunidade de usufruirmos dos equipamentos.

À orientadora Cristiane Maria Basto Bacaltchuk pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pela sua participação efetiva orientando e ajudando nas horas difíceis, correções e incentivos.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

A área de exploração de petróleo offshore no Brasil proporcionou, ao longo das últimas décadas, o aperfeiçoamento dos materiais utilizados na perfuração da costa marítima. Percebeu-se que o ambiente agressivo e inóspito, que é o mar, é fonte de deterioração e redução da vida útil de qualquer componente que esteja em contato com a água salina ou outros tipos de substâncias, acarretando assim, o surgimento de corrosão e outros tipos de problemas. Dentre os diversos tipos de equipamentos utilizados na perfuração marítima, a fim de obter petróleo, a válvula de segurança é um tipo essencial e vital para o bom funcionamento de todo o processo, pois além de proteger os bens materiais também protege vidas humanas. Dependendo da aplicação e do ambiente de trabalho, a válvula precisa ser construída com o objetivo de suportar a exigência da qual é incumbida. Assim, o material construtivo da válvula de segurança precisa atender não só a função para qual ela é projetada, mas também precisa resistir aos efeitos nocivos dos ambientes salinos. Desse modo, serão realizados testes de caracterização da microestrutura, de corrosão e da dureza nos aços inoxidáveis CF8M, 316L e 420 com o objetivo de obter resultados que sejam similares aos encontrados na literatura.

Palavras-chaves: Válvula de Segurança, Petróleo, Perfuração Marítima, Aço Inoxidável

ABSTRACT

The offshore oil exploration area in Brazil has provided, over the past decades, the improvement of materials used in marine shore drilling. It was noticed that the aggressive and inhospitable environment, which is the sea, has deteriorating and shortening sources of life components that is in contact with salt water or other substances, causing thus the appearing of corrosion and other types of defects. Among the various types of equipment used in the offshore drilling in order to obtain oil, the safety valve is an essential type and vital to the entire process, as well as protecting the material goods and also protects human lives. Depending on the application and the working environment, the valve must be built in order to support the requirement in which it is tasked. Thus, the safety valve building material must comply with not only the function for which it is designed, but also need to resist the harmful effects of saline environments. Thereby the microstructure, corrosion and hardness tests in stainless steel CF8M, 316L e 420 will be done in order to get results that are similar to those found in literature.

Keywords: Safety Valve, Oil, Offshore Drilling, Stainless Steel

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivo	2
1.4 Metodologia e Trabalho Realizado.....	2
1.5 Organização do Trabalho.....	2
2. Embasamento Teórico	4
2.1 O Petróleo	4
2.1.2 Composição.....	5
2.2 Origem do Petróleo.....	6
2.3 Perfuração Marítima	8
2.4 História da Perfuração no Brasil.....	8
2.5 Válvulas de Segurança e Alívio.....	9
2.5.1 Histórico.....	11
2.5.2 Normas utilizadas.....	12
2.5.2.1 O Código ASME	12
2.5.2.2 A Norma <i>American Petroleum Institute</i> (API)	15
2.5.2.3 A Norma Petrobrás.....	16
2.5.2.4 Outras Normas	16
2.5.3 Válvulas de Segurança.....	17
2.5.3.1 Conceitos.....	18
2.5.3.1.1 Diferencial de Alívio.....	18
2.5.3.1.2 Pressão de Operação.....	18
2.5.3.1.3 Pressão de Ajuste à Frio (ou CDTP).....	18
2.5.3.1.4 Contrapressão	18

2.5.3.1.5 Acumulação.....	19
2.5.3.1.6 PMTA.....	19
2.5.3.1.7 Pressão de Projeto	19
2.5.3.1.8 Sobrepressão.....	19
2.5.3.1.9 Capacidade de Vazão	19
2.5.3.1.10 Pressão de Alívio.....	20
2.5.3.2 Componentes.....	20
2.5.3.2.1 Corpo	20
2.5.3.2.2 Castelo	21
2.5.3.2.3 Capuz ou Tampa.....	22
2.5.3.2.4 Bocal.....	22
2.5.3.2.5 Disco.....	23
2.5.3.2.6 Mola.....	23
2.5.3.2.7 Haste	24
2.5.3.2.8 Guia	25
2.5.3.3 Funcionamento.....	25
2.6. Aços inoxidáveis.....	27
2.6.1 Aços inoxidáveis martensíticos.....	30
2.6.2 Aços inoxidáveis austeníticos	30
2.6.3 Aço inoxidável CF8M.....	31
2.6.4 Aço inoxidável AISI 316L.....	35
2.6.5 Aço inoxidável AISI 420	37
2.7 Corrosão.....	40
2.7.1 Tipos	40
2.7.2 Tipos de corrosão encontrados na indústria do petróleo.....	41
2.7.2.1 Meios corrosivos	41
2.7.2.2 Tipos de corrosão	42

2.7.3 Corrosão em aços inoxidáveis	44
2.8 Ensaios.....	45
2.8.1 Ensaio de Micrografia por microscópio óptico (MO)	46
2.8.1.1 Preparação de amostras para MO.....	46
2.8.2 Ensaio de Dureza Rockwell	51
2.8.2.1 Métodos de ensaio Rockwell	52
2.8.3 Ensaio de Corrosão – Névoa Salina.....	57
2.8.3.1 Ensaios de laboratório e de campo.....	57
2.8.3.2 Avaliação.....	59
2.8.3.3 Monitoramento da corrosão	61
2.8.3.4 Taxa de corrosão	61
3. Materiais e metodologia	65
3.1 Procedimento experimental	65
3.1.1 Ensaio de Micrografia por microscópio óptico (MO).....	65
3.1.2 Ensaio de Dureza Rockwell	66
3.1.3 Ensaio de Corrosão – Névoa Salina	68
4. Resultados e discussões.....	69
4.1 Resultados de micrografia por microscopia óptica.....	69
4.1.1 Aço inoxidável CF8M.....	69
4.1.2 Aço inoxidável AISI 316L.....	70
4.1.3 Aço inoxidável AISI 420	71
4.2 Resultados do ensaio de dureza Rockwell	73
4.2.1 Aço inoxidável CF8M.....	73
4.2.2 Aço inoxidável AISI 316L.....	74
4.2.3 Aço inoxidável AISI 420	74
4.3 Resultados do ensaio de corrosão por névoa salina	76
4.3.1 Aços inoxidáveis CF8M, AISI 316L e AISI 420.....	76

5. Conclusão	79
6. Propostas de trabalhos futuros.....	80
Referências Bibliográficas.....	81

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Transformação termoquímica da matéria orgânica e a geração do petróleo	7
FIGURA 2.2: Tipos de plataformas marítimas	8
FIGURA 2.3: Linha do tempo da perfuração do petróleo no Brasil	9
FIGURA 2.4: Exemplo de válvula de segurança	9
FIGURA 2.5: Exemplo de válvula de segurança instalada em uma caldeira.....	10
FIGURA 2.6: Exemplo de válvula de segurança instalada em uma tubulação.....	10
FIGURA 2.7: Válvula de segurança tipo contrapeso	11
FIGURA 2.8: Válvula de segurança de <i>Richardson</i>	12
FIGURA 2.9: Representação gráfica da evolução do número de explosões de caldeiras desde o final do século XIX até o final do século XX	13
FIGURA 2.10: Fábrica <i>Shoe Grover</i> antes da explosão da caldeira	13
FIGURA 2.11: Fábrica <i>Shoe Grover</i> depois da explosão da caldeira	14
FIGURA 2.12: Corpo e castelo da válvula de segurança	21
FIGURA 2.13: Tipo de capuz com alavanca e trava para teste hidrostático.....	22
FIGURA 2.14: Disco de vedação de uma PSV	23
FIGURA 2.15: Exemplo de uma mola helicoidal	23
FIGURA 2.16: Haste de uma válvula de segurança	24
FIGURA 2.17: Pressão do fluido atuando dentro do bocal e antes da abertura.....	25
FIGURA 2.18: (1) Início do curso de abertura da PSV; (2) Abertura completa da PSV.....	26
FIGURA 2.19: Representação gráfica do ciclo operacional de uma válvula de segurança para vasos de pressão	27
FIGURA 2.20: Gráfico ilustrando o percentual de cromo influenciando sobre a resistência à corrosão	28
FIGURA 2.21: Gráfico ilustrando o efeito do cromo na resistência à oxidação a altas temperaturas.....	28
FIGURA 2.22: Diagrama de Schaeffler	29

FIGURA 2.23: Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico CF8M com austenita (fase clara), com ferrita delta (na forma de rede) e com ferrita interdendrítica	32
FIGURA 2.24: Diagrama de fases ferro-cromo	33
FIGURA 2.25: Estrutura bruta de fusão de um aço inoxidável austenítico 316L com austenita (mais clara) e com ferrita (fase escura) sob ataque químico de uma solução de 60% (vol.) HNO ₃	36
FIGURA 2.26: Microestrutura de um aço inoxidável 420 recozido. Matriz ferrítica com carbonetos esferoidizados. Ataque químico com o reagente Vilella. Não foi informada a resolução obtida na micrografia	38
FIGURA 2.27: Estrutura típica de um aço inoxidável 420 temperado. Matriz martensítica com carbonetos não dissolvidos. Ataque químico com Vilella. Não foi informada a resolução obtida na micrografia.....	39
FIGURA 2.28: Corrosão por pite em tubo de aço inoxidável AISI 304	43
FIGURA 2.29: Corrosão uniforme em chapa de aço carbono	43
FIGURA 2.30: Corrosão alveolar generalizada em tubo de aço carbono	44
FIGURA 2.31: Corrosão intercrystalina ou intergranular.....	45
FIGURA 2.32: Representação esquemática do encruamento produzido pelo lixamento, abaixo da superfície do material.....	49
FIGURA 2.33: Aparência de superfícies após polimentos	49
FIGURA 2.34: Superfície mal polida: (A) cometas; (B) manchas marrons; (C) halos em torno de pequenos orifícios	50
FIGURA 2.35: Representação produzida por um penetrador cônico de diamante	52
FIGURA 2.36: Escala de dureza Rockwell normal e aplicações	53
FIGURA 2.37: Escala de dureza Rockwell normal e aplicações	54
FIGURA 2.38: Ensaio com penetrador cônico de diamante – escalas A, C e D	54
FIGURA 2.39: Ensaio com penetrador cônico de diamante – escalas B, F e G	55
FIGURA 2.40: Ensaio Rockwell superficial – escalas N	55
FIGURA 2.41: Ensaio Rockwell superficial – escalas T	56
FIGURA 3.1: (A) amostra de aço CF8M; (B) amostra de aço 420; (C) amostra de aço 316L; (D) Lixadora Arotec Aropol 2V; (E) Politriz Arotec Aropol 2V	66

FIGURA 3.2: Máquina de ensaio de dureza Instron Wolpert modelo Dia Testor 7551 com mostrador digital.....	67
FIGURA 3.3: Amostras presas e penduras dentro da máquina <i>Bass Equipamentos Ltda</i>	67
FIGURA 4.1: Estrutura típica de um aço inoxidável austenítico CF8M com um aumento de 200x. Reagente: Água Régia.	69
FIGURA 4.2: Estrutura típica de um aço inoxidável austenítico CF8M com um aumento de 500x. Reagente: Água Régia.	70
FIGURA 4.3: Estrutura típica de um aço inoxidável austenítico 316L laminado revelando grão de austenita e <i>maclas</i> . Reagente: Água Régia. A foto foi tirada com um aumento de 1000x.	71
FIGURA 4.4: Amostra de aço inoxidável 420. Microestrutura não revelada com pontos de corrosão (pite). Reagente: Água Régia. Aumento de 1000x	72
FIGURA 4.5: Amostra de aço inoxidável 420. Matriz ferrítica com pontos de corrosão (pite). Reagente: Vilella. Aumento de 1000x.....	72
FIGURA 4.6: Castelo da válvula de segurança.....	73
FIGURA 4.7: Capuz da válvula de segurança.....	74
FIGURA 4.8: Peça de uma haste da válvula de segurança	75
FIGURA 4.9: Amostras após o ensaio de corrosão.....	76
FIGURA 4.10: Aço inoxidável CF8M - (A) amostra em CF8M antes do ensaio; (B) amostra após o ensaio sem apresentar pontos de corrosão; (C) amostra após o ensaio apresentando início de corrosão.....	77
FIGURA 4.11: Aço inoxidável 316L - (A) amostra antes do ensaio; (B) amostra após o ensaio sem apresentar pontos de corrosão; (C) amostra após o ensaio sem apresentar pontos de corrosão	77
FIGURA 4.12: Aço inoxidável 420 - (A) amostra antes do ensaio; (B) amostra após o ensaio apresentando corrosão em toda a face plana; (C) amostra após o ensaio apresentando corrosão em todo o seu corpo cilíndrico	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: Composição química elementar do óleo cru (% em peso)	4
TABELA 2.2: Frações típicas do petróleo	5
TABELA 2.3: Composição química de um petróleo típico	5
TABELA 2.4: Componentes do gás natural (% em mol).....	6
TABELA 2.5: Composição química do aço inoxidável CF8M (% em peso)	31
TABELA 2.6: Composição química do aço inoxidável 316 (% em peso).....	31
TABELA 2.7: Dureza dos aços inoxidáveis CF8M e 316, em condições ambientes	34
TABELA 2.8: Composição química dos aços inoxidáveis 316L (% em peso).....	35
TABELA 2.9: Dureza do aço inoxidável 316L.....	37
TABELA 2.10: Composição química dos aços inoxidáveis 420	37
TABELA 2.11: Dureza do aço inoxidável AISI 420, no estado recozido	40
TABELA 2.12: Rugosidade média após polimento manual e automático de um aço inoxidável	48
TABELA 2.13: Tipos de métodos de dureza com suas respectivas cargas	53
TABELA 2.14: Classificação da corrosividade conforme a norma NACE RP 0775	63
TABELA 4.1: Média das medições de dureza Rockwell A para o aço inoxidável CF8M	73
TABELA 4.2: Média das medições de dureza Rockwell A para o aço inoxidável 316L	74
TABELA 4.3: Média das medições de dureza Rockwell A para o aço inoxidável 420.....	75
TABELA 4.4: Conversão dos resultados de dureza Rockwell A em Rockwell B.....	75
TABELA 4.5: Comparativo dos resultados de dureza nos ensaios com os valores de tabelados	76
TABELA 4.6: Comparativo dos resultados de pesagem, em gramas, das amostras em CF8M, AISI 316L e AISI 420	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI – ALLOY CASTING INSTITUTE

AISI – AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO

API - AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE

ASME – AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS

BA - BAHIA

BOP - BLOW-OUT PREVENTER

CCC – CÚBICA DE CORPO CENTRADO

CDTP – COLD DIFFERENTIAL TEST PRESSURE

CEL. – CORONEL

CFC – CÚBICA DE FACE CENTRADA

CNP - CONSELHO NACIONAL DO PETRÓLEO

CNPE - CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL

D.O.U. – DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO

EUA – ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA

GNV - GÁS NATURAL VEICULAR

HC – HEXAGONAL CENTRADO

IPY – POLEGADA DE PENETRAÇÃO POR ANO

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION

MDD – MILIGRAMAS POR DECÍMETRO QUADRADO DE ÁREA EXPOSTA POR DIA

MMPY – MILÍMETRO DE PENETRAÇÃO POR ANO

NACE – NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS

NB – NATIONAL BOARD

NBIC – NATIONAL BOARD INSPECTION CODE

NBBI – NATIONAL BOARD OF BOILER AND PRESSURE VESSEL INSPECTORS

PETROBRÁS - PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.

PMTA – PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL

PSV – PRESSURE SAFETY VALVE

RJ - RIO DE JANEIRO

RP – RECOMMENDED PRACTICE

SGMB - SERVIÇO GEOLÓGICO E MINERALÓGICO BRASILEIRO

STD – STANDART

TH – TESTE HIDROSTÁTICO

CAPÍTULO 1

Introdução

A evolução da tecnologia aplicada aos materiais nas áreas de perfuração de petróleo offshore no Brasil tornou o país uma potência na perfuração em alto mar. O uso dos materiais em aço inoxidável foi essencial para que as reservas petrolíferas com profundidades cada vez maiores fossem descobertas, assim como a camada pré-sal.

Serão mostrados os motivos da necessidade do uso dos aços inoxidáveis em aplicações que envolvem alto poder de corrosão e trabalho a altas temperaturas e pressões. Além disso, serão salientados os problemas mais comuns enfrentados na perfuração pelas indústrias de petróleo, em especial pela Petrobrás. Utilizaremos, neste estudo, um componente essencial na produção de petróleo: as válvulas de segurança. Ensaios de Microestrutura e de dureza Rockwell serão realizados a fim de mostrar que os aços inoxidáveis 316L, 420 e CF8M atendem ao serviço de perfuração de poços de petróleo, principalmente da camada Pré-Sal.

1.1 Motivação

A descoberta da camada Pré-Sal incentivou diversas pesquisas com o intuito de aperfeiçoar os materiais utilizados nas plataformas offshore. O grande motivo para esta iniciativa é que o Pré-Sal localiza-se numa profundidade entre cinco e sete mil metros e nesta profundidade a pressão é muito maior e há considerável presença de agentes corrosivos que danificam toda a estrutura metálica utilizada. De acordo com as pesquisas, nenhum outro poço no mundo possui petróleo a uma profundidade tão alta como é encontrado na camada pré-sal. (REVISTA VIRTUAL DE QUÍMICA, 2013, p. 7).

A expectativa gerada com a descoberta desta importante camada de petróleo e gás é tornar o Brasil um país autossuficiente e exportador de petróleo. Os benefícios são imensuráveis e incalculáveis. Existirá também ganho no campo da ciência e tecnologia, o que permitirá um grande avanço do Brasil na perfuração no mar.

1.2 Justificativa

A sociedade está cada vez mais aumentando o consumo de artigos provenientes do petróleo. Gasolina, plásticos, GNV, borracha, entre outros. Simultaneamente, a Petrobrás é a empresa responsável pela maior parte dos campos de petróleo do território brasileiro. Unindo estes dois fatores, pode-se perceber que a companhia petrolífera precisa almejar algo a mais para suprir tamanha exigência, demanda e responsabilidade de fornecer todos os bens materiais que a população brasileira deseja.

A grande descoberta da camada Pré-Sal possibilitará que a Petrobrás alcance seus objetivos no que concernem as inovações tecnológicas e as áreas de exploração, produção, refino e distribuição de petróleo no território brasileiro.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo dos aços inoxidáveis CF8M, 316L e 420 e suas caracterizações metalográficas, de dureza e de corrosão.

1.4 Metodologia e Trabalho Realizado

Este estudo será realizado a partir de uma profunda pesquisa teórica sobre a história da perfuração no Brasil, dos aços inoxidáveis CF8M, 316L e 420 e dos tipos de corrosões existentes com as perfurações no mar. Serão feitos testes de caracterização da microestrutura, da corrosão com névoa salina e da dureza Rockwell com o uso de alguns componentes da válvula de segurança para determinar se os materiais de estudo corresponderão o que diz a literatura.

1.5 Organização do Trabalho

O estudo deste trabalho está dividido de modo a facilitar o entendimento sobre o início das operações de perfuração no solo brasileiro e sobre os problemas mais comuns que os aços inoxidáveis precisam resistir.

- O capítulo 1 trata das motivações e justificativas para a escolha do tema.
- O capítulo 2 trará uma breve explicação conceitual sobre a história do petróleo no Brasil, sobre as válvulas de segurança, sobre os aços inoxidáveis e sobre os tipos de corrosões existentes na área do petróleo.

- No capítulo 3 serão abordados os materiais escolhidos para a realização dos ensaios de caracterização metalográfica por microscópio óptico, da corrosão e da dureza Rockwell.
- No capítulo 4 serão discutidos os resultados obtidos pelos ensaios feitos nos corpos de prova de algumas partes da válvula de segurança.
- O capítulo 5 trará a conclusão final de todo o tema abordado.
- O capítulo 6 abordará propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. Embasamento Teórico

Neste capítulo serão abordados todos os conceitos pertinentes à área offshore de petróleo. A compreensão dos mesmos será de grande importância para o bom entendimento e assimilação do tema proposto.

2.1 O Petróleo

O petróleo é uma palavra de origem do latim *petra* (pedra) e *oleum* (óleo). Ele é constituído por uma mistura de diversos compostos químicos, mas a maior parte desta mistura contém carbono e hidrogênio, principais constituintes orgânicos chamados de *Hidrocarbonetos*. A tabela 2.1 mostra o percentual de cada elemento químico encontrado no petróleo.

Tabela 2.1: Composição química elementar do óleo cru (% em peso) (THOMAS, 2004, p. 5).

Hidrogênio	11-14%
Carbono	83-87%
Enxofre	0,06-8%
Nitrogênio	0,11-1,7%
Oxigênio	0,1-2%
Metais	até 0,3%

Os outros constituintes aparecem sob a forma de compostos orgânicos que contêm outros elementos, sendo os mais comuns o nitrogênio, o enxofre e o oxigênio.

Sob condições normais de temperatura e pressão, para o caso da mistura encontrada no petróleo conter uma maior porcentagem de moléculas pequenas de hidrocarbonetos, o seu estado físico será o gasoso. Porém, se for uma porcentagem maior de moléculas grandes, o seu estado físico será o líquido. Dependendo do reservatório, o petróleo pode ser totalmente negro, viscoso e denso ou castanho claro com baixa viscosidade e densidade. Ele ainda pode liberar uma boa quantidade de gás ou somente gás.

O petróleo contém centenas de compostos químicos e separá-los em componentes puros ou misturas de composição conhecida é praticamente impossível. Normalmente, a

separação é feita em frações de acordo com a faixa de ebulição dos compostos. A Tabela 2.2 mostra as frações típicas encontradas no petróleo.

Tabela 2.2: Frações típicas do petróleo (THOMAS, 2004, p. 5).

Fração	Temperatura de ebulição (°C)	Composição Aproximada	Usos
Gás residual	-	C ₁ - C ₂	gás combustível.
Gás liquefeito de petróleo - GLP	Até 40	C ₃ - C ₄	gás combustível engarrafado, uso doméstico e industrial.
Gasolina	40 - 175	C ₅ - C ₁₀	combustível de automóveis, solvente.
Querosene	175 - 235	C ₁₁ - C ₁₂	iluminação, combustível de aviões a jato.
Gasóleo leve	235 - 305	C ₁₃ - C ₁₇	diesel, fornos.
Gasóleo pesado	305 - 400	C ₁₈ - C ₂₅	combustível, matéria-prima para lubrificantes.
Lubrificantes	400 - 510	C ₂₆ - C ₃₈	óleos lubrificantes.
Resíduos	Acima de 510	C ₃₈₊	asfalto, piche, impermeabilizantes.

2.1.2 Composição

Os principais constituintes normalmente encontrados no petróleo são os hidrocarbonetos saturados, os hidrocarbonetos aromáticos, as resinas e os asfaltenos. Os primeiros constituem o maior grupo. A tabela 2.3 mostra a composição química dos diferentes compostos que compõe o petróleo (THOMAS, 2004, p. 11).

Tabela 2.3: Composição química de um petróleo típico (THOMAS, 2004, p. 11).

Tipos de hidrocarbonetos	Composição química
Parafinas normais	14%
Parafinas ramificadas	16%
Parafinas cíclicas	30%
Aromáticos	30%
Resinas e asfaltenos	10%

Também é possível encontrar gás natural na forma livre ou associado ao óleo em reservatórios naturais. O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos que contêm pequenas quantidades de diluentes e contaminantes.

A tabela 2.4 abaixo mostra as faixas de composição dos gases extraídos a partir de reservatórios de gás natural e a partir de reservatórios de óleo.

Tabela 2.4: Componentes do gás natural (% em mol) (THOMAS, 2004, p. 11).

