

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

ANÁLISE DE FALHA EM CANO DE SUBMETRALHADORA FMAE .40

**JEAN PIERRE DE OLIVEIRA BONE
RAUL KROHLING**

**VITÓRIA – ES
JULHO/2011**

**JEAN PIERRE DE OLIVEIRA BONE
RAUL KROHLING**

ANÁLISE DE FALHA EM CANO DE SUBMETRALHADORA FAMAE .40

Parte manuscrita do Projeto de Graduação dos alunos Jean Pierre de Oliveira Bone e Raul Krohling, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

**VITÓRIA – ES
JULHO/2011**

**JEAN PIERRE DE OLIVEIRA BONE
RAUL KROHLING**

ANÁLISE DE FALHA EM CANO DE SUBMETRALHADORA FAMAE .40

COMISSÃO EXAMINADORA:

**Prof. Dr.
Temístocles de Souza Luz
Orientador**

**Prof. Dr.
Flávio José da Silva
Examinador**

**Prof. Dr.
Fernando César Meira Menandro
Examinador**

Vitória - ES, 06 de julho de 2011

DEDICATÓRIA

Aos colegas do Curso de Engenharia Mecânica da UFES.

AGRADECIMENTOS

A Deus, princípio e fim de todas as coisas.

As nossas famílias, que nos deram todo apoio e ensinamentos que serão levados por toda vida.

Ao nosso professor orientador Temístocles Sousa Luz, que nos deu todo suporte para realização desse projeto.

A Polícia Civil do Estado do Espírito Santo na pessoa de Jandira Maria de O. Bone Brandão por fornecer a arma que foi objeto do estudo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Gráfico mostrando a simulação de disparo para um projétil com 5,56mm de diâmetro em um cano com 510mm de comprimento. A linha horizontal representa o tempo de disparo, linha verde a pressão, linha azul a velocidade e linha vermelha a distância percorrida [5].	15
Figura 2.2 - Geometria de trincas internas e superficiais. (b) Perfil de tensões ao longo da linha X-X [1].	18
Figura 2.3 - Correlação entre teor de enxofre e propriedades mecânicas [12].	23
Figura 2.4 - Importância da análise de falha [16].	25
Figura 3.1 - Falha em cano de Submetralhadora Famae .40	27
Figura 3.2 - Foto do cano fraturado da submetralhadora FAMAÉ .40.	28
Figura 3.3 - Foto do cano fraturado da submetralhadora FAMAÉ .40.	28
Figura 3.4 – Cano de fuzil com falha precedida por deformação.	29
Figura 3.5 - Análise da superfície de fratura.	31
Figura 3.6 - Análise da superfície de fratura.	32
Figura 3.7 - Inclusões de MnS [18].	32
Figura 3.8 - Micrografia da região longitudinal do cano.	33
Figura 3.9 - Micrografia da região longitudinal do cano.	33
Figura 3.10 - Micrografia da região transversal do cano.	34
Figura 3.11 - Micrografia da região transversal do cano.	34
Figura 3.12 - Inclusões nodulares em corte transversal.	35
Figura 3.13 - Inclusões deformadas em corte longitudinal.	35
Figura 3.14 - Inclusões deformadas em corte longitudinal.	36
Figura 3.15 - Contagem de inclusões da imagem longitudinal, revelando 0,8854%, Software SVERNA [20].	36
Figura 3.16 - Contagem de inclusões da imagem longitudinal, revelando 0,9137%, Software SVERNA [20].	37
Figura 3.17 - Área de inclusões x percentual de enxofre em peso [13].	37
Figura 3.18 - Correlação entre durezas Knoop e Brinell [1].	39

LISTA DE TABELA

Tabela 3.1 - Medição de temperatura durante utilização de diferentes formas da submetralhadora FAMAE .40 através de pirômetro a laser.	30
Tabela 3.2 - Dureza HV medida em três pontos por secção para os cortes longitudinal e transversal.	38

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS	II
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELA	IV
SUMÁRIO.....	V
RESUMO.....	VII
1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Objetivo.....	9
1.2 Justificativa	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Armas de fogo.....	10
2.1.1 Histórico das armas	10
2.1.2 Funcionamento das armas.....	11
2.2 Munição	12
2.2.1 Projétil Balístico	12
2.2.2 Falhas em munições.....	13
2.3 Canos das armas de fogo	14
2.3.1 Projeto	14
2.3.2 Fabricação	15
2.3.3 Materiais	17
2.3.3.1 Tenacidade	18
2.3.3.2 Dureza	19
2.3.3.3 Ductibilidade	19
2.3.3.4 Resistência à fadiga	20
2.3.3.5 Fatores que alteram a propriedade dos materiais.....	21
2.4 Inclusões nos aços.....	21
2.4.1 Inclusões e propriedades mecânicas	22
2.5 Análise de falha	24
2.5.1 Importância.....	24
2.5.2 Metodologia	25
3 ANÁLISE DE FALHA	27
3.1 Descrição da situação da falha	27
3.2 O exame visual	28

3.3	Análise de tensões.....	29
3.4	Análise de temperatura	29
3.5	Fractografia.....	31
3.6	Exame Metalográfico	32
3.7	Propriedades.....	38
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
5	CONCLUSÕES.....	41
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	42
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

RESUMO

Este projeto de graduação mostra a influência das inclusões de Sulfeto de manganês nas propriedades mecânicas dos aços da família 41XX e sugere a presença destas inclusões, em altos teores, como possível causa para a fratura frágil ocorrida no cano de uma submetralhadora modelo FAMAE .40 durante treinamento de tiro da Polícia Civil do ES. O estudo foi desenvolvido através de análise metalográfica, ensaio de dureza, fractografia e comparação com outros trabalhos relacionados aos resultados.

Palavras chave: Submetralhadora. Famae .40. Inclusões. Propriedades mecânicas. Sulfeto de manganês.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais estão provavelmente mais entranhados na nossa cultura do que a maioria de nós imagina [1].

A constante evolução tecnológica pela qual passamos diariamente trás consigo a responsabilidade de utilizarmos técnicas cada vez mais precisas, visto que os resultados esperados encontram-se em intervalos cada vez mais estreitos. A evolução da ciência e da engenharia dos materiais nos possibilita obter materiais e ligas com grandes valores agregados, sobretudo no que diz respeito às propriedades mecânicas. Na medida em que cresce a utilização dos materiais devido à melhoria das propriedades, cresce também a demanda por materiais com propriedades cada vez melhores, visto que as solicitações mecânicas impostas aos materiais se tornam maiores a cada projeto novo que surge.

A indústria bélica tem grande participação no estudo e no desenvolvimento dos materiais, visto que produz armas que tem como objetivo acima de tudo preservar a vida daqueles que as operam. A confiabilidade das ligas utilizadas na produção destas armas deve ser tal que não se discutam e nem mesmo ocorram falhas mecânicas durante o seu uso.

A seleção adequada do material, bem como a execução correta dos processos de fabricação e claro a definição de itens como fator de segurança, além do controle de qualidade devem ser levados à mais extrema seriedade durante a concepção e durante a confecção de uma arma de fogo.

Um tratamento especial deve ser dado às falhas que porventura ocorrerem em armas de fogo, visto que estas podem por em risco a vida do operador. A análise de falhas nesta situação deve se preocupar com aspectos que tragam a possibilidade da falha e sobretudo informar as características ou aspectos construtivos que se opõem à capacidade da arma de executar o serviço desejado.

Ao longo deste trabalho vai se estudar um caso de análise de falha em arma de fogo buscando justamente entender as possíveis causas da mesma.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar a falha ocorrida no cano de uma submetralhadora da marca Taurus de modelo FAMAE .40, de uso exclusivo da polícia e das forças armadas, por meio de estudos comparativos, análises e ensaios que se mostrarem pertinentes ao estudo.

1.2 Justificativa

O cuidado com a segurança daqueles que operam armas de fogo é um dos itens mais importantes nas corporações policiais, pois o sucesso ou o fracasso das operações que empregam de tais equipamentos depende, na maioria das situações, destas armas. O estudo das possíveis causas de falhas em armas de fogo contribui substancialmente para o desenvolvimento de novas tecnologias e para a prevenção de acidentes ou falhas durante operação, visto que permite um melhor controle da qualidade na fabricação de tais equipamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Armas de fogo

2.1.1 Histórico das armas

Uma dos fatos mais importantes que levou ao surgimento das armas de fogo modernas foi sem dúvida a descoberta da pólvora. A pólvora é constituída em geral por uma mistura de enxofre, carvão, salitre e nitrito de potássio, e sua força explosiva se deve ao fato de que 1 mol de pó de sólidos, quando inflamado, produz 6 mols de gás em uma expansão extremamente rápida. Essa expansão no espaço fechado de um tubo de metal pode ser usada para conduzir um projétil a alta velocidade em uma direção específica [1].

Com a evolução tecnológica, a pólvora moderna se tornou uma versão refinada da substância primitiva na qual a composição química foi alterada para proporcionar maior expansão com menor quantidade de sólidos e resíduos.

Inicialmente, a pólvora foi utilizada com as funções de produzir som e sinais luminosos e a partir do século XIV passou a ser utilizada com a função bélica com os surgimentos dos primeiros canhões datados de 1327 e que tiveram sua utilização marcada já no ano de 1346 em batalhas na Grécia.

Os primeiros canhões eram feitos de forma grosseira, tendo seu efeito provavelmente mais psicológico; relacionados ao fogo, fumaça e barulho, do que à chance de se acertar fisicamente o alvo com o projétil e ao longo dos séculos se evoluiu a partir destes canhões para as modernas armas que existem hoje, tendo esta evolução passado sobretudo pela seleção de materiais e pelo desenvolvimento dos processos de fabricação.

