

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DIRCT / DIRGRAD / SELIB

CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

DISCIPLINA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

ÂNGELA CRISTINA ZILIO

MARIA IZABEL MARTINS TRINDADE

**ESTUDO DA TENACIDADE À FRATURA NO AÇO ASTM A516 PARA
VASOS DE PRESSÃO, ENVELHECIDO, APLICANDO ENSAIO DE
IMPACTO CHARPY**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2011

ÂNGELA CRISTINA ZILIO
MARIA IZABEL MARTINS TRINDADE

**ESTUDO DA TENACIDADE À FRATURA NO AÇO ASTM A516 PARA
VASOS DE PRESSÃO, ENVELHECIDO, APLICANDO ENSAIO DE
IMPACTO CHARPY**

Monografia apresentada à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, como requisito parcial para aprovação.

Orientador: Prof. César Lúcio M. Allenstein,
MSc.

CURITIBA

2011

RESUMO

TRINDADE, Maria Izabel Martins; ZILIO, Ângela Cristina. Estudo da tenacidade à fratura no aço A516 para vasos de pressão, envelhecido, aplicando ensaio de impacto Charpy. 2011. 64 f. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

Vasos de pressão são equipamentos essenciais para a indústria de processo. Eles podem atuar desde o armazenamento como também no processamento de fluídos gasosos e líquidos. São equipamentos que possuem como requisito principal suportar pressões elevadas. É esse mesmo requisito que preocupa a segurança, pois falhas durante o processo podem ser catastróficas. Um dos materiais utilizados para construção de vasos de pressão é o aço ASTM (*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS*) A516, que após conformação mecânica, seja por calandragem ou rebordeamento, pode estar susceptível a perda de tenacidade a fratura por deformação. Esta perda de tenacidade é efeito do envelhecimento, que se trata da difusão de elementos intersticiais para as linhas de discordância. Neste trabalho é apresentada a fundamentação teórica sobre o mecanismo de envelhecimento, a metodologia prescrita na norma ASME (*AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS*) SA516, que especifica os critérios de aceitação para o aço em questão, ensaios experimentais realizados durante o projeto e sua análise.

A perda da tenacidade é observada quando os corpos de prova, ensaiados por ensaio de impacto Charpy a 0°C, em estado de fornecimento apresentaram uma energia média para ruptura de 207J, enquanto os corpos de prova, depois de deformados e envelhecidos, apresentaram uma energia média de ruptura de 14J. O surpreendente resultado possui um significado ainda maior quando ensaiado a 20 °C, no qual uma energia média de 23J é suficiente para romper o corpo de prova envelhecido.

Palavras-chave: vasos de pressão, perda de tenacidade, envelhecimento, ASTM A516.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Curva tensão-deformação para aços de baixo carbono demonstrando envelhecimento. Fonte: Dieter (1981, p.181).	17
Figura 2 - Representação atômica da formação de atmosfera de Cottrell em uma discordância em aresta. Fonte: Wikipedia (2007) disponível em http://en.wikipedia.org/wiki/Cottrell_atmosphere	19
Figura 3 - Variação das propriedades mecânicas relacionada com os estágios de envelhecimento para um aço baixo carbono mantido a 200°C, resfriado bruscamente e pré-tracionado até 4%, depois envelhecido a 60°C. Fonte: Murari (2009, p. 13).....	22
Figura 4 - Desenho esquemático do ensaio de impacto de Charpy. Fonte: http://www.mspc.eng.br/	25
Figura 5 - Compilação de geometria de corpos de prova e posição de impacto de ensaios de impacto de Charpy e Izod. Fonte: Souza (1982) p. 84.....	26
Figura 6 - Fluxograma de ensaios.....	32
Figura 7 - Espectrômetro BRUKER utilizado para análise química, instalado na Spectroscan.	33
Figura 8 - Amostra do aço A516: três análises de composição química.	34
Figura 9 – Croqui indicativo da posição de remoção da amostra analisada por metalografia: Face 1 – transversal à direção de laminação; Face 2 - longitudinal à direção de laminação; Face 3 – paralela à maior superfície da chapa.	35
Figura 10 - Politriz Struers Dap-V.....	36
Figura 11 - Microscópio marca Olympus, modelo BX51M	37
Figura 12 – Fresadora ferramenteira marca Sinitron.....	38
Figura 13 - Dimensões do corpo de prova de ensaio de tração.....	39
Figura 14 - Corpos de prova para ensaio de tração	39
Figura 15 - Croqui esquemático de localização e orientação dos corpos de prova de tração	40

Figura 16 - Material bruto e corpo de prova para ensaio de tração.....	40
Figura 17 - Máquina Universal de Ensaio de Tração, marca EMIC, modelo DL30000.	42
Figura 18 – Temperatura dos corpos de prova em forno para envelhecimento.	43
Figura 19 - Dimensões do corpo de prova Charpy A	44
Figura 20 - Croqui da posição do corpo de prova de Charpy em relação à direção de laminação.....	45
Figura 21 – Diagrama do efeito da orientação do corpo de prova nas curvas de temperatura de transição Charpy. Fonte: Dieter (1981) p. 427.	45
Figura 22 - Recipiente de refrigeração de corpos de prova de ensaio de impacto de Charpy.....	46
Figura 23 - Máquina universal de ensaio de impacto, marca AMSLER, modelo D- 6700	46
Figura 24 – Representação tridimensional da microestrutura do aço ASTM A 516, gerado a partir do exame metalográfico. Ataque Nital 2%. Aumento 100X.....	48
Figura 25 - Análise metalográfica do aço ASTM A 516. Ataque Nital 2%. Aumento 100X. (a) Face 3, (b) Face 1, (c) Face 2	49
Figura 26 - Aço ASTM A 516, no estado de fornecimento. Ataque Nital 2%. Aumento 1000X.....	50
Figura 27 - Corpo de prova 3 após ensaio de tração até ruptura.....	51
Figura 29 – Gráfico obtido no ensaio de tração realizado em corpo de prova do aço A516 em estado de fornecimento até sua ruptura	51
Figura 28 - Aspecto da superfície de fratura do Corpo de prova 3.....	51
Figura 30 - Corpo de prova 2 após ensaio de tração até ruptura.....	53
Figura 31 – Aspecto da superfície de fratura do Corpo de prova 2	53
Figura 32 – Gráfico obtido no ensaio de tração realizado em corpo de prova do aço A516 após envelhecimento até sua ruptura.....	54
Figura 33 - Corpos de prova de Charpy - estado de fornecimento.....	55

Figura 34 – Aspecto das superfícies de fratura dos corpos de prova de Charpy (a) Corpo de prova 3, (b) Corpo de prova 2, (c) Corpo de prova 1. Apresentam aspecto de fratura com expansão lateral, fibrosa, dúctil.	56
Figura 35 – Aspecto das superfícies de fratura dos Corpos de prova de Charpy ensaiados a 20°C – Envelhecidos. Apresentam características de fratura dominante cristalina.	57
Figura 36 - Aspecto das superfícies de fratura dos Corpos de prova de Charpy ensaiados a 0°C – Envelhecidos. Apresentam características de fratura dominante cristalina.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos de composição química do aço SA516 Grau 60.....	29
Tabela 2 - Critérios de aceitação em ensaio de Tração	30
Tabela 3 - Critério de aceitação para o aço A516 em ensaio de impacto de Charpy a -40°C para o material normalizado, temperado ou rev enido.....	30
Tabela 4 - Dimensões para o corpo de prova de tração	39
Tabela 5 – Relação de amostras do ensaio de tração	41
Tabela 6- Dimensões do corpo de prova Charpy A.....	44
Tabela 7 - Controle dimensional dos corpos de prova do ensaio de Charpy.	44
Tabela 8 - Composição química da amostra de aço A516 Grau 60	47
Tabela 9 – Resultados obtidos no ensaio de tração até ruptura com material em estado de fornecimento.....	52
Tabela 10 – Resultados obtidos no ensaio de tração até ruptura com material após envelhecimento	54
Tabela 11 – Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy realizado a 0°C no material em estado de fornecimento	56
Tabela 12 – Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy realizado a 20°C no material após envelhecimento.....	57
Tabela 13 – Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy realizado a 0°C no material após envelhecimento.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Tema	9
1.2	Problema	9
1.3	Objetivos	9
1.4	Justificativa	10
1.5	Conteúdo do trabalho	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Vasos de Pressão	12
2.1.1	Materiais para Costados e Tampos de Vaso de Pressão	13
2.1.2	Seleção de Materiais	13
2.1.3	Aços Carbono	14
2.1.4	Comportamento da curva tensão-deformação no envelhecimento	16
2.1.5	Atmosfera de Cottrell	18
2.2	Comportamento dos Materiais	23
2.2.1	Comportamento dúctil e frágil	23
2.2.2	Falha por fratura	23
2.2.3	Tenacidade	24
2.2.4	Ensaio de impacto	24
3	METODOLOGIA	28
3.1	Descrição da Metodologia	28
3.2	Justificativa da metodologia	28
3.3	Produtos do projeto	28
3.4	Etapas do projeto	29
3.5	Materiais e métodos	29
3.5.1	Material	29
3.5.2	Procedimentos e Ensaio	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	Análise Química	47
4.2	Análise Metalográfica em Microscópio	48
4.3	Ensaio de Tração	50
4.3.1	Caracterização do Aço	50
4.3.2	Reaparecimento de limite de escoamento após envelhecimento	52
4.4	Ensaio de Impacto de Charpy	55
4.4.1	Análise da Tenacidade a Fratura após o envelhecimento por deformação	56
5	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – CINÉTICA DO ENVELHECIMENTO	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

Equipamentos como vasos de pressão, ao sofrerem processos de conformação durante sua fabricação, apresentam deformação plástica e podem apresentar envelhecimento por difusão de intersticiais.

O fenômeno do envelhecimento, dependendo das características do material e das condições operacionais, pode alterar propriedades mecânicas da matéria prima, como por exemplo, a tenacidade à fratura. Sabe-se que a perda da tenacidade à fratura pode conduzir a uma falha do material, logo é essencial a análise dos efeitos do envelhecimento na tenacidade à fratura do aço como matéria prima para vasos de pressão.

1.2 Problema

A deformação plástica, mais o agravante do envelhecimento, tornam indispensáveis as análises de integridade da matéria prima a fim de garantir que o material escolhido atenderá aos requisitos de segurança dos vasos de pressão.

A perda de tenacidade à fratura é um fator potencial de falha, e qualquer falha neste tipo de equipamento oferece riscos à segurança operacional. Além disso, prevendo o comportamento do material, gastos futuros com reparos ou até mesmo a inutilização do equipamento podem ser evitados.

1.3 Objetivos

O presente trabalho encontra-se dividido em dois principais objetivos:

- a) Trabalho de Conclusão de Curso 1: identificação e desenvolvimento dos conteúdos teóricos relacionados ao tema perda de tenacidade à fratura por difusão de intersticiais; estabelecimento de diretrizes para condução dos ensaios mecânicos;

- b) Trabalho de Conclusão de Curso 2: identificação da ocorrência de perda de tenacidade à fratura, devido ao envelhecimento por difusão de intersticiais, em uma chapa de aço ASTM A516 com 38 milímetros de espessura grau 60, através da análise de resultados obtidos nos ensaios.

1.4 Justificativa

Vasos de pressão são equipamentos com função de armazenamento e processamento de fluidos, fundamentais e amplamente aplicados nos processos industriais. Estes equipamentos necessitam resistir com segurança a pressões internas, que variam de acordo com o formato e tamanho do vaso. As consequências de uma falha em um vaso de pressão podem ser catastróficas, implicando até mesmo em risco de perdas de vidas.

Os vasos de pressão são, em geral, itens com maior tamanho, peso e custo em uma indústria de processo. Segundo Telles (1996), seu custo total, entre materiais e equipamentos, representa em média 60% do total presente na indústria e, por isso, são considerados equipamentos de extrema importância.

O processo de desenvolvimento e construção de um vaso de pressão exige a aplicação de várias normas e conhecimentos específicos para a escolha de materiais e processos que atendam as exigências de segurança e regulamentação. Isso faz com que o vaso de pressão se torne um produto de alto custo e valor agregado. As previsões de comportamento mecânico em campo são indispensáveis para evitar desperdícios em paradas de produção não programadas, reparos e uma vida útil menor do que a esperada para o equipamento.