	Campos de Gás Natural	Gás Natural liberado do óleo
Nitrogênio	traços - 15%	traços - 10%
Dióxido de carbono	traços - 5%	traços - 4%
Gás Sulfídrico	traços - 3%	traços - 6%
Hélio	traços - 5%	não
Metano	70 - 98%	45 - 92%
Etano	1 - 10%	4 - 21%
Propano	traços - 5%	1 - 15%
Butanos	traços - 2%	0,5 - 2%
Pentanos	traços - 1%	traços - 3%
Hexanos	traços - 0,5%	traços 2%
Heptanos +	traços - 0,5%	traços - 1,5%

2.2 Origem do Petróleo

O petróleo tem origem a partir da matéria orgânica depositada junto com sedimentos. A matéria orgânica marinha é basicamente originada de micro-organismos e algas que formam o fitoplâncton e não pode sofrer processos de oxidação, pois para a formação dessa matéria orgânica é necessário um ambiente onde os sedimentos sejam impermeáveis, a fim de evitar que a ação da água atrapalhe sua formação.

A interação da matéria orgânica, dos sedimentos e de condições termoquímicas apropriadas é fundamental para o início da cadeia de processos que leva à formação do Petróleo. O tipo de petróleo formado é determinado pela constituição da matéria orgânica original e pela intensidade do processo térmico. Se a matéria orgânica proveniente dos fitoplânctons for submetida a condições térmicas adequadas, pode ser gerado petróleo líquido. Caso ela seja proveniente de vegetal lenhosa, pode ser gerado hidrocarboneto gasoso (THOMAS, 2004, p. 15).

Considerando um ambiente apropriado, após a incorporação da matéria orgânica ao sedimento, ocorre o aumento de carga sedimentar e de temperatura começando, assim, um processo que passa pelos seguintes estágios evolutivos:

- **Diagênese:** na faixa de temperaturas mais baixas, até 65°C, predomina a atividade bacteriana que provoca a reorganização celular e transforma a matéria orgânica em querogênio;
- **Catagênese:** ocorre um aumento da temperatura, até 165°C, determinando a quebra das moléculas de querogênio e dando origem a hidrocarbonetos líquidos e gasosos;
- **Metagênese:** a temperatura continua aumentando, até 210°C, propiciando a quebra das moléculas de hidrocarbonetos líquidos e as transformando em gás leve;
- **Metamorfismo:** com o aumento contínuo da temperatura, acima de 210°C, ocorre a degradação do hidrocarboneto gerado e, assim, é deixado como produto remanescente o grafite, gás carbônico e alguns resíduos de gás metano.

A figura 2.1 mostra os diferentes estágios de transformação da matéria orgânica, em função da temperatura, em um tipo de produto.

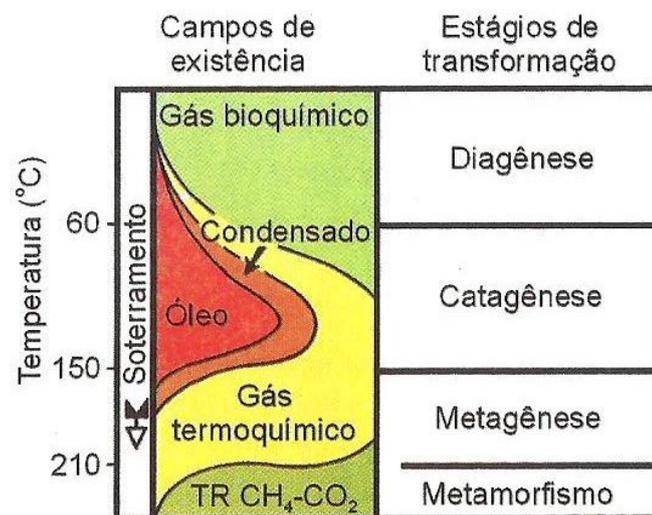


Figura 2.1: Transformação termoquímica da matéria orgânica e a geração do petróleo (THOMAS, 2004, p. 16).

Assim, o processo de formação do petróleo é um processo que resulta na captação de energia solar, por meio da fotossíntese, e na transformação da matéria orgânica com o auxílio do fluxo de calor proveniente do interior da Terra.

2.3 Perfuração Marítima

A perfuração marítima iniciou-se com sondas terrestres montadas sobre estruturas para perfurar em águas rasas. Empregavam-se as mesmas técnicas utilizadas em terra. Entretanto, devido à necessidade de se perfurar em águas profundas surgiram novos tipos de equipamentos e técnicas especiais orientadas especificamente à perfuração marítima. A figura 2.2 mostra os diferentes tipos de plataformas marítimas existentes.

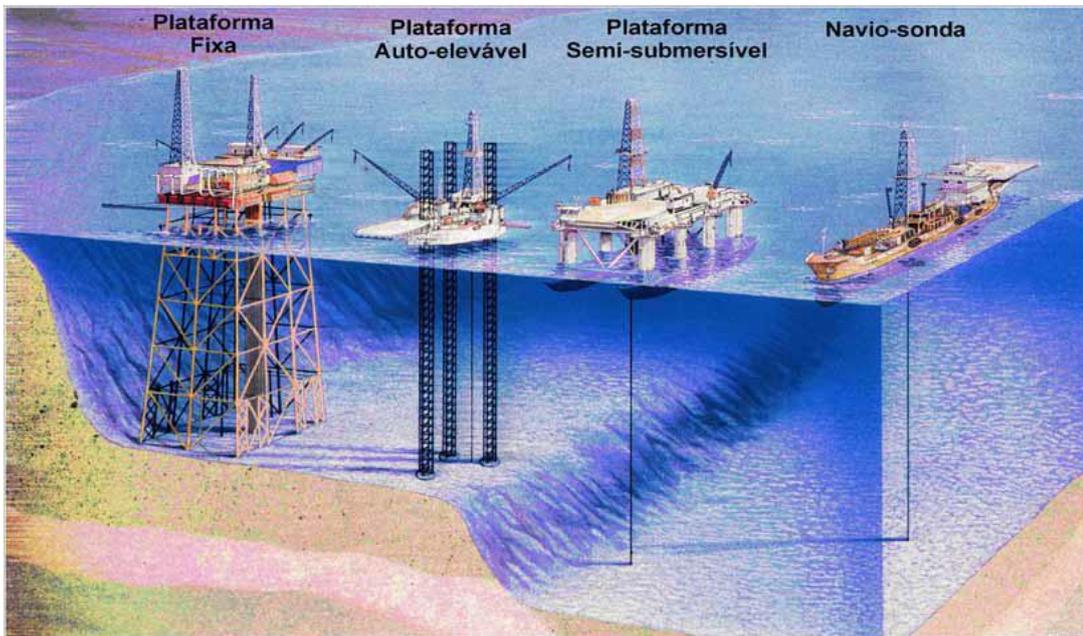


Figura 2.2: Tipos de plataformas marítimas (MANSANO, 2004, p. 26).

Atualmente, existem dois tipos de Unidades de Perfuração Marítima, sendo a primeira, a chamada BOP na superfície, como as plataformas fixas, as auto-eleváveis, as submersíveis e as *tension legs*. A segunda unidade de perfuração marítima é a BOP no fundo do mar, conhecida como unidades flutuantes, como as semi-submersíveis e navios-sonda.

2.4 História da perfuração no Brasil

A figura 2.3 abaixo mostra um breve histórico da perfuração do petróleo no Brasil, a partir do ano que ocorreu a busca concreta por petróleo até o ano que a primeiro óleo da camada do Pré-Sal foi extraído.

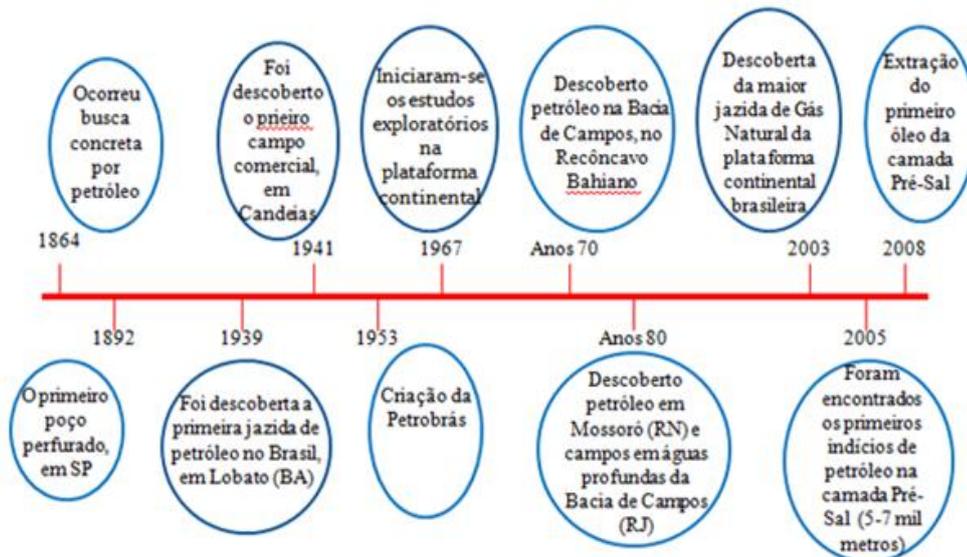


Figura 2.3: Linha do tempo da perfuração do petróleo no Brasil.

2.5 Válvulas de Segurança e Alívio

Diversos tipos de equipamentos e acessórios são essenciais na área da perfuração de poços de petróleo. Tratando-se de um ambiente no qual as altas pressões e temperaturas são constantes, desde a extração do óleo até a sua produção e refino, é necessária a presença de elementos que aliviem a pressão quando esta se torna superior à pressão de operação padrão do processo. Os elementos mais indicados e obrigatórios que precisam estar presentes nas instalações das plataformas e refinarias são as válvulas de segurança e alívio.

As válvulas de segurança e alívio, ou *PSV (Pressure and Safety Valves)*, são dispositivos automáticos de alívio de pressão sendo obrigatório o uso em vasos de pressão, caldeiras e outros equipamentos que trabalham a uma pressão interna maior que a pressão atmosférica. A figura 2.4 mostra um exemplo de uma válvula de segurança e alívio.



Figura 2.4: Exemplo de válvula de segurança (LESER, 2015, p. 5).

Em determinadas circunstâncias, durante o serviço, a pressão de operação do equipamento pode sofrer um aumento, fazendo com que este comece a trabalhar a uma pressão acima do qual ele foi projetado. É nesta condição que a *PSV* é necessária, pois a sua função primordial é aliviar o excesso de pressão de dentro deste equipamento. A ausência deste dispositivo automático poderá trazer consequências desastrosas, como a perda de vidas humanas e perda de capital investido. Entretanto, a válvula precisa ser corretamente especificada, dimensionada, instalada e mantida para que funcione corretamente quando for exigida. As figuras 2.5 e 2.6 mostram as válvulas de segurança, instaladas em equipamentos pressurizados, em operação.



Figura 2.5: Exemplo de válvula de segurança instalada em uma caldeira (CALTEC CALDEIRAS).



Figura 2.6: Exemplo de válvula de segurança instalada em uma tubulação (FLOWSAFE).

As válvulas de segurança de um modo geral oferecem uma medida de proteção devido aos potenciais níveis perigosos de temperaturas elevadas e de forças causadas pelas excessivas pressões de vapor ou qualquer outro tipo de fluido dentro de um sistema.

Normalmente, as válvulas de segurança e alívio são projetadas para aplicações que envolvem fluidos líquidos, gasosos ou vapores.

2.5.1 Histórico

A história da válvula de segurança relata que ela foi inventada em 1682 na Inglaterra por *Denis Papin*, um físico francês. O modelo inventado por *Papin* funcionava com um sistema de contrapeso, que nada mais era que um peso que ao ser movimentado ao longo de uma alavanca alterava a pressão que a válvula iria abrir (MATHIAS, 2014, p.197).

A figura 2.7 mostra uma válvula de segurança do tipo contrapeso.

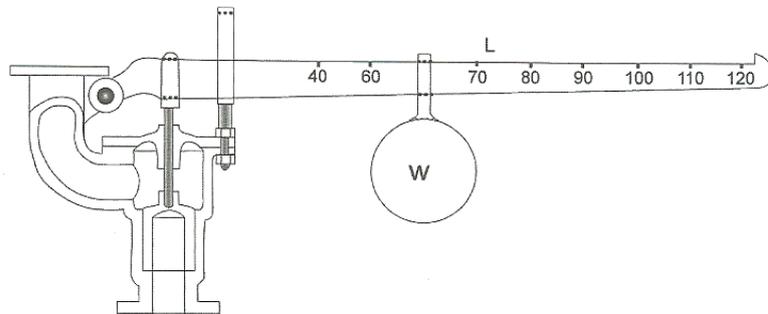


Figura 2.7: Válvula de segurança tipo contrapeso (MATHIAS, 2014, p. 197).

Essas válvulas começaram a ser amplamente utilizadas durante a revolução industrial. Com o passar do tempo e com a evolução tecnológica, as pressões de operação dos equipamentos foram sendo elevadas e a quantidade de pesos também, tornando o seu uso impraticável.

Devido a sua falta de precisão, diversas explosões de caldeiras e vasos de pressão ocorreram, o que provocou muitas perdas de vida, e a partir desses eventos foi criado a ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) e sua seção I, que não permitiu mais a instalação deste tipo de válvula em caldeiras.

Somente em 19 de janeiro de 1869 foi inventada a válvula de segurança do tipo mola sob carga, por dois americanos, *George Richardson* e *Edward H. Ashcroft*. De acordo com os registros da época, seu projeto era muito utilizado na proteção de locomotivas a vapor (MATHIAS, 2014, p. 198).

A figura 2.8 abaixo ilustra a válvula de segurança inventada por *Richardson*.

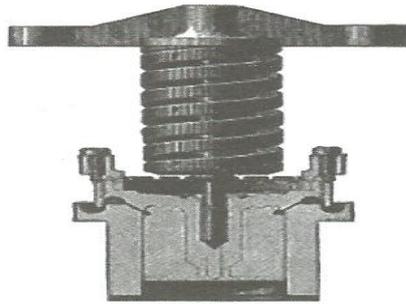


Figura 2.8: Válvula de segurança de *Richardson* (MATHIAS, 2014, p. 198).

2.5.2 Normas utilizadas

A criação das válvulas de segurança possibilitou que os homens explorassem o amplo universo da engenharia, podendo lidar com altas pressões e altas temperaturas. O trabalho com estes parâmetros, porém, promoveram diversos tipos de acidentes, justamente porque não havia uma norma internacional que regulamentasse as válvulas de segurança. Como foi mencionado anteriormente, diversas caldeiras e vasos de pressão explodiram, pois não existia precisão no dimensionamento, instalação e uso das válvulas de segurança nestes equipamentos.

Devido a esses relevantes acontecimentos, foram criadas diversas normas com o objetivo de minimizar ao máximo os acidentes.

2.5.2.1 O Código ASME

O código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) foi criado e organizado em 16 de fevereiro de 1880, como uma sociedade técnica e educacional de engenheiros mecânicos. Essa organização regulamenta e determina como todos os vasos de pressão e caldeiras devem ser projetados e protegidos nos Estados Unidos da América (EUA).

Este código nasceu da necessidade de proteger as pessoas e de fornecer uma uniformidade na fabricação de caldeiras e vasos de pressão. Mesmo com as constantes explosões destes equipamentos ocorridas no início do século XIX, ainda não havia nos EUA um código de projetos de caldeira.

Desde o ano de 1870 até o ano de 1910, foram registradas, no mínimo, 10 mil explosões em caldeiras na América do Norte. Somente em 1910, foram registradas 1400

explosões. Já entre 1905 e 1911, houve, na região de *New England* nos EUA, aproximadamente 1700 explosões de caldeiras, resultando na morte de 1.300 pessoas (MATHIAS, 2014, p. 195).

A figura 2.9 mostra o número de explosões de caldeiras e as pressões máximas consideradas nesses equipamentos que ocorreram entre 1880 e 2000 e as criações da ASME e da NB (*National Board*).

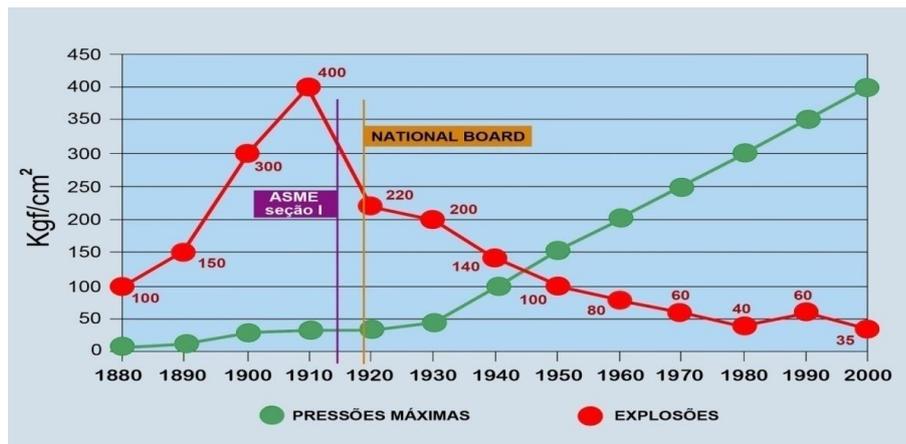


Figura 2.9: Representação gráfica da evolução do número de explosões de caldeiras desde o final do século XIX até o final do século XX (CHAINHO, 2012).

Além desses fatos, em 10 de março de 1905, a explosão de uma caldeira numa fábrica de sapatos chamada de *Shoe Grover*, na cidade de Brockton em Massachusetts, EUA, resultou na morte de 58 pessoas, deixando 117 feridos e ocasionando a destruição completa daquela fábrica (MATHIAS, 2014, P.195). Abaixo seguem as figuras 2.10 e 2.11 que mostram o estado da fábrica antes e depois da explosão da caldeira.



Figura 2.10: Fábrica *Shoe Grover* antes da explosão da caldeira (FERREIRA, 2013).



Figura 2.11: Fábrica *Shoe Grover* depois da explosão da caldeira (FERREIRA, 2013).

Devido à ocorrência destes fatos, a ASME foi chamada para elaborar um código de projeto. Assim, foi formado um Comitê de Caldeiras e Vasos de Pressão, dando origem à primeira seção do código ASME para vasos de pressão submetidos a fogo (caldeiras).

A seção I foi publicada em 1914 e nesta edição foi mencionado que o uso das válvulas de segurança para aplicações em caldeiras a vapor é obrigatório.

Uma caldeira de água quente, por exemplo, estampada para uma PMTA (*Pressão Máxima de Trabalho Admissível*) igual ou menor que 160 psi (ou 11,25 kgf/cm²) e para uma temperatura igual ou menor que 121°C, é considerada, de acordo com a ASME, uma caldeira de aquecimento de água. O estampo “H” do código ASME indica que é uma caldeira de aquecimento (*heating*). Acima desses valores, ela é denominada de caldeira de água de alta temperatura e são abrangidas pelo código ASME seção I (MATHIAS, 2014, P.195).

Segue abaixo uma lista cronológica do ano de publicação das seções da ASME e os títulos das oito edições iniciais do código para caldeiras e vasos de pressão:

- ASME Seção I: Código de Construção de Caldeiras – 1914 (**utilizada na fabricação de válvulas de segurança**);
- ASME Seção III: Caldeiras de Locomotivas a Vapor – 1921;
- ASME Seção V: Caldeiras Miniaturas – 1922;
- ASME Seção IV: Caldeiras de Aquecimento de Baixa Pressão – 1923;
- ASME Seção II: Especificações de Materiais – 1924 (**utilizada na fabricação de válvulas de segurança**);

- ASME Seção VI: Regras para Inspeção – 1924;
- ASME Seção VIII: Vasos de Pressão Não Submetidos a Fogo – 1925 **(utilizada na fabricação de válvulas de segurança)**;
- ASME Seção VII: Cuidados e Usos de Caldeiras – 1926.

Caso as caldeiras ou vasos de pressão sejam construídos conforme a ASME Seção I e ASME Seção VIII (que fornece regras básicas para o projeto, construção, fabricação, teste e certificação de vasos de pressão), respectivamente, é obrigatório o uso de um dispositivo de alívio de pressão. Devem-se utilizar as válvulas de segurança para as caldeiras e válvulas de segurança e/ou alívio ou disco de ruptura para os vasos de pressão. Entretanto, há uma restrição na norma que diz que esses equipamentos só podem ser projetados conforme a ASME se a pressão de operação não for menor que 15 psi (MATHIAS, 2014, p. 195).

As válvulas de segurança e alívio são os mais importantes tipos de válvulas instaladas dentro de um processo industrial, que visam à sua segurança. A confirmação disto está no fato destas válvulas serem as únicas a receberem parágrafos específicos no código ASME.

Atualmente, a ASME é uma norma de projeto e construção reconhecida mundialmente e que deve ser, rigorosamente, seguida e cumprida.

2.5.2.2 A Norma *American Petroleum Institute* (API)

A norma API é um código padrão voluntário adotado pelo ASME, Seção VIII e que foi estabelecido nos EUA em 20 de março de 1919. Ela é uma grande organização que representa as indústrias petroquímica e de petróleo e gás, desenvolvendo diversas normas e padrões relacionados com a indústria.

Esta norma é composta por diversos documentos que definem algumas diretrizes consideradas boas para a prática da engenharia. Para válvulas de segurança são considerados:

- API 520, parte 1: trata do dimensionamento e seleção de válvulas de segurança;
- API 520, parte 2: trata da instalação de válvulas de segurança;
- API 521: trata das diretrizes necessárias às válvulas de segurança, como a seleção e construção de sistemas de eliminação de resíduos;
- API 526: trata de uma especificação de compra para válvulas de segurança. Foi padronizado os materiais utilizados, as faixas operacionais de pressão e temperatura e testes e inspeções;

- API 527: trata dos testes necessários para determinar a estanqueidade das válvulas de segurança.

Quando o número da API vem com a sigla *RP* significa que o seu uso é facultativo, ficando a critério do fabricante, usá-la ou não. Porém, se o número da API vem com a abreviação *Std* seu uso é obrigatório, fazendo com que o fabricante construa a válvula conforme determina o padrão.

Os padrões API não são como os códigos ASME, pois são padrões adotados por empresas de petróleo e gás com o objetivo de padronizar os testes de aceitação. Serão obrigatórios caso o fabricante e o usuário tenham a intenção de vender ou utilizar o produto em uma indústria que também o tenha adotado.

2.5.2.3 As Normas Petrobrás

As normas Petrobrás foram criadas com o objetivo de padronizar os requisitos mínimos quanto ao fornecimento de equipamentos e serviços dentro do Brasil, além de seguir as diretrizes das normas API e ASME. Qualquer tipo de equipamento, como bombas, caldeiras, vasos de pressão e, inclusive, válvulas de segurança, precisam estar respaldadas por essas normas.

Por exemplo, a norma N-1882 regulamenta os critérios básicos para a elaboração de projetos de instrumentação. Para o caso das válvulas de segurança, são estabelecidas diretrizes para a seleção de materiais, dimensionamento e instalação (CONTEC, 2004, p. 9).

Existem outras normas as quais as válvulas de segurança precisam atender, como as normas N-1735 e a N-1374.

2.5.2.4 Outras Normas

Órgãos e outras normas e códigos também são utilizados e considerados quando o uso das válvulas de segurança é necessário.

Por exemplo, o *National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors (NBBI)* é um laboratório de testes credenciado pelo ASME, criado em 1919, para certificar a capacidade de vazão das válvulas de segurança e alívio de acordo com as regras estabelecidas. Já o *National Board (NB)* é um órgão fiscalizador que garante a conformidade das disposições da norma

ASME, garantindo o treinamento e capacitação dos trabalhadores em inspecionar vasos de pressão e caldeiras.

Outro exemplo de norma utilizada seria a *NR-13*, uma norma regulamentadora criada pelo Ministério de Trabalho e Emprego para caldeiras e vasos de pressão. Nela é citada que o uso da válvula de segurança é obrigatório: “13.1.4 Constitui risco grave e iminente a falta de qualquer um dos seguintes itens: a) válvula de segurança com pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior a PMTA.” (MTE, 2008, p. 1).

Outra norma bastante importante é a norma NACE (*National Association of Corrosion Engineers*). Ela costuma ser adotada com o objetivo de estabelecer padrões para a seleção e a qualificação de materiais metálicos utilizados em ambientes onde a presença de H₂S pode corromper a integridade dos equipamentos, colocando em risco a saúde pública e o meio ambiente. A camada do pré-sal é um exemplo onde há grandes concentrações desse composto químico.