Um grande avanço na tecnologia de produção de armas de fogo ocorreu a partir da necessidade de se produzirem peças separadas que pudessem ser montadas transformando-se em armas, o que reduziria o tempo de fabricação e a qualificação exigida do profissional que trabalhava nesta produção. Em 1798, nos Estados Unidos, um industrial chamado Eli Whitney inventou um sistema no qual as peças eram feitas sob certas especificações e tolerâncias e verificadas por meio de

pinças e padrões. Whitney também projetou máquinas de produção que poderiam ser operadas por trabalhadores não qualificados e através deste sistema ele lançou as bases para a produção moderna, em massa, e para a intercambiabilidade de peças, características que são essenciais para a produção atual [2].

Uma característica importante das armas de fogo, principalmente as utilizadas em guerras ou confrontos civis é a capacidade de efetuar grande número de disparos em curtos intervalos de tempo com garantia de funcionamento segurança.

Durante as batalhas em trincheiras da primeira guerra mundial, surgiu a submetralhadora - uma arma totalmente automática disparando cartuchos de pistola. Esta arma se tornou a mais importante de infantaria ao lado do rifle e recebeu durante a segunda guerra mundial a forma que conhecemos hoje, baseada em armas como o Stengun Inglês, o alemão MP 40 e o americano M3.

Após a primeira guerra foram desenvolvidas outras armas, entretanto a maioria das armas que estão em uso hoje são baseadas em projetos que apareceram pela primeira vez nos anos entre o início da utilização da pólvora e a primeira guerra mundial. A tecnologia evoluiu, com o uso de novos materiais - como os polímeros e o alumínio, técnicas de fundição de precisão, solda e outros métodos de produção em massa, aumento da capacidades de carregadores, entre outros, porém, os princípios básicos do funcionamento das armas permanecem os mesmos [2].

2.1.2 Funcionamento das armas

Técnicamente podemos definir as armas de fogo como sendo artefatos utilizados para propulsão de projéteis sólidos, por meio de uma rápida expansão de gases obtidos pela queima controlada de um propelente, geralmente sólido, que na maioria dos casos é a pólvora, contido em uma câmara fechada por todos os lados, exceto por aquele que conduz o projétil através de um orifício cilíndrico denominado cano ou tubo. É imprescindível para o funcionamento letal da arma de fogo também a munição [3].

O poder de destruição de um projétil está relacionado com a energia cinética atribuída a ele a partir da expansão dos gases. Esta energia pode ser reforçada de duas maneiras tradicionais, sendo elas o aumento do calibre e o aumento da velocidade.

O calibre se refere ao diâmetro do furo do tambor, dadas em frações decimais de uma polegada, ou nos sistemas métrico, em milímetros. Assim, um revólver ou fuzil poderia ser referenciado como 0,45 ou 0,38 cal (chamado de calibre 45 ou calibre 38) ou 9 mm.

A velocidade pode ser aumentada através da utilização de pólvoras contendo mais energia, isto é, pólvoras mais eficientes [4].

Outro item importante das armas de fogo são as raia internas dos canos. Tais raia são confeccionadas com o intuito de guiar o projétil gerando movimento giratório nos projéteis, o que aumenta o momento angular do projétil e consequentemente sua estabilidade, gerando maior alcance e precisão [4]. O projeto das raia deve levar em conta a massa do projétil, o comprimento do projétil e sua forma. As raia por sua vez podem variar em número, forma, profundidade, direção de torção (esquerda ou direita) e taxa de torção, sendo estas normalmente confeccionadas através dos mecanismos de brochamento ou mandrilamento. Estes processos, em geral, são refrigerados, pois as altas temperaturas geradas podem interferir no tratamento térmico dos tubos.

2.2 Munição

2.2.1 Projétil Balístico

Projétil balístico é um sólido pesado qualquer que se move no espaço, abandonado a si mesmo depois de haver recebido impulso. A munição tem quatro partes essenciais: O invólucro, a espoleta, o propelente (normalmente pólvora) e o projétil. Quando a queima da pólvora produz gases, o projétil, geralmente de chumbo em forma de ogiva, é impulsionado a grande velocidade para fora da arma. É constituído de um núcleo de chumbo endurecido com antimônio e envolvido por uma camisa de tombac, que é uma liga de cobre e zinco [5].

Quando um projétil é guiado através das raías de um tubo, ocorre um processo que pode ser chamado de gravura, que consiste na marcação do projétil pelas raías. As gravuras assumem não somente as características macroscópicas das raías, mas também menores como arranhões e marcas de ferramentas. As relações entre as marcas da gravura e as características das raías são utilizadas em balística forense para identificar a arma que efetuou o disparo do projétil.

2.2.2 Falhas em munições

Uma avaria com munições ocorre quando uma arma de fogo não funciona como projetada por causa de uma questão relacionada com a perda de potência da carga de um cartucho constituída de pólvora. Assim, cartuchos de munição devem ser adequadamente armazenados sob condições ambientais adequadas para reduzir a probabilidade de um mau funcionamento.

As três falhas mais comuns com munição são:

Falha de ignição: ocorre quando o gatilho da arma é totalmente puxado e ela não dispara. Em outras palavras, a carga dos cartuchos de pó se deteriorou tanto que não consegue ser inflamada com a faísca gerada pela espoleta. No exato momento em que o gatilho é puxado e a arma não funciona, ainda é cedo para afirmarmos que temos uma falha de ignição. Há a possibilidade de que um Hangfire esteja prestes a ocorrer.

Hangfire: é um mau funcionamento da munição que é mais bem descrito como uma "descarga retardada." Neste cenário, a carga de pólvora na caixa tem dificuldade em ser incinerada. O Hangfire em munições pode atrasar o disparo de uma arma de fogo em até trinta segundos. Assim, quando um atirador puxa gatilho da arma e não há descarga imediata é indeterminado se o mau funcionamento é por uma falha de ignição ou hangfire. Assim, é fundamental ter regras de manuseio seguro da arma, até 30 segundos terem se passado após puxado o gatilho. Assim, se a arma carregada com o gatilho puxado não disparou dentro de 30 segundos, é seguro assumir que uma falha de ignição tenha ocorrido.

Carga tipo rojão: ocorre quando há tanto uma diferença visível na quantidade de retração do ferrolho, que visa ejetar a cápsula deflagrada, quanto no

nível de ruído gerado quando a arma é descarregada. Em outras palavras, a carga de pó dos cartuchos está avariada de tal forma que a força gerada na descarga não impulsiona o projétil totalmente através do cano. Desta forma, o cano da arma fica bloqueado, o que cria uma condição perigosa. Se uma arma de fogo cujo cano está bloqueado é disparada, três hipóteses são possíveis: A arma pode falhar mecanicamente, o operador pode sofrer danos que incluem inclusive a morte, ou as duas situações podem ocorrer juntas, isto é, danos a arma e ao operador.

Estas possibilidades de falhas, que podem advir de diversos fatores, tais como armazenamento incorreto, ou uso indevido, sugerem que os operadores de armas de fogo sejam sobretudo experientes, visto que a experiência e a técnica adequada de utilização permitem que se tomem medidas eficientes frente a ocorrência de uma ou mais destas falhas.

2.3 Canos das armas de fogo

O cano de uma arma é a região onde ocorre a expansão gasosa proveniente da queima da pólvora. Esta expansão é a responsável pelo impulsionamento do projétil. O cano é uma parte extremamente exigida durante a operação da arma, haja vista que as pressões provenientes da queima da pólvora podem resultar em algo em torno de 50,000 PSI. Este valor pode ser considerado elevado o que torna necessário o emprego de materiais de excelente qualidade [6].

2.3.1 Projeto

Em geral o projeto mecânico de canos de armas de fogo é complexo e envolve um grande número de variáveis. Depende da carga de pólvora, tipo do explosivo, tipo de projétil, alcance e precisão desejados para a arma, entre outros. Tais variáveis são imprescindíveis para que possam ser feitos os cálculos de estimativas de pressão máxima de disparo e temperatura máxima atingida. Os estudos envolvendo os cálculos acima descritos são conhecidos como Balística Interna.

O gráfico a seguir mostra as curvas de pressão, velocidade e distância de um projétil no interior de um cano de arma.

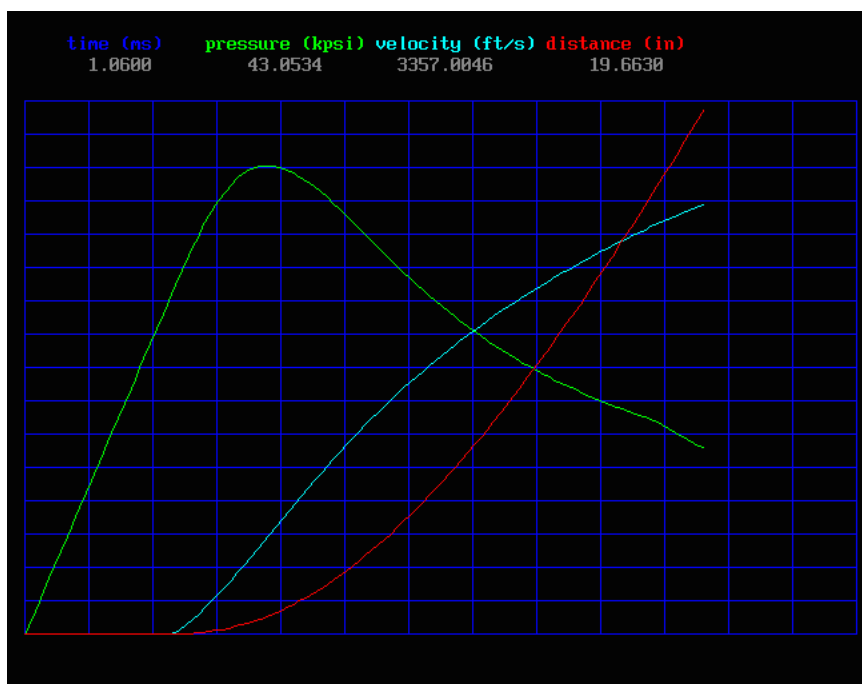


Figura 2.1 - Gráfico mostrando a simulação de disparo para um projétil com 5,56mm de diâmetro em um cano com 510mm de comprimento. A linha horizontal representa o tempo de disparo, linha verde a pressão, linha azul a velocidade e linha vermelha a distância percorrida [5].