1.5 Conteúdo do trabalho

Nos seguintes capítulos do projeto são abordados assuntos de importância significativa para a execução dos ensaios e para a análise do comportamento do material. No segundo capítulo apresenta-se a fundamentação teórica necessária sobre os seguintes assuntos: vasos de pressão, materiais utilizados em sua fabricação, mecanismos de envelhecimento, comportamento dúctil e frágil dos

materiais, tenacidade e ensaios de impacto, mais especificamente o Ensaio de Impacto de Charpy.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia adotada nos ensaios, baseada em normas. E, por fim, no quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios e suas respectivas análises e discussões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Vasos de Pressão

Vaso de pressão é um equipamento utilizado nas indústrias de processo, as quais trabalham com materiais que sofrem transformações físicas e químicas. Sua função é principalmente processar, armazenar e distribuir fluídos. Dentre as indústrias de processo que utilizam vasos de pressão, pode-se citar: indústria de alimentos, química e petroquímica, farmacêutica, entre outras.

Em sua maioria os vasos de pressão são fabricados a partir de chapas de aço carbono calandradas, conformadas e soldadas. Os processos que envolvem sua fabricação podem gerar defeitos, por isso a exigência de aplicação de ensaios em matéria prima e no produto em operação. Os ensaios aplicados podem ser destrutivos como: análise química, ensaio de tração e impacto, ou não-destrutivos como: ultrassom, radiografia, entre outros. Além dos defeitos de fabricação existem os defeitos ocasionados da operação do vaso de pressão devido ao meio e às condições operacionais as quais o equipamento está submetido.

Segundo Telles (1996) pode-se classificar os vasos de pressão da seguinte forma:

- a) vasos não sujeitos a chama: dentre estes, se encontram trocadores de calor, vasos de armazenamento e acumulação, torres de destilação fraccionada, reatores diversos e esferas de armazenamento de gás;
- b) vasos sujeitos a chama: caldeiras e fornos.

Ainda podem-se dividir as funcionalidades dos vasos de pressão não sujeitos a chama como:

- a) armazenagem de gases sob pressão (quase sempre sob a forma liquefeita);
- b) processamento de gases e líquidos;
- c) acumulação intermediária de gases e líquidos em processos industriais.

Vasos de pressão são, em geral, projetados e construídos sob medida, de maneira a atender condições específicas de desempenho. Por este motivo seu estudo antes da fabricação é tão importante.

Estão envolvidos no projeto do vaso de pressão não somente o seu dimensionamento físico, mas também a seleção técnica e econômica de materiais adequados, processos de fabricação e componentes de instalação.

2.1.1 Materiais para Costados e Tampos de Vaso de Pressão

A variedade de materiais empregados para a fabricação de costados e tampos de vasos de pressão é grande. São dois os grupos que iniciam uma classificação para eles dividindo-os, então, em materiais metálicos e não-metálicos. Onde materiais não-metálicos podem ser resumidos em plásticos termoestáveis reforçados.

Segundo Telles (1996) os materiais metálicos são mais usuais e são subdivididos em ferrosos e não-ferrosos. Dentre essa gama de materiais o aço-carbono, pertencente ao grupo de materiais ferrosos, é o mais comum para essa finalidade, tendo em vista disponibilidade, sua boa soldabilidade e seu baixo custo.

Existem atualmente vários documentos normativos que contém a chamada especificação de material. Esses documentos reúnem um conjunto de normas que visam, de maneira padronizada, descrever as propriedades dos materiais sendo elas mecânicas, físicas ou químicas. O perfeito conhecimento das propriedades do material é essencial para a construção de um vaso de pressão e é com base nesses documentos que se define o melhor material para o vaso de pressão. O código ASME, Secção VIII, Divisões 1 e 2 (1998) contém o conjunto de normas com as exigências e restrições quanto aos materiais que podem ser empregados em vasos de pressão.

2.1.2 Seleção de Materiais

A seleção de materiais para a fabricação de vasos de pressão é um problema difícil de ser solucionado, pois depende de vários fatores. Telles (1996) cita os

principais fatores determinantes para a escolha do material mais apropriado, dentre eles consideram-se significantes para o contexto do presente trabalho:

- a) temperatura de serviço: deve-se levar em consideração a temperatura de operação e a variabilidade desta grandeza exercida sobre o material. Deve-se atentar a faixas normais e anormais destes aspectos, como o caso do aço ASME A516, o qual é específico para trabalho em baixa e moderada temperaturas, que compreende uma faixa de -45°C à 0°C .
- b) nível de tensões no material: a resistência mecânica do material deve ser compatível com a pressão exercida no mesmo, e para tanto, deve-se escolher o material resistente que possa ser feito na espessura correta. A Norma ASME Seção II A SA516 (1998), especifica o nível de tensões aceitável para o aço a ser analisado.
- c) natureza dos esforços mecânicos: a natureza dos esforços mecânicos que o vaso sofrerá também é influente na escolha do seu material constituinte. Lembrando que a pressão interna produz um estado triaxial de tensões conformar demonstrado por Johnston (1995).
- d) forma de apresentação do material e processo de fabricação: dependendo da forma de apresentação do material desejada (chapas finas ou grossas, tubos para condução ou para troca de calor, acessórios de tubulação, entre outras), alguns materiais podem ou não ser ideais devido a sua capacidade de assumirem estas formas específicas. Além disso o processo de fabricação, por exemplo a conformação mecânica, pode gerar uma alteração nas propriedades do material.

2.1.3 Aços Carbono

Conforme já mencionado, o aço carbono é o material mais usual para a fabricação de vasos de pressão. Suas propriedades são influenciadas geralmente pela temperatura de trabalho e composição química.

Ao analisar a quantidade de carbono nos aços, devem-se considerar as etapas de fabricação do vaso de pressão. Segundo Telles (1996) para áreas de solda não é aconselhável na composição química quantidades superiores a 0,3% de carbono equivalente, pois uma maior concentração de carbono implica em alta susceptibilidade a trincas de hidrogênio nessas regiões devido à ação do hidrogênio retido. Para as partes não soldadas é importante considerar que o aumento da quantidade de carbono tem consequências como o aumento dos limites de resistência e de escoamento, da dureza e temperabilidade do aço e também prejudicam a ductilidade e soldabilidade.

Para temperaturas de trabalho superiores a 400°C ou inferiores a 0°C, recomenda-se a aplicação de aços carbono acalmados, os quais possuem adição de Si, em torno de 0,6%. Aços acalmados têm uma frequência de defeitos internos menor, com uma estrutura metalúrgica fina e uniforme.

Um fenômeno de caráter crítico para vasos de pressão é a ocorrência da transição dúctil frágil em baixas temperaturas, que pode causar fratura frágil. Generalizando, em temperaturas entre -45°C e 0°C o uso de aço carbono deve ser empregado com maior cuidado. A norma ASME, Seção VIII, Divisão 2 (1998) exige teste de impacto para o aço carbono A516 com espessuras acima de 25mm e temperatura de trabalho abaixo de -16°C. Porém, considerando as consequências catastróficas de uma falha em vaso de pressão, o teste de impacto deve ser realizado sempre que a temperatura mínima de trabalho seja igual ou inferior a 0°C.

2.1.3.1 Envelhecimento

Conforme mencionado na publicação de Rybakova (1991), a partir do século XIX iniciou-se pesquisas sobre os efeitos do envelhecimento em aços, sendo os grandes pioneiros Bauschinger e Chernov, desde então outros autores, como Cottrell (1949), descrevem as alterações das propriedades dos metais e o efeito do fenômeno de envelhecimento. Não existem dúvidas quanto à importância do envelhecimento pelo fato de implicar, principalmente, em fragilização do material.

O envelhecimento de aços baixo carbono é associado com a redistribuição de intersticiais, carbono (C) e nitrogênio (N), em solução sólida, preferencialmente em locais de discordâncias. A taxa de endurecimento e fragilização com iguais condições deve depender da quantidade de átomos de carbono e nitrogênio capazes de se redistribuírem. Sarraf em seu artigo, Investigação do Envelhecimento em Aços Acalmados (1964), mostra que em aços baixo carbono uma mínima quantidade de elementos de impureza tem um considerável efeito sobre a sensibilidade do aço ao envelhecimento. O resultado de sua investigação mostrou que o aumento da tensão em determinada orientação (σ_y) está conectada com o aumento do parâmetro $Kd^{1/2}$ na equação de Hall-Patch, demonstrada na equação (1), a seguir:

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{1/2}, \quad (1)$$

onde K é o coeficiente que expressa o grau de desorientação no plano de escorregamento ativo no grão (de diâmetro d).

2.1.4 Comportamento da curva tensão-deformação no envelhecimento

Dieter (1981) define envelhecimento como sendo um comportamento associado ao escoamento descontínuo no qual um metal previamente deformado a frio tem sua resistência mecânica aumentada. Porém a ductilidade do material é diminuída com o aquecimento, a temperaturas relativamente baixas. Pode-se ilustrar melhor esse comportamento analisando a Figura 1, a seguir:

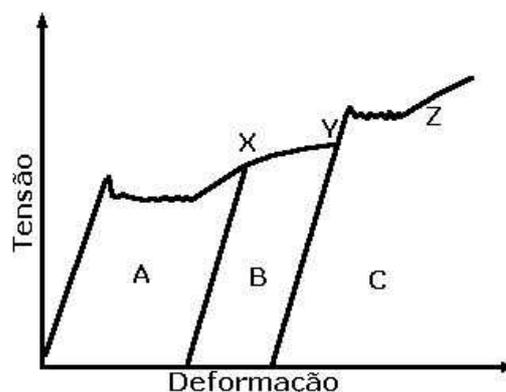


Figura 1 - Curva tensão-deformação para aços de baixo carbono demonstrando envelhecimento. Fonte: Dieter (1981, p.181).

A região A do diagrama representa a curva tensão-deformação para um aço baixo carbono deformado plasticamente através da aplicação de uma carga trativa, para uma deformação correspondente ao ponto X. É retirada então a carga do material e, sem ser submetido a tratamento térmico, faz-se um novo carregamento referente à região B. Nesta região percebe-se que o escoamento descontínuo não ocorre, pois as discordâncias foram libertas das atmosferas de átomos de carbono e nitrogênio. Continua-se o carregamento até alcançar a deformação do ponto Y onde é novamente descarregado. Após o envelhecimento, que pode ocorrer em alguns dias à temperatura ambiente, ou em menor tempo utilizando forno, se ele for recarregado, o escoamento descontínuo reaparece caracterizado pela curva tensão-deformação de Y até Z.

A razão do reaparecimento do escoamento descontínuo deve-se à difusão dos átomos intersticiais de carbono e nitrogênio para as discordâncias durante o envelhecimento e, assim, formando novas atmosferas de intersticiais, que ancoram as discordâncias.

O controle de envelhecimento por deformação de aços baixo carbono é feito adicionando elementos como alumínio e vanádio, com o objetivo de diminuir a quantidade de átomos de carbono e nitrogênio em solução. Deve-se ressaltar que medidas de controle não eliminam o envelhecimento por deformação dos aços com baixo teor de carbono.

2.1.5 Atmosfera de Cottrell

A atmosfera de Cottrell, segundo Cottrell (1976), ocorre em materiais de estrutura cúbica de face centrada com pequenos átomos de impureza, como carbono e nitrogênio. Como esses átomos intersticiais distorcem um pouco a estrutura, haverá um campo de tensão residual ao redor desse interstício. Esse campo de tensões pode ser aliviado por um átomo intersticial difundido num plano de discordância, que contenha uma lacuna em seu núcleo. Uma vez que o átomo está difundido, ele se acomoda. Normalmente apenas um átomo intersticial é necessário por plano da grade de deslocamento, para aliviar o campo de tensões.

Uma vez que a discordância é assentada, uma força extra é demandada para retorná-la ao seu estado anterior, elevando a tensão de escoamento. Após esse retorno ao estado anterior, as discordâncias ficam livres para se movimentarem no cristal, resultando em um subsequente limite de escoamento mais baixo, e o material se deforma plasticamente com maior facilidade.

Ao submetermos o material a condições em que ocorra o envelhecimento, permite-se novamente a difusão de átomos de carbono em volta dos núcleos de discordâncias, resultando novamente na elevação da tensão de escoamento.