A norma ISO (*International Organization for Standardization*) também é outro exemplo no qual as válvulas de segurança precisam ser respaldar. Esta norma foi criada em 1946 e tem como objetivo criar outras normas que facilitem o comércio e promovam boas práticas de gestão e avanço tecnológico. As normas mais conhecidas são a ISO 9000, para a gestão de qualidade, e a ISO 14000, para a gestão do meio ambiente.

2.5.3 Válvulas de Segurança

As válvulas de segurança e alívio são dispositivos automáticos de alívio de pressão com retorno de fechamento, atuados por mola, por contrapeso ou operados pneumáticamente, empregados obrigatoriamente, para proteger vasos de pressão quando esses operam com fluidos gasosos, vapores, líquidos monofásicos ou líquidos bifásicos, e para proteger caldeiras que trabalhem com vapores. Estas válvulas também podem ser tipos de dispositivos sem fechamento automático, como o disco de ruptura e o pino atuador.

Para entender o princípio de funcionamento de uma válvula de segurança, é necessário primeiro conhecer os conceitos aplicados a ela e todos os elementos que a compõem.

2.5.3.1 Conceitos

2.5.3.1.1 Diferencial de Alívio

O diferencial de alívio de uma válvula de segurança esteja ela em caldeiras, vasos de pressão ou tubulações, é a diferença existente entre a pressão de abertura e a pressão de fechamento expressada, sempre, em porcentagem da pressão de ajuste. Conforme a ASME VIII considera-se um diferencial de alívio de 7% para gases e 20% para líquidos. Isto quer dizer que para ocorrer o fechamento total da PSV, a pressão de operação deve possuir um valor máximo equivalente a 93% da pressão de ajuste, considerando gases, e um valor máximo de 80% da pressão de ajuste, considerando líquidos. Caso estes limites não sejam obedecidos, a válvula não irá fechar completamente, pois a pressão de operação estará maior que a pressão na qual a PSV estará completamente fechada.

2.5.3.1.2 Pressão de Operação

É a pressão na qual um equipamento é projetado para trabalhar, isto é, a pressão que o equipamento opera normalmente, sem nenhuma variação considerável.

2.5.3.1.3 Pressão de Ajuste a frio (ou CDTP)

A pressão de ajuste a frio ou CDTP (*Cold Differential Test Pressure*) é a pressão na qual a válvula abrirá, sendo a mola calibrada em uma bancada de teste. Apesar de ela estar somente sob a influência da temperatura ambiente no momento da calibração, haverá correções, como da temperatura e/ou da contrapressão constante, durante a calibração da válvula, o que garantirá o perfeito funcionamento sob as condições de operação.

2.5.3.1.4 Contrapressão

É a pressão que atua no lado da descarga da válvula de segurança e alívio, podendo atuar a favor ou contra à força exercida pela mola, antes e/ou durante o processo de alívio.

A contrapressão pode ser superimposta (constante ou variável) ou desenvolvida. A *contrapressão superimposta constante* possui seu valor descontado na CDTP da mola. Assim, a PSV deverá ser ajustada em uma bancada de teste num valor que será a pressão de ajuste desejada para ela abrir menos o valor dessa contrapressão. A *contrapressão superimposta variável*, geralmente ocorre quando diversas válvulas com pressões de ajuste diferentes e/ou

com capacidades de alívio diferentes descarregam o fluido do processo para dentro do mesmo coletor, fazendo com que o valor da pressão do coletor varie de tempo em tempo. Vale destacar que para esse caso, as válvulas não descarregam o fluido do processo para atmosfera, mas sim para outro equipamento ou processo. Já a *contrapressão desenvolvida* ocorre somente no momento de abertura da válvula devido ao fluxo na tubulação de descarga.

2.5.3.1.5 Acumulação

Esta é a pressão máxima alcançada pela válvula nas condições de alívio num valor acima da PMTA do equipamento. Vale ressaltar que esse aumento da pressão acima da PMTA ocorre no momento que a PSV está aberta e aliviando a pressão interna do processo. O seu valor serve como um referencial para a quantidade mínima que deve ser instalada no equipamento.

2.5.3.1.6 PMTA

Corresponde à pressão máxima permitida de trabalho pelo equipamento, como os vasos de pressão e caldeiras. É a partir da PMTA que se determina a pressão de ajuste da válvula de segurança.

A pressão de operação, ou de trabalho, só pode exceder a PMTA na situação de *acumulação*, ou seja, quando a PSV estiver aberta e aliviando, nunca em condições normais de operação e com a válvula fechada.

2.5.3.1.7 Pressão de Projeto

É definida como o valor de pressão calculado no momento do dimensionamento do equipamento, sem levar em consideração nenhum fator de segurança nesse cálculo.

2.5.3.1.8 Sobrepressão

É a pressão máxima alcançada pela válvula nas condições de alívio e de acordo com a taxa de fluxo requerida pelo processo. Ela é bem parecida com a *Acumulação*, mas a válvula de segurança estará ajustada num valor abaixo ou igual à PMTA do equipamento.

2.5.3.1.9 Capacidade de Vazão

É a capacidade que a válvula tem de descarregar o fluido do processo, pela relação entre a área de passagem e a pressão na qual a válvula é ajustada para abrir. A capacidade de

vazão é determinada pelo tamanho da área do orifício de passagem do bocal, de acordo com a pressão, estado físico do fluido, temperatura, densidade, volume e coeficiente de descarga, que é determinado por meio da taxa de fluxo máxima da válvula e dentro da sobrepressão permitida.

A área de passagem corresponde à menor área efetiva existente no bocal, correspondendo a uma série de 14 letras, de *D* a *T*, conforme a API Std. 526. Desta forma, estas válvulas de segurança podem ser reconhecidas da seguinte maneira: PSV 1" D 2", conforme a API 526 (PSV com entrada de 1" e saída de 2" com orifício D).

2.5.3.1.10 Pressão de Alívio

É a pressão na qual a capacidade de vazão máxima da válvula, em conjunto com a sobrepressão e com as condições reais de operação (temperatura, volume e contrapressão), é alcançada. Ela difere da *pressão de ajuste*, pois esta não considera a sobrepressão e nem as condições reais de operação, já que o ajuste é feito diretamente na calibração da mola.

2.5.3.2 Componentes

Basicamente, as válvulas de segurança possuem os seguintes componentes principais: corpo, castelo, capuz, disco, bocal, haste, mola e guia. Os materiais construtivos destes componentes são selecionados de acordo com o tipo, pressão, temperatura, abrasividade e corrosividade do fluido.

2.5.3.2.1 Corpo

O corpo da válvula é um invólucro externo, que corresponde à parte inferior de sua carcaça. Nela podemos encontrar a sede, ou bocal da válvula e as conexões de entrada e de saída, as quais podem ser flangeadas ou roscadas. O corpo serve para direcionar o fluxo do fluido para o lugar certo e serve para garantir a estanqueidade quando o disco, que é a peça de fechamento, assenta sobre a sede.

Normalmente, o corpo da válvula é construído em aço carbono (WCB), em aço liga (C5, WC6 u WC9) para altas temperaturas, em aços específicos para baixa temperatura (LCB, LC1, LC2 ou LC3), em ferro fundido (cinzento ou nodular) ou bronze para fluidos não corrosivos e temperatura ambiente em baixas pressões, em aço inoxidável (CF8 ou CF8M)

para fluidos moderadamente corrosivos e em aços Monel, Hastelloy, Dulex e Superduplex para aplicações de corrosão elevada.

2.5.3.2.2 Castelo

O castelo é a parte superior das válvulas de segurança e é onde estão alojadas a mola, a haste e outros elementos internos.

A figura 2.12 mostra o castelo e o corpo da válvula de segurança.

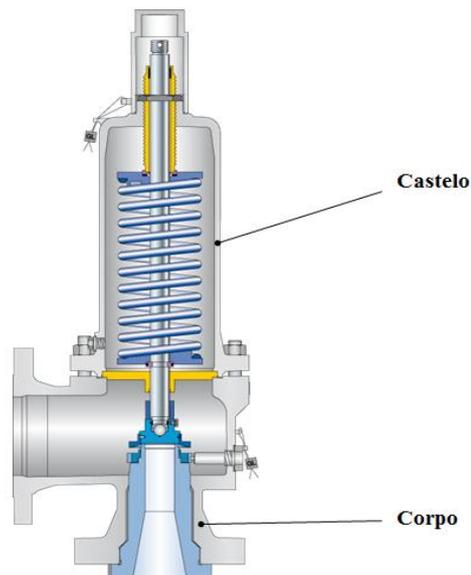


Figura 2.12: Corpo e castelo da válvula de segurança (LESER, 2015, p. 6).

O castelo pode ser fechado ou aberto. É utilizado o castelo fechado nas situações em que se deseja proteger a mola contra intempéries ou quando se quer protegê-la contra a corrosão. Já nas situações em que se almeja a troca térmica entre a mola e o meio ambiente utiliza-se o castelo aberto.

Normalmente, o castelo aberto é utilizado quando a PSV está submetida a elevadas temperaturas e quando o fluido do processo é vapor d'água.

Os materiais construtivos aplicados ao castelo da válvula de segurança são os mesmos que os aplicados ao corpo.

2.5.3.2.3 Capuz ou Tampa

O capuz é um acessório montado na parte superior do castelo. Ele tem por objetivo proteger uma parte da haste e alguns elementos internos. Além disso, há a opção de ser instalado nele uma alavanca e/ou trava para teste hidrostático. A figura 2.13 mostra o capuz de uma PSV com a alavanca e trava para teste hidrostático.

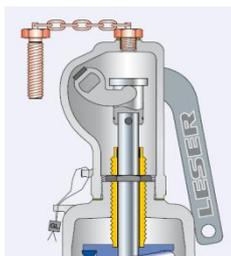


Figura 2.13: Tipo de capuz com alavanca e trava para teste hidrostático (LESER, 2015, p. 46).

O uso da alavanca está condicionado a situações nas quais as válvulas de segurança sejam instaladas em vasos de pressão com o fluido compressível (vapor d'água ou ar comprimido). Esta alavanca tem as funções de permitir uma abertura manual da PSV quando a pressão de trabalho estiver abaixo da pressão de abertura, quando em situações de emergência a PSV não abrir na pressão de ajuste especificada e quando se deseja expulsar algum material estranho que tenha ficado preso entre a sede e o disco. Já o uso do *TH* (teste hidrostático) está condicionado a situações que se deseja realizar um teste no equipamento onde a PSV está instalada. A parte maior da trava TH é rosqueada no orifício na parte superior do capuz, impedindo assim que a haste levante e, conseqüentemente, que a PSV se abra no momento em que a pressão de abertura for atingida.

O capuz pode ser fabricado em aço carbono (A105, WCB) ou em aço inoxidável (AISI 316L ou CF8M).

2.5.3.2.4 Bocal

Esta peça não permite o contato direto do fluido do processo com o corpo da válvula enquanto esta estiver fechada. Geralmente, o bocal possui formato cônico com o objetivo de aumentar a velocidade de escoamento do fluido no ponto de saída. Além disso, ele possui a entrada arredondada para permitir que o escoamento do fluido seja laminar e direcionado, o que ajuda a reduzir a pressão.

O bocal, normalmente, é fabricado em aço inoxidável (AISI 316, AISI 422 e CF8M) justamente para atender à pressão e temperatura operacional e à corrosividade, abrasividade e compatibilidade química do fluido. Também pode ser fabricado em material especial, como em Duplex, Superduplex, Hastelloy e Inconel.

2.5.3.2.5 Disco

O disco é o obturador móvel da válvula de segurança e alívio responsável pela sua vedação, tendo contato direto com a superfície do bocal quando a válvula está fechada. Assim como o bocal, o disco mantém contato constante com o fluido do processo e, da mesma forma, só é fabricado em aço inoxidável, endurecido ou não, ou em aços especiais.

Outra função do disco seria controlar a taxa de fluxo do fluido através do bocal. Neste caso, a mola controla a sua posição em relação ao bocal, principalmente com fluidos incompressíveis. Ela fica alojada dentro do suporte do disco sendo exposta à pressão, temperatura e corrosividade do fluido do processo pela sua face inferior. Já pela face oposta, o disco fica exposto à contrapressão, caso exista. A figura 2.14 ilustra o disco de uma PSV.



Figura 2.14: Disco de vedação de uma PSV (MATHIAS, p. 16).

2.5.3.2.6 Mola

Este componente da válvula de segurança é um dos mais importantes do conjunto. Ela é a responsável por uma parte do desempenho operacional correto das válvulas. A figura 2.15 mostra uma mola usada em uma válvula de segurança.



Figura 2.15: Exemplo de uma mola helicoidal (MATHIAS, p. 23).

Sua função é aplicar a força requerida para manter a superfície de vedação do disco em contato constante com a superfície de vedação do bocal. É ela que estabelece a força que determina a pressão de ajuste da válvula, isto é, a pressão que a PSV irá abrir. Essa força exercida pela mola é combinada pelas forças desenvolvidas pela pressão do fluido. Ocorrendo a abertura da válvula, a mola controla o curso de levantamento do disco e o fechamento da PSV.

A mola é uma das peças mais críticas de todo este conjunto, pois muitos problemas operacionais são atribuídos a ela, principalmente fadiga por erro na especificação do material (quando opera em temperaturas elevadas) ou por excesso de ciclos operacionais (quando a pressão de operação se estabiliza muito próxima da pressão de ajuste).

Normalmente as molas são fabricadas em aço carbono ligado (AISI 5160) para temperaturas de até 232°C com castelo fechado e para temperaturas de até 343°C com castelo aberto, em aço liga (tungstênio, cromo e outros) para temperaturas maiores no qual são mantidas as características mecânicas da mola e em aço inoxidável (AISI 302, AISI 304, AISI 316 e outros) para aplicações de fluidos corrosivos e temperaturas criogênicas. Além desses materiais, as molas também podem ser fabricadas em titânio (ASTM B 348 Gr. 5) para fluidos extremamente corrosivos e em Inconel (X-750) para aplicações de ácido sulfídrico (H₂S).

2.5.3.2.7 Haste

Este é um componente que tem a função de transmitir a força descendente exercida pela mola ao suporte do disco e deste ao disco. Em sentido contrário, a pressão do fluido atuando na área interna de vedação do disco, transmite uma força ascendente que se opõe à força exercida pela mola. A figura 2.16 mostra a haste montada dentro de uma válvula de segurança.

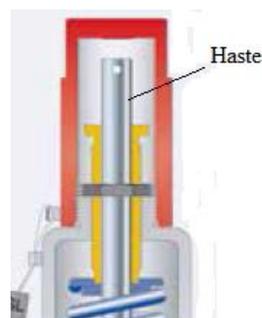


Figura 2.16: Haste de uma válvula de segurança (LESER, 2015, p. 46).

A haste pode ser fabricada em aço inoxidável AISI 410, para trabalho com vapor d'água saturado, água, ar comprimido e outros gases não corrosivos, pois devido à sua dureza, ele minimiza o empenamento, tanto pelas forças exercidas sobre ela, quanto à força exercida pela trava. Também pode ser fabricada em aço inoxidável AISI 316 ou AISI 420, para fluidos mais corrosivos e em Monel e para vapor d'água superaquecido.

2.5.3.2.8 Guia

Esta peça tem a função de alinhar o suporte do disco e a superfície de vedação do disco com a superfície de vedação do bocal, antes e durante a abertura e após o fechamento da válvula. Ela também suporta e limita os movimentos laterais do suporte do disco quando a válvula abre, pois a tendência do fluxo é forçar as peças internas para o lado do flange de saída, acompanhando seu escoamento.

Normalmente, a guia é fabricada em aço carbono (ASTM A-105) ou em aço inoxidável AISI 316L para casos no qual o fluido é corrosivo.

2.5.3.3 Funcionamento

A válvula de segurança e alívio não atua quando o processo está em condições normais de operação, mas no momento que houver algum distúrbio que provoque a elevação da pressão de trabalho até à pressão de abertura, a válvula deverá funcionar corretamente. O princípio básico de operação da PSV é que nenhuma força externa seja necessária para que ela funcione, quando for o caso, pois a válvula é um dispositivo automático.

O seu funcionamento é baseado no equilíbrio de forças geradas pela pressão do fluido com as forças contrárias exercidas pela mola. A figura 2.17 mostra um esquema do disco e bocal antes da abertura.

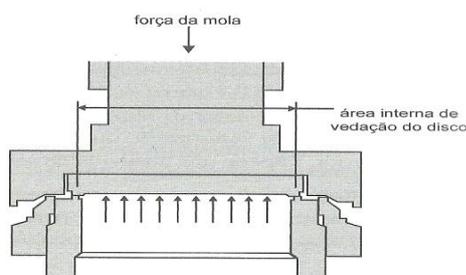


Figura 2.17: Pressão do fluido atuando dentro do bocal e antes da abertura (MATHIAS, 2014, p. 224).

A força exercida pela mola sobre a superfície superior do disco é constante e controlada, enquanto a força exercida pela pressão do fluido sobre a superfície inferior do disco pode variar. No momento em que a válvula se encontra fechada, a força da mola será maior do que a força exercida pelo fluido. Somente quando a válvula começar a se abrir é que a força exercida pelo fluido sobre o disco será maior do que a força exercida pela mola, até atingir a abertura completa.

Quando ocorrer o alívio do processo, a pressão irá se estabilizar, fazendo com que a PSV se feche. Neste momento a força exercida pelo fluido irá diminuir até o ponto de voltar a ser menor que a força exercida pela mola, provocando então o fechamento completo da válvula (MATHIAS, 2014, p. 224).

A figura 2.18 mostra o momento que a válvula de segurança está começando a abrir e o momento que obtém a sua abertura máxima.

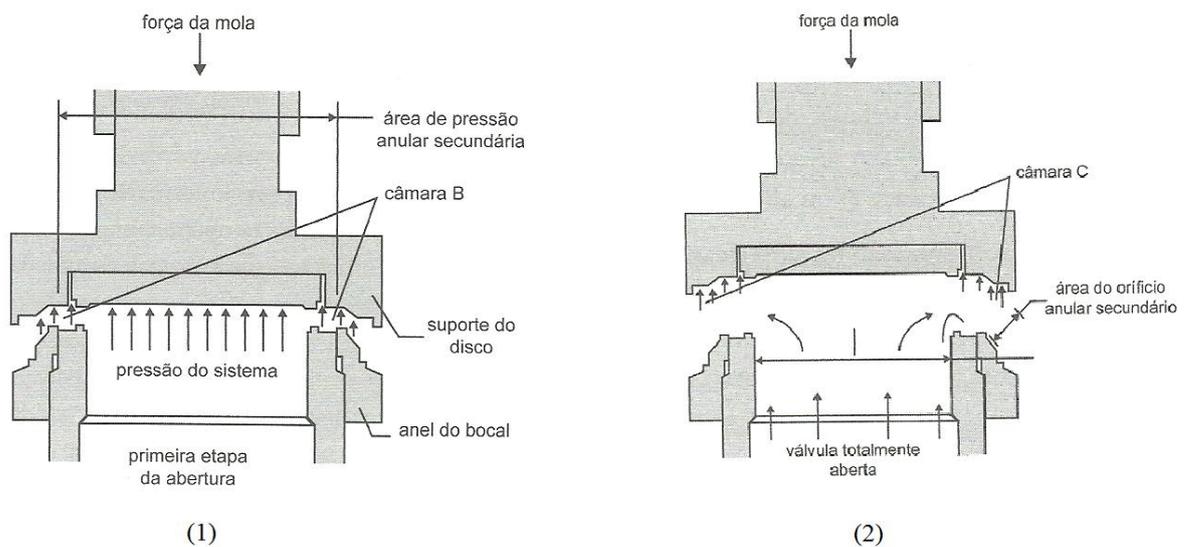


Figura 2.18: (1) Início do curso de abertura da PSV; (2) Abertura máxima da PSV (MATHIAS, 2014, p. 224 e 225).

A figura 2.19, a seguir, apresenta a relação entre o curso de elevação do disco nas válvulas de segurança do tipo mola e a pressão do vaso pressão.

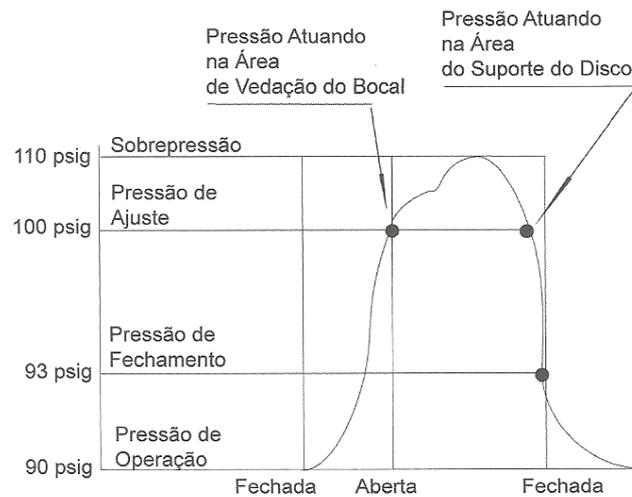


Figura 2.19: Representação gráfica do ciclo operacional de uma válvula de segurança para vasos de pressão (MATHIAS, 2014, p. 228).

2.6 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro, carbono e cromo, podendo ainda conter outros elementos como níquel e molibdênio. A adição de cromo aumenta a resistência à oxidação e à corrosão, aprimora as propriedades mecânicas a elevadas temperaturas e aumenta a tenacidade. Para serem definidos como tal, é necessário que o teor de cromo na composição do material seja superior a 12% (COLPAERT, 2008, p. 522).

Possuir um teor mínimo de 12% de cromo em sua composição química garante que seja formada uma película passivadora de óxido de cromo, que tem a função de proteger o metal contra a oxidação ou corrosão em diferentes temperaturas e meios.

A figura 2.20 mostra que à medida que o teor de cromo no aço aumenta, a resistência à corrosão também aumenta. Para situações de temperaturas elevadas, a figura 2.21 mostra que é necessário que o teor de cromo seja maior que 20% para que o material adquira resistência ao calor.

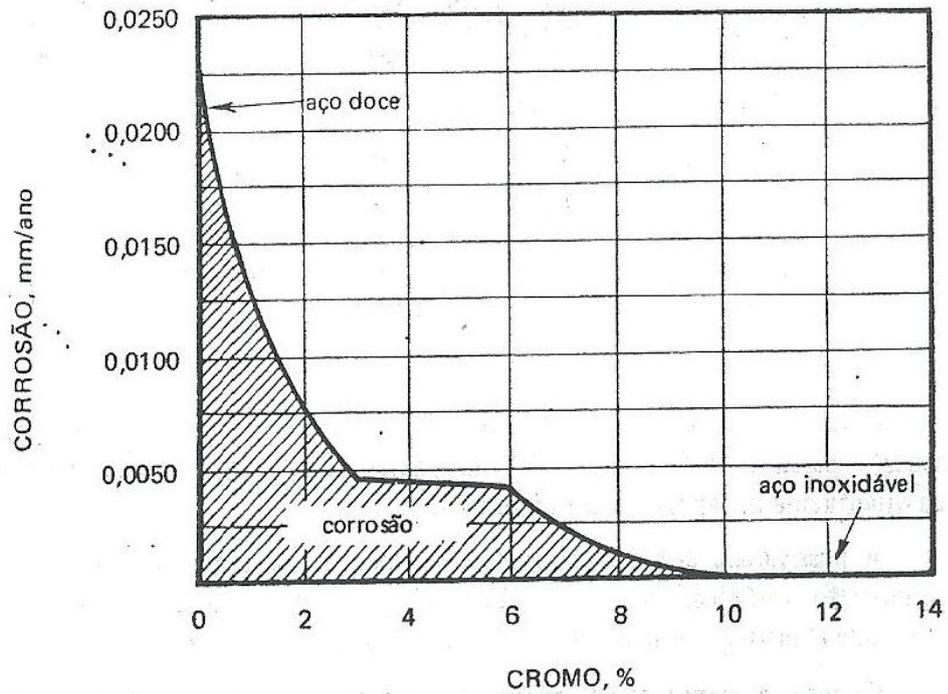


Figura 2.20: Gráfico ilustrando o percentual de cromo influenciando sobre a resistência à corrosão (CHIAVERINI, 1986, p. 251).