2.3.2 Fabricação

A fabricação dos canos de armas de fogo se dá basicamente através da usinagem de um furo no interior de uma barra do material previamente selecionado. Tal processo de furação apresenta certa complexidade devido à extensão dos tubos, que em alguns casos pode chegar a 20". Além da profundidade do furo, a alta solicitação das propriedades mecânicas feitas aos tubos, exigem materiais com excelentes características para suportar tais cargas. Estes materiais por sua vez são de difícil usinagem, sobrecarregando as ferramentas de corte [7].

Com relação à matéria prima para a confecção dos canos alguns detalhes devem ser observados, pois os processos de conformação mecânica alteram as características dos materiais.

Geralmente as barras com as quais são confeccionados os canos são fabricadas a partir de extrusão, trefilação e laminação. Estes processos influem de forma marcante as propriedades mecânicas.

As operações de conformação mecânica são processos de trabalho dentro da fase plástica do material [8]

O objetivo principal do trabalho mecânico é conformar peças. Secundariamente, ele exerce outra função importante: rompe e define a estrutura dendrítica presente nos metais e ligas fundidas, contribuindo para uma melhora nas propriedades mecânicas do material.

Classificam-se os processos de deformação em trabalho a quente e trabalho a frio, em função de uma temperatura específica chamada de temperatura de recristalização.

Resumindo as vantagens e desvantagens do trabalho mecânico temos:

- o trabalho a quente permite o emprego de menor esforço mecânico e, para a mesma quantidade de deformação, as máquinas necessárias são de menor capacidade que no trabalho a frio;

- a estrutura do metal é refinada pelo trabalho a quente, de modo que sua tenacidade melhora; o trabalho mecânico a frio deforma a estrutura, em maior ou menor profundidade, conforme a extensão do trabalho e, em consequência, pode alterar sensivelmente as propriedades mecânicas: resistência e dureza aumentam; ductilidade diminui. Tais alterações podem ser úteis em determinadas situações ou devem ser eliminadas por recozimento em outras [8].

- o trabalho a quente deforma mais profundamente que o trabalho a frio, devido a continuada recristalização que ocorre durante o processo.

Ainda com relação ao trabalho mecânico, as partículas de segunda fase (inclusões, vazios, segregações e etc.) tendem a distribuir-se e assumir um formato, de forma grosseira, análogo a deformação da peça como um todo.

Se as partículas e inclusões são dúcteis e mais moles que a matriz, assumem forma alongada (ex. MnS no aço); se forem frágeis, quebram-se em fragmentos que se orientam paralelamente a direção principal de trabalho (ex. Al_2O_3 no aço); se forem mais duras e resistentes que a matriz, não se deformam (ex. SiO_2 no aço) [9].

2.3.3 Materiais

O estudo dos materiais componentes das armas de fogo sempre é uma incógnita. Os fabricantes geralmente não fornecem tipo algum de informação por julgarem serem estas segredo industrial. Assim só é possível a descoberta do tipo, composição química, tratamentos térmicos e demais características dos aços via análise em laboratório. Apesar da pouca quantidade de informações prévias sobre os materiais, sabe-se que as armas de fogo são normalmente fabricadas em aços da família 41XX, geralmente o 4140 e o 4150 bem como o inoxidável 416. Esses materiais possuem excelentes características mecânicas que por sua vez lhes asseguram a capacidade de resistir às altas pressões geradas no interior do cano quando do disparo. Em geral a escolha destes aços da família 41XX, é a que associa da melhor forma o custo com as propriedades mecânicas.

Os canos das armas de fogo necessitam de algumas características especiais para que sejam eficazes em sua tarefa. Valendo-se de uma hipótese simplificadora, podemos simular o tubo como sendo um vaso de pressão.

Segundo Collins em [10] os vasos de pressão são vulneráveis a falhas por diversos modos prováveis, dependendo da aplicação, do nível de pressão, do nível de temperatura, do ambiente e da composição do fluido de pressurização. A falha de um vaso de pressão pode ocorrer por escoamento, ruptura dúctil, fratura frágil (mesmo se o material é nominalmente dúctil), fadiga (incluído fadiga de baixo ciclo, térmica ou associada a corrosão), trincamento por corrosão sob tensão, fluência, ou fadiga e fluência combinadas.

Observa-se, de acordo com os possíveis modos de falha, que os materiais a serem utilizados em cilindros pressurizados devem ter uma boa resistência (incluído uma boa resistência à fadiga), alta ductibilidade, boa conformabilidade, boa soldabilidade e baixo custo. Os aços tipicamente satisfazem a maioria destes critérios e, portanto, são amplamente utilizados na fabricação de vasos de pressão [10].

Para o caso específico dos tubos para armas de fogo, não é necessário que os mesmos possuam boa soldabilidade, entretanto, características como tenacidade, dureza, ductibilidade, usinabilidade e resistência à fadiga são de importância fundamental.

2.3.3.1 Tenacidade

Tenacidade segundo Callister [1], pode ser definida como sendo uma medida da capacidade de um material em absorver energia antes de sua fratura. Para que um material seja tenaz ele deve possuir tanto resistência como ductilidade.

As resistências à fratura medidas para a maioria dos materiais frágeis são bem menores do que aquelas obtidas através de cálculos baseados nas energias de ligações atômicas. Tal discrepância se dá pela presença de defeitos ou trincas muito pequenas, microscópicas, que normalmente existem, tanto na superfície de um corpo quanto em seu interior [1]. Esses defeitos prejudicam o material quanto a resistência à fratura na medida em que uma tensão aplicada ao material pode ser aumentada ou concentrada nas extremidades do defeito, onde a magnitude dessa concentração depende da geometria e orientação da trinca. A figura 1 mostra o perfil de tensões ao longo de uma seção transversal que contém uma trinca interna. O perfil mostrado indica que a magnitude dessa tensão localizada diminui com a distância, afastando-se da trinca. Devido à sua habilidade em amplificar tensões aplicadas em suas extremidades, esses defeitos são algumas vezes chamados de concentradores de tensão [1].

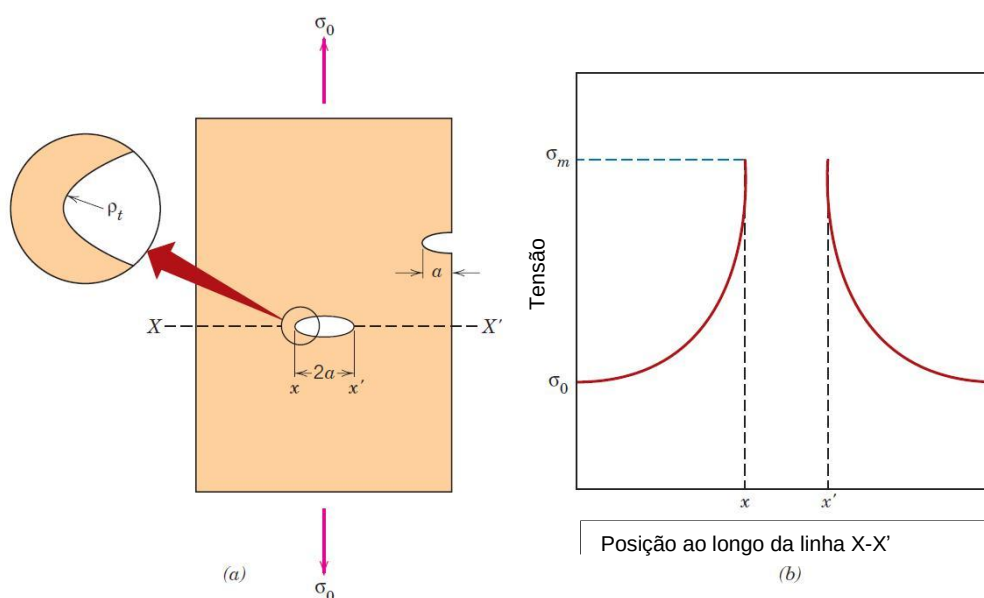


Figura 2.2 - Geometria de trincas internas e superficiais. (b) Perfil de tensões ao longo da linha X-X' [1].

Quando uma trinca está presente no material, pode-se ter um indicativo da resistência à fratura através da tenacidade à fratura. A tenacidade à fratura é uma propriedade que mede a resistência de um material à fratura frágil quando uma trinca está presente [1].

Quando uma carga atua sobre uma trinca da maneira como mostrado na parte (a) da figura 1 onde não existe qualquer componente de deformação nas demais direções das faces do corpo, dizemos que o mesmo sofre deformação plana. Para este caso, tem-se um índice que avalia a tenacidade à fratura em deformação plana dado por K_{IC} . Tal índice é uma propriedade fundamental dos materiais à qual depende de muitos fatores, sendo que os de maior influência são a temperatura, a taxa de deformação e a microestrutura [1].

2.3.3.2 Dureza

A dureza consiste em uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada (p.ex., a uma pequena impressão ou a um risco) [1].