A atmosfera de Cottrell leva à formação de banda de Lüders, que são regiões de deformação plástica localizada, tornando-se um obstáculo ao processamento do material. Alguns aços são projetados para evitar o efeito da atmosfera de Cottrell. Através da remoção de todos os átomos intersticiais, da adição de titânio para remover nitrogênio e da descarbonização, é possível neutralizar esse efeito. Uma representação visual pode ser analisada na Figura 2, a seguir:

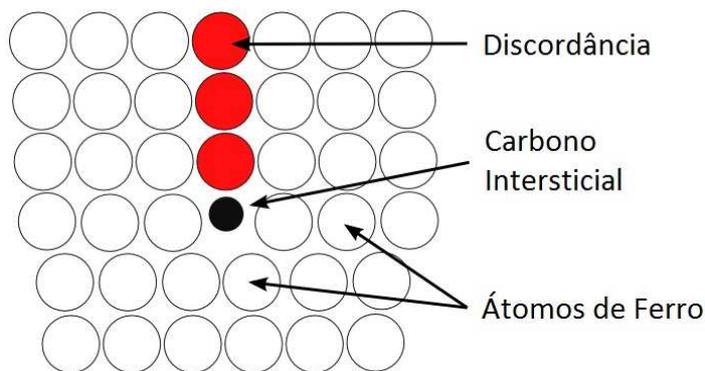


Figura 2 - Representação atômica da formação de atmosfera de Cottrell em uma discordância em aresta. Fonte: Wikipedia (2007) disponível em http://en.wikipedia.org/wiki/Cottrell_atmosphere

Segundo Hertzberg (1996), a teoria de Cottrell não se aplica para os últimos estágios da formação da atmosfera por desprezar a variação da concentração de átomos de carbonos livres e a saturação de discordâncias. Harper (1951) tentou modificar a teoria assumindo que a taxa de segregação de átomos de carbono fosse proporcional ao carbono remanescente em solução sólida. Porém sua descoberta também não se mostrou aplicável para a investigação da formação da atmosfera de Cottrell para essa situação. A teoria da cinética do envelhecimento elaborada por Cottrell e Bilby (1949), e posteriormente modificada por Harper (1951), é demonstrada matematicamente no Apêndice A.

Durante o envelhecimento, átomos de carbono podem também segregar para os contornos de grão e para as partículas de carbeto pré-existent, fatores esses que também afetam a formação da atmosfera de Cottrell. Porém nenhum desses fatores foi abordado teoricamente.

2.1.5.1 Modelo Teórico

Cottrell e Bilby (1949) propuseram um modelo para explicar o fenômeno de envelhecimento baseado no alívio das tensões elásticas ocasionadas pela presença de soluto no campo das discordâncias. A difusão de átomos de soluto forma as atmosferas de Cottrell devido às condições cinéticas favoráveis. A resistência do cristal aumenta devido à diminuição de energia proveniente da associação dos

átomos de solutos com as discordâncias, gerando um aumento na tensão para movimentá-las.

O coeficiente de difusão do soluto é o fator de controle da velocidade de movimentação dos átomos de soluto para as discordâncias. Temperaturas mais elevadas propiciam um aumento das velocidades de difusão ocasionando uma rápida concentração de soluto em torno das discordâncias até uma temperatura limite. Caso os átomos de soluto se atraiam mutuamente, a precipitação de uma segunda fase cristalina é iniciada próximo às discordâncias. Ao ser atingido o equilíbrio com essa nova fase o fluxo de soluto entre as duas fases é limitado. A partir do equilíbrio a concentração de soluto no cristal é reduzida ao mínimo possível.

No caso de não existir essa atração entre os átomos de soluto, não há a formação de uma nova fase, e o equilíbrio é estabelecido através da igual quantidade de átomos de soluto que entram e saem de um mesmo volume de material no qual se encontra uma discordância. Nessas condições os átomos de soluto serão concentrados próximos as discordâncias, se comparado ao reticulado vizinho, caracterizando então a formação da atmosfera de Cottrell.

Murari (2009) explica que nesse caso, um aumento da temperatura tem por consequência um aumento da entropia do cristal, fazendo com que os átomos de soluto separem-se das discordâncias, diminuindo sua concentração ao redor das mesmas. A diminuição de concentração é grande, ao ponto de não mais existir atmosferas de soluto quando a temperaturas muito elevadas. Existe então uma tendência em diminuir a concentração de átomos de carbono e nitrogênio, abaixo do valor médio do material, devido à tensão de compressão oriunda de uma linha superior da discordância em aresta. Simultaneamente tem-se a atração dos átomos devido à tensão de tração inferior à discordância. Deste modo, ao analisar a atmosfera ao redor de uma discordância em aresta, nota-se uma menor concentração de intersticiais acima do plano adicional do que abaixo dele. As atmosferas, geralmente, movem-se juntamente com as discordâncias. Porém, quando esse movimento acontece de maneira a afastar a atmosfera da discordância, uma tensão efetiva surge sobre os átomos de soluto, atraindo-os a disposição de equilíbrio e propiciando que a atmosfera fique atrás da discordância.

O movimento da discordância no cristal acaba por atrair mais átomos de soluto para a atmosfera e simultaneamente, uma mesma quantidade de átomos de soluto deixa a atmosfera, no sentido contrário ao movimento. O resultado desse processo é um realinhamento dos átomos de soluto que se encontram acima do plano de escorregamento, para posições inferiores a esse plano. O movimento das discordâncias associado a atmosfera de Cottrell implica em um conceito dinâmico, e esse influi diretamente sobre essa movimentação.

A movimentação pode ser dificultada devido à interação entre átomos de soluto da atmosfera e a discordância, sendo necessário um aumento na tensão que está sendo aplicada para que a discordância se desloque. Logo se entende que a tensão de arraste, devido à atmosfera da discordância, é um elemento importante na deformação plástica de um material.

A formação das atmosferas de soluto ao redor das discordâncias é um fator influente na definição do limite de escoamento verificado após o envelhecimento. Isso acontece, pois com o envelhecimento as discordâncias são ancoradas. Para que os átomos se concentrem em torno das discordâncias, é preciso que antes esses se difundam no reticulado. A temperatura é outro parâmetro que define o limite de escoamento, quanto mais elevada é a temperatura maior é o coeficiente de difusão do átomo de soluto, e mais depressa o limite de escoamento reaparece.

As alterações das propriedades mecânicas, devido ao envelhecimento, podem ser representadas em quatro estágios, conforme apresentado na Figura 3, a seguir.

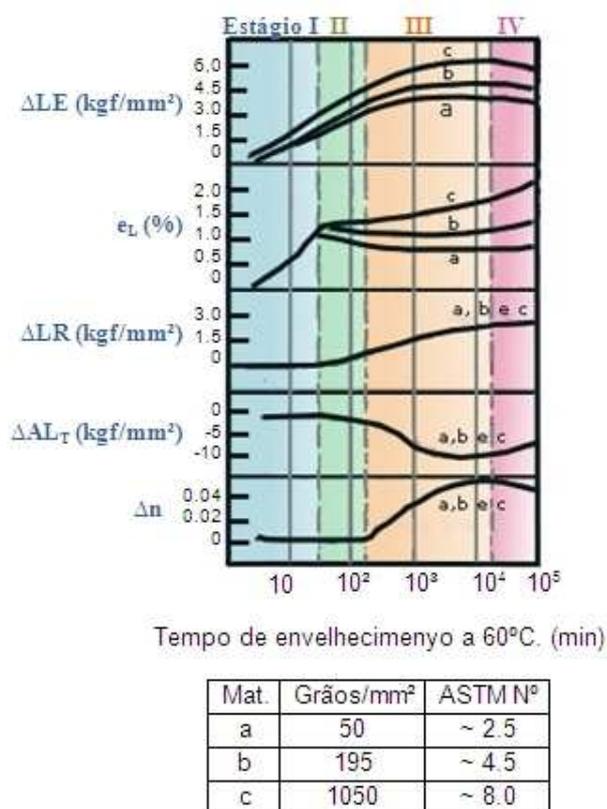


Figura 3 - Variação das propriedades mecânicas relacionada com os estágios de envelhecimento para um aço baixo carbono mantido a 200°C, resfriado bruscamente e pré-tracionado até 4%, depois envelhecido a 60°C. Fonte: Murari (2009, p. 13)

Sendo ΔLE a variação do limite de escoamento, e_L a deformação de Lüders, ΔLR a variação do limite de resistência, ΔAL_T variação no alongamento total e Δn a variação no expoente de encruamento, e todas essas as propriedades avaliadas após o envelhecimento, tem-se os seguintes estágios:

- I. Primeiro estágio - a tensão de escoamento aumenta assim como a deformação de Lüders. Nela as discordâncias começam a ser ancoradas até um limite ao qual a densidade da atmosfera alcança o valor de um átomo de soluto por plano atômico, ao longo da linha.
- II. Segundo estágio - o limite de escoamento aumenta, mas a deformação de Lüders continua constante. Nuvens de intersticiais são formadas ao redor das discordâncias, limitando assim seu movimento. Pode ser verificada uma formação inicial de precipitados nas linhas de discordâncias.

III. Terceiro estágio – difere-se do estágio anterior pelo aumento do expoente de encruamento, acarretando um endurecimento do material.

IV. Quarto estágio – as propriedades do material são recuperadas, redistribuição do soluto agora nos contornos de grão.

2.2 Comportamento dos Materiais

2.2.1 Comportamento dúctil e frágil

O comportamento mecânico dos materiais submetidos a cargas podem dividi-los em dois grupos: dúcteis e frágeis. Esta divisão leva em consideração a propriedade do material em suportar deformação plástica ou permanente, denominada ductilidade. Materiais dúcteis permitem a redistribuição de tensões localizadas suportando, assim, uma maior deformação plástica, enquanto em materiais frágeis a fratura ocorre inesperadamente. A fragilidade não é uma propriedade absoluta do material. Conforme ressaltado por Dieter (1981), um metal dúctil à temperatura ambiente pode se tornar frágil quando exposto a elementos fragilizantes como o hidrogênio ou a baixas temperaturas e altas taxas de carregamento.

2.2.2 Falha por fratura

Os metais podem falhar por fratura de três diferentes maneiras: fratura frágil repentina, fadiga e fratura retardada. Uma fratura frágil repentina pode ocorrer em metais dúcteis sob condições específicas, que favorecem a transição dúctil-frágil do material. Entre estas condições as mais impactantes são: baixas temperaturas, aumento da taxa de carregamento e presença de um estado complexo de tensões. Um material frágil sob carregamento estático pode romper sem evidências externas de escoamento, como micro deformação visível.

2.2.3 Tenacidade

A tenacidade é a propriedade do material definida por Callister (2002), como a capacidade de absorver energia antes da fratura. Ela compreende tanto a resistência quanto a ductilidade do material e pode ser enxergada como a área sob a curva tensão-deformação. Esta propriedade pode ser medida através de ensaios de impacto.

2.2.4 Ensaio de impacto

Segundo Hertzberg (1996), antes dos conceitos de mecânica da fratura serem desenvolvidos, engenheiros procuraram amostras de laboratório de tamanho e condições de ensaio adequados. Para que não fosse necessário recorrer ao custo excessivo de testes destrutivos de componentes de engenharia em grande escala.

Esses exames laboratoriais empregaram condições experimentais que poderiam suprimir a capacidade do material em deformar plasticamente pela elevação do limite de escoamento elástico: ensaios a baixas temperaturas, elevadas taxas de deformação, e um estado de tensões multiaxial causado pela presença de um entalhe ou defeito na amostra. Estas medidas tinham como objetivo antecipar o pior conjunto possível de circunstâncias que possam cercar uma falha potencial,

Segundo Dieter (1981) três fatores básicos contribuem para uma fratura frágil por clivagem, ou seja, que ocorre em planos cristalográficos específicos: um estado triaxial de tensões, temperatura baixa e taxa de deformação elevada ou alta taxa de carregamento rápida. Porém, para que ocorra a fratura frágil não é necessária a manifestação simultânea dos três fatores. Os principais responsáveis pela maioria das falhas do tipo frágil que ocorrem em serviço são a presença de um estado triaxial de tensões e uma temperatura baixa. Como estes dois efeitos são acentuados a uma taxa de carregamento elevada, vários tipos de testes de impacto têm sido utilizados para determinar a suscetibilidade dos materiais à fratura frágil.

Através do ensaio de impacto pode-se determinar a faixa de temperatura para a qual ocorre a transição dúctil-frágil do material. Para isso o teste deve ser executado em um intervalo de temperaturas. Alguns materiais apresentam uma mudança significativa na absorção de energia quando uma vasta gama de

temperaturas é examinada. Na verdade, essa súbita mudança ou transição de absorção de energia com a temperatura sugeriu aos engenheiros a possibilidade de projetar componentes estruturais com uma temperatura de operação acima da qual não seria esperada a falha do componente.

O ensaio de impacto tem por objetivo medir a tendência de um metal a se comportar de uma maneira frágil. Uma flexão por impacto, produzida por um martelo pendular, é aplicada a um corpo de prova padronizado e provido de um entalhe. O entalhe tem como função localizar a ruptura, produzindo um estado triaxial de tensões.

A energia absorvida pelo corpo de prova, necessária para deformá-lo e rompê-lo, pode ser medida pela diferença entre a altura atingida pelo martelo antes e depois do impacto e multiplicada pelo seu peso. Em geral, a energia pode ser lida na própria máquina de ensaio, através de um ponteiro em uma escala graduada. Na Figura 4, a seguir, é demonstrado um desenho esquemático do ensaio de impacto de Charpy.