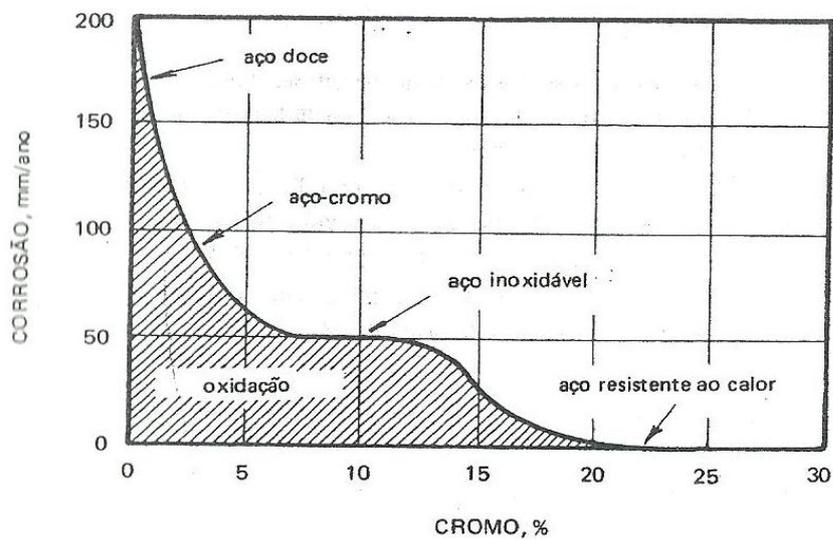


Figura 2.21: Gráfico ilustrando o efeito do cromo na resistência à oxidação a altas temperaturas (CHIAVERINI, 1986, p. 252).

As propriedades dos aços inoxidáveis são classificadas de acordo com a microestrutura à temperatura ambiente e esta microestrutura depende, diretamente, da composição química e dos tratamentos térmicos realizados. Tendo em vista a complexidade

dos sistemas envolvidos, representações simplificadas das relações de fases em função da composição química são empregadas, conforme pode ser visto pelo diagrama de *Schaeffler* na figura 2.22 abaixo.

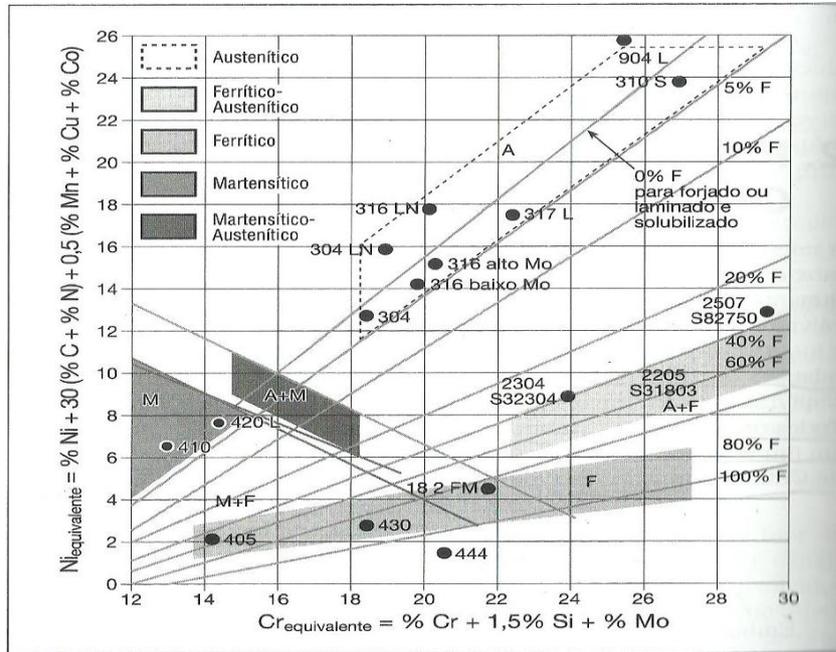


Figura 2.22: Diagrama de Schaeffler (COPAERT, 2008, p. 524).

Todos os elementos que estabilizam a ferrita são computados em um valor de “cromo equivalente ($Cr_{equivalente}$)” e os estabilizadores da austenita em um valor de “níquel equivalente ($Ni_{equivalente}$)”.

$$Cr_{equivalente} = (\% Cr + 1,5) \times (\% Si + \% Mo) \quad (1)$$

$$Ni_{equivalente} = (\% Ni + 30) \times (\% C + \% N) + 0,5 \times (\% Mn + \% Cu + \% Co) \quad (2)$$

Embora o diagrama tenha sido desenvolvido para prever o teor de ferrita e metal depositado por solda, ele fornece uma visão útil das fases presentes em metais laminados ou forjados. Assim, pode-se determinar as principais microestruturas que estarão presentes em um determinado aço inoxidável.

Tendo visto essas condições, os aços inoxidáveis são normalmente divididos em cinco categorias: *martensíticos*, *ferríticos*, *austeníticos*, *duplex* e *endurecidos por precipitação* (COLPAERT, 2008, p. 522).

2.6.1 Aços inoxidáveis martensíticos

São ligas de ferro e cromo (11-18%) com teor de carbono acima de 0,1% (COLPAERT, 2008, p. 522). Este tipo de aço inoxidável possui elevada resistência mecânica devido ao alto teor de cromo, pois ele provoca o aumento da temperabilidade do material.

Os aços martensíticos são comumente austenitizados a temperaturas elevadas (925-1070°C) de modo a dissolver todos os carbonetos para obter uma microestrutura austenítica uniforme. Esta tentativa de controle do tamanho do grão é importante para garantir a tenacidade do material (COLPAERT, 2008, p. 523).

Além disso, este tipo de aço pode ser endurecido por tratamento térmico de têmpera e eles são considerados magnéticos. Incluem-se nessa família os seguintes aços: AISI 403, 410, 414, 416, 420, 431, 440A, 440B, 440C e 501. Estes tipos de aços podem ser aplicados em molas, eixos, hastes de válvulas, parafusos e entre outros (CHIAVERINI, 1986, p. 256).

Para situações nas quais os aços martensíticos contem baixo teor de carbono, tem-se encontrado bastante aplicação em alguns segmentos da indústria do petróleo por estes aços possuírem boa soldabilidade, boa resistência mecânica e boa resistência à corrosão (COLPAERT, 2008, p. 524).

2.6.2 Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são ligas de ferro, cromo (16-30%) e níquel (8-35%) com o teor de carbono inferior a 0,08%. São os mais comuns entre os aços inoxidáveis e são caracterizados por uma resistência à corrosão muito boa, por uma elevada tenacidade e por uma boa soldabilidade (COLPAERT, 2008, p. 522 e 527).

A adição de níquel à composição química estabiliza a austenita à temperatura ambiente, fazendo com que a estrutura seja predominantemente austenítica (COLPAERT, 2008, p. 527). Possuindo esta estrutura, os aços austeníticos podem ser aplicados na criogenia ou em situações de temperatura elevada, pois eles possuem resistência ao amolecimento e resistência à deformação a quente.

O tratamento térmico aplicado aos aços austeníticos forjados e laminados é a solubilização. O tamanho e forma dos grãos austeníticos não são afetados por este tratamento, a menos que o material tenha sido submetido ao trabalho a frio (COLPAERT, 2008, p. 528).

Estes, são aços não-magnéticos e pertencem a essa família os seguintes aços: AISI 301, 302, 304, 304L, 308, 310, 316, 316L, 317, 321 e 347 (COLPAERT, 2008, p. 522).

2.6.3 Aço inoxidável CF8M

As ligas CF8M são aços inoxidáveis austeníticos fundidos, de composição química similar ou equivalente à classe AISI 316, contendo cromo, níquel e molibdênio como principais elementos de liga (GILMAR, 2009, p. 12). As tabelas 2.5 e 2.6 mostram as composições dos aços inoxidáveis CF8M e AISI 316.

Tabela 2.5: Composição química do aço inoxidável CF8M (% em peso) (GILMAR, 2009, p. 12).

Tipo	Composição Química (%)							
	C _{máx}	Mn _{máx}	Si _{máx}	P _{máx}	S _{máx}	Cr	Ni	Mo
CF8M	0,08	1,5	1,5	0,040	0,04	18,0 - 21,0	9,0 - 12,0	2,0 - 3,0

Tabela 2.6: Composição química do aço inoxidável 316 (% em peso) (KLOECKNER, 2011, p.64).

Tipo	Composição Química (%)							
	C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Cr	Ni	Mo
316	0,08	2,0	1,0	0,045	0,03	16,0 - 18,0	10,0 - 14,0	2,0 - 3,0

A microestrutura bruta de fusão é tipicamente austenítica, com frações volumétricas de ferrita delta variando normalmente entre 5% e 20%, podendo chegar a 40%. Esta proporção entre as fases na microestrutura é uma função da composição química e do balanço dos elementos de liga, além dos parâmetros do processo de fabricação, tais como temperatura de vazamento, velocidade de resfriamento e tratamentos térmicos subsequentes (GILMAR, 2009, p. 12).

A classificação da liga CF8M, segundo a *Alloy Casting Institute* (ACI) é a seguinte: a letra C indica que este aço é utilizado em ambientes onde se exige alta resistência à corrosão, a letra F resulta dos valores de cromo (19%) e níquel (9%), o número 8 indica que esta liga contém no máximo 0,08% de carbono e por fim, a letra M se refere à presença de molibdênio na composição química, que contribui para uma maior resistência à corrosão na presença de cloretos (GILMAR, 2009, p. 12 e 13).

Pode-se utilizar o CF8M em componentes como carcaças de bombas e válvulas,

juntas, adaptadores, anéis e tubos de resfriamento primário de equipamentos que trabalham com meios líquidos agressivos.

a) *Microestruturas*

As microestruturas dos aços inoxidáveis austeníticos fundidos são basicamente formadas por uma matriz austenítica, com certa quantidade de ferrita distribuída aleatoriamente, podendo conter carbonetos. A figura 2.23 abaixo mostra as microestruturas do aço CF8M.

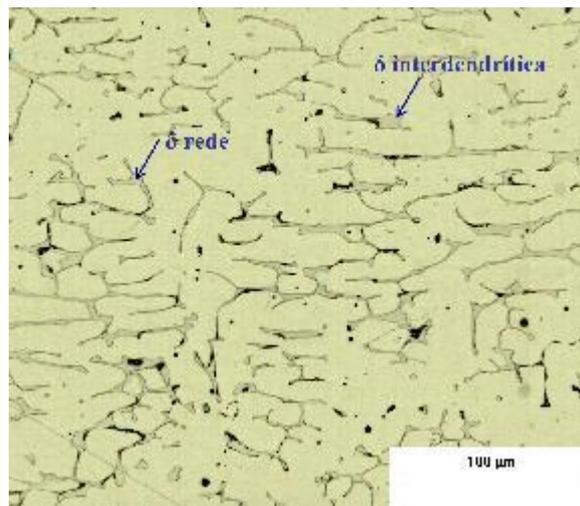


Figura 2.23: Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico CF8M com austenita (fase clara), com ferrita delta (na forma de rede) e com ferrita interdendrítica (SILVA, 2013, p. 11).

Além de possuir estrutura *cúbica de face centrada* (CFC), a austenita não é magnética. A fase austenítica garante aos aços inoxidáveis CF8M alta resistência à corrosão e elevada tenacidade, mesmo em aplicações criogênicas (GILMAR, 2009, p. 25).

Já a presença de ferrita na microestrutura pode ser tanto benéfica quanto prejudicial ao material. Ela ajuda a reduzir as trincas a quente, a aumentar a resistência à formação de trincas nos processos de corrosão e a aumentar a resistência à corrosão intergranular, pois a precipitação de carbonetos, ocorrendo no interior das ferritas e não nos contornos de grão, evitariam a sensitização. Entretanto, a presença dessa ferrita pode ser prejudicial para aplicações a baixas temperaturas, por reduzir a tenacidade dos aços inoxidáveis austeníticos, e por formar carbonetos, como o carboneto de cromo, e fases intermetálicas, como a fase sigma, em determinadas faixas de temperatura. (GILMAR, 2009, p.25).

Esta fase intermetálica se localiza nas regiões interdendríticas e por ser bastante frágil, quebra-se durante o corte para a preparação metalográfica. Pode se formar em todos os aços

inoxidáveis e é a fase que tem maior impacto sobre as propriedades mecânicas e de corrosão. Ela promove o empobrecimento de cromo e molibdênio nas regiões adjacentes da matriz, levando à redução da resistência à corrosão (GILMAR, 2009, p. 28 e 29).

A figura 2.24 abaixo mostra o diagrama de fases Fe-Cr. Pode-se perceber a formação da fase sigma e da ferrita delta em função temperatura e do teor de cromo presente na composição química do aço.

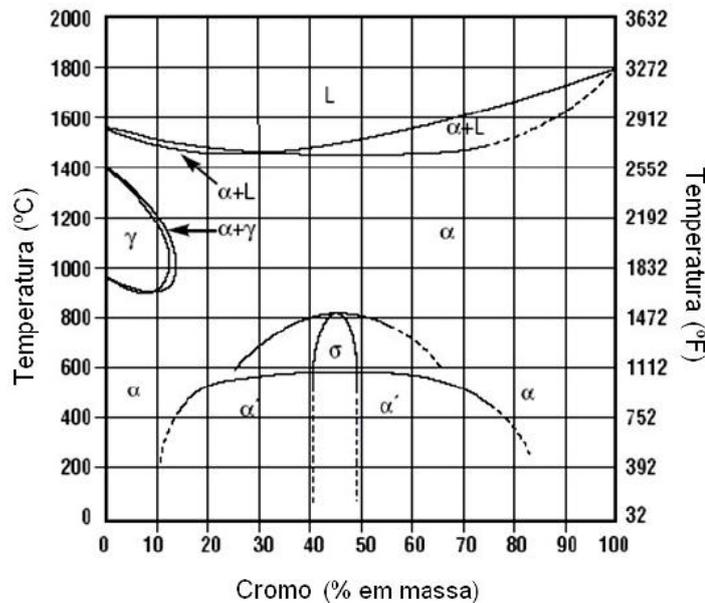


Figura 2.24: Diagrama de fases ferro-cromo (ANDRADE, 2006, p. 7).

Geralmente todos os elementos que estabilizam a ferrita promovem a formação de fase sigma. Para aços inoxidáveis austeníticos ou ferríticos, o silício, o molibdênio e o cromo são os elementos que aceleram a formação dessa fase. Porém, adicionando-se carbono, a sua formação é diminuída, pois o carbono favorece a formação de carboneto de cromo, levando à redução do teor de cromo em solução sólida (GILMAR, 2009, p. 30).

Em ligas completamente austeníticas, a fase sigma se formará ao longo dos contornos de grãos. Quando a ferrita delta está presente na liga austenítica, a formação de sigma é mais rápida e acontece dentro da própria ferrita (GILMAR, 2009, p. 30).

b) *Propriedades mecânicas*

As ferritas deltas resultantes do processo podem apresentar diferentes morfologias: nas formas de esqueleto, em redes, lamelares ou mistas (GILMAR, 2009, p. 19).

A presença de ferrita delta na microestrutura de aços inoxidáveis austeníticos contribui para o aumento da resistência mecânica, tanto pelas características de escorregamento desta fase, como pela presença de maiores quantidades de elementos, como por exemplo, o molibdênio, o tungstênio e o vanádio, que endurecem por solução sólida (GILMAR, 2009, p. 35).

Os aços inoxidáveis da classe AISI 316 apresentam as mesmas propriedades mecânicas referenciadas na norma ASTM A351 (*American Society for Testing and Materials*) para os aços CF8M. Assim, pode-se considerar que a dureza conforme a AISI 316 seja similar aos aços CF8M (RIBEIRO, 2012, p. 17).

A tabela 2.7 abaixo mostra a dureza referenciada para os aços inoxidáveis 316 e CF8M, em condições ambientes.

Tabela 2.7: Dureza dos aços inoxidáveis CF8M e 316, em condições ambientes
(KLOECKNER, 2011, p. 65).

Tipo	Dureza (HRB)
CF8M / AISI 316	79

A importância das propriedades mecânicas na seleção dos aços fundidos resistentes à corrosão é estabelecida pela aplicação dos fundidos. A base para a seleção de ligas de inoxidáveis é normalmente a sua resistência a um meio corrosivo específico ou ao ambiente de trabalho. Neste caso, as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis muitas vezes exercem um papel secundário (GILMAR, 2009, p. 35).

c) Resistência à corrosão

A passividade é a propriedade típica de certos metais e ligas metálicas de permanecerem inalteradas no meio, gerando o mecanismo de resistência à corrosão. Neste processo o cromo é o elemento mais importante nos aços inoxidáveis, embora quando combinado com outros elementos pode não conferir resistência em certos meios, como ácido clorídrico. Esta camada é formada por óxidos hidratados de Cr e Fe e apresenta-se de forma contínua, insolúvel e não porosa, formando uma barreira entre o metal e o meio evitando sua corrosão. Se, por alguma razão, a camada protetora for interrompida, ela se restabelece rapidamente (repassivação). As condições mais propícias para uma boa passivação são

aquelas em que a superfície da liga está isenta de qualquer contaminação e o meio de exposição seja oxidante. Porém, caso a camada passiva seja destruída e as condições do meio não permitam a repassivação, as taxas de corrosão podem ser elevadas (GILMAR, 2009, p. 36).

Além do cromo, o níquel também tem um papel muito importante na melhoria da resistência à corrosão dos aços inoxidáveis, sobretudo quando presente em teores acima de 7%. Já o molibdênio aumenta a estabilidade da camada passiva e a resistência à corrosão em ácido sulfúrico e na água do mar (resistência à corrosão por pite). Porém, favorece a formação de ferrita e da fase sigma. Assim, os aços inoxidáveis austeníticos que contém cromo, níquel e molibdênio são considerados os melhores tipos de aços resistentes à corrosão (GILMAR, 2009, p. 37).

O carbono, embora em teores inferiores a 0,08%, é o responsável por aumentar a resistência mecânica do aço e estabilizar a austenita, contudo contribui para a redução da resistência à corrosão intergranular dos aços inoxidáveis (GILMAR, 2009, p. 37).

2.6.4 Aço inoxidável AISI 316L

Este aço inoxidável é um dos mais conhecidos aços inoxidáveis austeníticos. Os aços AISI 316L são ligas de ferro, carbono, cromo, níquel e molibdênio. Segue a tabela 2.8 com a composição química do aço 316L.

Tabela 2.8: Composição química dos aços inoxidáveis 316L (% em peso) (KLOECKNER, 2011, p. 64)

Tipo	Composição Química (%)							
	C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Cr	Ni	Mo
316L	0,03	2,0	1,0	0,045	0,03	16,0 - 18,0	10,0 - 14,0	2,0 - 3,0

a) *Microestruturas*

Assim como no aço inoxidável austenítico CF8M, a microestrutura do 316L é formada basicamente por uma matriz austenítica (CFC), com certa quantidade de ferrita (CCC) distribuída aleatoriamente (5-20%), podendo conter carbonetos e fase sigma. Pode ser visto na figura 2.25 abaixo um exemplo de microestrutura característica deste aço inoxidável.

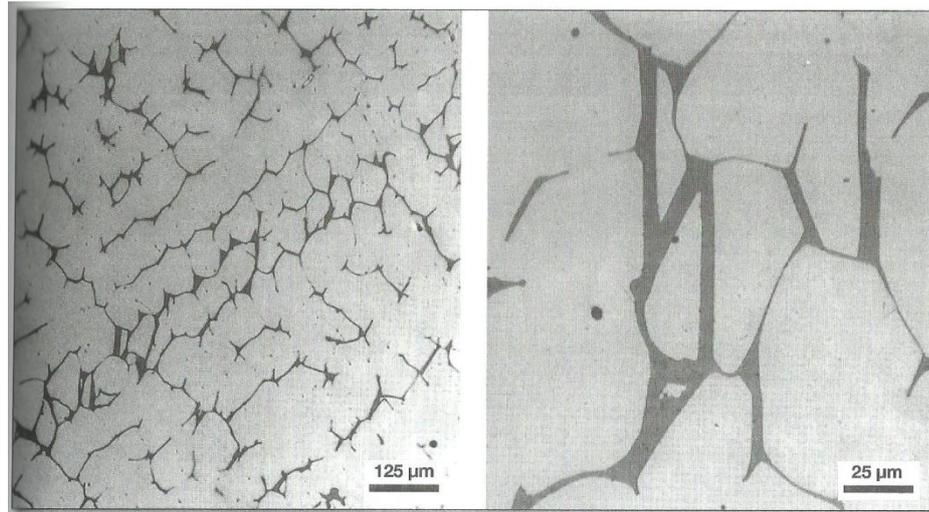


Figura 2.25: Estrutura bruta de fusão de um aço inoxidável austenítico 316L com austenita (mais clara) e com ferrita (fase escura) sob ataque químico de uma solução de 60% (vol.) HNO_3 (COLPAERT, 2008, p. 533).

b) *Propriedades mecânicas e resistência à corrosão*

Estes tipos de aços apresentam alta resistência à corrosão e à oxidação. A resistência à corrosão é decorrente da existência de uma camada de óxido, rica em cromo, formada naturalmente na superfície do aço de reduzida espessura (1 a 5 ηm), grande aderência e estabilidade química (SILVA, 2010, p. 26).

Além disso, outros elementos também podem ser adicionados para garantir algumas outras propriedades, tais como, resistência ao calor, tenacidade, capacidade de deformação e resistência mecânica (SILVA, 2010, p. 26).

Em alguns aços deformados pode surgir o aparecimento de maclas. A macla é um tipo de contorno de grão através do qual os átomos em um dos lados do contorno estão localizados em posições de imagem em espelho em relação aos átomos no outro lado do contorno. É justamente a região entre esses contornos que é chamada de macla. Ela resulta dos deslocamentos atômicos que são produzidos por forças mecânicas de deformação (maclas de deformação) e pelo tratamento térmico de recozimento após deformações (maclas de recozimento) (CALLISTER, 2008, p. 69 e 70).

A maclagem ocorre em um plano cristalográfico definido e em uma direção específica, tudo em função da estrutura cristalina. Assim, as maclas de recozimento são encontradas em estruturas do tipo CFC e as maclas de deformação são encontradas nas estruturas CCC e HC. Elas correspondem às regiões que possuem os lados relativamente retos e paralelos, como

pode ser visualizado na figura acima (CALLISTER, 2008, p. 70 e 71)

Estes aços não podem ser endurecidos por tratamento térmico, mas são facilmente encruáveis, isto é, podem ser endurecidos por deformação plástica a frio (SILVA, 2010, p. 26 e 27). A tabela 2.9 abaixo mostra a dureza do aço inoxidável 316L.

Tabela 2.9: Dureza do aço inoxidável 316L (ARTEX).

Tipo	Dureza (HRB)
316L	85

Apesar dos os aços austeníticos não serem magnéticos, o endurecimento por deformação a frio pode tornar o aço 316L magnético.

O aço inoxidável 316L é um variante do tipo 316 com um menor teor de carbono. Ele possui um limite de escoamento inferior e uma resistência à tração inferior, mas ele oferece uma melhor soldabilidade devido ao baixo teor de carbono.

Este tipo de aço austenítico pode sofrer corrosão intercrystalina, que é um tipo de corrosão localizada próximo dos contornos de grãos. Se ele for exposto a uma faixa de temperatura entre 450°C a 850°C por períodos de vários minutos e se ocorrer, logo em seguida, exposição a um ambiente corrosivo, a corrosão pode acontecer. Dessa forma, o aço 316L foi especificado com um nível de carbono de até 0,03% com o objetivo de resistir a esse tipo de corrosão, pois a determinadas faixas de temperatura, se o nível do carbono está abaixo desse valor, a corrosão intercrystalina não ocorre.

2.6.5 Aço inoxidável AISI 420

O aço inoxidável 420 é um tipo de aço martensítico, cuja composição química típica se encontra na tabela 2.10 abaixo.

Tabela 2.10: Composição química dos aços inoxidáveis 420 (% em peso)

(KLOECKNER, 2011, p. 64).