Durante o movimento dos projéteis através dos canos das armas, há a interferência do projétil com as paredes do tubo. Diante de tal fato, para que se evite desgaste prematuro do cano, um elevado índice de dureza é desejado na superfície de contato. Tal dureza em geral é obtida mediante tratamentos térmicos de têmpera e posterior alívio de tensões através de revenimento.

2.3.3.3 Ductibilidade

Ductibilidade nada mais é do que uma medida do grau de deformação plástica que foi suportado até a fratura. Um material que apresenta uma deformação plástica muito pequena ou mesmo nenhuma deformação plástica até a fratura é chamado de frágil.

Um conhecimento da ductilidade dos materiais é importante por pelo menos dois motivos. Em primeiro lugar, ela indica ao projetista o grau ao qual uma estrutura irá se deformar plasticamente antes de fraturar. Em segundo lugar, ela especifica o grau de deformação que é permitido durante as operações de fabricação. Algumas

vezes nos referimos aos materiais relativamente dúcteis como sendo “generosos”, no sentido em que eles podem sofrer uma deformação local sem eu haja fratura, caso exista um erro no valor da tensão de projeto [1].

2.3.3.4 Resistência à fadiga

De acordo com [10] em engenharia, cargas repetitivas, cargas variáveis e cargas de impacto são de longe mais comuns do que cargas estáticas ou quase estáticas. Além disso, a maior parte das condições de projeto em engenharia envolve peças de máquinas sujeitas a cargas variáveis ou cíclicas. Tais cargas induzem tensões cíclicas e variáveis que, freqüentemente, resultam em falha por fadiga. A fadiga é um processo de falha progressivo que envolve a iniciação e propagação de uma trinca até esta atingir um tamanho instável, causando uma separação repentina catastrófica em duas ou mais partes da peça afetada. É difícil detectar as mudanças progressivas que ocorrem nas propriedades do material durante a solicitação em fadiga, assim, falha por fadiga pode ocorrer com pouco ou nenhum aviso. Períodos de repouso, com a tensão de fadiga removida, não levam a melhora alguma ou recuperação significativa dos efeitos da solicitação cíclica anterior [10].

Mesmo nos metais normalmente dúcteis, a falha por fadiga é de natureza frágil, existindo muito pouca, ou nenhuma, deformação plástica generalizada associada à falha. O processo ocorre pela iniciação e a propagação de trincas, e em geral a superfície de fratura é perpendicular à direção de uma tensão de tração aplicada [1].

Para algumas ligas ferrosas e de titânio, a curva σ -N – que trata a resistência à fadiga a partir do número de ciclos que a peça suporta para um dado valor de tensão – se torna horizontal para os valores de N mais altos; ou existe um nível de tensão limite, chamado de limite de resistência à fadiga (algumas vezes também chamado de limite de durabilidade), abaixo do qual a falha por fadiga não irá ocorrer. Esse limite de resistência à fadiga representa o maior valor da tensão oscilante que não causará falha para um número essencialmente infinito de ciclos. Para muitos aços, os limites de resistência à fadiga variam entre 35% e 60% do limite de resistência à tração [1].

2.3.3.5 Fatores que alteram a propriedade dos materiais

Segundo Chiaverini [11] as propriedades mecânicas dos aços são influenciadas pelos seguintes fatores:

- composição química;
- microestrutura.

No que se refere a composição química, nos aços esfriados normalmente, isto é, em condições em que se processe transformação total da austenita, o elemento predominante é o carbono que, como se viu, à medida que aumenta, melhora as propriedades relativas a resistência mecânica, isto é, o limite de escoamento, o limite de resistência a tração e a dureza e piora as propriedades relativas à ductilidade e à tenacidade, isto é, o alongamento e a resistência ao choque.

No que se refere à microestrutura, esta é inicialmente afetada pela composição química, pois se sabe que os constituintes presentes são ferrita e perlita, ou perlita e cementita ou somente perlita, conforme se trate de aços hipoeutetóide, hiper-eutetóide ou eutetóide.

Ainda segundo Chiaverini [11], a microestrutura dos aços também depende dos seguintes fatores:

- estado ou condição do aço, sob o ponto de vista de fabricação: se fundido, trabalhado a quente (laminado, forjado, etc.) ou trabalhado a frio (encruado);
- tamanho de grão austenítico;
- velocidade de resfriamento;

2.4 Inclusões nos aços

De acordo com Barros [12] as partículas que iniciam fraturas ou os efeitos delas podem ser identificadas pela observação das superfícies de fratura por microscopia eletrônica de varredura. Se as partículas estão separadas e dispersas na matriz, fratura dúctil por nucleação, crescimento e coalescência de microvazios se desenvolve. Em geral, quanto maior a concentração de partículas, e normalmente

quanto maiores as partículas, mais baixa será a energia absorvida pelo processo de fratura dúctil.

A evolução da identificação de partículas associadas com a fratura dúctil levou à aceitação das inclusões como um importante componente microestrutural dos aços. O efeito prejudicial das inclusões sobre a fratura dúctil tem levado ao desenvolvimento de procedimentos com o objetivo de minimizar a concentração de inclusões em aços estruturais. Inclusões são fases não metálicas tais como alumina, aluminatos, sulfetos e silicatos, em muitas combinações e morfologias, que são introduzidas durante vários estágios do processo de fabricação de aços. Algumas inclusões, tais como sulfetos de manganês, são plásticas durante o trabalho a quente e tornam-se alongadas e planificadas, conseqüentemente pode ser introduzida considerável anisotropia nas propriedades e na fratura em produtos conformados a quente. A anisotropia causada por essas partículas pode ser reduzida pelo controle de forma das inclusões com adição de elementos como cálcio, titânio, zircônio, cobalto e terras raras uma vez que estes se combinam com o enxofre para produzir sulfetos que são menos deformáveis durante a conformação a quente [12].

2.4.1 Inclusões e propriedades mecânicas

O enxofre nos aços normalmente se encontra na forma de Sulfeto de Manganês (MnS). A presença do Manganês melhora a usinabilidade dos materiais. Entretanto as inclusões de MnS são deformadas e alongadas nas direções de trabalhos mecânicos causando diferenças efetivas nas áreas de inclusões, nas direções verticais e horizontais. Tal fato altera as concentrações de tensões, alterando assim as propriedades mecânicas nas duas direções. Além disso, sulfetos podem estar presentes em grupo gerando pouco espaço entre as inclusões o que favorece a propagação e a coalescência de pequenas trincas originadas de inclusões de formas alongadas [13].

Com relação à tenacidade, impurezas são sempre deletérias. A figura 2.3 representa a perda de Tenacidade, para níveis mais elevados de resistência, com níveis de impurezas crescentes, no caso, o teor de enxofre.

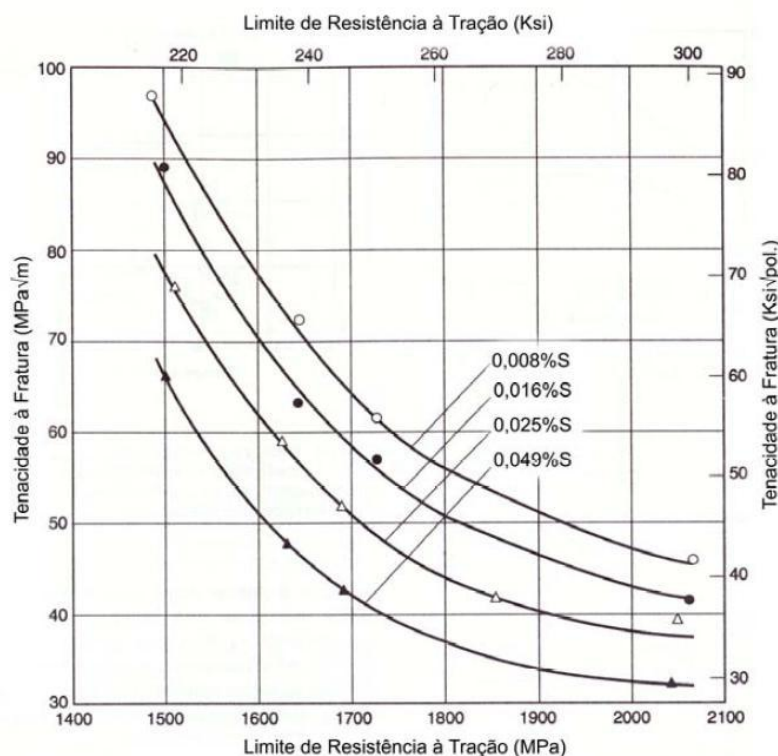


Figura 2.3 - Correlação entre teor de enxofre e propriedades mecânicas [12].

Quando se trata de fadiga Temmel [14] afirma que o limite de fadiga em seções longitudinais (com presença de inclusões alongadas de MnS) foi 50% inferior do que em seções transversais para os dois tipos de aços que foram por ele estudados 0.042% S e 0.004% S no aço 42CrMo4. Aumentando-se a concentração de enxofre por um fator de 10, reduziu-se em 38% o limite de fadiga na direção longitudinal. Kage e Nisitani [15] relatam que o limite de fadiga de flexão em chapas de aço laminadas de baixo carbono foi reduzida em 10,5% na direção longitudinal (direção com presença de inclusões alongadas de MnS). A anisotropia do limite de fadiga foi observada somente em casos em que a fratura originou-se de inclusões.