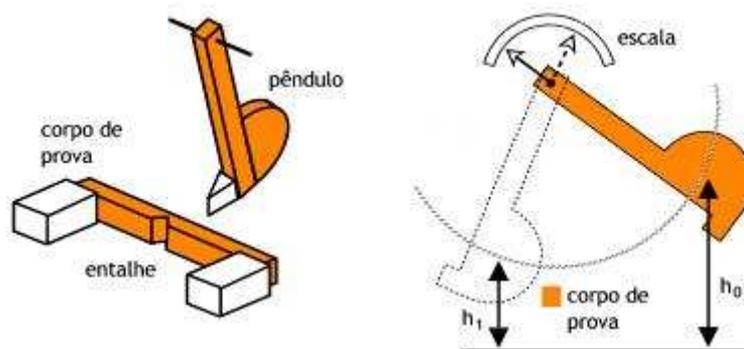


Figura 4 - Desenho esquemático do ensaio de impacto de Charpy. Fonte: <http://www.mspc.eng.br/>.

A partir da área de secção entalhada do corpo de prova, é possível obter a energia absorvida por unidade de área. Esta é uma informação útil ao comportamento do metal: quanto menor a energia absorvida, mais frágil é seu comportamento.

É importante salientar que o estado tridimensional de tensões produzido é suficiente para provocar a ruptura frágil, porém não é possível medir

satisfatoriamente os componentes das tensões. O significado e interpretação do ensaio de impacto são limitados a uma comparação de materiais ensaiados nas mesmas condições.

Os dois principais métodos de ensaio de impacto empregados são Charpy e Izod. Os dois métodos utilizam o mesmo aparato de ensaio, ou seja, o martelo pendular, porém os ensaios diferem na fixação, posição e geometria dos corpos de prova. Na Figura 5, a seguir, são demonstrados os tipos de corpos de prova e sua respectiva fixação para cada método de ensaio.

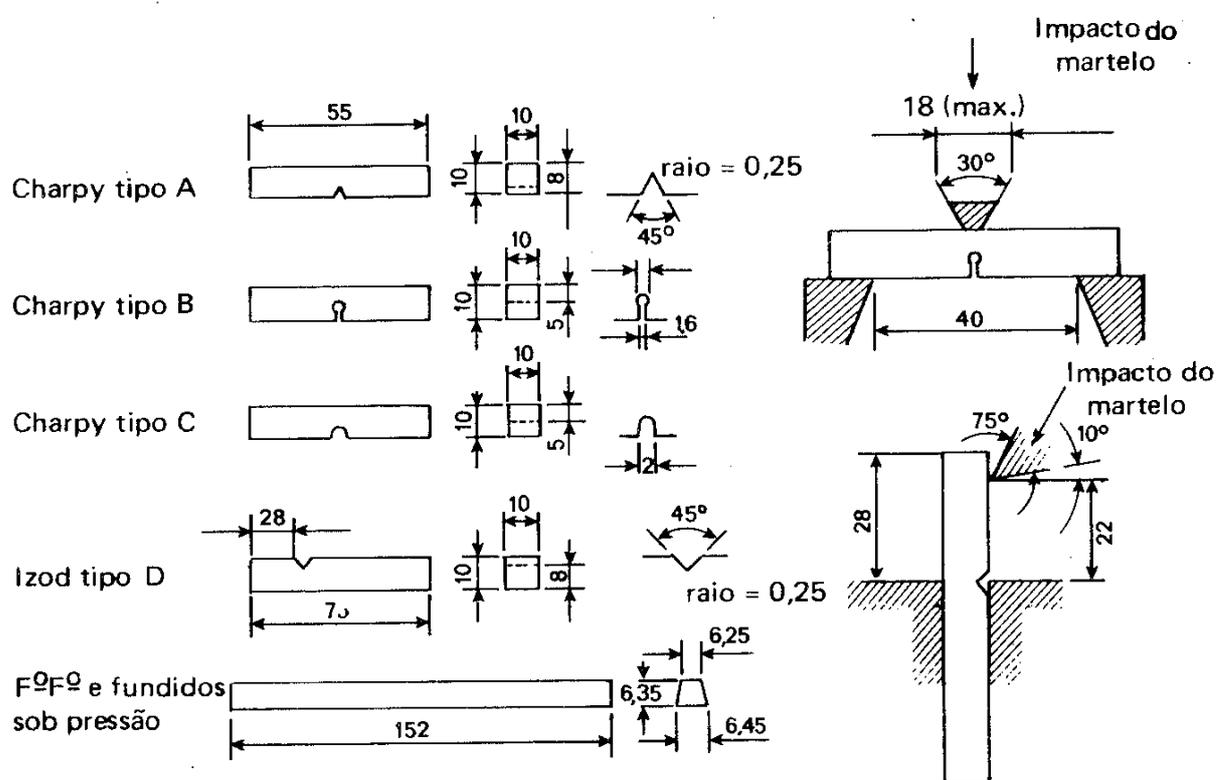


Figura 5 - Compilação de geometria de corpos de prova e posição de impacto de ensaios de impacto de Charpy e Izod. Fonte: Souza (1982) p. 84.

2.2.4.1 Ensaio de Impacto de Charpy

O ensaio de impacto de Charpy é amplamente utilizado por ser de relativa simplicidade e utilizar corpos de prova pequenos e de baixo custo. Este ensaio fornece um teste de resistência relativamente severo do material. A norma regulamentadora dos testes é a ASTM A370 (2003), onde estão definidos todos os parâmetros a serem controlados no ensaio.

O ensaio consiste em apoiar o corpo de prova como uma viga em posição horizontal na máquina com distância entre apoios de 40 mm. Um martelo é montado na extremidade de um pêndulo e ajustado em uma posição inicial, de forma que sua energia cinética no ponto de impacto tenha um valor fixo e especificado, então o martelo é solto atingindo o corpo de prova. A altura que o martelo atinge após o impacto e rompimento do corpo de prova é inversamente proporcional à energia absorvida para rompê-lo e deformá-lo. O ensaio somente é válido se houver o rompimento do corpo de prova, ou seja, a separação total das partes rompidas.

Os corpos de prova de Charpy podem dividir-se em três tipos, conforme a forma do entalhe, em tipo A, B ou C. Indiferente de seu tipo, eles possuem uma secção quadrada de 10 mm de lado e comprimento de 55 mm e um entalhe é feito, em forma de V, no meio dos corpos de prova. O corpo de prova de Charpy tipo A, com entalhe mais agudo e profundo, é o mais indicado quando se pretende mostrar as diferenças de energia absorvidas nos ensaios de metais com velocidades menores de ensaio. Isto se deve ao fato de as condições propiciarem a ruptura de caráter frágil, devido a um aumento da tensão radial em relação à tensão transversal de cisalhamento.

A região do entalhe do corpo de prova é submetida a uma tensão de tração assim que ocorre a flexão devido ao impacto com o martelo, assim tem-se um estado triaxial de tensões (radial ao entalhe, transversal e longitudinal). Porém, como o estado tridimensional de tensões não é uniforme através do corpo de prova, o ensaio não fornece um valor quantitativo de tenacidade. Logo a energia medida é um valor relativo e comparativo entre resultados, que devem ser obtidos nas mesmas condições de ensaio. É então recomendado fazer-se no mínimo três ensaios com a mesma condição de temperatura.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição da Metodologia

A metodologia adotada para o projeto consiste em revisão bibliográfica dos assuntos envolvidos, planejamento experimental, experimentação e análise dos resultados.

O planejamento experimental inclui a descrição dos ensaios a serem realizados, de acordo com as exigências das normas ASME Seção II A SA516 (1998) e ASME Seção II A SA20 (1998). A norma ASME SA20 contém requisitos gerais de chapas de aço para vasos de pressão, e a norma ASME SA516 contém a especificação para chapas de aço carbono para vasos de pressão com temperaturas de trabalho de baixas a moderadas.

3.2 Justificativa da metodologia

Vasos de pressão são equipamentos que exigem atenção especial quanto ao grau de confiabilidade de segurança e atendimento a regulamentações. As normas regulamentadoras de projeto, construção e inspeção são de extrema importância e devem ser aplicadas fielmente.

Para a execução de um projeto experimental baseado em normas, é importante a revisão teórica dos assuntos envolvidos para que os resultados obtidos na experimentação possam ser devidamente explicados. Também é de extrema importância que os ensaios sejam conduzidos de acordo com as exigências normativas, para que os resultados sejam confiáveis.

3.3 Produtos do projeto

O produto principal do projeto será o detalhamento das análises dos resultados dos ensaios onde será constatado se o material atende ou não os requisitos exigidos em norma, e, principalmente, se a perda da tenacidade à fratura do material ocorre conforme pressuposto. Esse produto foi apresentado em forma de monografias em Trabalho de Conclusão de Curso 1 e Trabalho de Conclusão de Curso 2.

3.4 Etapas do projeto

As atividades desenvolvidas no projeto ocorreram dentro dos cronogramas das disciplinas Trabalho de Conclusão de Curso 1 e Trabalho de Conclusão de Curso 2, conforme descrito a seguir:

- a) Trabalho de Conclusão de Curso 1:
 - a. Revisão bibliográfica dos conteúdos relevantes ao projeto, conceitos teóricos e definições.
 - b. Especificação de condições de teste e preparação de corpos de prova padronizados conforme exigências normativas.
 - c. Início dos testes na Spectroscan.
- b) Trabalho de Conclusão de Curso 2:
 - a. Finalização dos testes na Spectroscan.
 - b. Análise crítica dos resultados obtidos.
 - c. Conclusões do projeto.

3.5 Materiais e métodos

3.5.1 Material

O material estudado é um aço de baixo carbono para vasos de pressão, aplicável a temperaturas de trabalho de baixas a moderadas, denominado A516. O aço, em seu estado de fornecimento, trata-se de uma chapa laminada com espessura de 38 mm grau 60, cedida pela Spectroscan.

O material é regulamentado pelas normas ASME Seção II A SA516 (1998) e ASME Seção II A SA20 (1998). A composição química do aço de acordo com a norma é apresentada na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 - Requisitos de composição química do aço SA516 Grau 60

Elementos	Composição (%)
Carbono, Max	0.23
Manganês:	0.79 – 1.30
Fósforo, Max	0.035
Enxofre, Max	0.035
Silício:	0.13 – 0.45

Na Tabela 2, a seguir, é apresentado o critério de aceitação para o aço A516 grau 60 em ensaio de tração.

Tabela 2 - Critérios de aceitação em ensaio de Tração

Resistência à tração [MPa]	415 – 550
Tensão de escoamento, min. [MPa]	220
Alongamento em 200mm, min., %	21
Alongamento em 50mm, min., %	25

Na Tabela 3, a seguir, é apresentado o critério de aceitação para o aço A516 grau 60 em ensaio de impacto de Charpy realizado a -40°C.

Tabela 3 - Critério de aceitação para o aço A516 em ensaio de impacto de Charpy a -40°C para o material normalizado, temperado ou revenido.

Média para três corpos de prova, [J], min.	18
Mínimo para um corpo de prova, [J], min.	14

3.5.2 Procedimentos e Ensaio

Com o objetivo de determinar a resistência de um material, simulam-se os possíveis esforços de tração, compressão, flexão, torção, cisalhamento e pressão interna, dependendo de sua aplicabilidade. Souza (1982) explica que a finalidade do material, os esforços ao qual será solicitado e as propriedades mecânicas a serem medidas são os principais fatores para a escolha do ensaio mecânico mais adequado.

Para a correta realização dos ensaios, é necessário utilizar-se de normas técnicas referentes à especificação de materiais e aos métodos de teste utilizados. Um método descreve o procedimento correto para a realização de um ensaio específico, define os conceitos e recomenda como os resultados devem ser fornecidos.

A especificação do material menciona valores, ou intervalo de valores, mínimos das propriedades mecânicas que o material deve atender, dependendo de sua

finalidade. Pela especificação, verificam-se quais são os ensaios necessários, descartando os ensaios sem importância.

As normas utilizadas como referencial para os ensaios a serem realizados são:

- a) norma para especificação de material: ASME SA516 - Especificação de chapas para vasos de pressão, aço carbono, para temperatura de serviço baixa e moderada (1998);
- b) método de ensaio e alguns critérios de aceitação: ASME SA20 - Especificações para requisitos gerais para chapas de aço para vasos de pressão (1998);
- c) método de ensaio: ASTM A370 - Métodos de ensaio padronizados e definições para ensaios mecânicos de produtos de aço (2003).