Tipo	Composição Química (%)							
	C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Cr	Ni	Mo
420	0,15	1,0	1,0	0,040	0,03	12,00 - 14,00	-	-

Este aço inoxidável é caracterizado por apresentar liga de ferro, carbono e cromo. Ele é amplamente utilizado em aplicações de cutelaria, moldes para injeção de polímeros e componentes mecânicos que combinem elevada resistência mecânica e resistência à corrosão (PINEDO, 2004, p. 282).

Este aço é submetido à usinagem inicial e logo após é tratado termicamente pelo processo de têmpera e revenimento, com o objetivo de conseguir o nível de dureza especificado para determinada aplicação (PINEDO, 2004, p. 282).

a) *Microestrutura*

O carbono está em uma determinada concentração que permite a transformação de ferrita em austenita a altas temperaturas. Durante o resfriamento, a austenita se transforma em martensita, que é uma fase rica em carbono, frágil e muito dura (APERAM, p. 15).

Esses aços são fabricados e vendidos no estado recozido, com estrutura ferrítica, baixa dureza e boa ductilidade. Somente depois de um tratamento térmico de têmpera é que terão uma estrutura martensítica, atribuindo a estes aços alta dureza e baixa ductilidade. Porém, somente nestas condições que o aço inoxidável 420 será resistente à corrosão (APERAM, p. 15).

A figura 2.26 abaixo mostra a microestrutura típica de um aço inoxidável 420 no estado recozido.

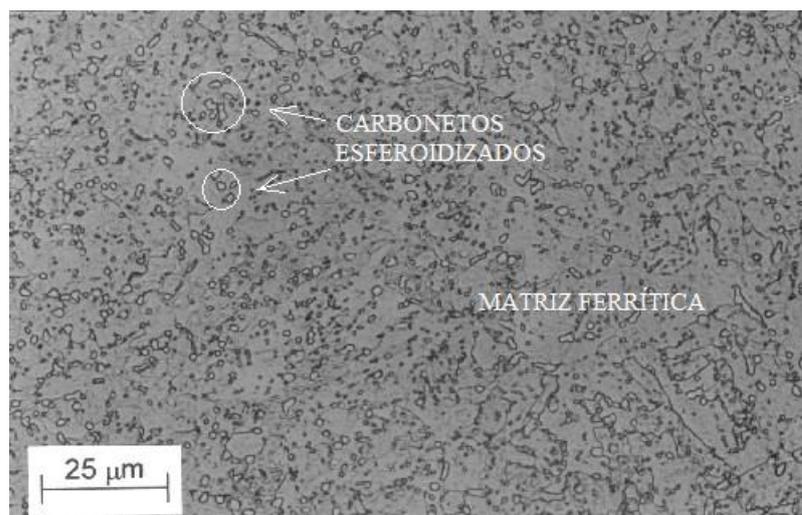


Figura 2.26: Microestrutura de um aço inoxidável 420 recozido. Matriz ferrítica com carbonetos esferoidizados. Ataque químico com o reagente Vilella. Não foi informada a resolução obtida na micrografia (PINEDO, 2004).

No caso da figura 2.27, pode-se perceber uma estrutura típica de um aço inoxidável AISI 420 temperado.

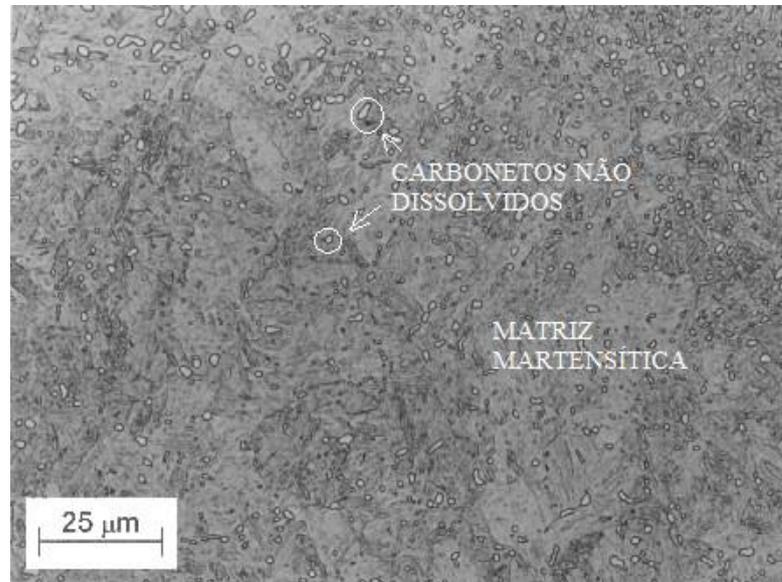


Figura 2.27: Estrutura típica de um aço inoxidável 420 temperado. Matriz martensítica com carbonetos não dissolvidos. Ataque químico com Vilella. Não foi informada a resolução obtida na micrografia (PINEDO, 2004).

b) *Propriedades mecânicas e resistência à corrosão*

No estado recozido o aço 420 não possui boa resistência à corrosão atmosférica. Isso se deve à operação de recozimento, no qual o carbono e o cromo presentes no aço se combinam para formar carboneto de cromo, que se precipita. Cada carboneto precipitado possui, em peso, aproximadamente 95% de Cr. Como o aço 420 tem muito carbono e pouco cromo, comparando-se com os outros aços inoxidáveis, praticamente a metade do cromo é precipitada e retirada da solução sólida. Nesta condição, o material não resiste a corrosão atmosférica (APERAM, p. 15).

Dessa forma o aço inoxidável AISI 420, como todo o aço martensítico, deve sofrer o tratamento térmico de têmpera, que transforma a austenita em martensita durante o processo de resfriamento. Com o tratamento térmico, o carbono forma parte da fase martensítica e assim, não contribui para a formação de precipitado. Somente depois da têmpera que estes materiais passam ser resistentes à corrosão. Além disso, a alta dureza, proveniente da estrutura martensítica, faz com que estes materiais tenham uma alta resistência ao desgaste (APERAM, p. 15). A tabela 2.11 abaixo mostra a dureza comumente encontrada no aço inoxidável 420.

Tabela 2.11: Dureza do aço inoxidável AISI 420, no estado recozido (LYMAN, 1961).

Tipo	Dureza (HRB)
420	92

2.7 Corrosão

A corrosão é a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 2012, p. 1). Sendo um processo espontâneo, acaba por transformar constantemente os materiais, prejudicando a durabilidade e desempenho dos mesmos, fazendo com que sua vida útil seja reduzida e causando falhas de equipamentos.

Falhas deste tipo geram paradas não programadas, perda de produção, elevados custos com manutenção e aumento dos riscos ambientais e de segurança operacional.

Os investimentos feitos nas mais diversas plantas industriais, principalmente nas plataformas de petróleo, exigem certa importância com a durabilidade e resistência à corrosão dos mais diversos equipamentos e estruturas que as compõem. Sendo assim, estratégias de inspeção e de monitoração da corrosão são fundamentais para determinar as condições de sistemas como estes e definir as ações de controle da corrosão. Essas estratégias têm por objetivo evitar danos materiais e humanos.

2.7.1 Tipos

Os processos de corrosão são considerados reações químicas heterogêneas ou reações eletroquímicas que se passam geralmente na superfície de separação entre o metal e o meio corrosivo. Logo, a corrosão é um modo de destruição do metal, progredindo através de sua superfície (GENTIL, 2012, p. 45).

A corrosão pode ocorrer de diversas formas, assumindo tipos variados. Assim, ela pode surgir conforme:

- A *morfologia*: uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular (ou intercrystalina), intragranular (ou transgranular), filiforme, por

esfoliação, grafítica, dezincificação, em torno do cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;

- *As causas ou mecanismos:* por aeração diferencial, eletrolítica ou por corrente de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas (corrosão sob tensão fraturante), em torno do cordão de solda, seletiva (grafítica e dezincificação), empolamento ou fragilização pelo hidrogênio;
- *Os fatores mecânicos:* sob tensão, sob fadiga, por atrito, associada à erosão;
- *O meio corrosivo:* atmosférica, pelo solo, induzida por microrganismos, pela água do mar, por sais fundidos, entre outros;
- *A localização do ataque:* por pite, uniforme, intergranular, transgranular, entre outros.

2.7.2 Tipos de corrosão encontrados na indústria do petróleo

Um dos problemas mais encontrados na indústria petrolífera é a corrosão.

Os equipamentos em todas as etapas da produção de óleo da indústria petrolífera situados em grandes variedades de ambientes corrosivos sofrem constantes processos de corrosão.

Na produção de petróleo a presença de gases como o H_2S e o CO_2 causam como consequência aumento da acidez e a corrosão. À medida que a concentração desses gases aumentam, o pH diminui e a taxa de corrosão aumenta.

2.7.2.1 Meios corrosivos

- **Substâncias Poluentes com gases**

Os gases poluentes são originados pelos gases constituintes da atmosfera, como o gás oxigênio (O_2), gás nitrogênio (N_2), monóxidos de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), ozônio (O_3), dióxido de enxofre (SO_2), trióxido de enxofre (SO_3), monóxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio (NO_2) e áreas mais localizadas, gás sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3), cloreto de hidrogênio (H_2F_2) e cloro (Cl_2) (GENTIL, 2012, p. 59).

O CO_2 e CO são normalmente originados da queima de combustíveis, como os hidrocarbonetos (gasolina e óleo, por exemplo) e carvão. Em temperaturas normalmente

encontradas em atmosferas ambientais eles não costumam ser corrosivos para os materiais metálicos, embora o gás carbônico forme com água o ácido carbônico (H_2CO_3), que é um ácido fraco (GENTIL, 2012, p. 59).

O SO_2 e SO_3 são os mais frequentes constituintes corrosivos de atmosferas industriais, em razão de as indústrias usarem óleos combustíveis contendo geralmente 3 a 4% de enxofre. Esses gases formam com a umidade presente no ar, respectivamente ácido sulfuroso (H_2SO_3) e ácido sulfúrico (H_2SO_4). Esses gases podem ser originados também da queima de gasolina, de gases residuais de refinarias e de carvão contendo enxofre (GENTIL, 2012, p. 57).

O H_2S , nas atmosferas próximas às refinarias de petróleo, mangues e pântanos, é o gás responsável pelo escurecimento do cobre, ou de suas ligas.

- **Água Salgada (água do mar)**

A água está presente em óleos brutos, onde atua como eletrólito causando a corrosão, tendendo a hidrolisar outros compostos, como os cloretos, aumentando assim sua acidez. Ela está dispersa no petróleo bruto sob a forma cristalina (hidratos) e os principais sais presentes são: cloreto de sódio, cloreto de magnésio, cloreto de cálcio.

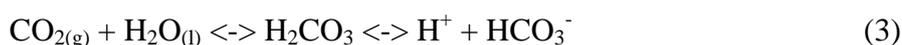
2.7.2.2 Tipos de corrosão

A corrosão que mais prejudica a indústria do petróleo é a *corrosão eletroquímica*, devido a presença dos constituintes de perfuração e da água produzida. Tais como sais, gases dissolvidos, micro-organismos aliados à temperatura e pressão.

A corrosão eletroquímica pode ser verificada sempre que existir heterogeneidade no sistema material metálico-meio corrosivo, pois a diferença de potencial resultante possibilita a formação de áreas anódicas e catódicas. Destacam-se nesse tipo de processo, a corrosão em água ou soluções aquosas, corrosão atmosférica e corrosão no solo.

- **Corrosão pelo dióxido de Carbono (CO_2)**

O dióxido de carbono dissolvido na água forma o ácido carbônico (H_2CO_3), reduzindo o pH, causando a formação de pites.



Ultimamente, tem sido considerado como o principal agente corrosivo encontrado nos campos do Pré-Sal. O uso de materiais em aço inoxidável é uma solução para evitar a corrosão criada por esse agente.

A figura 2.28 ilustra um exemplo de um material que sofreu corrosão por pite. Esta corrosão se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro.



Figura 2.28: Corrosão por pite em tubo de aço inoxidável AISI 304 (GENTIL, 2012, p. 47).

- **Corrosão pelo sulfeto de Hidrogênio (H_2S)**

O sulfeto de hidrogênio é altamente perigoso, pois estimulada e acelera a corrosão localizada e uniforme, causando a perda das propriedades plásticas do aço e rachaduras. O H_2S dissolvido na água contribui para a diminuição do pH, o que torna a corrosão mais agressiva.

A norma NACE 0175/ISO contempla o uso de materiais específicos para situações que o H_2S está presente, como por exemplo, o aço inoxidável AISI 316L para evitar problemas com a corrosão.

Segue abaixo figura 2.29 ilustrando um exemplo de um material que sofreu corrosão uniforme. Esta corrosão se processa em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura. É chamada de corrosão generalizada.



Figura 2.29: Corrosão uniforme em chapa de aço carbono (GENTIL, 1996).

- **Corrosão por cloretos e oxigênio**

Este tipo de corrosão é característico de ambientes marinhos agressivos (névoa salina). Os principais componentes são: O₂, cloreto de sódio, cloreto de magnésio, cloreto de cálcio.

A corrosão pode ser externa, quando o material estiver sob a influência de névoa salina, ou interna, quando o material estiver em contato com água produzida. O O₂ e o cloro, proveniente dos compostos de cloreto, rompem o filme passivo do material, provocando corrosão do tipo pite ou alveolar. Realizar pintura especial externa no material, fazer um revestimento interno ou aumentar o teor de molibdênio, que fará o papel de prender o íon cloro, evitará que este tipo de corrosão ocorra.

A figura 2.30 ilustra um exemplo de material que sofreu corrosão alveolar. Esta corrosão se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que seu diâmetro.



Figura 2.30: Corrosão alveolar generalizada em tubo de aço carbono (GENTIL, 2012, p. 47).

2.7.3 Corrosão em aços inoxidáveis

Os tipos de corrosões mais comuns nos aços inoxidáveis são os tipos de corrosão generalizada e localizada. Normalmente o processo de corrosão nos aços inoxidáveis é localizado, como a corrosão por pite, a corrosão sob tensão e a corrosão intergranular.

A corrosão localizada é sempre mais perigosa, pois a detecção superficial é mais difícil e complicada de obter.

Determinados elementos podem segregar para os contornos de grão em determinadas temperaturas. Estes contornos de grão são regiões de alta energia e por isso, são sítios preferenciais para a precipitação de compostos. Em algumas condições, isso pode deixar os contornos de grão dos aços inoxidáveis muito reativos, dando origem à chamada *corrosão intercrystalina ou intergranular* (COLPAERT, 2008, p. 545).

Os aços austeníticos e ferríticos são suscetíveis a esse tipo de corrosão. A *sensitização*, que consiste na precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, torna a região em volta do precipitado pobre de cromo e, portanto, propícia para o início do fenômeno da corrosão (COLPAERT, 2008, p. 545).

Pode-se visualizar na figura 2.31 um exemplo de corrosão intergranular ou intercrystalina. Esta corrosão se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos, tendo-se então a corrosão sob tensão.

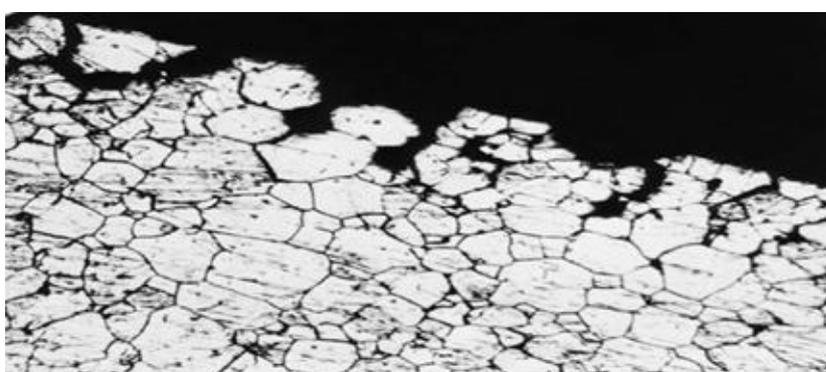


Figura 2.31: Corrosão intercrystalina ou intergranular (GENTIL, 2012, p. 46).

Entretanto, segundo Colpaert (2008, p. 545 e 546), existem duas medidas para reduzir ou evitar a sensitização: uma medida seria o uso de elementos estabilizadores, como o titânio e o nióbio, para formarem carbonetos mais estáveis que o cromo, e a outra medida seria reduzir o teor de carbono do aço (os aços da série L seriam uma ótima opção).

2.8 Ensaaios

Qualquer projeto de engenharia exige um vasto conhecimento das características, propriedades e comportamento dos materiais. Os critérios de especificação dos materiais impõem, para a realização dos ensaios, métodos normalizados que objetivam levantar as propriedades mecânicas e seu comportamento quando submetidos a determinadas condições de trabalho ou esforços (GARCIA, 2012, p. 1).

Estes métodos normalizados são fundamentais para que se estabeleça uma linguagem comum entre fornecedores e clientes, já que é prática comum a realização de ensaios a partir de um corpo de prova da peça.

Este trabalho abordará os princípios e procedimentos básicos dos ensaios de Micrografia por microscópio óptico, de Corrosão – Névoa salina e de Dureza Rockwell, sempre de acordo com suas respectivas normas, ou métodos normalizados.

2.8.1 Ensaio de Micrografia por microscópio óptico (MO)

Há diversas técnicas usuais para observar a estrutura dos aços em escala microscópica. Para um grande grupo de técnicas em que se observa a microestrutura através das seções, as técnicas de preparação dos corpos de prova são bem similares. A técnica mais comum é por meio da *microscopia óptica*.

Através da microscopia ótica, é possível obter grandes aumentos do corpo de prova e esse aumento depende do foco bem ajustado. Segundo Colpaert (2008, p. 68), quanto maior o aumento, menor a profundidade de foco e para que se possa observar a superfície de uma amostra totalmente em foco, é necessário que ela esteja bastante plana e perpendicular ao eixo óptico do microscópio.

Assim, cuidados com a planicidade da amostra é uma preocupação básica na preparação de amostras para a microscopia ótica.

2.8.1.1 Preparação de amostras para MO

A técnica de preparação de amostras para a realização de um ensaio micrográfico em microscópio óptico pode ser dividida nas seguintes fases:

1) Escolha e localização da seção a ser estudada

A dificuldade de obter uma boa preparação para o exame de microscopia ótica pode limitar as dimensões de um corpo-de-prova.

A orientação da seção escolhida para a realização do exame micrográfico é muito importante e deve ser registrada. Convém, portanto, ao cortar as amostras para a preparação micrográfica, identificá-las claramente. Croquis de amostragem ou fotografias que registrem o processo de amostragem são extremamente úteis. A perda destas informações durante o processo de preparação da amostra pode requerer a tomada de nova amostra ou colocar sérias dúvidas sobre a confiabilidade dos resultados.

2) Obtenção de uma superfície plana e polida no local escolhido para estudo

Após o corte da peça, para a obtenção da amostra ou corpo-de-prova, há duas opções de prepará-la: pode-se realizar um embutimento, em plástico ou resina, que permite maior firmeza e facilidade de manuseio, além de permitir medidas para preservar as arestas durante o polimento, ou pode-se submeter a amostra direto à preparação. Quando do embutimento do corpo-de-prova com resina fenólica, “baquelite” ou similares, deve-se tomar cuidado para que a temperatura, na ordem de 150°C, seja suficiente para não trazer nenhuma influência sobre a estrutura do material a ser examinado (COLPAERT, 2008, p. 71).

A preparação da superfície de interesse envolve o lixamento em lixadeiras motorizadas seguindo uma sequência de papéis de lixa de carboneto de silício (SiC). A sequência usual das lixas é: 100 (ou 120 ou 180), 240, 320, 400, 500, 600 e, eventualmente, 1200. Para materiais mais macios, como os aços inoxidáveis, aços ferríticos e aços carbonetados, que se tem interesse em evitar uma deformação excessiva, a sequência pode ser: 240, 320, 400, 500, 600 e 1200. As primeiras etapas em lixa de 120 não são recomendadas nesses casos (COLPAERT, 2008, p. 71).

Após finalizar o lixamento, inicia-se o polimento manual ou automático. Usualmente, após o acabamento da lixa de 600 é que se inicia a operação de polimento. Este é continuado sobre disco giratório de feltro, sobre o qual se aplica uma leve camada de abrasivo, que pode ser as pastas de alumina, de diamante e, em alguns casos, de sílica coloidal.

É preciso determinar, experimentalmente, as melhores condições de pressão sobre a amostra e velocidade de rotação do disco para o material ser preparado. Quando as amostras não são embutidas, é prudente chanfrar um pouco os seus vértices antes de iniciar o lixamento ou polimento para não desgastá-los e para diminuir o perigo do corpo-de-prova prender na lixa e ser projetado à distância. Esta é uma medida positiva também para a segurança do operador.

Durante o lixamento e o polimento a posição da amostra sobre a lixa ou pano deve ser mudada em 90° quando for trocar de um abrasivo para outro. Uma regra comum é submeter à amostra a cada lixa, ao menos o dobro do tempo necessário para eliminar os riscos da lixa anterior.

Para verificar se o lixamento ou polimento já estão suficientemente bons, deve se examinar a superfície ao microscópio. Para isso, a amostra deve ser antes lavada com água, álcool e, imediatamente seca em ar quente.

A tabela 2.12 apresenta alguns valores de rugosidade de um aço inoxidável obtidos pela sequência de lixas de SiC.

Tabela 2.12: Rugosidade média após polimento manual e automático de um aço inoxidável (COLPAERT, 2008, p. 72).

Lixa de SiC	Rugosidade (média aritmética) (R_a)	
	Manual μm	Automático μm
120	0,23	0,18
180	0,13	0,08
240	0,10	0,10
320	0,10	0,05
400	0,05	0,03
600	0,05	0,03

Quando a superfície apresentar um aspecto especular e praticamente sem riscos perceptíveis com aumento de 100 a 200 vezes, estará em condições de ser examinada ao microscópio para a observação de inclusões, trincas, distribuição da grafita, porosidades ou outras ocorrências visíveis sem ataque. Ainda assim, é somente depois do ataque com reagente químico que se pode ter certeza de que o polimento foi bem conduzido.

Os abrasivos usados no polimento não só riscam o material como também causam deformação a frio da camada de material abaixo da superfície polida. A profundidade de deformação depende diretamente da granulometria do material usado no lixamento ou no polimento, da pressão empregada no lixamento ou polimento e da dureza do material.

Quando os polimentos mais finos subsequentes removem as depressões deixadas pelos riscos no material sem remover também a parte encruada, a superfície pode atingir um acabamento aparentemente satisfatório com aparência de bem polida. Porém, quando se ataca essa amostra, o resultado do ataque não é uniforme, pois o reagente corrói preferencialmente as regiões mais encruadas, em relação ao resto da superfície, resultando em heterogeneidades artificiais, como por exemplo, linhas escuras nos antigos riscos. Os vestígios de encruamento decorrentes de imperfeições no polimento podem também aparecer sob a forma de

“empastamento” dos constituintes ou então dando a aparência de aspereza no interior dos grãos. A figura 2.32 abaixo mostra como os vestígios de riscos profundos podem permanecer no material.

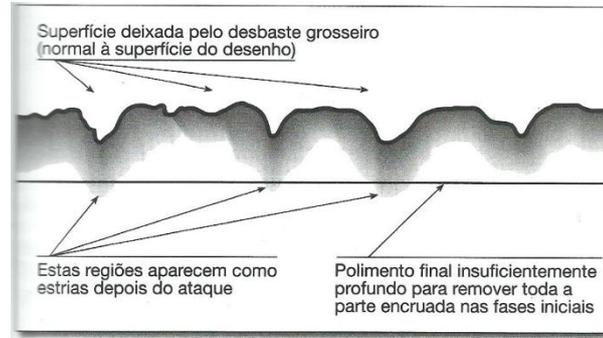


Figura 2.32: Representação esquemática do encruamento produzido pelo lixamento, abaixo da superfície do material (COLPAERT, 2008, p. 73).