Importante trabalho feito por Nisha, Fatemi [13] correlacionou a quantidade de enxofre com a anisotropia por inclusões de sulfeto de manganês. Este estudo foi realizado correlacionando amostras de aço 4140 com três taxas de enxofre distintas (alta: 0.077% S; baixa: 0.012% S; muito baixa: 0.004% S). Em tal estudo verificou-se, em ensaio de tração, que para os aços com maior quantidade de S, a elongação e redução de área antes da fratura eram menores. Concluiu-se portanto em [13] que a ductilidade é negativamente influenciada pelo aumento no teor de enxofre.

2.5 Análise de falha

2.5.1 Importância

Segundo [16], a investigação de falhas pode ter vários objetivos. Uma investigação pode ser feita para a imposição de culpa por fracasso, mas principalmente para identificar a confiabilidade do produto e para que falhas prematuras sejam impedidas. Ocasionalmente, uma investigação de falha é realizada por razões puramente acadêmicas. A maioria dos metais pode ser adequadamente analisada pelos engenheiros. Outros são mais complexos e exigem especialistas em outras disciplinas. A figura 2.4 mostra a importância da análise de falha em melhorias aplicadas a projetos mecânicos.

Investigações complexas podem levar algum tempo até que um caminho lógico seja encontrado. No entanto, as diretrizes a seguir ajudam de forma sistêmica o investigador a atingir a causa raiz da falha [16].

1. Informação de base que forneça o que aconteceu antes e no momento da falha, a história de fabricação da peça, e debate com testemunho ocular;
2. O exame visual inclui uma visita ao local da falha, fazendo desenhos e medições, anotações e fotografias. É útil para selecionar as peças a serem tomadas para a investigação, exame e compreensão;
3. Ensaaios não-destrutivos, para obter informações de defeitos da superfície, bem como o núcleo da peça que falhou;
4. Fractografia para identificar o tipo e a natureza da fratura;
5. Ensaio destrutivo para garantir a solidez do material em conformidade com as especificações químicas, propriedades da microestrutura, e etc;
6. Exame de todos os dados para chegar a uma conclusão acerca da causa da falha e recomendações para sua prevenção.

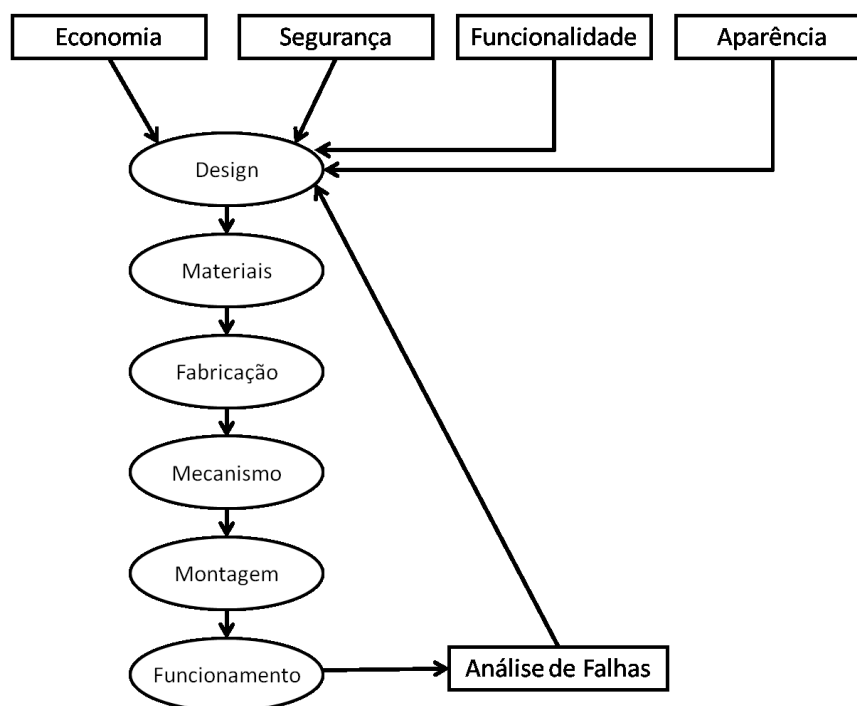


Figura 2.4 - Importância da análise de falha [16].

2.5.2 Metodologia

As etapas envolvidas na condução de uma análise de falhas bem como, sua seqüência são importantes e delas podem depender sucesso ou fracasso. Uma seqüência a ser seguida inclui as oito etapas descritas a seguir [17]:

1. *Descrição da situação da falha.* Aqui a história da falha deve ser documentada. Todas as informações referentes ao fracasso, como o desenho do componente , e como o componente estava sendo usado, são importantes documentar. As fotografias da peça e dos componentes associados são de extrema importância.

2. *O exame visual.* Aqui, o aspecto geral da parte envolvida deve ser documentado. Deve haver cuidado na manipulação da peça de modo a não danificar nenhuma das superfícies de fratura ou outras características importantes.

3. *Análise mecânica do projeto (análise de tensões).* Quando a parte envolve claramente um projeto mecânico, como um componente do projeto maior, uma análise de tensões deve ser realizada. Isso ajudará a determinar se a peça era de tamanho suficiente e de forma adequada, e quais as propriedades mecânicas eram

exigidas. Em alguns casos, esta análise pode determinar as causas do fracasso. Por exemplo, se a carga sobre a peça pode ser determinada e as estimativas das propriedades mecânicas feitas, então pode ser possível estabelecer que a parte foi corretamente dimensionada para essa carga.

4. *Análise química do projeto.* Esta etapa refere-se a uma análise da aplicabilidade do material a partir do ponto de vista da resistência à corrosão.

5. *Fractografia.* Um exame da superfície de fratura, com microscópios ópticos e eletrônicos, deve ser realizado a fim de estabelecer o mecanismo de fratura.

6. *Exame metalográfico.* Isso requer corte e preparação metalográfica. Pode exigir um acordo entre todas as partes envolvidas antes do corte. Este passo ajudará a estabelecer os fatos tais como se a peça teve o tratamento térmico correto.

7. *Propriedades.* As propriedades pertinentes ao projeto devem ser determinadas. Isto, nem sempre é possível porque o teste para determinar uma propriedade pode destruir a peça. Em termos de propriedades mecânicas, dureza é especialmente importante. Dureza vem freqüentemente correlacionada com muitas outras propriedades mecânicas (tais como o limite de resistência à tração). É um teste simples de realizar, e que normalmente não irá danificar a peça.

8. *Falha de simulação.* A abordagem é muito útil para tomar uma parte (supostamente) idêntica e submetê-la à condição exata em que ela é projetada para operar. Este teste envolve altos custos e não é feito com certa freqüência.

3 ANÁLISE DE FALHA

A análise da falha da submetralhadora FAMAE .40 seguirá os 8 passos da metodologia apresentada acima descrita.

3.1 Descrição da situação da falha

A falha ocorrida na submetralhadora aconteceu durante treinamento da polícia civil do Estado do Espírito Santo. Durante uma sequência de tiros houve a fratura do cano, figura 3.1. As informações fornecidas sugerem a obstrução do cano da arma por um projétil anterior. Alguns instrutores declararam que tal fato – a obstrução – ocorre com alguma frequência, exigindo bastante cuidado por parte do operador no cumprimento das normas, que exigem a verificação da arma após cada tiro.

Os perigos decorrentes da obstrução do cano, já foram mencionados na revisão bibliográfica feita acima. Informações, não científicas, adicionais, relatam que falhas semelhantes à encontrada são decorrentes de disparos efetuados com cano obstruído.



Figura 3.1 - Falha em cano de Submetralhadora Famae .40

3.2 O exame visual

As figuras 3.2 e 3.3 mostram a falha no cano da arma. Nelas percebe-se a ausência de deformação antes da fratura. Tal fato é intrigante uma vez que, imagens encontradas sobre falhas semelhantes em geral eram precedidas de deformação como mostra a figura 3.4



Figura 3.2 - Foto do cano fraturado da submetralhadora FAMAE .40.



Figura 3.3 - Foto do cano fraturado da submetralhadora FAMAE .40.



Figura 3.4 – Cano de fuzil com falha precedida por deformação.

3.3 Análise de tensões

Cálculos de análise de tensões para o problema em questão são extremamente complexos uma vez que envolvem a expansão dos gases resultantes da queima da pólvora, perdas térmicas por transmissão de calor através do cano e perdas mecânicas no deslocamento do projétil, geradas por superfícies não definidas. Valores publicados e encontrados na internet para pressões no interior dos tubos dão conta de algo em torno de 50.000 PSI [5] em condições normais de funcionamento. Analisando as imagens da falha e valendo-se das distribuições de tensão verifica-se que a hipótese de entupimento do cano é válida. Tal fato se justifica pelas trincas propagadas na direção longitudinal do tubo. Tais trincas apenas são possíveis com a extremidade do tubo bloqueada o que o assemelharia a um vaso de pressão tendo, portanto, tensões nas direções longitudinais e transversais.

3.4 Análise de temperatura

Apesar de não constar no método proposto por [17], foi feita uma medição das temperaturas atingidas na superfície externa do tubo durante utilização da arma com intuito de avaliar a possível relação entre a temperatura e a redução de

propriedades mecânicas do material. Os resultados obtidos bem como a seqüência de medições estão na tabela 3.1.

As temperaturas obtidas neste ensaio tornam-se influentes se considerarmos que a temperatura externa é bem menor que a interna, devido ao tempo necessário para a transferência do calor pela parede do cano. Entretanto, as temperaturas mais altas foram obtidas apenas nas situações de uso extremo da arma, o que não ocorre em situações normais do uso da mesma. Sendo assim, foi considerado que a temperatura não influencia na falha.

Tabela 3.1 - Medição de temperatura durante utilização de diferentes formas da submetralhadora FAMAE .40 através de pirômetro a laser.