Os ensaios previstos em norma que foram realizados, na Spectroscan, são os seguintes:

- a) análise química;
- b) análise metalográfica por microscópio
- c) ensaio de tração;
- d) envelhecimento;
- e) ensaio de Impacto de Charpy.

Na Figura 6, a seguir é apresentado o fluxograma de ensaios, onde os números abaixo de cada etapa representam o respectivo item detalhado nessa monografia.

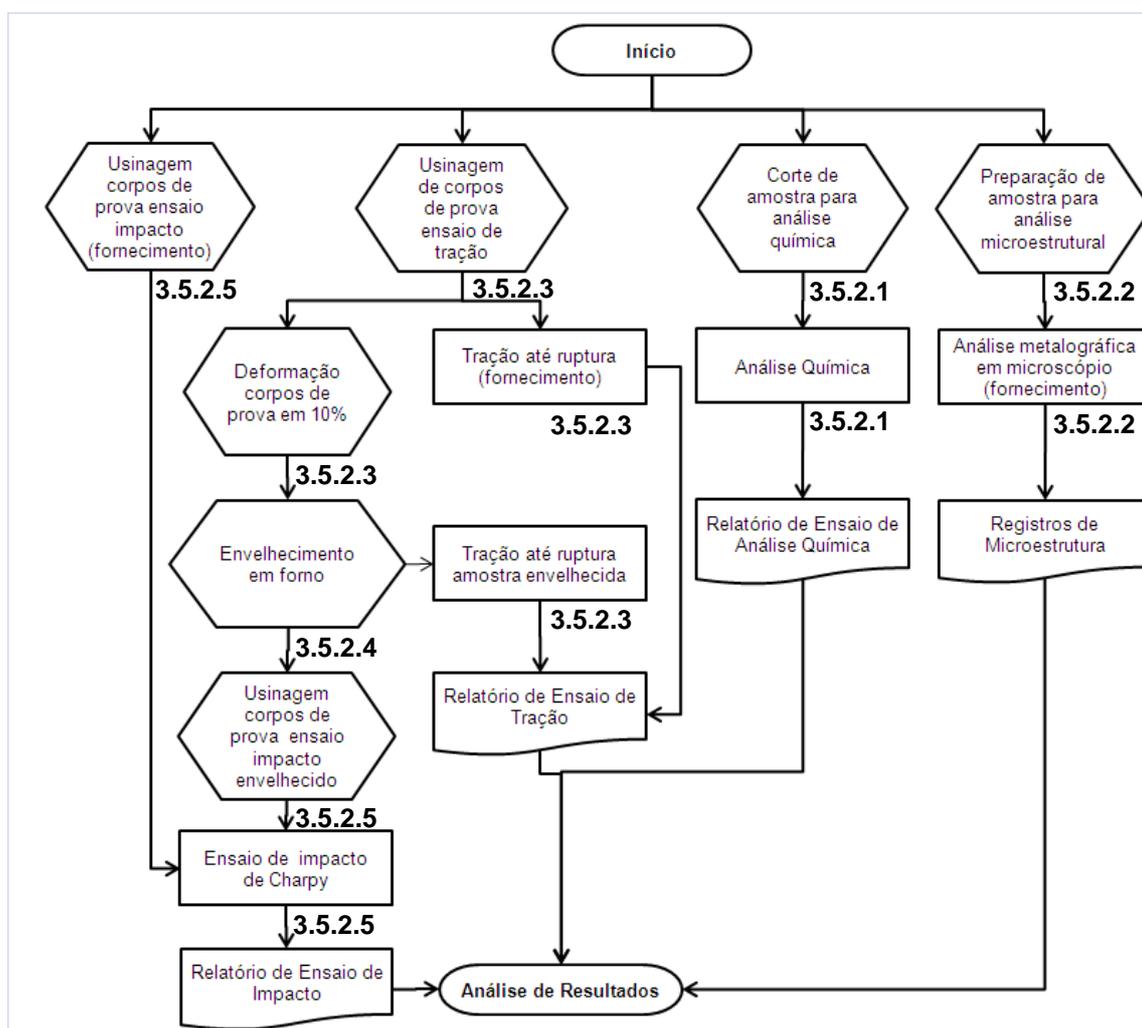


Figura 6 - Fluxograma de ensaios

3.5.2.1 Análise Química

O ensaio de análise química tem o objetivo de determinar quantitativamente os constituintes do material, e também para fornecer uma análise elemental qualitativa. Um exemplo de sua aplicação é a rápida determinação dos elementos de liga em aços.

Existem várias técnicas para se obter a composição química de um material e uma das mais utilizadas é a espectroscopia de emissão óptica, por ser uma técnica útil e flexível. Os métodos da espectrometria de emissão óptica são originados de experimentos realizados no século XIX e partem do princípio de que quando átomos livres são colocados em um ambiente energético, emitem luz em intervalos limitados de comprimentos de onda. Estes intervalos, denominados linhas de emissão formam

um padrão, o espectro emissivo, que é uma característica do átomo que o produz. A presença de um elemento de liga na amostra é indicada pela presença de uma linha de emissão característica e a concentração do elemento pode ser determinada pela medição da intensidade da linha.

Para análise química de aços para vasos de pressão, segundo a norma ASME Seção 2A SA20 (1998), pode-se realizar o teste em dois casos: nos lingotes de fusão ou no produto acabado, no caso a chapa laminada. Para a análise em produto acabado, a amostra deve ser retirada do corpo de prova rompido no teste de tração ou da mesma região da chapa onde o corpo de prova foi obtido.

A análise da composição química na amostra de aço A516 foi rastreada em padrões de referência do equipamento, um espectrômetro de emissão óptica para análise de metais, marca BRUKER, modelo Q4TASMAN, ilustrado na Figura 7, a seguir.



Figura 7 - Espectrômetro BRUKER utilizado para análise química, instalado na Spectroscan.

A amostra foi cortada por corte mecânico refrigerado e três análises foram feitas, conforme ilustrado na Figura 8, a seguir.



Figura 8 - Amostra do aço A516: três análises de composição química.

3.5.2.2 *Análise Metalográfica em Microscópio*

A análise metalográfica tem como objetivo observar a microestrutura do material para determinação de quais fases microconstituintes o compõe. A microscopia serve para realização da metalografia quantitativa, através da determinação do tamanho médio de grãos e o percentual de cada fase constituinte do material.

A análise metalográfica foi realizada para a caracterização da amostra do aço A516 em seu estado de fornecimento através das seguintes etapas descritas a seguir. As etapas “b”, “c”, “d” e “e” foram realizadas sequencialmente por face:

- a) corte da amostra: a amostra foi cortada com uma serra para o corte primário e em sequência em um “Cut-off”, equipamento para corte mais preciso com um disco fino abrasivo e muita refrigeração para que a amostra não sofra alterações devido ao método de corte. A amostra não foi embutida para ser possível a análise das três faces de uma mesma região. Na Figura 9, a seguir, é demonstrado o croqui da localização das faces da amostra de acordo com o material base.

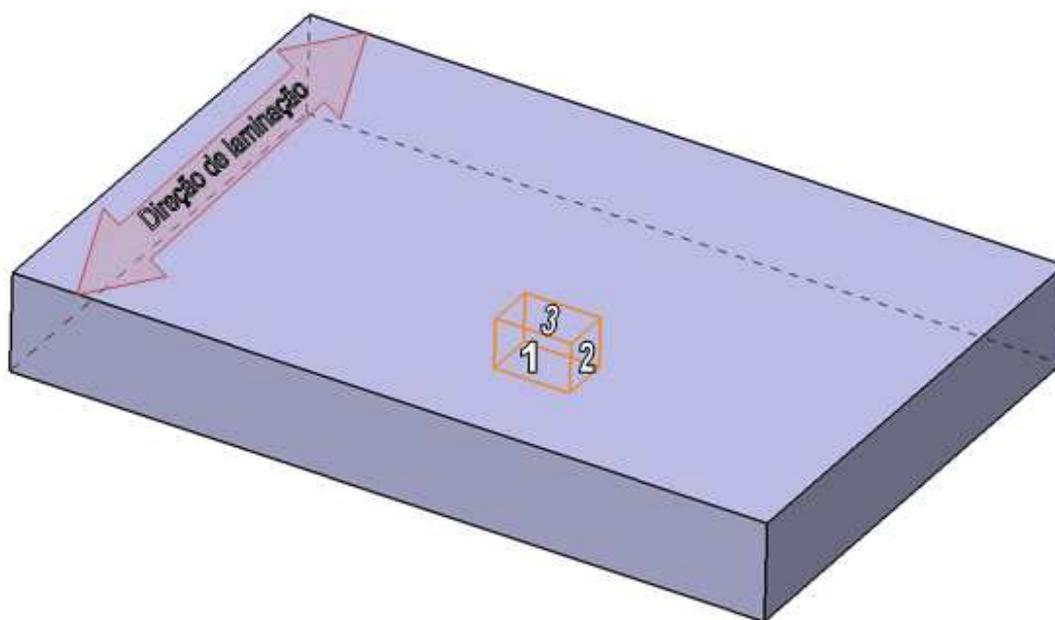


Figura 9 – Croqui indicativo da posição de remoção da amostra analisada por metalografia: Face 1 – transversal à direção de laminação; Face 2 - longitudinal à direção de laminação; Face 3 – paralela à maior superfície da chapa.

- b) lixamento da amostra: o processo de lixamento foi o mesmo para as três faces. Foi realizado um lixamento gradual em lixas d'água, fixadas no equipamento rotativo, de granulometrias 220, 320, 400 e 600, aplicando-se uma rotação de 90° da amostra entre uma lixa e outra e com refrigeração por água.
- c) polimento da amostra: o processo de polimento foi o mesmo para as três faces da amostra. Foi utilizada a politriz de marca Struers, modelo Dap-V, demonstrada na Figura 10, a uma rotação de 300 rpm. O abrasivo utilizado foi óxido de alumínio (alumina) 1µm empregado em um pano de polimento. O polimento foi feito até as superfícies ficarem livre de riscos e espelhadas.



Figura 10 - Politriz Struers Dap-V

- d) ataque químico: para o ataque químico foi utilizado Nital 2%, ou seja, para cada 100ml de álcool étílico tem-se 2 ml de ácido nítrico. A revelação da microestrutura ocorre após a exposição das superfícies durante 15s ao reagente.
- e) análise microestrutural: imagens da microestrutura do material em cada uma das faces foram capturadas a partir do microscópio do Laboratório de Materiais da UTFPR, marca Olympus, modelo BX51M, ilustrado na Figura 11, a seguir.



Figura 11 - Microscópio marca Olympus, modelo BX51M

As imagens, para caracterizar o tamanho de grão, foram capturadas em um aumento de 100x na Face 3 e as imagens para visualização das fases foram capturadas em um aumento de 1000x em todas as faces. As imagens foram processadas pelo software Image Pro Plus.

A determinação do tamanho de grão é obtida segundo especificações da norma ASTM E112 (2004).

A metalografia do material após o envelhecimento não foi realizada, pois não ocorre mudança de fase e não seria possível visualizar muitas diferenças entre as microestruturas.

3.5.2.3 Ensaio de Tração

O ensaio de tração consiste em submeter um corpo de prova a um esforço uniaxial aplicado por um equipamento de carregamento mecânico ou hidráulico, o qual tende a esticá-lo ou alongá-lo. A carga aplicada assim como as medidas de deformação correspondentes pode ser computada, gerando assim um gráfico tensão-deformação característico para o material. Esse tipo de ensaio proporciona deformações distribuídas uniformemente em todo o corpo de prova, pelo menos até

que a carga máxima seja atingida, permitindo medir satisfatoriamente a resistência do material. Para que isso ocorra o corpo de prova deve estar bem centrado na máquina, garantindo-se assim que os esforços aplicados deformem o corpo uniformemente.

A norma ASTM A370 (2003), foi utilizada como referência para a realização dos ensaios de tração, e as etapas realizadas na Spectroscan foram:

- a) usinagem dos corpos de prova: os corpos de prova foram usinados em fresa da marca Sinitron, ilustrada na Figura 12, a seguir:



Figura 12 – Fresadora ferramenteira marca Sinitron

A norma ASTM A370 (2003) determina que para chapas com mais de 5mm de espessura, o tipo de corpo de prova utilizado é tipo chapa standard de seção retangular. Em caso de chapas com até 100 mm de espessura, os corpos de prova podem compreender a espessura total do material, caso a máquina de ensaio possua capacidade para tanto. A espessura definida para o corpo de prova é de 14 mm, pois os 38 mm da chapa não atenderiam ao limite máximo de capacidade da máquina, e, sabendo-se que os esforços são distribuídos de maneira uniforme,

podemos considerar que a espessura adotada é suficiente para exprimir os resultados de maneira satisfatória. Na Figura 13 e na Tabela 4, a seguir, pode ser observada a geometria do corpo de prova e suas cotas e tolerâncias.