É importante tomar cuidado para não superaquecer a amostra durante o processo de lixamento e polimento, pois o superaquecimento podem alterar as estruturas que se deseja observar. A figura 2.33 mostram exemplos dos aspectos de superfícies após polimentos sem ataque. A imagem da esquerda mostra o aspecto de uma superfície bem polida. A imagem central exemplifica uma superfície mal polida, pois há diversos riscos no processo de polimento. Já na imagem da direita, é mostrada uma superfície bem polida.

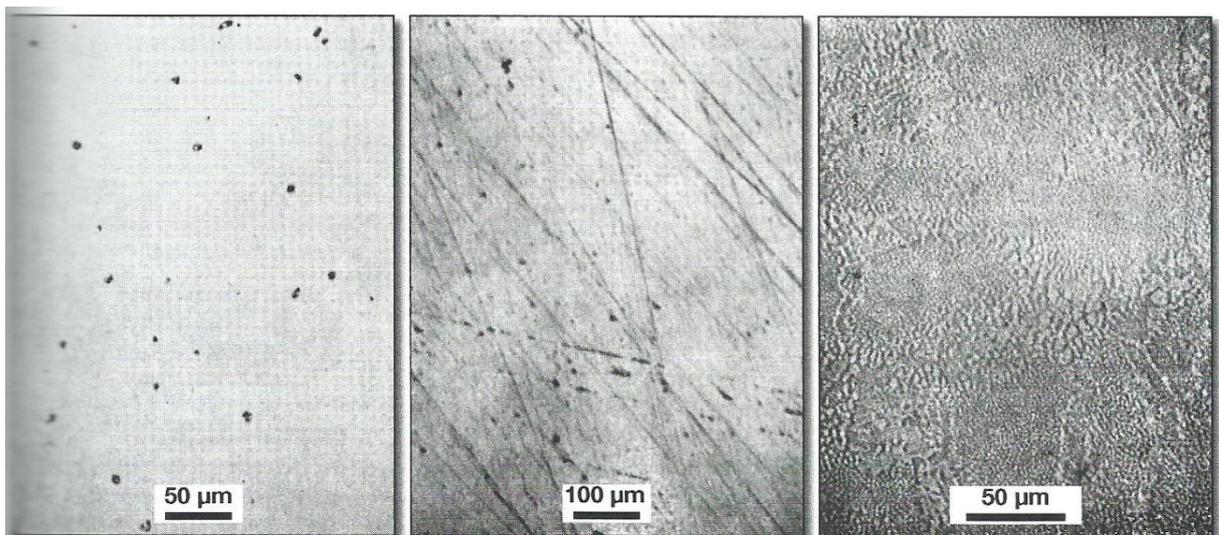


Figura 2.33: Aparência de superfícies após polimentos (COLPAERT, 2008, p. 75).

Quando a superfície polida não for atacada imediatamente, é preciso evitar a sua oxidação. Uma medida preventiva seria conservar o corpo-de-prova completamente seco ou manusear a amostra com as mãos secas e limpas.

A figura 2.34, apresenta uma micrografia com os defeitos mais comuns associados a problemas no polimento.

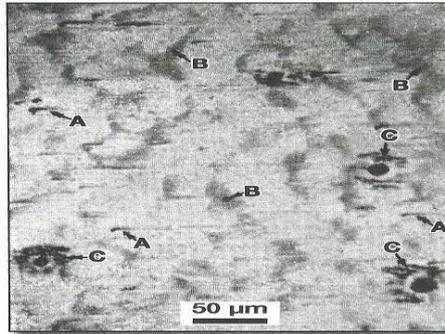


Figura 2.34: Superfície mal polida: (A) cometas; (B) manchas marrons; (C) halos em torno de pequenos orifícios (COLPAERT, 2008, p. 76).

3) *Exame ao microscópio para a observação das ocorrências visíveis sem ataque*

O exame ao microscópio antes da realização de qualquer ataque tem duas funções: permitir avaliar a qualidade do polimento, pois alguns defeitos podem influenciar os resultados do ataque químico, e avaliar as características estruturais que são visíveis, como inclusões não-metálicas, grafita, trincas, porosidades, entre outros (COLPAERT, 2008, p. 77).

4) *Ataque da superfície por um reagente químico adequado*

A primeira etapa para a realização de um ataque químico é escolher o reagente correto. Logo em seguida, é necessário atentar aos cuidados de segurança do trabalho e aos cuidados ambientais relativos ao uso e descarte do reagente. Por fim, o ataque propriamente dito é feito.

Existe mais de uma forma de realizar o ataque químico em amostras. Uma delas é agitar o corpo-de-prova com a superfície polida mergulhada no reagente. A técnica do esfregaço é também bastante utilizada para fins de ataque químico. Vale destacar que determinados reagentes são suficientemente ativos somente quando usados imediatamente após a preparação da amostra.

A duração do ataque varia com a concentração do reagente, com a estrutura do material e de material para material. Para aços comuns e ferros fundidos, por exemplo, o

tempo empregado é da ordem de 5 a 15 segundos. Terminado o ataque, lava-se imediatamente a superfície atacada com álcool e se seca a amostra com ar quente.

Algumas características da microestrutura são mais bem reveladas com ataques mais leves enquanto outras necessitam de tempos maiores de ataque.

5) *Exame ao microscópio para a observação da microestrutura;*

6) *Registro do aspecto observado (fotografia);*

2.8.2 Ensaio de Dureza Rockwell

O ensaio Rockwell, que leva o nome do seu criador, é hoje o processo de medição de dureza mais utilizado no mundo inteiro, devido à rapidez e à facilidade de execução, facilidade em detectar pequenas diferenças de durezas e pequeno tamanho da impressão.

Por volta de 1922, Rockwell desenvolveu um método de ensaio de dureza que utilizava um sistema de pré-carga. Este método apresenta algumas vantagens em relação aos ensaios Brinell, por exemplo, pois permite avaliar a dureza de metais diversos, desde os mais moles até os mais duros e a leitura da máquina se baseia, somente, na profundidade de penetração do penetrador na amostra e não nas dimensões da impressão no corpo de prova (GARCIA, 2012, p. 129).

Neste método, a carga do ensaio é aplicada em etapas. No primeiro estágio se aplica uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois se aplica a carga do ensaio propriamente dita. A leitura do grau de dureza é feita diretamente num mostrador acoplado à máquina de ensaio, de acordo com uma escala predeterminada, adequada à faixa de dureza do material.

Os penetradores utilizados na máquina de ensaio de dureza Rockwell são do tipo esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (cone de diamante com 120° de conicidade). Quando se utiliza o penetrador cônico de diamante, deve-se fazer a leitura do resultado na escala externa do mostrador de cor preta. Já se o penetrador esférico for usado, faz-se a leitura do resultado na escala vermelha. Nos equipamentos com mostrador digital, uma vez fixada a escala a ser usada, o valor é dado diretamente na escala determinada.

A profundidade da impressão produzida pela carga maior é a base da medida do ensaio Rockwell. A figura 2.35 mostra a representação esquemática da profundidade produzida por

um penetrador cônico de diamante, no qual a indicação 1 representa a profundidade causada pela pré-carga, a indicação 2 representa a profundidade causada pela carga maior, a indicação 3 representa o penetrador, a indicação 4 representa a ponta de diamante e a indicação 5 representa a medida linear que é a base da leitura do resultado de dureza.

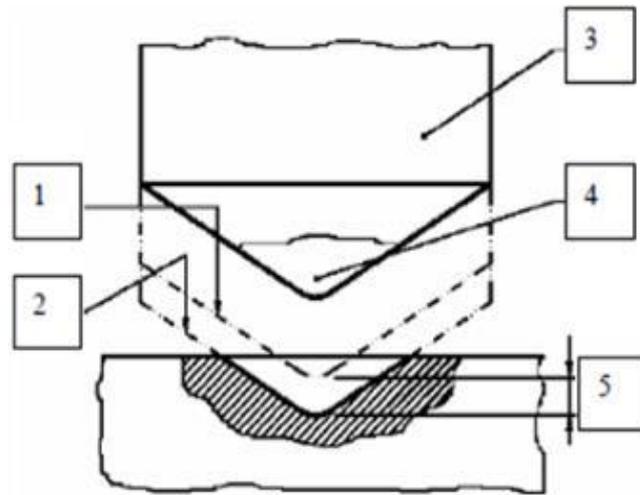


Figura 2.35: Representação produzida por um penetrador cônico de diamante (FAHOR, 2014).

Segundo Garcia (2012, p. 129), os ensaios Rockwell baseiam-se na medição da profundidade de um penetrador, subtraída a recuperação elástica devido à retirada de uma carga maior e à profundidade causada pela aplicação de uma carga menor. O aproveitamento de uma carga inicial menor, seguida por uma carga principal maior, aumenta a precisão do ensaio.

2.8.2.1 Métodos de ensaio Rockwell

O método Rockwell é subdividido em dois grupos: *Rockwell normal* e *Rockwell superficial*. A diferença entre os grupos está no valor da carga utilizada para a realização do ensaio. A dureza Rockwell normal aplica um valor de carga maior, até 150 Kgf, enquanto a Rockwell superficial aplica valores até 45 Kgf (GARCIA, 2012, p. 130).

A máquina mais precisa mede a dureza Rockwell superficial e é indicada para avaliação de dureza em folhas finas, lâminas bem como camadas superficiais de materiais. Na máquina Rockwell normal, cada divisão da escala equivale a 0,02 mm e na máquina Rockwell superficial, cada divisão equivale a 0,01 mm.

As escalas de dureza Rockwell foram determinadas em função do tipo de penetrador e do valor da carga maior. Nos ensaios de dureza Rockwell normal utiliza-se uma pré-carga de 10 Kgf e a carga maior pode ser de 60, 100 ou 150 Kgf. Nos ensaios de dureza Rockwell superficial a pré-carga é de 3 Kgf e a carga maior pode ser de 15, 30 ou 45 Kgf. A tabela 2.13 mostra os métodos de dureza existentes com suas respectivas pré-cargas e cargas.

Tabela 2.13: Tipos de métodos de dureza com suas respectivas cargas (GARCIA, 2012, p. 130).

TIPO DE ENSAIO	PRÉ-CARGA	CARGA
Rockwell Comum	10 Kgf	60 Kgf
		100 Kgf
		150 Kgf
Rockwell Superficial	3 Kgf	15 Kgf
		30 Kgf
		45 Kgf

Estas escalas não tem relação entre si. Por isso, não faz sentido comparar a dureza de materiais submetidos a ensaio de dureza Rockwell utilizando escalas diferentes, ou seja, um material ensaiado numa escala só pode ser comparado a outro material ensaiado na mesma escala (FAHOR, 2014, p. 5). A figura 2.36 e figura 2.37 mostram as escalas mais utilizadas nos processos industriais.

Escala	Cor da escala	Carga maior	Penetrador	Faixa de utilização	Campo de aplicação
A	Preta	60	Diamante cone 120°	20 a 80 HRA	Carbonetos, folhas de aço com fina camada superficial endurecida.
C	Preta	150	Diamante cone 120°	20 a 70 HRC	Aço, titânio, aços com camada endurecida profunda, materiais com HRB>100.
D	Preta	100	Diamante cone 120°	40 a 77 HRD	Chapas finas de aço com média camada endurecida.
B	Vermelha	100	Esfera aço 1,5875 mm	20 a 100 HRB	Ligas de cobre, aços brandos, alumínio, ferro maleável.
E	Vermelha	100	Esfera aço 3,175 mm	70 a 100 HRB	Ferro fundido, ligas de alumínio e de magnésio.
F	Vermelha	60	Esfera aço 1,5875 mm	60 a 100 HRF	Ligas de cobre recozidas, folhas finas de metais moles.
G	Vermelha	150	Esfera aço 1,5875 mm	30 a 94 HRG	Ferro maleável, ligas de cobre-níquel-zinco e de cobre-níquel
H	Vermelha	60	Esfera aço 3,175 mm	80 a 100 HRH	Alumínio, zinco, chumbo.
K	Vermelha	150	Esfera aço 3,175 mm	40 a 100 HRK	Metais de mancais e outros muito moles ou finos.

Figura 2.36: Escala de dureza Rockwell normal e aplicações (FAHOR, 2014, p. 6).

Escala	Cor da escala	Carga maior	Penetrador	Faixa de utilização	Campo de aplicação
15 N	Preta	15	Diamante cone 120	65 a 90 HR 15 N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD.
30 N	Preta	30	Diamante	40 a 80 HR 30 N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD.
45 N	Preta	45	Diamante	35 a 70 HR 45 N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD.
15 T	Vermelha	15	Esfera aço 1,5875 mm	50 a 94 HR 15 T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG.
30 T	Vermelha	30	Esfera aço 1,5875 mm	10 A 84 HR 30 T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG.
45 T	Vermelha	45	Esfera aço 1,5875 mm	10 A 75 HR 45 T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG.

Figura 2.37: Escala de dureza Rockwell normal e aplicações (FAHOR, 2014, p. 6).

Nos casos de medições em superfícies cilíndricas convexas e esféricas, as correções são dadas pelas figuras 2.38, 2.39, 2.40 e 2.41, que correspondem às escalas que empregam penetrador de diamante e escalas que empregam penetradores esféricos, respectivamente. Soma-se a correção ao valor de dureza medido.

Lectura de dureza Rockwell / Dureza Rockwell indicada	Radio de curvatura / Raio de curvatura mm								
	3	5	6,5	8	9,5	11	12,5	16	19
20				2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0
25			3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
30			2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5
35		3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5
40		2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5
45	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
50	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
55	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0
60	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
65	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
70	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
75	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0
80	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0
85	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0
90	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0

NOTA No se consideran aceptables correcciones mayores de 3 HRA, HRC y HRD, y por lo tanto no están incluidas en esta Tabla. / Correções superiores a 3 HRA, HRC e HRD não são consideradas aceitáveis e, portanto, não estão incluídas nesta Tabela.

Figura 2.38: Ensaio com penetrador cônico de diamante – escalas A, C e D (NBR 6508, 2008, p. 19).

Lectura de dureza Rockwell / Dureza Rockwell indicada	Radio de curvatura / Raio de curvatura						
	mm						
	3	5	6,5	8	9,5	11	12,5
20				4,5	4,0	3,5	3,0
30			5,0	4,5	3,5	3,0	2,5
40			4,5	4,0	3,0	2,5	2,5
50			4,0	3,5	3,0	2,5	2,0
60		5,0	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0
70		4,0	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5
80	5,0	3,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,5
90	4,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0
100	3,5	2,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5

NOTA No se consideran aceptables correcciones mayores de 5 HRB, HRF y HRG, y por lo tanto no están incluidas en esta Tabla. / Correções superiores a 5 HRB, HRF e HRG não são consideradas aceitáveis e, portanto, não estão incluídas nesta Tabela.

Figura 2.39: Ensaio com penetrador cônico de diamante – escalas B, F e G (NBR 6508, 2008, p. 20).

Lectura de dureza Rockwell superficial / Dureza Rockwell superficial indicada	Radio de curvatura ^e / Raio de curvatura ^e					
	mm					
	1,6	3,2	5	6,5	9,5	12,5
20	(6,0) ^d	3,0	2,0	1,5	1,5	1,5
25	(5,5) ^d	3,0	2,0	1,5	1,5	1,0
30	(5,5) ^d	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0
35	(5,0) ^d	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0
40	(4,5) ^d	2,5	1,5	1,5	1,0	1,0
45	(4,0) ^d	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
50	(3,5) ^d	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
55	(3,5) ^d	2,0	1,5	1,0	0,5	0,5
60	3,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5
65	2,5	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5
70	2,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
75	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0
80	1,0	0,5	0,5	0,5	0	0
85	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
90	0	0	0	0	0	0

^a Estas correcciones son sólo aproximadas y representan los promedios, redondeados a 0,5 unidades de dureza superficial Rockwell, de numerosas observaciones hechas sobre superficies de ensayo con las curvaturas dadas en esta Tabla. / Estas correções são apenas aproximadas e representam valores médios, arredondados de 0,5 unidades de dureza Rockwell superficial, de várias observações reais de superfícies de ensaio com as curvaturas dadas nesta Tabela.

^b Cuando se ensayen superficies cilíndricas convexas, la exactitud del ensayo se verá seriamente afectada por la falta de alineación del dispositivo de elevación, del yunque en V y del penetrador, así como por imperfecciones en el acabado superficial y en la rectitud del cilindro. / Quando são realizados ensaios em superfícies cilíndricas convexas, a exatidão do ensaio será seriamente afetada pelo desalinhamento do parafuso de elevação, apoio em V e penetrador, assim como pelas imperfeições no acabamento superficial e na retilidade do cilindro.

^c Para radios distintos de los indicados en esta Tabla, las correcciones pueden obtenerse por interpolación lineal. / Para outros raios além daqueles dados nesta Tabela, as correções poderão ser derivadas por interpolação linear.

^d Las correcciones dadas entre paréntesis no deben usarse salvo que haya acuerdo. / As correções dadas entre parênteses não devem ser utilizadas, exceto por acordo.

Figura 2.40: Ensaio Rockwell superficial – escalas N (NBR 6508, 2008, p. 20).

Lectura de dureza Rockwell superficial / Dureza Rockwell superficial indicada	Radio de curvatura ^c / Raio de curvatura ^c						
	1,6	3,2	5	6,5	8	9,5	12,5
20	(13) ^d	(9,0) ^d	(6,0) ^d	(4,5) ^d	(3,5) ^d	3,0	2,0
30	(11,5) ^d	(7,5) ^d	(5,0) ^d	(4,0) ^d	(3,5) ^d	2,5	2,0
40	(10,0) ^d	(6,5) ^d	(4,5) ^d	(3,5) ^d	3,0	2,5	2,0
50	(8,5) ^d	(5,5) ^d	(4,0) ^d	3,0	2,5	2,0	1,5
60	(6,5) ^d	(4,5) ^d	3,0	2,5	2,0	1,5	1,5
70	(5,0) ^d	(3,5) ^d	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0
80	3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5
90	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5

^a Estas correcciones son sólo aproximadas y representan los promedios, redondeados a 0,5 unidades de dureza superficial Rockwell, de numerosas observaciones hechas sobre superficies de ensayo con las curvaturas dadas en esta Tabla. / Estas correções são apenas aproximadas e representam valores médios, arredondados de 0,5 unidades de dureza Rockwell superficial de várias observações reais de superficies de ensaio com as curvaturas dadas nesta Tabela.

^b Cuando se ensayen superficies cilíndricas convexas, la exactitud del ensayo se verá seriamente afectada por la falta de alineación del dispositivo de elevación, del yunque en V y del penetrador, así como por imperfecciones en el acabado superficial y en la rectitud del cilindro. / Quando são realizados ensaios em superficies cilíndricas convexas, a exatidão do ensaio será seriamente afetada pelo desalinhamento do parafuso de elevação, apolo em V e penetrador, assim como pelas imperfeições no acabamento superficial e na retitude do cilindro.

^c Para radios distintos de los indicados en esta tabla, las correcciones pueden obtenerse por interpolación lineal. / Para outros raios além daqueles dados nesta Tabela, as correções poderão ser derivadas por interpolação linear.

^d Las correcciones dadas entre paréntesis no deben usarse salvo que haya acuerdo. / As correções dadas entre parênteses não devem ser utilizadas, exceto por acordo.

Figura 2.41: Ensaio Rockwell superficial – escalas T (NBR 6508, 2008, p. 21).

O número de dureza Rockwell deve ser seguido pelo símbolo HR, com um sufixo que indique a escala utilizada.

Após fazer o ensaio de dureza Rockwell, recorre-se às tabelas apresentadas anteriormente, que trazem as escalas de dureza Rockwell, sendo possível identificar as condições de realização do ensaio.

A espessura mínima do corpo de prova deve ser de 17 vezes a profundidade atingida pelo penetrador. Não há meios de medir a profundidade exata atingida pelo penetrador no ensaio de dureza Rockwell. É possível obter a medida aproximada desta profundidade (P), a partir do valor de dureza indicado na escala da máquina de ensaio, utilizando as equações a seguir:

- Penetrador de diamante conforme Eq. (4) e Eq. (5):

$$HR_{\text{normal}}: P = 0,002 \cdot (100 - HR) \quad (4)$$

$$HR_{\text{superficial}}: P = 0,001 \cdot (100 - HR) \quad (5)$$

- Penetrador de esférico conforme Eq. (6) e Eq. (7):

$$HR_{\text{normal}}: P = 0,002 \cdot (130 - HR) \quad (6)$$

$$HR_{\text{superficial}}: P = 0,001 \cdot (130 - HR) \quad (7)$$

2.8.3 Ensaio de Corrosão – Névoa salina

O ensaio de corrosão é caracterizado pela agressividade de um determinado meio corrosivo e por fornecer fundamentos básicos para o controle da corrosão.

A corrosão dos materiais metálicos é influenciada por diversos fatores que modificam o ataque químico ou eletroquímico. Por esse motivo, existem diversos tipos de ensaio de corrosão.

Para satisfazer exigências de reprodutibilidade de resultados, os ensaios de corrosão só devem ser efetuados depois de consideradas as suas exatas possibilidades de ocorrência e o desenvolvimento do processo corrosivo. Com o objetivo de evitar conclusões errôneas e visando atribuir uniformidade à execução dos ensaios, foram criadas especificações detalhadas para o processamento do ensaio de corrosão, como por exemplo, ASTM 262 – suscetibilidade de aços inoxidáveis a ataque intergranular, ASTM A279 – ensaio de corrosão por imersão total para aços inoxidáveis, ASTM B 117 (NBR-8094) – ensaio de névoa salina (*salt spray*) com exposição contínua à solução de NaCl a 5%, pH = 6,5-7,2 e temperatura de 35°C, entre outras (GENTIL, 2012, p. 310).

2.8.3.1 Ensaios de laboratório e de campo

Os ensaios de corrosão podem ser feitos no laboratório ou o campo, dependendo dos objetivos que se quer alcançar.

Nos *ensaios de laboratório*, são usados pequenos corpos de prova, a composição do meio corrosivo é fixada com exatidão, se podem manter as condições de ensaio constantes e o processo pode ser acelerado para conseguir resultados mais rápidos. É útil reproduzir esses tipos de ensaios, pois eles têm o papel de estudar o mecanismo do processo corrosivo, de indicar o material metálico mais adequado para determinado meio corrosivo, de controlar com mais rigor o processo de fabricação de materiais metálicos resistentes à corrosão, de determinar se um metal, liga ou revestimento protetor satisfaz as especificações de um ensaio de corrosão e de determinar os efeitos do processo de fabricação, das impurezas, dos tratamentos térmicos e mecânicos e do estado da superfície sobre o comportamento do material metálico em determinado meio corrosivo.

Entretanto, nos ensaios de laboratório, não se consegue reproduzir todas as condições reinantes do meio corrosivo, como por exemplo, o ensaio de névoa salina, que reproduz a

atmosfera marinha em laboratório, mas sem alguns compostos que existem nela (poluentes, temperaturas variáveis, radiações ultravioletas, entre outras).

Nos *ensaios de campo*, a peça a ser testada está submetida diretamente às condições reais do meio corrosivo e os resultados desses ensaios geralmente são obtidos depois de longo período de tempo. Além disso, as condições de ataque podem variar muito, fazendo com que sejam incontrolláveis. Para verificar a resistência à corrosão de um material e a eficiência de uma medida protetora em condições naturais de utilização, é decisivo simular o comportamento do material no campo.

Estes ensaios se realizam sob as mesmas condições das de serviço e assim, uma avaliação mais correta da ação do meio corrosivo sobre o material metálico é feita. Os resultados completos são obtidos somente depois de longos períodos de tempo porque dessa forma é verificado também a ação dos fatores aceleradores e retardadores da taxa de corrosão. Estes fatores podem ser a atmosfera, a umidade, a temperatura, os agentes poluentes, o vento, a irradiação solar, a chuva, entre outros (GENTIL, 2012, p. 310).

Embora sejam mais demorados que os ensaios de laboratório, os ensaios de campo apresentam resultados mais reais, permitindo um estudo comparativo que indicará o material mais adequado para aquele meio corrosivo. Segundo Gentil (2012, p. 311), os tipos de ensaios de campo existentes são: ensaio na atmosfera, ensaios em água do mar e ensaios no solo.