Modo	Tiro a tiro: (medição de temperatura feita após 1 tiro apenas, com intervalo entre tiros de aproximadamente 5 segundos)	Intermitente: (medição de temperatura feita após seqüência rápida de 3 tiros e intervalo entre seqüências de aproximadamente 5 segundos)	Rajada: (medição de temperatura feita após seqüência rápida de 30 tiros com intervalo entre seqüências de aproximadamente 10 segundos)	
			Inicial	Final
1º	23,2 °C	29 °C	41,5 °C	66,8 °C
2º	24,1 °C	29 °C	40 °C	72 °C
3º	25,3 °C	33 °C	57,9 °C	85 °C
4º	26,1 °C	xxx	66 °C	92 °C
5º	26,4 °C	xxx	69 °C	95,6 °C
			73,1 °C*	79 °C*
* Medição feita no modo Intermitente com três tiros aproveitando arma quente após seqüência de rajada				
Considerações				
A arma normalmente é utilizada nos modos tiro A tiro e poucas vezes no modo intermitente. O modo rajada raramente é utilizado.				
De acordo com um instrutor de tiro que se encontrava no local, a temperatura raramente se torna perceptível na arma.				

3.5 Fractografia

A análise superficial da fratura foi realizada a partir de fotos obtidas no MEV as quais são expostas a seguir.

Observando as figuras 3.5 e 3.6, embora seja notado a presença de óxidos, em função do tempo de exposição da região fraturada, é notável a quantidade de inclusões alongadas. Segundo Azevedo [18], mostrado na Figura 3.7, essas inclusões imputam na minimização da tenacidade do material.

Assim, sugere-se que esta presença de inclusões esteja relacionada a fratura frágil observada nesse material.

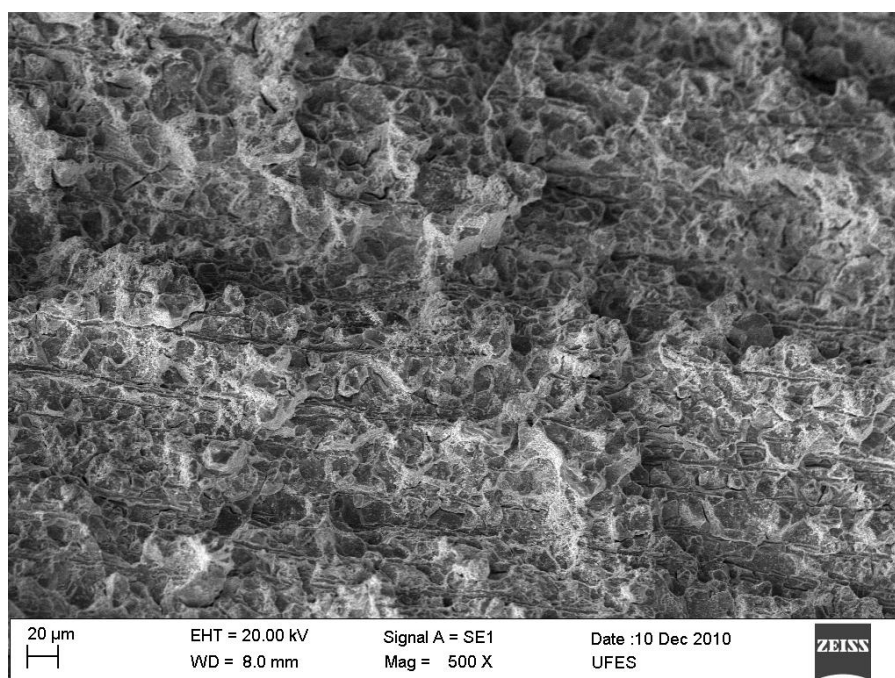


Figura 3.5 - Análise da superfície de fratura.

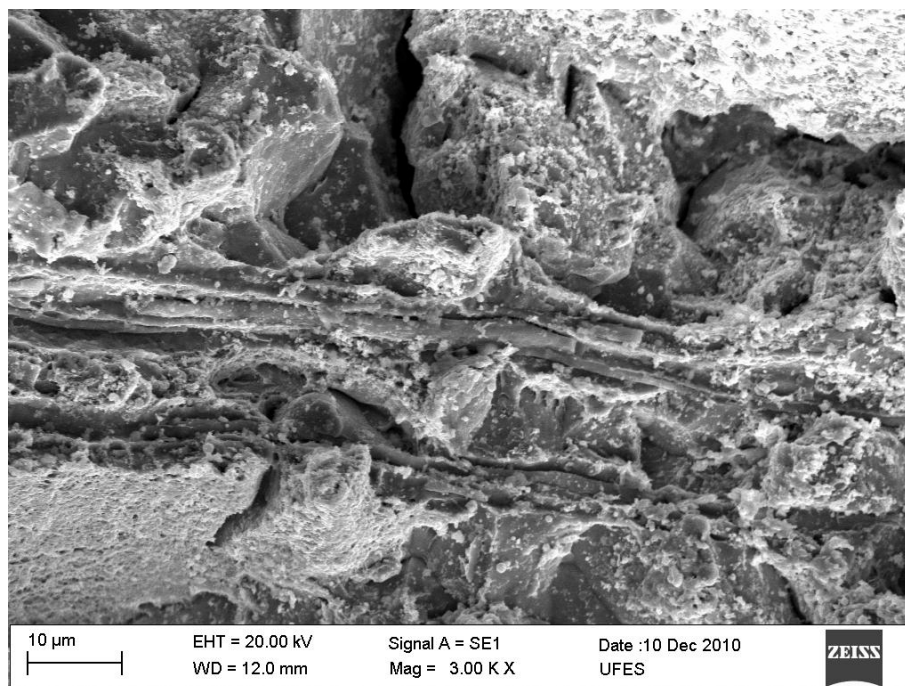


Figura 3.6 - Análise da superfície de fratura.

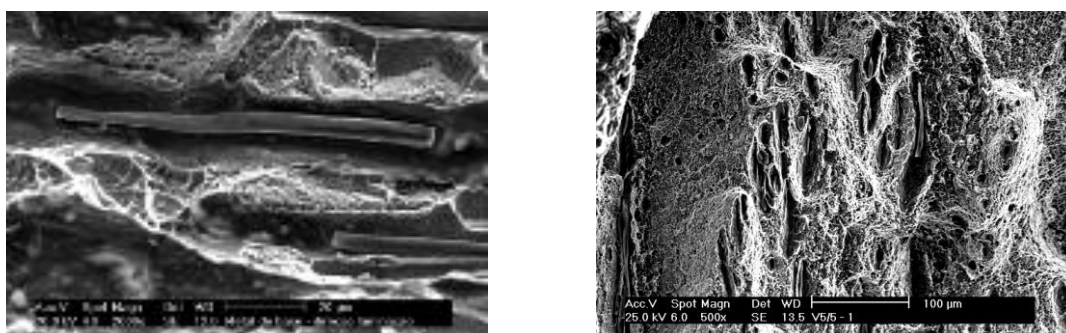


Figura 3.7 - Inclusões de MnS [18].

3.6 Exame Metalográfico

Foram realizados exames metalográficos, seguindo os conceitos e procedimentos descritos em [19], a fim de se determinar as características microestruturais do material principalmente no que se refere a morfologia dos grãos e presença e quantificação bem como também morfologia de inclusões. A análise micrográfica com ataque químico revelou uma estrutura temperada e revenida com

marcas longitudinais de deformação, provavelmente proveniente da fabricação do tubo, como se pode observar nas imagens a seguir:



Figura 3.8 - Micrografia da região longitudinal do cano.

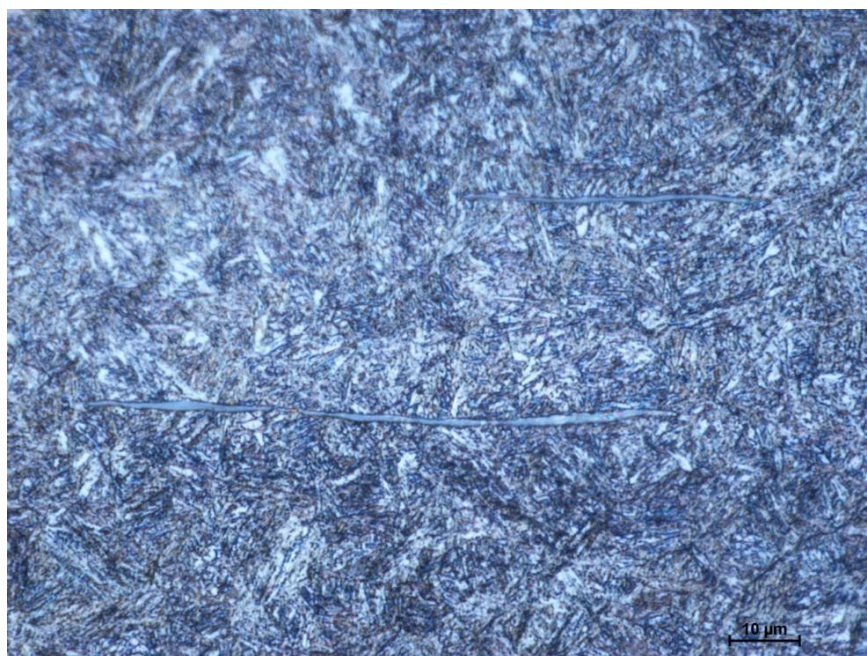


Figura 3.9 - Micrografia da região longitudinal do cano.