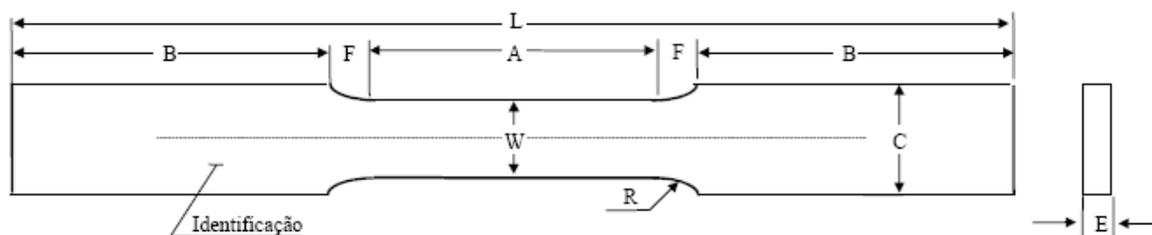


Figura 13 - Dimensões do corpo de prova de ensaio de tração

Tabela 4 - Dimensões para o corpo de prova de tração

Dimensão	A	B	C	F	R	W	L	E
Valor e tolerância	225 mm	75 mm	50 mm	37,5 mm	13 mm	40 mm (+3 -6 mm)	450 mm	14 mm

Foram usinados três corpos de prova nas dimensões demonstradas na Tabela 4. A Figura 14 ilustra os três corpos de prova confeccionados e identificados.



Figura 14 - Corpos de prova para ensaio de tração

Quanto à localização e orientação dos corpos de prova, o eixo longitudinal do corpo de prova deve ser transversal à direção de laminação final da chapa e o corpo de prova de tração deve ser extraído do canto da chapa de ambas as extremidades. Na Figura 15, a seguir é ilustrado o croqui da localização e orientação dos corpos de prova de tração retirados da chapa.

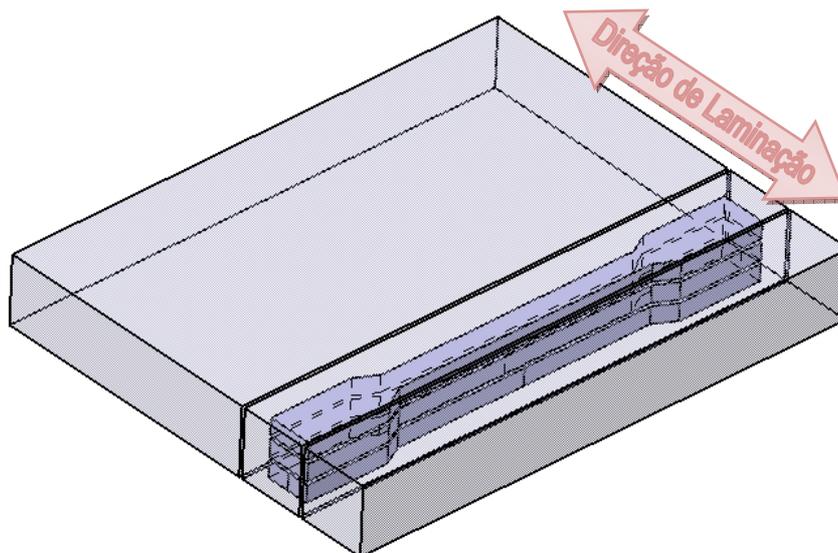


Figura 15 - Croqui esquemático de localização e orientação dos corpos de prova de tração

Na Figura 16, a seguir, é ilustrada uma foto da chapa com o corpo de prova de tração.

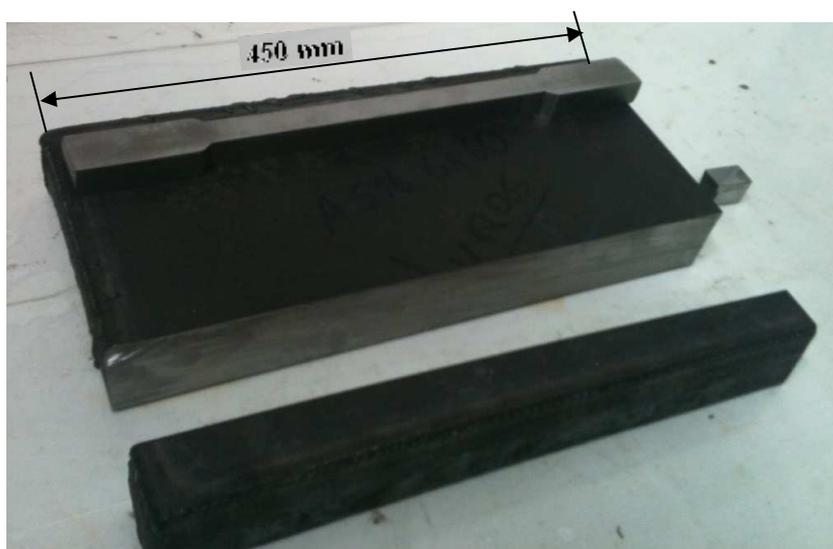


Figura 16 - Material bruto e corpo de prova para ensaio de tração

b) ensaio dos corpos de prova por tração: foram ensaiados três corpos de prova, conforme relação da Tabela 5, a seguir.

Tabela 5 – Relação de amostras do ensaio de tração

CP	Ensaio	Objetivo
1	Deformar em 10%	Envelhecer e confeccionar corpos-de-prova para ensaio de impacto Charpy.
2	Deformar em 10 % e conforme norma ASTM A370, após envelhecimento.	Caracterizar influências do envelhecimento na tensão de ruptura.
3	Conforme norma ASTM A370	Caracterizar o material

O corpo de prova 1 foi deformado em 10%, para ultrapassar seu limite elástico, e posteriormente envelhecido para retirada de três corpos de prova para realização do ensaio de impacto Charpy. Este procedimento tem a finalidade de simular a deformação plástica que o material sofre no processo de fabricação do vaso de pressão e envelhecimento devido à difusão de intersticiais. O corpo de prova 3 foi ensaiado até sua ruptura para caracterização do aço A516. O corpo de prova 2 foi ensaiado até sua ruptura, após ser deformado em 10% e envelhecido. Este último ensaio tem como objetivo a observação do reaparecimento do escoamento descontínuo e outras influências do envelhecimento.

O equipamento para realização desse ensaio foi uma máquina universal de ensaio de tração, modelo DL 30000, eletromecânica, microprocessada, marca EMIC, ilustrada na Figura 17, a seguir.



Figura 17 - Máquina Universal de Ensaio de Tração, marca EMIC, modelo DL30000.

3.5.2.4 Envelhecimento

O ensaio de envelhecimento consiste em deixar o material envelhecer, após a deformação, em temperatura ambiente de 24 a 48 horas, ou por aquecimento em óleo ou forno, para a aceleração do processo.

Segundo Reed-Hill (1982), o reaparecimento do limite de escoamento devido ao envelhecimento depende da temperatura, pois a difusão é função dela. Quanto mais elevada a temperatura, mais rapidamente o limite de escoamento reaparece. Porém este fenômeno não é observado em aços carbonos, quando ensaiados a temperaturas acima de aproximadamente 400°C. Isto pode ser explicado pela tendência de dispersão das atmosferas de discordâncias a elevadas temperaturas. Além disso, a velocidade de deformação também é um fator de influência, pois eleva os limites inferiores e superiores de temperatura de envelhecimento. Então, para um corpo de prova deformado a uma velocidade de aproximadamente 0,5 mm/min, os efeitos do envelhecimento podem ser observados entre 100°C e 350°C.

Para o envelhecimento das amostras a temperatura escolhida foi 250°C em um período de 30 minutos. Esta temperatura é abaixo da recristalização do material. Os corpos de prova de tração 1 e 2 foram envelhecidos na Spectroscan, em um forno de marca Quimis, Observa-se na Figura 18 os materiais já inseridos no forno, assim como a temperatura interna, controlada através de um termômetro digital infravermelho



Figura 18 – Temperatura dos corpos de prova em forno para envelhecimento.

3.5.2.5 Ensaio de Impacto

Para atender ao objetivo de verificar a perda de tenacidade à fratura do material devido ao envelhecimento, o ensaio de impacto de Charpy foi realizado duas vezes a 0°C: uma com corpos de prova do material em estado de fornecimento e outra com corpos de prova do material deformado em 10% e envelhecido. Os ensaios foram realizados na Spectroscan seguindo as seguintes etapas:

- a) usinagem dos corpos de prova: os corpos de prova foram usinados em retífica e obedeceram as dimensões de um corpo de prova Charpy com entalhe em “V” do tipo “A”. O entalhe foi aberto em uma brochadeira. As cotas e tolerâncias do corpo de prova são demonstradas através da Figura 19 e da Tabela 6, a seguir.

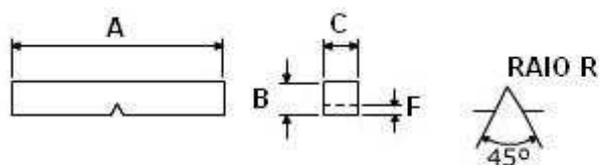


Figura 19 - Dimensões do corpo de prova Charpy A

Tabela 6- Dimensões do corpo de prova Charpy A

Dimensão	A	B	C	F	RAIO R
Valor e tolerância	55 mm (+0/ -2,5 mm)	10 mm (±0,075 mm)	10 mm (±0,075 mm)	2 mm (±0,025 mm)	0,25 mm (±0,025 mm)

Os corpos de prova tiveram suas dimensões controladas, na Tabela 7, a seguir são apresentadas as dimensões reais dos corpos de prova:

Tabela 7 - Controle dimensional dos corpos de prova do ensaio de Charpy.

	Estado	Dimensão A (mm)	Dimensão B (mm)	Dimensão C (mm)	Dimensão F (mm)	Raio R (mm)
Corpo de Prova 1	Fornecimento	55.045	10.032	10.026	2.004	0.254
Corpo de Prova 2	Fornecimento	55.043	10.040	10.041	2.004	0.256
Corpo de Prova 3	Fornecimento	55.052	10.013	9.981	2.003	0.252
Corpo de prova 4	Envelhecido	55.045	10.041	10.040	2.005	0.255
Corpo de Prova 5	Envelhecido	55.046	10.045	10.040	2.003	0.256
Corpo de Prova 6	Envelhecido	55.043	10.036	10.033	2.004	0.252

Quanto à orientação e localização dos corpos de prova, a orientação pode ser tanto longitudinal quanto transversal à direção de laminação. Uma vez que os corpos de prova envelhecidos foram retirados dos corpos de prova do ensaio de tração, a orientação do eixo mais longo deve ser transversal à direção de laminação, e o entalhe deve ser perpendicular à maior superfície da chapa. Na Figura 20, a seguir, é ilustrado o croqui da posição do corpo de prova de Charpy em relação à direção de laminação.