A concordância de comportamento, em meios corrosivos para ensaios de laboratório e de campo é deficiente e por isso, torna-se conveniente para os ensaios de laboratório o uso de amostras ou corpos-de-prova de materiais metálicos cujos comportamentos já são conhecidos.

Como os longos períodos dos ensaios de campo são, em muitos casos, incompatíveis com os prazos de projeto de instalação e de seleção dos materiais a serem utilizados, é comum realizar os ensaios acelerados de laboratório a fim de se ter um resultado mais rápido. Porém, é necessário ter o consentimento que este tipo de ensaio não produz as condições reais de serviço e, portanto, não é aconselhável aplicar diretamente os seus resultados sem que ocorra uma adequada análise.

Conforme o Gentil (2012, p. 311) cita, os ensaios de laboratório se realizam sob condições variadas, visando reproduzir as de utilização dos materiais, como: por imersão contínua, por imersão alternada, por imersão contínua com agitação, por ensaios com fluxo contínuo, por ensaios com líquidos em ebulição, por ensaios com líquidos a temperaturas e

pressões elevadas, por ensaios de corrosão conjugados às solicitações mecânicas, por ensaios de corrosão conjugados a pressões elevadas e altas velocidades e corrente, por cabine de umidade, por cabine de umidade com dióxido de enxofre e por cabine de névoa salina.

2.8.3.2 Avaliação

Entre os métodos para verificar os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de corrosão, a fim de avaliar qualitativa ou quantitativamente o processo corrosivo e ter uma medida de extensão do ataque, estão:

- Observação visual: permite verificar se o ataque foi uniforme ou localizado com formação de pite;
- Perda e ou ganho de peso;
- Desprendimento de hidrogênio;
- Absorção de oxigênio;
- Observação ao microscópio: permite verificar ataques intergranulares, profundidade de pite, espessura de camada de revestimento;
- Métodos eletroquímicos: permite medir a diferença de potencial entre metais diferentes (catodo e anodo);
- Métodos eletrométricos: mede-se a espessura da película de oxidação;
- Métodos óticos: analisa o crescimento da película de oxidação;
- Modificação nas propriedades físicas: verifica a ductibilidade, resistência a impacto;
- Alteração da resistência elétrica do material metálico;

Estes métodos são, em alguns casos, usados em conjunto para se obter melhor avaliação. Quando é necessário conhecer a composição química do produto de corrosão formado sobre os corpos-de-prova, empregam-se as seguintes técnicas (GENTIL, 2012, p. 311):

- Quando em quantidade adequada: a análise da composição química ocorre por via úmida, processos colorimétricos, espectrofotométricos e cromatografia;
- Quando o produto de corrosão é superficial: a análise da composição química pode ser verificada por microsonda, por dispersão de energia, por espectroscopia *Auger* e por fluorescência de raios X;

E quando se quer conhecer as características físicas do produto de corrosão, as técnicas são as seguintes:

- Morfologia: forma, homogeneidade, porosidade, continuidade, entre outros;
- Espessura;
- Estrutura cristalina;

Após observação visual, procede-se com a limpeza da peça a fim de realizar algumas das verificações citadas anteriormente. Essa limpeza pode ser feita por processo mecânico, químico e eletrolítico. Deve-se tomar cuidado para não remover o material metálico não atacado.

O *processo mecânico* utiliza escovas, abrasivos macios, choques mecânicos e limpeza ultrassônica. Já o *processo químico* remove o material corroído dissolvendo em reagente químico adequado. Estes reagentes são (GENTIL, 2012, p. 313):

- Para níquel, cobre ou suas ligas utiliza-se ácido clorídrico (15-20%);
- Para alumínio e ligas utiliza-se ácido nítrico (70%);
- Para ferro e aço utiliza-se hidróxido de sódio e zinco em pó ou ácido clorídrico concentrado contendo cloretos de estanho (II) (50 g/L) e de antimônio (III) (20 g/L);
- Para aço inoxidável utiliza-se ácido nítrico (10%, 60°C);
- Para zinco utiliza-se solução aquosa de cloreto de amônio (10%);

No caso para *limpeza eletrolítica*, retiram-se previamente por limpeza mecânica leve, os produtos de corrosão fracamente aderidos e, em seguida, procede-se à limpeza eletrolítica, colocando-se o corpo de prova como o catodo de uma cuba eletrolítica.

Além dos ensaios de campo e de laboratório, são de grande utilidade as observações que podem ser feitas nos ensaios usados na inspeção de equipamentos. Os resultados desses ensaios, juntamente com os resultados de monitoração de corrosão, permitem a indicação de medidas adequadas de proteção, pois mostram o comportamento do material metálico no meio corrosivo.

2.8.3.3 Monitoramento da corrosão

O monitoramento da corrosão pode ser definido como uma forma sistemática de medição da corrosão ou da degradação de um determinado componente de um equipamento, com o objetivo de auxiliar a compreensão do processo corrosivo e/ou obter informações úteis para o controle da corrosão e das suas consequências (GENTIL, 2012, p. 314). Isto quer dizer que as técnicas de monitoramento em detectar alterações no comportamento de materiais frente à corrosão ocorrem em tempo real, isto é, enquanto os materiais estão em uso.

O monitoramento possui os objetivos de caracterizar a natureza do ataque corrosivo, de determinar a taxa de corrosão, de avaliar os procedimentos de prevenção e controle da corrosão, de analisar as falhas decorrentes de problemas de corrosão, de auxiliar o desenvolvimento de novas formas de controle da corrosão e de executar testes e ensaios de avaliação do comportamento de materiais, inibidores e revestimentos.

Os métodos e técnicas de monitoramento são também capazes de fornecer dados que possibilitam o estabelecimento de correlações entre a cinética da corrosão e as variáveis do processo, como por exemplo, pH, temperatura e vazão. Estas informações podem ser realizadas para diagnosticar problemas de corrosão e otimizar o controle de corrosão.

Os métodos de monitoramento podem ser classificados em *não destrutivos*, *analíticos* e *métodos de engenharia de corrosão*.

Os *métodos não destrutivos* indicam a presença de ataque, fissuras, trincas, reduções de espessura de parede, defeitos internos, vazamentos, porosidades e outras formas de danos. São normalmente empregados quando os equipamentos estão em operação ou parados.

Os *métodos analíticos* visam controlar os parâmetros do meio corrosivo, como por exemplo, o pH. Eles complementam o método de engenharia de corrosão.

Os *métodos de engenharia de corrosão* podem ser aplicados em ambientes aquosos e gasosos, quando não for de natureza eletroquímica. Porém, quando for, podem ser aplicados em diversos processos corrosivos.

2.8.2.4 Taxa de corrosão

Após a realização do ensaio de corrosão e limpeza do corpo-de-prova, é verificada a perda de peso do material subtraindo-se o peso original com o peso depois do ensaio. Como a

perda de peso é influenciada pela área exposta e pelo tempo de exposição, estas variáveis são combinadas e expressas em *taxa de corrosão* (GENTIL, 2012, p. 316).

Uma unidade às vezes usada para expressar a taxa de corrosão, relacionada com a variação de massa, é o *mdd* (miligramas por decímetro quadrado de área exposta por dia). Como é difícil visualizar a profundidade de ataque em *mdd*, é comum converter esta unidade para outra que indiquem a penetração ou profundidade, que é a *ipy* (polegadas de penetração por ano).

$$ipy = mdd \times \frac{0,00144}{d} \quad (8)$$

$$mdd = ipy \times 694 \times d \quad (9)$$

Sendo *d* a densidade em gramas por centímetro cúbico.

A norma NACE Standart TM-01-69 recomenda expressar a taxa de corrosão em *mpy*, isto é, milésimo de polegada de penetração por ano, ou *mmpy* (milímetro de penetração por ano) (GENTIL, 2012, p. 316). Estas taxas podem ser calculadas das seguintes formas:

$$mpy = \frac{\text{perda de peso} \times 534}{\text{área} \times \text{tempo} \times \text{densidade do metal}} \quad (10)$$

$$mmpy = \frac{\text{perda de peso} \times 13,56}{\text{área} \times \text{tempo} \times \text{densidade do metal}} \quad (11)$$

Para conversão de *mdd* em *mpy* ou *mmpy*, podem-se as seguintes fórmulas:

$$mpy = mdd \times \frac{1,44}{d} \quad (12)$$

$$mmpy = mdd \times \frac{0,036}{d} \quad (13)$$

Deve-se observar também que os valores de taxas de corrosão só podem ser utilizados para corrosão uniforme, não se aplicando para casos de corrosão localizada como, por exemplo, puntiforme, intergranular e transgranular.

Quando o ataque é uniforme e em meio químico, os metais podem ser divididos em três grupos, de acordo com as suas taxas de corrosão e aplicação projetada:

- $mpy < 5$: metais com boa resistência à corrosão, para aplicações em partes críticas de equipamentos;
- $5 \leq mpy \leq 50$: metais usados para altas taxas de corrosão, como por exemplo, em tanques, tubulações e corpo de válvulas;
- $mpy > 50$: metais pouco resistentes e, assim, não recomendados os seus usos;

Já a norma NACE RP 0775 estabelece a classificação da corrosividade (GENTIL, 2012, p. 317), conforme tabela 2.14.

Tabela 2.14: Classificação da corrosividade conforme a norma NACE RP 0775 (GENTIL, 2012, p. 317).

Taxa de corrosão uniforme (mm/ano)	Taxa de pite (mm/ano)	Corrosividade
< 0,025	< 0,13	Baixa
0,025 a 0,12	0,13 a 0,20	Moderada
0,13 a 0,25	0,21 a 0,38	Alta
> 0,25	> 0,38	Severa

O cálculo da taxa de corrosão T em *mm/ano* sendo:

$$T = \frac{\text{perda de peso}(g) \times 365 \times 1000}{S \times t \times d} \quad (12)$$

T : taxa de corrosão (*mm/ano*)

S : área exposta da superfície (mm^2)

t : tempo

d : densidade (g/cm^3)

O cálculo da taxa de corrosão de pite T_p sendo:

$$T_p = \frac{p \times 365}{T} \quad (13)$$

p : profundidade do pite mais profundo

T : tempo de exposição

Conhecendo-se a taxa de corrosão de um material em determinado meio, pode-se estimar o tempo de vida de um equipamento. E determinada a espessura de parede para atender as características como, por exemplo, pressão, temperatura e peso do equipamento, se costuma usar uma espessura extra, conhecida como sobre-espessura de corrosão, que tem a finalidade de compensar a perda de material por corrosão durante o tempo de vida previsto para o uso do equipamento.

CAPÍTULO 3

3. Materiais e metodologia

O objetivo principal deste trabalho foi estudar os aços inoxidáveis CF8M, AISI 316L e AISI 420, sua importância dentro do contexto da indústria de petróleo, bem como investigar a microestrutura característica de cada um destes aços, sua dureza e seu comportamento quando submetido a ambiente corrosivo.

Foram utilizadas algumas peças de diferentes materiais que compõem uma das válvulas de segurança utilizadas pela Petrobrás durante o processo de extração e refino do petróleo. A partir destas peças foram realizados os testes de micrografia por microscópio óptico, de dureza e de corrosão por névoa salina para a sua caracterização com o objetivo de comparar os resultados coletados com os resultados da literatura.

3.1 Procedimento Experimental

Foram realizados três procedimentos experimentais com o objetivo de caracterizar os materiais utilizados.

3.1.1 Micrografia por microscopia óptica

A técnica de microscopia óptica seguiu a norma ABNT NBR 13284:1995 e foi utilizada para análise das amostras os aços CF8M, AISI 316L e AISI 420. A preparação metalográfica foi realizada segundo procedimentos convencionais:

- 1º passo: preparação do corpo-de-prova, por meio de corte das hastes em 420 e 316L e do castelo em CF8M da válvula de segurança;
- 2º passo: embutimento das amostras em resina fenólica (baquelite) na máquina Arotec PRE-30;
- 3º passo: lixamento, na máquina Arotec Aropol 2V, utilizando as lixas de granulometria 100, 200, 320, 400, 500 e 600;
- 4º passo: polimento com a pasta de diamante em panos de 6 μm , 3 μm , e 1 μm na máquina Arotec Aropol 2V;
- 5º passo: ataque químico na superfície polida da amostra;

- 6º passo: visualização da microestrutura da amostra atacada pelo reagente por meio do microscópio óptico;
- 7º passo: registro das imagens, através de fotografias, feitas pelo software Stream Essentials instalado em um computador acoplado ao microscópio;

O objetivo com esta série de lixamentos e polimentos foi obter na superfície da amostra um espelhamento com o mínimo número de riscos possíveis para que, assim, pudéssemos obter fotografias nítidas das microestruturas e de seus contornos de grão.

A figura 3.1 mostrando os equipamentos utilizados e os corpos-de-prova.

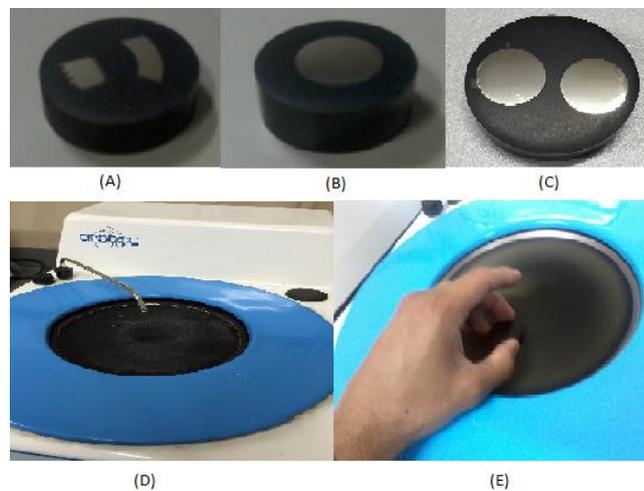


Figura 3.1: (A) amostra de aço CF8M; (B) amostra de aço 420; (C) amostra de aço 316L; (D) Lixadora Arotex Aropol 2V; (E) Politriz Arotex Aropol 2V.

3.1.2 Ensaio de Dureza Rockwell

Este ensaio baseia-se na medição da profundidade de penetração de um penetrador, subtraindo-se a recuperação elástica devido à retirada de uma carga maior e a profundidade causada pela aplicação de uma carga menor. O tipo do penetrador utilizado nesse ensaio pode ser do tipo esférico ou cônico.

Para o ensaio de dureza Rockwell utilizou-se como base a norma ABNT NBR MN ISO 6508-1:2008 e as informações teóricas descritas anteriormente. Foi escolhido o tipo de dureza Rockwell A devido ao fato de possuir uma gama maior de resultados, em comparação com as durezas Rockwell B e C.

As medidas de dureza foram realizadas, desprezando-se a primeira leitura que serviu apenas para a acomodação do penetrador na amostra. Utilizou-se o equipamento da marca Instron Wolpert modelo Dia Testor 7551 com mostrador digital e os penetradores cônicos de diamante e aço. A figura 3.2 abaixo mostra a máquina de medição de dureza utilizada no ensaio.



Figura 3.2: Máquina de ensaio de dureza Instron Wolpert modelo Dia Testor 7551 com mostrador digital.

Durante a realização do ensaio de dureza Rockwell observou-se a distância de quatro vezes o diâmetro da impressão entre os centros de cada impressão e não menos de duas vezes e meia desse mesmo diâmetro, em relação as bordas dos corpos de prova. Além disso, foi assegurado, durante a realização do ensaio, que a superfície do corpo-de-prova a ser penetrada estivesse em um plano normal ao eixo do penetrador e à linha de ação da força de penetração, evitando assim, o deslocamento do corpo-de-prova sobre a base.

O procedimento do ensaio de dureza resume-se conforme descrito a seguir:

- 1º passo: aproximar a superfície do corpo de prova no penetrador;
- 2º passo: submeter o corpo de prova a uma pré-carga de 10 Kgf durante 3 segundos;
- 3º passo: aplicar a carga maior de 60 Kgf por 6 segundos;
- 4º passo: retirar a carga e fazer a leitura do valor indicado no mostrador digital;

- 5º passo: caso a medição seja feita em uma superfície curva, somar ao valor indicado no mostrador o fator de correção, conforme exposto na norma.

3.1.3 Ensaio de Corrosão – Névoa Salina

O ensaio de corrosão por névoa salina segue a norma *ABNT NBR 8094:1983 - Material metálico revestido e não revestido: Corrosão por exposição à névoa salina*. Foram utilizadas para análise as amostras em CF8M, AISI 316L e AISI 420. A preparação do ensaio foi realizada segundo os procedimentos convencionais:

- 1º passo: preparação do corpo-de-prova por meio de corte das hastes em 420 e 316L e do castelo em CF8M da válvula de segurança;
- 2º passo: realização das pesagens das amostras na balança *Marte* antes de iniciar o ensaio;
- 3º passo: colocar as amostras penduradas por meio de um barbante dentro da máquina de ensaio *Bass Equipamentos Ltda*, como pode ser visto na figura 3.3;
- 4º passo: início do ensaio contínuo por 48 horas sob uma atmosfera de solução aquosa com 5% de cloreto de sódio (NaCl) em sua composição, com uma pressão interna de 1 Kgf/cm² e com uma temperatura de 25±2°C;
- 5º passo: retirada das amostras após o término do ensaio e realização de suas pesagens;
- 6º passo: comparação das pesagens realizadas, antes e depois do ensaio, para cada uma das amostras;



Figura 3.3: Amostras presas e penduras dentro da máquina *Bass Equipamentos Ltda*.

CAPÍTULO 4

4. Resultados e discussões

4.1 Resultados de micrografia por microscopia óptica

4.1.1 Aço Inoxidável CF8M

Para a revelação das microestruturas do aço inoxidável austenítico CF8M foi utilizado o reagente Água Régia. O ataque químico foi do tipo imersão durante um período de cinco segundos. Após o ataque, obtivemos como microestrutura as fases austenita e ferrita. As figuras 4.1 e 4.2, apresentam duas micrografias, com aumentos distintos, da amostra de aço inoxidável CF8M fundido, aonde a fase austenítica aparece com uma coloração mais escura enquanto a fase ferrítica aparece mais clara. Alguns pontos de corrosão (corrosão tipo pite) causados pelo reagente químico, utilizado para revelar a microestrutura, foram destacados nas duas figuras.

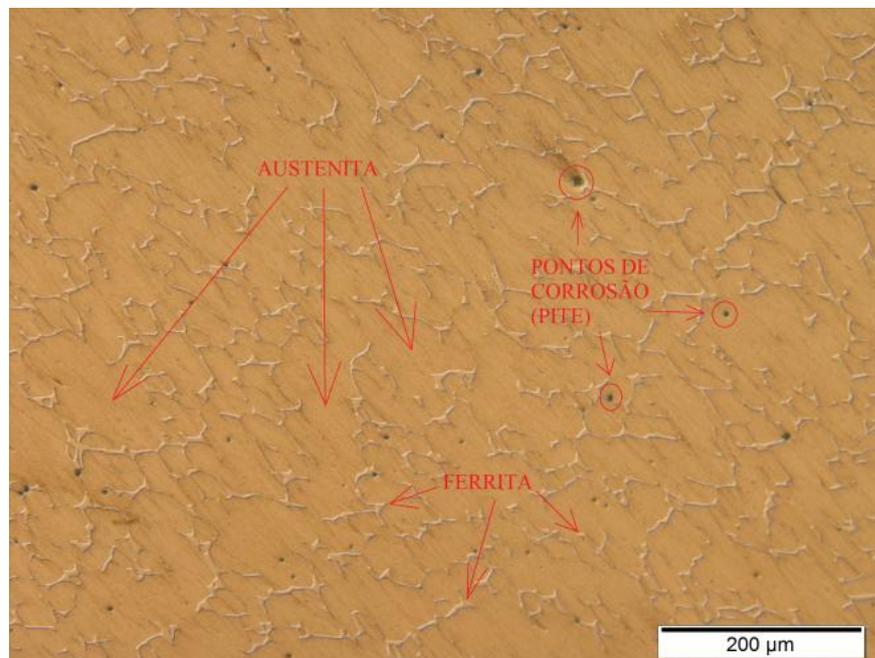


Figura 4.1: Estrutura típica de um aço inoxidável austenítico CF8M com um aumento de 200x. Reagente: Água Régia.

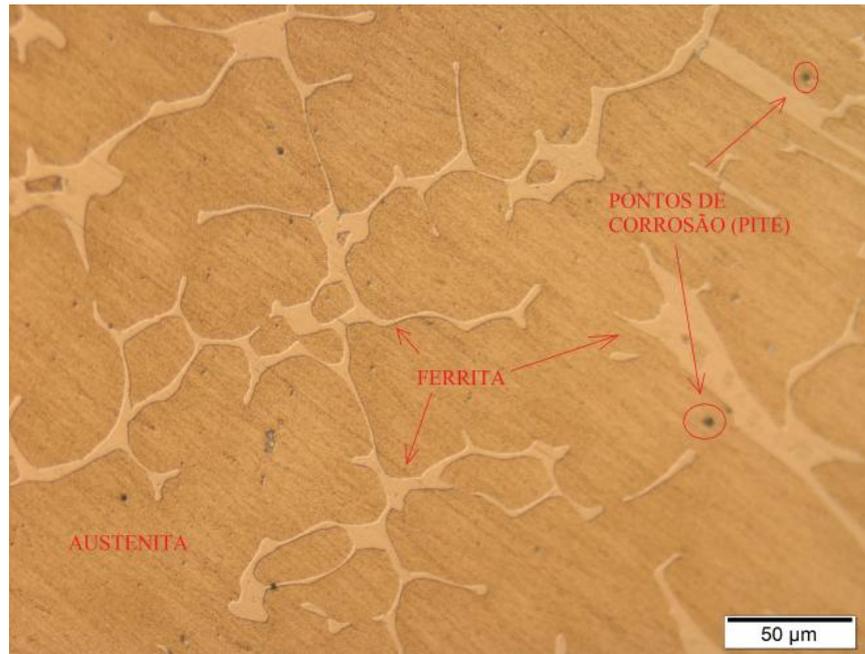


Figura 4.2: Estrutura típica de um aço inoxidável austenítico CF8M com um aumento de 500x. Reagente: Água Régia.

A austenita é a fase principal deste composto, juntamente com a ferrita, porém em menor quantidade e de menor tamanho. Percebe-se que a microestrutura revelada é muito similar com a microestrutura mostrada na figura 2.23.

4.1.2 Aço inoxidável AISI 316L

O próximo material a ser ensaiado foi o aço inoxidável 316L. Primeiramente, foi usado o ataque químico por esfregamento com Vilella, durante um período de sete minutos. Neste tipo de ataque, um algodão embebido em solução química é passado na superfície da amostra durante o tempo necessário para a revelação da sua microestrutura. Entretanto, o ataque com o reagente Vilella não revelou nem a microestrutura e nem o contorno de grão do material. Devido a isso, foi necessário submeter a amostra a um novo polimento para retirar a parte de material atacada pelo reagente e realizar um novo ataque. Conseguindo uma superfície isenta de riscos e limpa novamente, iniciamos um novo ataque químico por imersão com Água Régia, durante um período de 5 segundos. Após este ataque, a microestrutura foi revelada, e pode ser vista na figura 4.3.

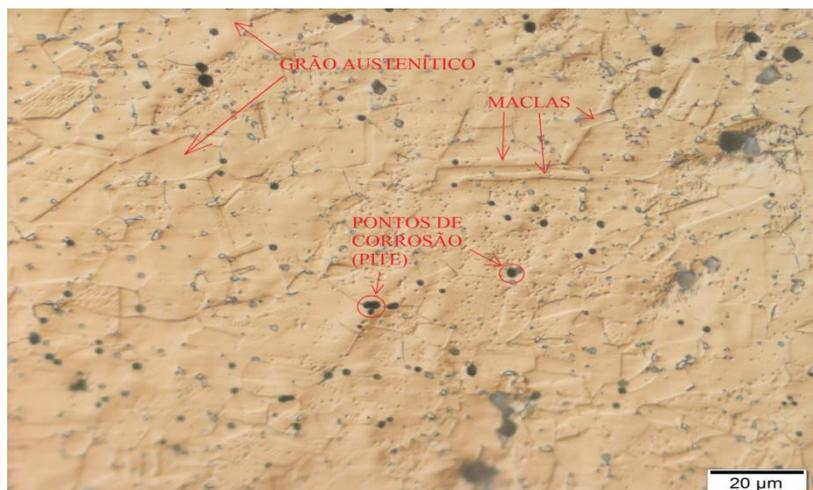


Figura 4.3: Estrutura típica de um aço inoxidável austenítico 316L laminado revelando grão de austenita e *maclas*. Reagente: Água Régia. A foto foi tirada com um aumento de 1000x.