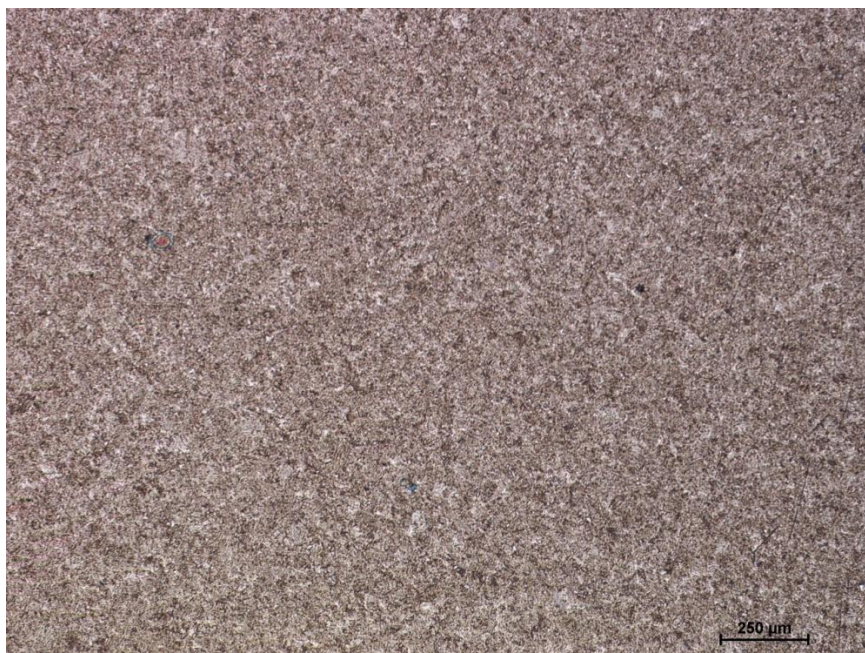


Figura 3.10 - Micrografia da região transversal do cano.

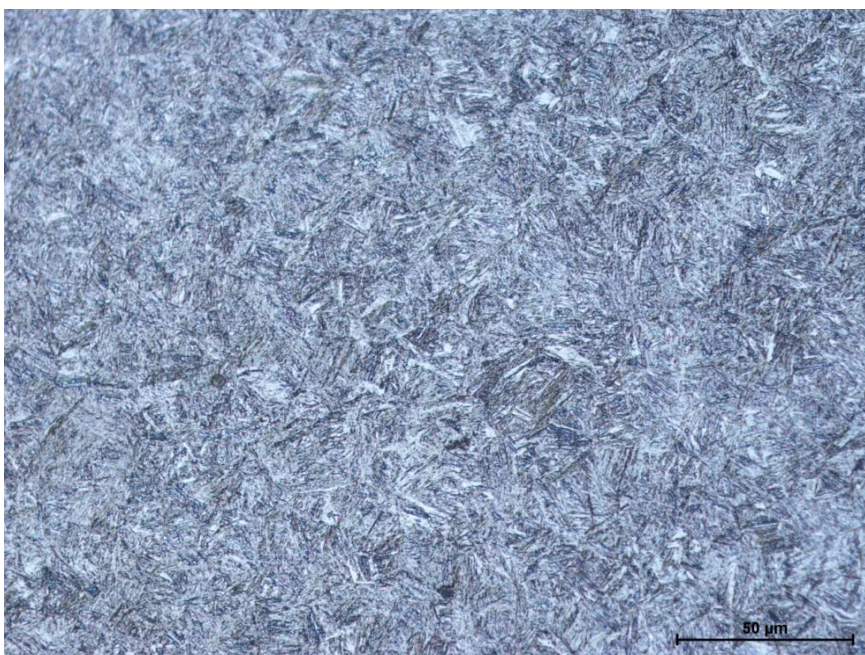


Figura 3.11 - Micrografia da região transversal do cano.

A análise das imagens da micrografia com ataque químico indicaram a presença de inclusões que por sua morfologia se assemelharam a inclusões de MnS. No intuito de confirmar a presença de inclusões e sua morfologia realizou-se

um novo exame e desta vez sem ataque químico. O resultado deste novo exame é abaixo apresentado.



Figura 3.12 - Inclusões nodulares em corte transversal.



Figura 3.13 - Inclusões deformadas em corte longitudinal.

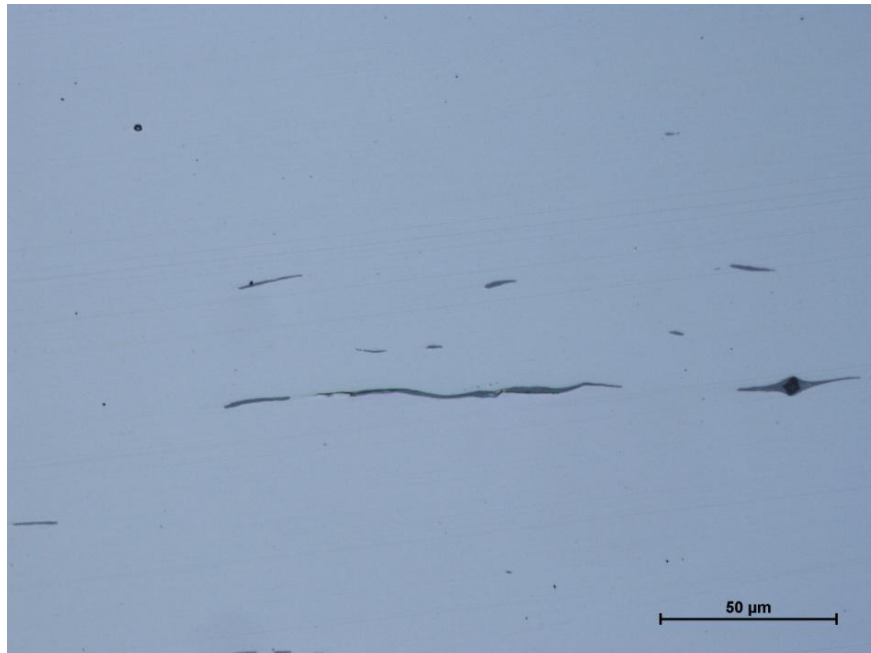


Figura 3.14 - Inclusões deformadas em corte longitudinal.

Foi feita a contagem das inclusões, através do programa SVERNA [20] e esta contagem revelou valores bastante significativos. As figuras 3.15 e 3.16 apresentam os resultados obtidos na contagem de inclusões.

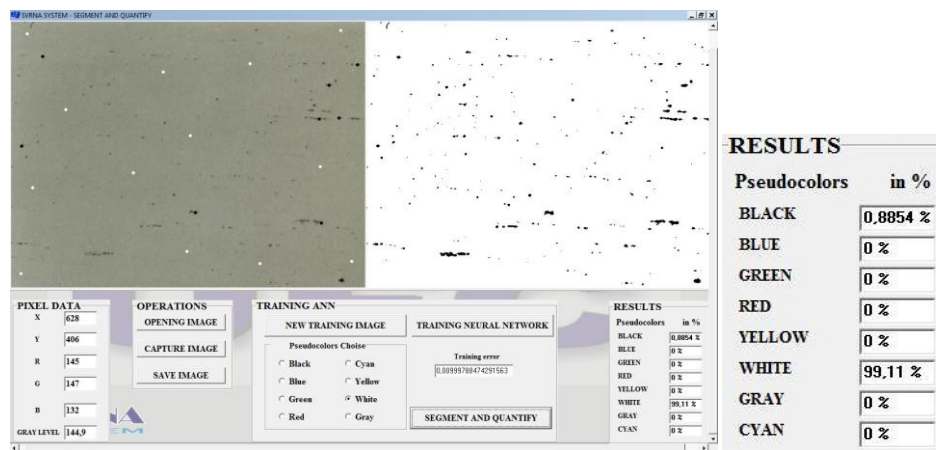


Figura 3.15 - Contagem de inclusões da imagem longitudinal, revelando 0,8854%, Software SVERNA [20]

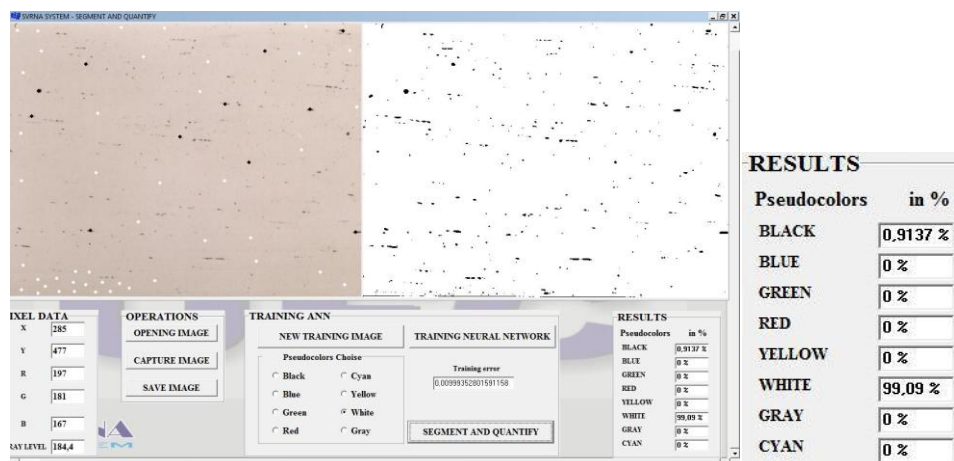


Figura 3.16 - Contagem de inclusões da imagem longitudinal, revelando 0,9137%, Software SVERNA [20].

Estudos realizados [13] correlacionaram a área encontrada de inclusões com a quantidade de enxofre no aço 4140. Tal resultado é bem específico uma vez que a área das inclusões dependerá da quantidade de trabalho mecânico realizados sobre as amostras. Entretanto como as dimensões das inclusões encontradas [13] se assemelham as encontradas neste trabalho, os valores da figura 3.17 servem como boa estimativa da quantidade de S.