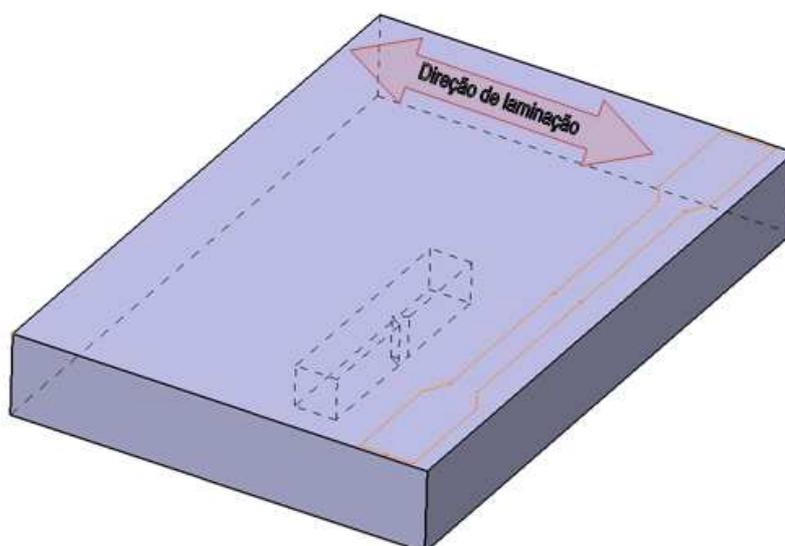


Figura 20 - Croqui da posição do corpo de prova de Charpy em relação à direção de laminação

O entalhe dos corpos de prova são perpendiculares à maior superfície da chapa, para simular a situação mais crítica, que seria a condição C do gráfico demonstrado na Figura 21, a seguir:

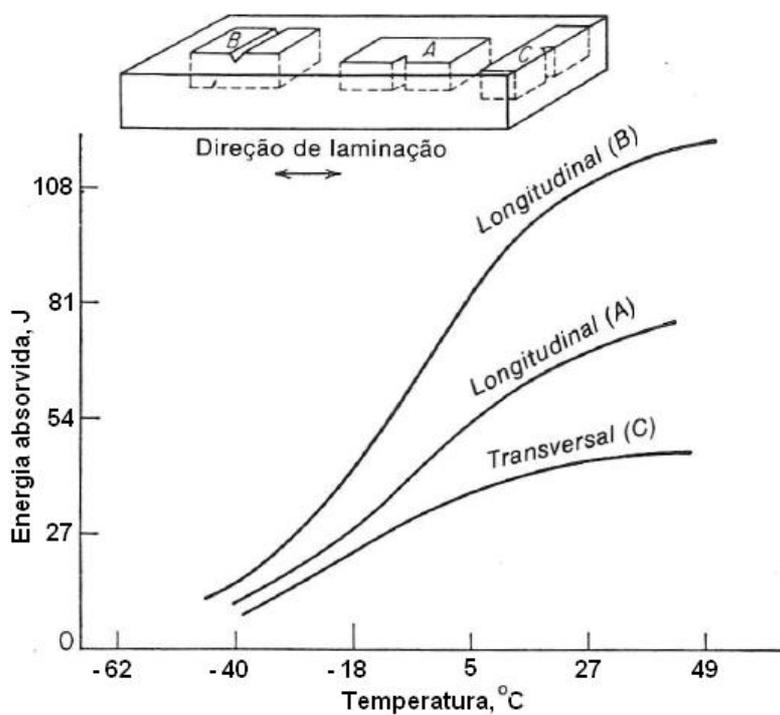


Figura 21 – Diagrama do efeito da orientação do corpo de prova nas curvas de temperatura de transição Charpy. Fonte: Dieter (1981) p. 427.

- b) ensaio de impacto: para a realização do ensaio de impacto seis amostras, três em estado de fornecimento e três deformadas em 10% e envelhecidas (retiradas do corpo de prova 1 de tração), foram resfriadas a 0°C através da imersão em álcool etílico contido em um recipiente próprio. Na Figura 22, a seguir, é apresentado o recipiente de refrigeração das amostras.



Figura 22 - Recipiente de refrigeração de corpos de prova de ensaio de impacto de Charpy

A refrigeração se deve à circulação controlada de dióxido de carbono expandido. Após 15 minutos nesse meio refrigerado, o corpo de prova foi retirado e imediatamente ensaiado. O equipamento utilizado para ensaio foi uma máquina universal de ensaio de impacto, marca AMSLER, modelo D-6700, ilustrada na Figura 23, a seguir.



Figura 23 - Máquina universal de ensaio de impacto, marca AMSLER, modelo D-6700

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise Química

Das três análises realizadas na amostra do aço A516, através do espectrômetro de emissão óptica, obteve-se uma média dos valores de cada um dos elementos da composição química do aço. O resultado da análise química é apresentado na Tabela 8, a seguir.

Tabela 8 - Composição química da amostra de aço A516 Grau 60

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Análise 1	98,01	0,197	0,211	1,021	0,027	0,029	0,066	0,136	0,149
Análise 2	97,98	0,197	0,217	1,027	0,028	0,029	0,065	0,142	0,153
Análise 3	97,96	0,194	0,217	1,063	0,027	0,030	0,065	0,132	0,156
Média (%)	97,98	0,196	0,215	1,037	0,028	0,030	0,065	0,137	0,153
	Cu	Al	Ti	V	Sn	B	Nb	Zr	
Análise 1	0,102	0,037	0,003	< 0,003	< 0,001	< 0,0001	0,0137	0,0004	
Análise 2	0,101	0,040	0,003	< 0,003	< 0,001	< 0,0001	0,0148	0,0016	
Análise 3	0,095	0,040	0,003	< 0,003	< 0,001	< 0,0001	0,0151	0,0015	
Média (%)	0,100	0,039	0,003	< 0,003	< 0,001	< 0,0001	0,0145	0,0012	

Segundo a norma ASME Seção II A SA516 (1998), os principais elementos a serem controlados na composição química do aço A516 são Carbono (C), Manganês (Mn), Fósforo (P), Enxofre (S) e Silício (Si). Comparando a média obtida no ensaio com o critério de aceitação da norma tem-se que:

- o nível de carbono da amostra é em média 0.196%, considerado aceitável quando comparado ao critério de aceitação de no máximo 0.23%.
- o nível de manganês da amostra é em média 1.037%, considerado aceitável quando comparado ao critério de aceitação de 0.79% a 1.30%.
- o nível de fósforo da amostra é em média 0.028%, considerado aceitável quando comparado ao critério de aceitação de no máximo 0.035%.
- o nível de enxofre da amostra é em média 0.030%, considerado aceitável quando comparado ao critério de aceitação de no máximo 0.035%.
- o nível de silício da amostra é em média 0.215%, considerado aceitável quando comparado ao critério de aceitação de 0.13% a 0.45%.

Baseado nestes resultados conclui-se que a amostra retirada da chapa laminada de aço A516, com 38 mm de espessura e grau 60 atende aos requisitos de composição química especificados na norma ASME Seção II A SA516 (1998).

4.2 Análise Metalográfica em Microscópio

Grãos equiaxiais de ferrita e colônias de perlita, e uma microestrutura bandeada são revelados em uma visão tridimensional da microestrutura do material, ilustrada na Figura 24. É possível observar uma estrutura alinhada nas direções transversal e longitudinal em relação à maior superfície da chapa, assim como a semelhança da morfologia de grãos nessas direções. O bandeamento sugere que a chapa não foi normalizada.

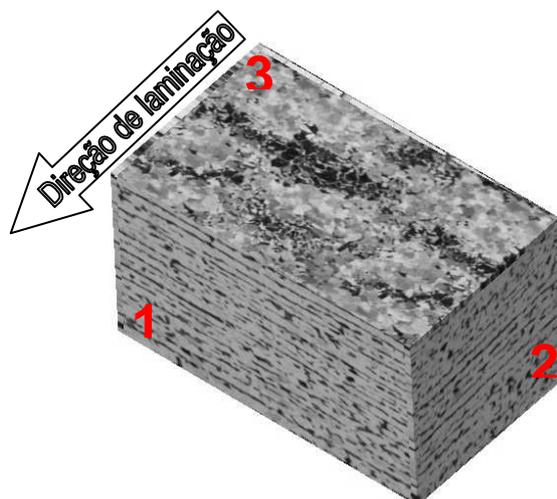


Figura 24 – Representação tridimensional da microestrutura do aço ASTM A 516, gerado a partir do exame metalográfico. Ataque Nital 2%. Aumento 100X

O posicionamento da amostra na Figura 24, está de acordo com a Figura 9, logo as faces estão identificadas como: face 1 – transversal à direção de laminação; face 2 – longitudinal a direção de laminação; e face 3 – paralela à maior superfície da chapa.

A seguir as imagens capturadas na microscopia, com um aumento de 100X, das três faces, são apresentadas. Na Figura 25 (a) consegue-se facilmente visualizar os grãos equiaxiais, assim como as colônias de perlita. Nas Figuras 25 (b) e (c) claramente nota-se o bandeamento.

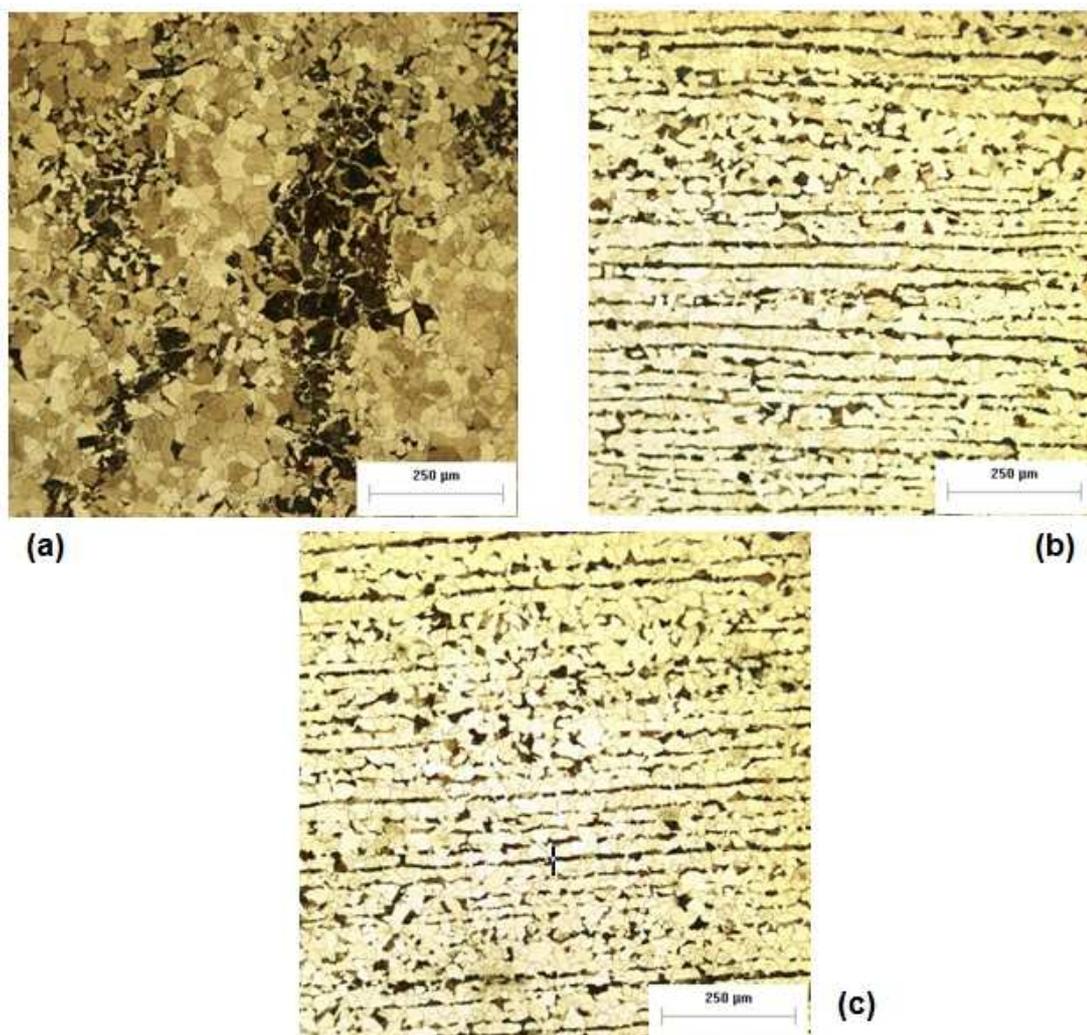


Figura 25 - Análise metalográfica do aço ASTM A 516. Ataque Nital 2%. Aumento 100X. (a) Face 3, (b) Face 1, (c) Face 2

Com um aumento de 1000X ao analisar a face 3, conforme demonstrado na Figura 26, e de acordo com Colpaert (2008), é possível identificar: ferrita, solução sólida de carbono no ferro alfa, a qual, depois de atacada com Nital 2%, apresenta-se como grão branco; e perlita, formado por lamelas finas intercaladas de ferrita e de cementita, que, após ser atacada com esse mesmo reagente, adquire uma coloração mais escura.