Pode-se perceber pela imagem que a microestrutura é puramente austenítica com pouca ou quase nenhuma revelação de contorno de grão. Isto indica que o ataque não foi muito eficaz para revelar este contorno. Um tempo maior de ataque poderia melhorar o aspecto e assim, revelar melhor os contornos. Porém, um tempo maior de ataque também poderia aumentar o número de pontos de corrosão por *pite* no material.

O reagente Água Régia utilizado neste ataque revelou maclas de deformação na microestrutura.

Pode-se perceber que a microestrutura obtida no teste de micrografia é um pouco diferente da microestrutura da figura 2.25, que corresponde a uma estrutura bruta de fusão proveniente de um processo de fundição. Pelo fato do aço inoxidável 316L da figura 4.3 ter sido submetido a um processo de deformação por laminação, surgiu como microestrutura austenítica com maclas de deformação, enquanto a microestrutura do aço inoxidável 316L fabricado por fundição corresponde a uma matriz austenítica com ferrita.

4.1.3 Aço inoxidável AISI 420

A terceira amostra analisada foi a de aço inoxidável 420. Para esta amostra, foi usado o ataque químico por imersão com o reagente Água Régia, durante um período de cinco segundos. Entretanto, o ataque não revelou a microestrutura e nem o contorno de grão do material de maneira nítida.

Pela falta de eficiência no ataque com este reagente, tentou-se realizar um novo

ataque com outro reagente químico. Para isso, primeiro a amostra foi submetida a um novo polimento para tirar a parte de material que foi atacado pelo reagente anterior e assim, foi realizado um novo ataque. Conseguindo uma superfície isenta de riscos e limpa novamente, iniciamos um novo ataque químico por esfregamento com o reagente Vilella, durante um período de 5 segundos. Após este ataque, o material revelou de uma maneira pouco nítida a microestrutura do aço inoxidável martensítico, conforme pode se ver nas figuras 4.4 e 4.5.

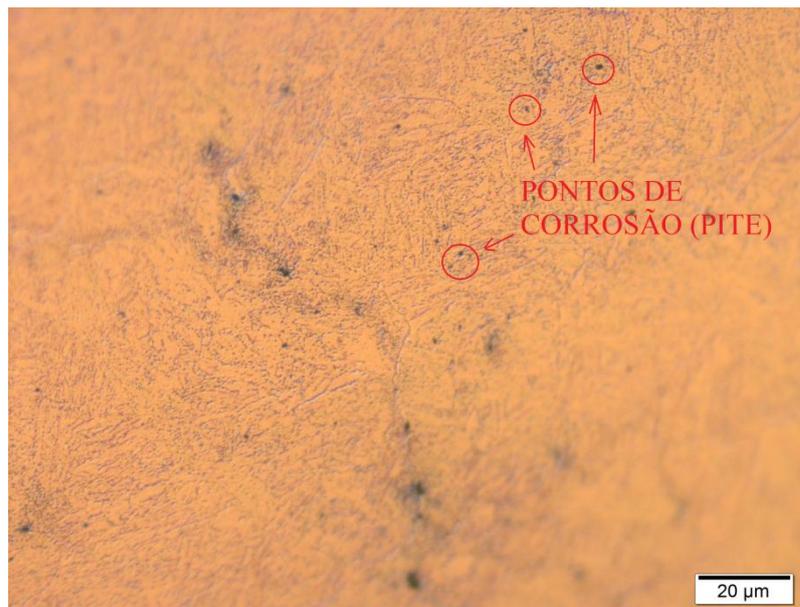


Figura 4.4: Amostra de aço inoxidável 420. Microestrutura não revelada com pontos de corrosão (pite). Reagente: Água Régia. Aumento de 1000x.

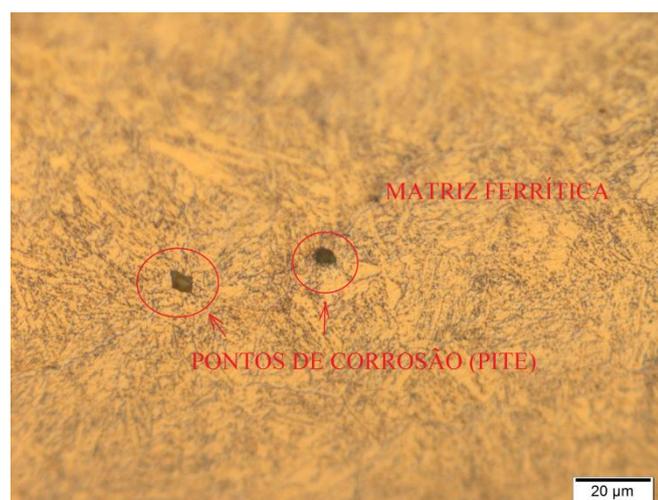


Figura 4.5: Amostra de aço inoxidável 420. Matriz ferrítica com pontos de corrosão (pite). Reagente: Vilella. Aumento de 1000x.

Comparando a microestrutura revelada pelo reagente Vilella com as microestruturas das figuras 2.26 e 2.27, no estado recozido e temperado, respectivamente, percebe-se que as microestruturas reveladas se aproximam mais das microestruturas da figura 4.5. Logo, o aço inoxidável martensítico AISI 420 utilizado no ensaio se encontrava na condição de recozido e não na condição de temperado, possuindo assim, uma estrutura ferrítica.

4.2 Resultados do ensaio de dureza Rockwell

4.2.1 Aço inoxidável CF8M

Iniciou-se a medição da dureza no material CF8M com pré-carga de 10 Kgf e carga de 60 Kgf a partir de um penetrador cônico de diamante 120°. A figura 4.6 abaixo mostra a superfície do castelo de uma válvula de segurança utilizada no teste de dureza. As identificações foram registradas na face plana e superior da peça.



Figura 4.6: Castelo da válvula de segurança.

Os resultados foram obtidos conforme mostrado na tabela 4.1 abaixo, no qual a média das medições encontradas foi de 47,3 HRA.

Tabela 4.1: Média das medições de dureza Rockwell A para o aço inoxidável CF8M.

Medição	Dureza (HRA)
1	46,9
2	48
3	46,9
Média	47,3

4.2.2 Aço inoxidável AISI 316L

O procedimento de medição da dureza continuou com o material em aço inoxidável AISI 316L, com pré-carga de 10 Kgf e carga de 60 Kgf a partir de um penetrador cônico de diamante 120°. A figura 4.7 abaixo mostra a superfície do capuz de uma válvula de segurança utilizada no teste de dureza. As identações foram registradas na face plana e superior da peça.



Figura 4.7: Capuz da válvula de segurança.

Os resultados foram obtidos conforme mostrado na tabela 4.2 abaixo, no qual a média das medições encontradas foi de 51,1 HRA.

Tabela 4.2: Média das medições de dureza Rockwell A para o aço inoxidável 316L.

Medição	Dureza (HRA)
1	51
2	51,1
3	51,2
Média	51,1

4.2.3 Aço inoxidável AISI 420

Finalizamos o procedimento de medição da dureza com a amostra em aço inoxidável AISI 420, com pré-carga de 10 Kgf e carga de 60 Kgf a partir de um penetrador cônico de diamante 120°. Especificamente para este último ensaio, a medição foi realizada na superfície cilíndrica da peça, por ser a superfície perpendicular à linha de ação do penetrador, e, conforme a norma deve-se considerar um fator de correção de 0,5 para um raio de curvatura

de 8 mm, somados a cada valor obtido nas medições. A figura 4.8 abaixo mostra a superfície da peça utilizada.



Figura 4.8: Pedaco de uma haste da válvula de segurança.

Assim, os resultados foram obtidos conforme mostrado na tabela 4.3 abaixo (medições já consideradas com o fator de correção), no qual a média das medições encontradas foi de 59,6 HRA.

Tabela 4.3: Média das medições de dureza Rockwell A para o aço inoxidável 420.

Medição	Dureza (HRA)
1	59,6
2	60,9
3	58,2
Média	59,6

Os valores de dureza tabelados dos aços CF8M, AISI 316L e AISI 420 foram encontrados na escala de dureza Rockwell B. Assim, convertendo os resultados obtidos no ensaio de Rockwell A para Rockwell B, obtemos os resultados conforme é mostrado na tabela 4.4 abaixo.

Tabela 4.4: Conversão dos resultados de dureza Rockwell A em Rockwell B.

Tipo	Dureza (HRA)	Dureza (HRB)
CF8M	47,3 HRA	76 HRB
316L	51,1 HRA	83 HRB
420	59,6 HRA	98 HRB

Comparando estes resultados encontrados no ensaio em Rockwell B com os valores tabelados, constatamos que as durezas dos aços CF8M, AISI 316L e AISI 420 estão próximas dos seus respectivos valores tabelados, conforme pode ser visto na tabela 4.5 abaixo.

Tabela 4.5: Comparativo dos resultados de dureza nos ensaios com os valores tabelados.

Tipo	Dureza encontrada no ensaio (HRB)	Dureza tabelada (HRB)
CF8M	76 HRB	79 HRB
316L	83 HRB	85 HRB
420	97 HRB	92 HRB

Pode-se perceber que a dureza encontrada para o aço inoxidável AISI 420 é próxima do valor quando este aço é submetido, somente, ao tratamento térmico de recozimento. Conforme mostra o Lyman (1961), a dureza deste aço, quando submetido a um tratamento térmico de têmpera, está em torno de 78 HRA. Observa-se que para este valor de dureza, não há medição na escala B.

4.3 Resultados do ensaio de corrosão por névoa salina

4.3.1 Aços inoxidáveis CF8M, AISI 316L e AISI 420

Após a retirada das amostras que ficaram submetidas a uma atmosfera de névoa salina durante 48 horas ininterruptas, se constatou visualmente que o corpo-de-prova em 420 sofreu uma corrosão do tipo contínua em toda a sua superfície. Entretanto, as amostras em CF8M e 316L não aparentaram ter sofrido corrosão.

Segue abaixo a figura 4.9 que mostra o aspecto das amostras após o ensaio.



Figura 4.9: Amostras após o ensaio de corrosão.

Entretanto, ao realizar as pesagens das amostras, antes e depois do ensaio, notou-se um aumento das massas dos corpos-de-prova, conforme pode ser visto na tabela 4.6 abaixo.

Tabela 4.6: Comparativo dos resultados de pesagem, em gramas, das amostras em CF8M, AISI 316L e AISI 420.

Tipo	Peso antes do ensaio (g)	Peso depois do ensaio (g)
CF8M	23,422 g	23,432 g
316L	24,849 g	24,855 g
420	38,172 g	38,203 g

Seguem abaixo as figuras 4.10, 4.11 e 4.12 mostrando os aspectos físicos dos materiais antes e depois do ensaio.

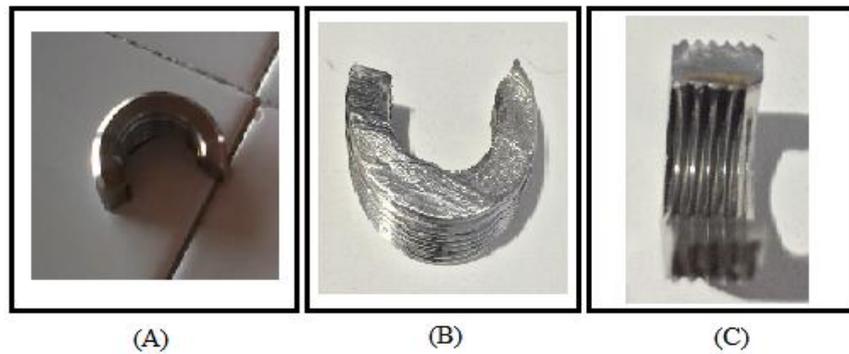


Figura 4.10: Aço inoxidável CF8M - (A) amostra em CF8M antes do ensaio; (B) amostra após o ensaio sem apresentar pontos do corrosão; (C) amostra após o ensaio apresentando início de corrosão.

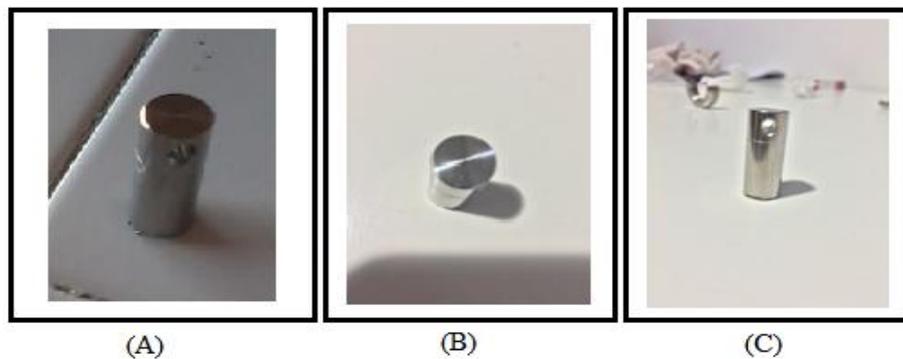


Figura 4.11: Aço inoxidável 316L - (A) amostra antes do ensaio; (B) amostra após o ensaio sem apresentar pontos do corrosão; (C) amostra após o ensaio sem apresentar pontos do corrosão.

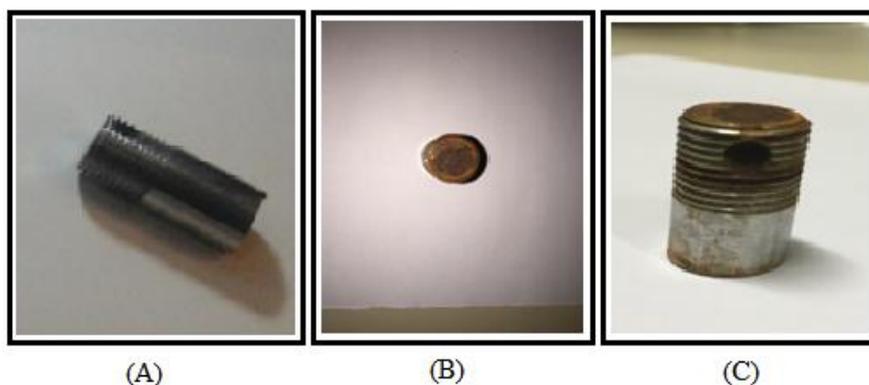


Figura 4.12: Aço inoxidável 420 - (A) amostra antes do ensaio; (B) amostra após o ensaio apresentando corrosão em toda a face plana; (C) amostra após o ensaio apresentando corrosão em todo o seu corpo cilíndrico.

Após a visualização das amostras e da comparação de suas pesagens, antes e depois do ensaio, podemos determinar que o corpo-de-prova em aço 420 foi o que mais sofreu corrosão, pois apresentou o maior ganho de massa devido à combinação de O_2 com o ferro da composição, fazendo surgir o óxido de ferro (ferrugem). Já o material em 316L foi o que menos sofreu alteração de massa e visualmente não apresentou pontos localizados de corrosão. No caso do aço CF8M, o aumento de massa do material também foi pequena, mas apresentou corrosão somente na face onde ocorreu o corte da peça para o seu preparo ao ensaio.

Assim, se pode dizer que o aço AISI 420 possui a menor resistência à corrosão por névoa salina entre os três aços estudados. Este resultado mostra que o aço martensítico em questão não possui a resistência à corrosão característica deste tipo de material, sendo desta forma um aço que foi submetido a um tratamento térmico de recozimento e não de têmpera. Além disso, a ausência de molibdênio e níquel e um menor teor de cromo em sua composição química contribuem ainda mais para a diminuição desta resistência. No caso dos aços em 316L e CF8M, eles se comportaram bem no ensaio e apresentaram uma boa resistência à corrosão, pois ambos possuem em suas respectivas composições químicas alto teor de cromo os elementos molibdênio e níquel.

Vale ressaltar que para este ensaio não houve a limpeza das amostras, após o término do ensaio, e nem o cálculo da taxa de corrosão.

CAPÍTULO 5

5. Conclusão

Os materiais em CF8M, AISI 316L e AISI 420 que compõem a PSV foram testados pelos ensaios de metalografia por microscópio óptico, de dureza Rockwell e de corrosão por névoa salina e apresentaram resultados parecidos com os encontrados na literatura.

Percebe-se que estes resultados estão em função da composição química, da microestrutura e dos tratamentos térmicos pelo qual os aços inoxidáveis foram submetidos. Um exemplo claro ocorreu com o aço martensítico AISI 420. A dureza, a microestrutura e a resistência à corrosão deste material variam de acordo com o tratamento térmico de recozimento ou de têmpera.

CAPÍTULO 6

6. Propostas de trabalhos futuros

Realização de outros testes para caracterização dos aços inoxidáveis CF8M, AISI 316L e AISI 420, como o ensaio de tração, ensaio de fadiga e ensaio de impacto, para determinar as propriedades mecânicas destes materiais.

O estudo mais aprofundado da microestrutura do aço martensítico AISI 420 e de suas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão quando submetido ao tratamento térmico de recozimento e de têmpera.

Determinar as fases e os precipitados das microestruturas existentes nos aços inoxidáveis estudados.

Por fim, realizar o ensaio cíclico e completo de corrosão por névoa salina nos três aços inoxidáveis.

Referências Bibliográficas

ANDRADE, T. F. de. **Precipitação de fase de Laves no aço inoxidável superferrítico 28%Cr-4%Ni-2%Mo-Nb**. São Paulo: USP, 2006.

APERAM. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. São Paulo: SP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8094: Material metálico revestido e não revestido: corrosão por exposição à névoa salina**. Rio de Janeiro: RJ, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13284: Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica - Procedimento**. Rio de Janeiro: RJ, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Materiais metálicos - Ensaio de Dureza Rockwell Parte 1: Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: RJ, 2008.

BRASIL. Norma Regulamentadora 13: Caldeiras e vasos de pressão. **Ministério do Trabalho e Emprego**. Brasília, DF, 19 jun. 2008. Disponível em:

<http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEF2695817E43/nr_13.pdf>.

Acesso em: 02 jun. 2015.

CALLISTER, W.D. **Ciência e engenharia de materiais**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHAINHO, J. A. P. **A história da inspeção de equipamentos**. Curitiba: PRÓEND, 2012.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda., 1986.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda., 1986.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

CUNHA, G. S. da. **Influência da composição química na microestrutura e nas propriedades de aços inoxidáveis austeníticos CF8M (AISI 316)**. Joinville: IST, 2009.

ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 9º, 1995. **A Perfuração no Brasil e Atividades na Bacia do Paraná**. São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. Disponível em:
<<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22486/14783>>. Acesso em: 21 abr. 2015.

FERREIRA, C. C. **A explosão de Shoe Grover - Caldeira (1905)**. 2013.

FOGAGNOLI, W. **Métodos de Perfuração**. Salvador: Programa de Formação Profissional para a Indústria do Petróleo e Gás Natural. Disponível em:
<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAenOYAF/3-metodos-perfuracao-0815>>. Acesso em: 25 abr. 2015.

FRAUCHES-SANTOS, C.; ALBUQUERQUE, M. A.; OLIVEIRA, M. C. C.; ECHEVARRIA, A. A Corrosão e os Agentes Anticorrosivos. **Revista Virtual de Química**. [S.I.], 20 dez. 2013. Disponível em:
<<http://www.uff.br/RVQ/index.php/rvq/article/viewFile/490/422>>. Acesso em: 09 jun. 2015.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

LESER. **API Flanged Safety Relief Valves Series 526**. Hamburg: LESER, 2015.

MANSANO, R. B. **Engenharia de perfuração e completação em poços e petróleo**. Florianópolis: UFSC, 2004.

MATHIAS, A. C. **Válvulas: Industriais, Segurança e Controle**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

MATHIAS, A. C. **Válvulas de Segurança e Alívio**. Espírito Santo: FLUIDCONTROL.

MELCHÍADES, A.C.B. **Operações de Perfuração de Poços de Petróleo**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2011. Disponível em:
<<http://pt.slideshare.net/CacauMelchiades/operacoes-de-perfuracao-de-poos-de-petroleo>>. Acesso em: 25 maio. 2015.

MELO, D. J. de. **Origens do Museu de Ciência da Terra do Departamento Nacional da Produção Mineral - RJ**. Campinas. Disponível em:

<http://www.sbhc.org.br/resources/anais/10/1340656675_ARQUIVO_MELOArtigo2.pdf>.

Acesso em: 22 maio. 2015.

MOREIRA, R. DA LUZ. **Petrobrás 50 Anos**. [S.I.]: Fundação Getúlio Vargas. Disponível em: <<http://cpdoc.fgv.br/producao/dossies/fatosimagens/petrobras50anos>>. Acesso em: 21 abr. 2015.

NACE International. In: Wikipédia. Wikipédia, a enciclopédia livre. [S.I: Sn]. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/NACE_International>. Acesso em: 10 jun. 2015.

OLIVEIRA, A.R. de. **Corrosão e Tratamento de Superfície**. Santa Maria: UFSM, 2012.

ORIGEM da Inspeção: O nascimento da inspeção de equipamentos. Disponível em:

<<http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/p/a-origem-da-inspecao.html>>. Acesso em: 10 jun. 2015.

PINEDO, C. E. **Tratamento térmico e superficial do aço inoxidável martensítico AISI 420 destinado a moldes para injeção de polímeros PARTE I – Tratamento Térmico**. São Paulo: UP??, 2004.

PINTO, F. N. M. **Coleção de Paleontologia do Museu de Ciências da Terra/DNPM-RJ: Patrimônio da Paleontologia Brasileira**. Rio de Janeiro: UNIRIO/MAST, 2009. Disponível em:

<<http://revistamuseologiaepatrimonio.mast.br/index.php/ppgpmus/article/viewFile/107/118>>.

Acesso em: 22 maio. 2015.

RIBEIRO, A. B. da S. **Fabrico de aço inoxidável austenítico CF8M**. Porto: UP, 2012.

SEMANA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA E ECONOMIA FAHOR, 2º, 2014.

Análise de Ensaios de dureza Brinell e Rockwell em corpo de prova. Horizontina:

Faculdade Horizontina. Disponível em:

<http://www.fahor.com.br/publicacoes/sief/2014/Analise_de_ensaios_de_dureza.pdf>.

Acesso em: 28 set. 2015.

SEMINÁRIO BRASILEIRO DO AÇO INOXIDÁVEL, IX. **Desafios na Seleção de Materiais na Indústria do Petróleo**. [S.I.]: Petrobrás/CENPES. Disponível em:

<http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/apresent_petrobras_desafios_sele%C3%A7%C3%A3o_materiais_v2.pdf>. Acesso em: 06 maio. 2015.

SERRA, F. A. dos S. **Uso do aço inoxidável na área Offshore**. [S.I.]: Petrobrás/CENPES.

Disponível em:

<<http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/apresentacoes/oleo-e-gas/flavio-augusto-uso-do-nox-na-area-offshore-novembro-2010.pdf>>. Acesso em: 11 maio. 2015.

SILVA, F. S. da. **Brocas de Perfuração**. Rio de Janeiro: Revista de divulgação do projeto Universidade Petrobrás e IF Fluminense. Disponível em:

<<http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/download/2404/1293>>. Acesso em: 30 maio. 2015.

SILVA, P. E. C. e. **Efeito do processamento da liga CF8M (316) na microestrutura e nas propriedades mecânicas**. Porto: UP, 2013.

SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE INSTALAÇÕES DE SUPERFÍCIE DA E&P-BC. **O uso de normas API nos projetos básicos da GEINP**. 1999: Petrobrás. Disponível em:

<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABM8YAC/uso-normas-api-petrobras>>. Acesso em: 02 jun. 2015.

TELLES, P. C. S. **Tubulações Industriais: Materiais, Projeto, Montagem**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

LYMAN, T. **ASM Handbook: Properties and Selection of metals**. 8. Ed. Ohio: ASM Int., 1961.