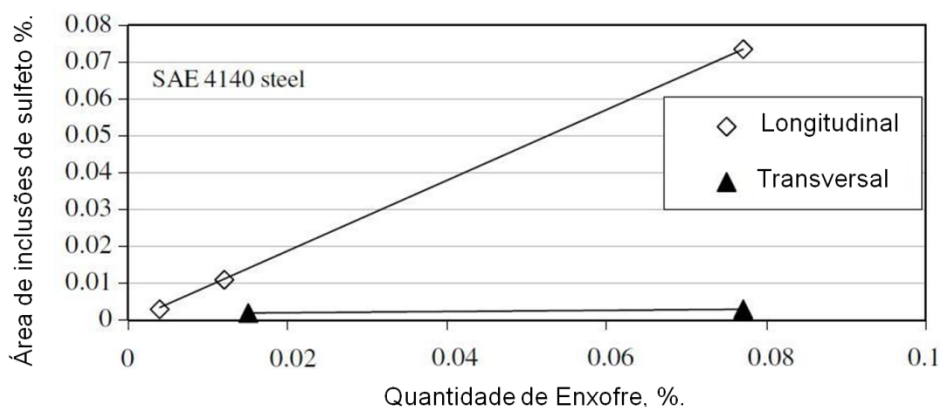


Figura 3.17 - Área de inclusões x percentual de enxofre em peso [13].

A figura 3.17 mostra que percentuais de área de inclusões de MnS na ordem de 0,08% indicam um percentual de enxofre na ordem de 0,08%, entretanto esta relação está vinculada à deformação sofrida pelo material, assim sugere-se que os

teores de enxofre no material estudado sejam superiores a 0,08% que como referência, indicam reduções consideráveis na tenacidade do aço 4140

3.7 Propriedades

Dentre as propriedades importantes para os materiais utilizados em canos de armas de fogo, destacam-se a tenacidade, dureza e usinabilidade. Com relação a tenacidade, já se constatou sua redução por conta da presença de inclusões. A presença de inclusões pode melhorar a usinabilidade do material, o que é bom, sob o ponto de vista da fabricação dos canos, entretanto torna conflitantes as duas propriedades, tenacidade e usinabilidade, visto que as inclusões melhoram uma, e pioram a outra.

A dureza do material que nos fornece um parâmetro de avaliação de sua resistência mecânica foi medida durante ensaio de microdureza Vickers (HV), realizado com a carga de 500g e tempo de penetração de 20s. Os resultados do ensaio são abaixo apresentados:

Tabela 3.2 - Dureza HV medida em três pontos por secção para os cortes longitudinal e transversal.

Longitudinal	Transversal
1º 521,00	1º 531,63
2º 534,00	2º 538,37
3º 515,15	3º 530,99

$$HV_{méd.} = 528,52$$

$$s = 8,59$$

Como dureza e o limite de resistência à tração são indicadores da resistência de um material à deformação plástica, estas propriedades podem ser relacionadas. Segundo [1], como regra geral para a maioria dos aços, a dureza Brinell (HB) e o limite de resistência à tração (LRT) são relacionados de acordo com:

$$LRT = 3,45 \times HB$$

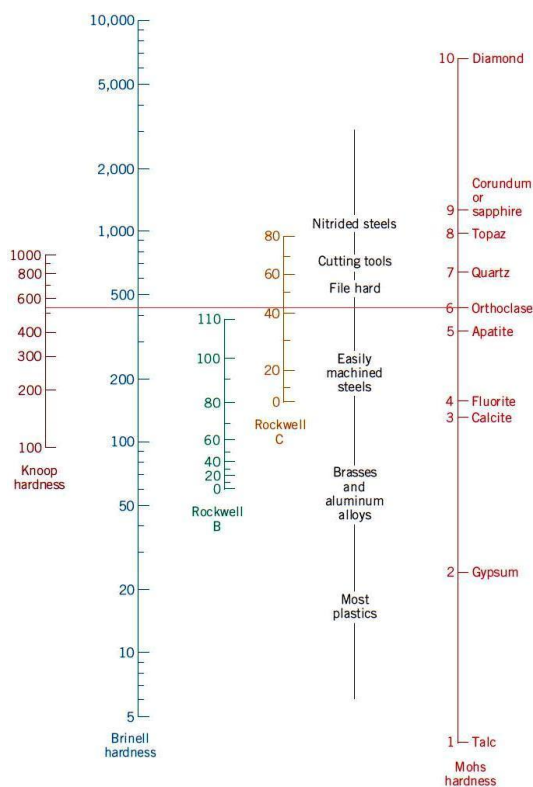


Figura 3.18 - Correlação entre durezas Knoop e Brinell [1].

A partir da figura 3.18, temos como resistência à tração do material em questão 1552 Mpa. Ressalta-se que o tratamento térmico ao qual o aço do cano foi submetido eleva sua dureza superficial e por conseqüência seu limite de resistência. Este fato induz a erros caso consideremos o valor apresentado acima como sendo real. Portanto o valor de 1552 Mpa é apenas uma estimativa.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da metodologia utilizada e conseqüentemente dos resultados obtidos, este trabalho sugere que a presença de inclusões de MnS reduziu as propriedades mecânicas do aço no cano e provavelmente este fato associado a obstrução do cano por projétil levou a ruptura do mesmo na forma frágil.

Não há, entretanto, garantias de que a ausência das inclusões impediria a fratura do cano, no caso considerado de obstrução do mesmo, assim, este trabalho sugere que a grande influência da presença de inclusões de MnS está associada ao fato de a fratura ter sido frágil, devido a redução da tenacidade.

Ao se considerar a forma como se utilizam as armas de fogo e, sobretudo o fato de que o cano é protegido por uma capa de polímero sobre a qual o operador segura a arma, torna-se importante a forma da fratura, visto que na forma frágil pode ocorrer com mais intensidade a projeção de estilhaços de encontro ao operador.

Este trabalho não sugere a interrupção da utilização deste tipo de arma, mas sinaliza a possibilidade deste tipo de falha ocorrer, devido ao fato de que a presença de inclusões advém da fabricação do aço e a morfologia das mesmas advém da conformação do aço, assim, sugere-se que sejam revistos os processos de controle de qualidade nestes itens.

5 CONCLUSÕES

- Observa-se a presença de inclusões que, devido a morfologia e literatura apontam para MnS.
- O material, em função de sua dureza, apresenta-se como um material de alta resistência.
- A falha apresentada se mostrou frágil.
- Correlaciona-se o tipo de falha com a grande incidência e o formato das inclusões observadas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aponta-se a necessidade de outros testes que forneçam valores relacionados as solicitações de tensão que ocorrem nas paredes do cano, para que se possa definir com precisão as características necessárias ao material para resistir ao evento em que ocorre a obstrução.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CALLISTER, W. D.; “Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução”. John Wiley& Sons 7ªed 2008 p.106-160
- [2] <http://pt.scribd.com/doc/12865853/A-short-history-of-firearms>, Acessado em 25/06/2011
- [3] http://pt.wikipedia.org/wiki/Arma_de_fogo, acessado em 01/06/2011
- [4] <http://library.med.utah.edu/WebPath/TUTORIAL/GUNS/GUNBLST.html>, acessado em 08/06/2011
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Internal_ballistics, acessado em 14/06/2011
- [6] <http://firearmsid.com/Feature%20Articles/RifledBarrelManuf/BarrelManufacture.html>, acessado em 23/06/2011
- [7] <http://firearmsid.com/Feature%20Articles/RifledBarrelManuf/BarrelManufacture.html>, acessado em 18/06/2011
- [8] CHIAVERINI, V.; “Tecnologia Mecânica – Processos de Fabricação e Tratamento”, McGraw-Hill, Inc., 1986 p.55-58
- [9] MORO, N.; AURAS, A. P.; “Processos de fabricação”, Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Florianópolis, 2007, p.11
- [10] COLLINS, J.A.; “Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas”, LTC, Inc., 2006 p.321-329
- [11] CHIAVERINI, V.; “Aços Carbono e Aços liga”, Associação Brasileira de Metais, 1971 p.156-158

- [12] LIMA, F. B.; Microestrutura e tenacidade de aços baixa liga tipo 41xx – Uma abordagem quantitativa. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2006.
- [13] NISHA, S. C.; FATEMI, A.; “*Experimental evaluation and modeling of sulfur content and anisotropy of sulfide inclusions on fatigue behavior of steels*”. *International Journal of fatigue*, n. 526-537, 2008.
- [14] TEMMEL, C.; KARLSSON, B.; INGESTEN, N.; “*Fatigue anisotropy in cross-rolled, hardened medium carbon steel resulting from MnS inclusions*”. *Metall Mater Trans A* 2006;37a:2995–3007.
- [15] KAGE, M.; NISITANI, H.; “*Some consideration on the anisotropy of fatigue limit in a rolled steel plate, based on the observation of fatigue process in electropolished specimens*”. *Bull JSME* 1972;15(83):565–74.
- [16] ASM METALS HANDBOOK v.11 “*Failure Analysis and Prevention*”, 2002.
- [17] BROOKS, C. R.; CHOUDHURY, A.; “*Failure Analysis of Engineering Materials*”, McGraw-Hill, USA, 2002, ISBN 0-07-135758-0
- [18] AZEVEDO, A. G. L.; “Aplicação da técnica da dupla camada na soldagem do aço ABNT 1045.”, Fortaleza, 2002.
- [19] COLPAERT, H.; “*Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*”, Edgard Blücher, 3ª Ed., São Paulo, 1975.
- [20] HELMUT FISCHER Operators manual FERITSCOPE® FMP30, 2008