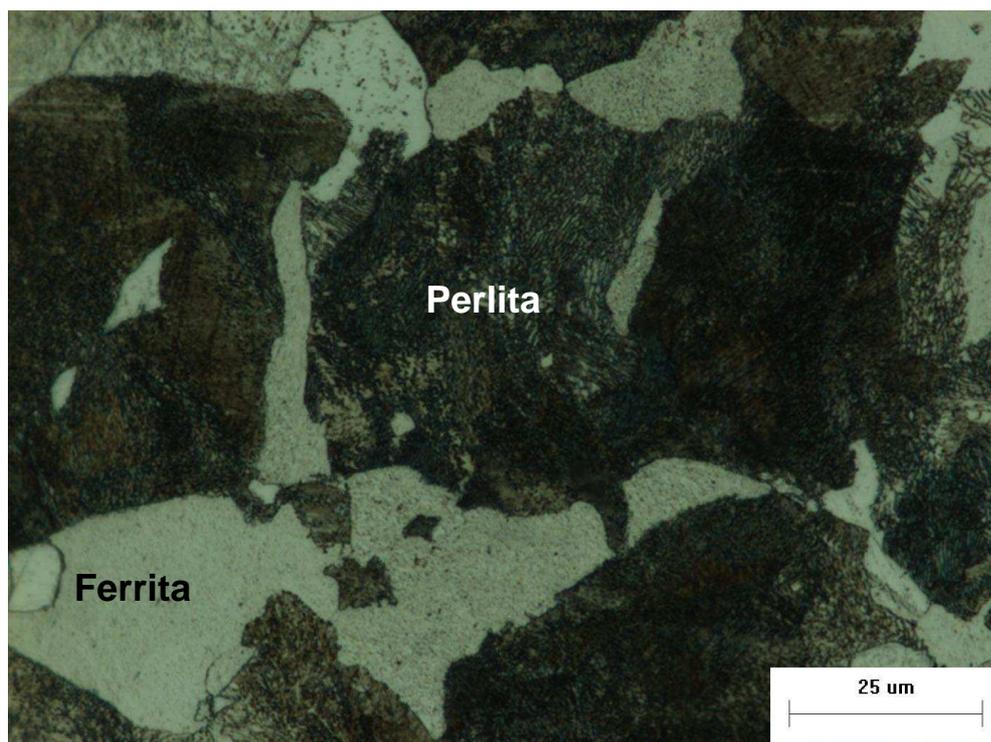


Figura 26 - Aço ASTM A 516, no estado de fornecimento. Ataque Nital 2%. Aumento 1000X

O tamanho de grão observado no aumento de 100x na face 3 é do tipo ASTM G igual à cinco, isso sugere um tamanho de grão médio de 63,50 μm .

4.3 Ensaio de Tração

4.3.1 Caracterização do Aço

O primeiro ensaio de tração realizado no aço A516 foi uma amostra em estado de fornecimento (Corpo de prova 3), ensaiada até sua ruptura para verificação da tensão de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento. Na Figura 27, a seguir, é apresentada a foto do corpo de prova após o ensaio.



Figura 27 - Corpo de prova 3 após ensaio de tração até ruptura

Na Figura 28, a seguir é apresentado o aspecto da superfície de fratura do corpo de prova 3.



de prova 3

Na Figura 29, a seguir, é apresentado o gráfico obtido no ensaio.

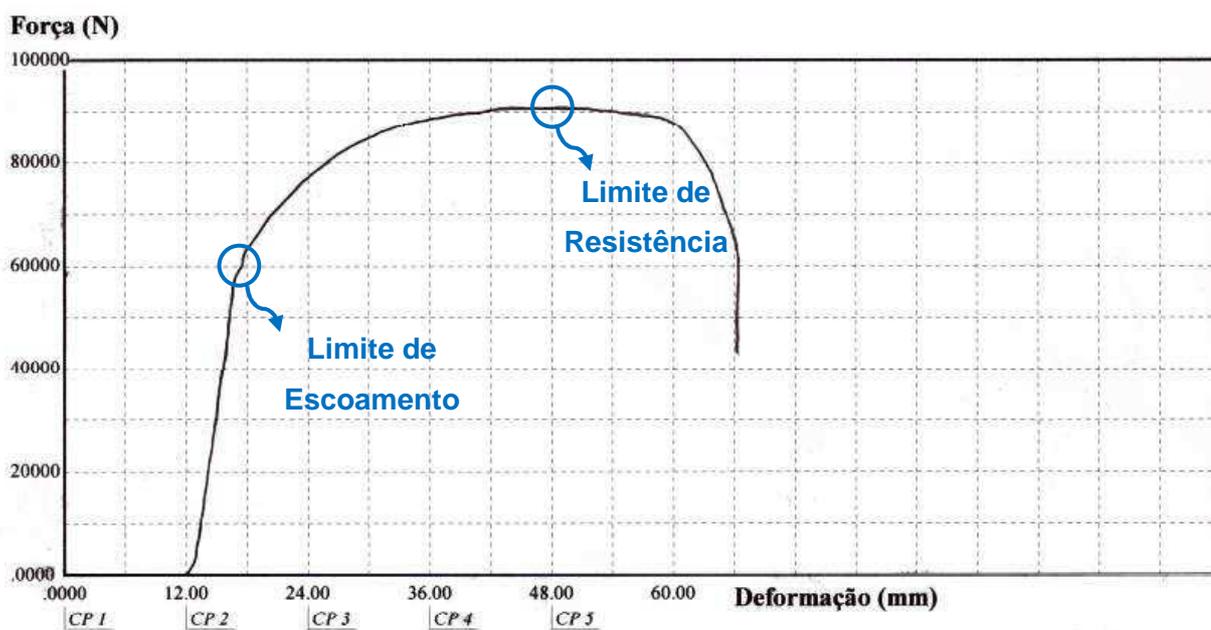


Figura 29 – Gráfico obtido no ensaio de tração realizado em corpo de prova do aço A516 em estado de fornecimento até sua ruptura

O ensaio foi zerado em 12 mm devido à um escorregamento e novo ajuste do corpo de prova. Os valores obtidos no ensaio são apresentados na Tabela 9, a seguir.

Tabela 9 – Resultados obtidos no ensaio de tração até ruptura com material em estado de fornecimento

Corpo de prova 3	
Força de Escoamento	58470 N
Tensão limite de escoamento	293,50 MPa
Força máxima	90720 N
Limite de resistência à tração	455,30 MPa
Alongamento em 50 mm	47%

Comparando os valores obtidos com o critério de aceitação da norma ASME Seção II A SA516 (1998), tem-se que:

- a) a tensão de escoamento do corpo de prova é de 293.50 MPa, considerada aceitável quando comparada ao critério de aceitação de no mínimo 220 MPa.
- b) a resistência a tração do corpo de prova é de 455.30 MPa, considerada aceitável quando comparada ao critério de aceitação de 415 MPa a 550 MPa.
- c) o alongamento em 50 mm do corpo de prova foi de 23.50 mm, ou 47%, este alongamento é considerado aceitável quando comparado ao critério de aceitação de no mínimo 25% em 50 mm.

Baseado nestes resultados conclui-se que o Corpo de prova 3 retirado da chapa laminada de aço A516, com 38 mm de espessura e grau 60 em seu estado de fornecimento, atende aos requisitos de tensões e alongamento em ensaio de tração especificados na norma ASME Seção II A SA516 (1998). Além disso, a fratura do corpo de prova é do tipo dúctil, como pode ser observado na Figura 28, caracterizada pela formação de um pescoço e formato “taça e cone”, conforme descrito por Dieter (1981).

4.3.2 Reaparecimento de limite de escoamento após envelhecimento

O segundo ensaio de tração realizado no aço A516 foi uma amostra deformada inicialmente em 10% e posteriormente envelhecida em forno a 250°C em um período

de 30min (Corpo de prova 2) e tracionada até sua ruptura. Este ensaio teve como objetivo observar a influência do envelhecimento na tensão de ruptura. Na Figura 30, a seguir, é apresentada a foto do corpo de prova após o ensaio.

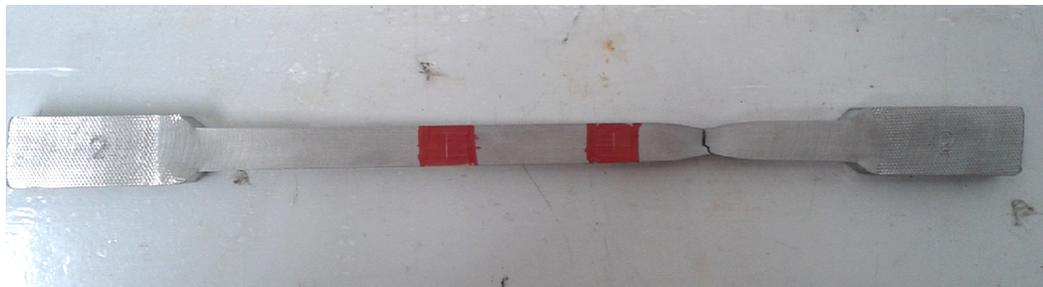


Figura 30 - Corpo de prova 2 após ensaio de tração até ruptura

Na Figura 31, a seguir, é apresenta a superfície de fratura do Corpo de prova 2.



Figura 31 – Aspecto da superfície de fratura do Corpo de prova 2

Na Figura 32, a seguir, é apresentado o gráfico obtido no ensaio.

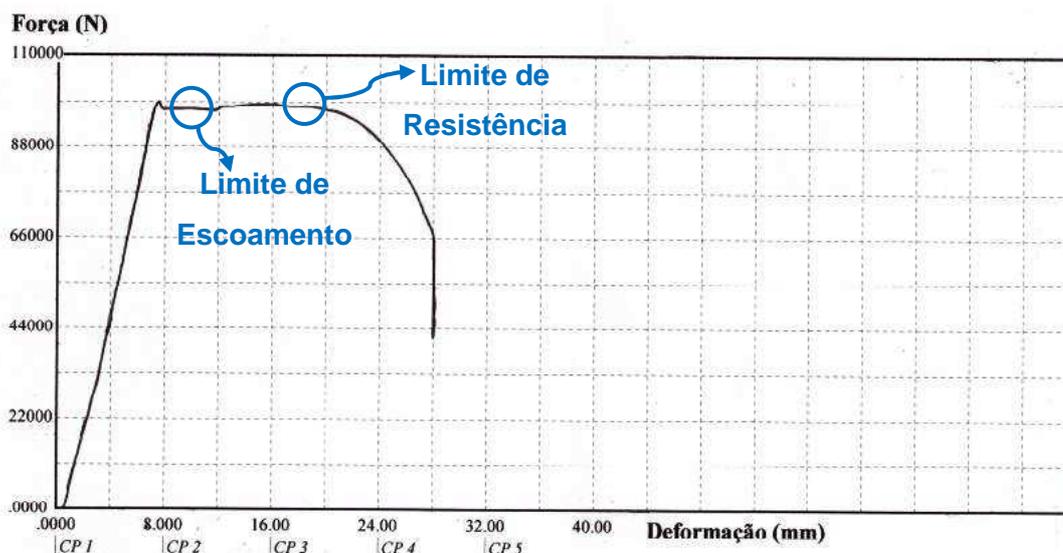


Figura 32 – Gráfico obtido no ensaio de tração realizado em corpo de prova do aço A516 após envelhecimento até sua ruptura

Os valores obtidos no ensaio são apresentados na Tabela 10, a seguir.

Tabela 10 – Resultados obtidos no ensaio de tração até ruptura com material após envelhecimento

Corpo de prova 2	
Força de Escoamento	98180 N
Tensão limite de escoamento	541,90 MPa
Força máxima	98950 N
Limite de resistência à tração	546,20 MPa
Alongamento	---

Comparando os valores obtidos no ensaio realizado no corpo de prova envelhecido com o ensaio em estado de fornecimento tem-se que:

- a) a tensão de escoamento do corpo de prova é de 541.90 MPa, 85% maior quando comparada com a tensão em estado de fornecimento de 293.50 MPa.
- b) a resistência a tração do corpo de prova é de 546.20 MPa, 20% maior quando comparada com a tensão em estado de fornecimento de 455.30 MPa.
- c) o alongamento não pôde ser mensurado, pois o corpo de prova rompeu fora das marcações em que se basearia a medição

Baseado nestes resultados conclui-se que o Corpo de prova 2 retirado da chapa laminada de aço A516 com 38 mm de espessura e grau 60, deformado em

10% e envelhecido em forno a 250°C em um período de 30min, sofreu o mecanismo de difusão e conseqüente envelhecimento. O corpo de prova teve suas tensões limite de escoamento e resistência à tração elevadas em relação ao corpo de prova em estado de fornecimento. No gráfico pode-se perceber que o corpo de prova envelheceu muito e quase não encruou, pela proximidade do limite de escoamento com o limite de resistência. Segundo Dieter (1981), o escoamento descontínuo tem seu limite aumentado devido à difusão dos átomos de carbono e nitrogênio para as discordâncias durante o período de envelhecimento. Quanto ao tipo de fratura, ainda pode-se considerar uma fratura dúctil, apesar de a formação de pescoço ser menos visível do que no Corpo de prova 3.

4.4 Ensaio de Impacto de Charpy

O primeiro ensaio de impacto de Charpy realizado no aço A516 foram três amostras em estado de fornecimento, retiradas diretamente da chapa, ensaiados em uma temperatura de 0°C. O resultado é expresso na energia máxima absorvida no impacto, em Joules.

Na Figura 33, a seguir, são apresentados os corpos de prova ensaiados.



Figura 33 - Corpos de prova de Charpy - estado de fornecimento

Na Figura 34, a seguir, são apresentadas as superfícies de fratura dos corpos de prova de Charpy 1, 2 e 3, em estado de fornecimento, ensaiados a 0°.

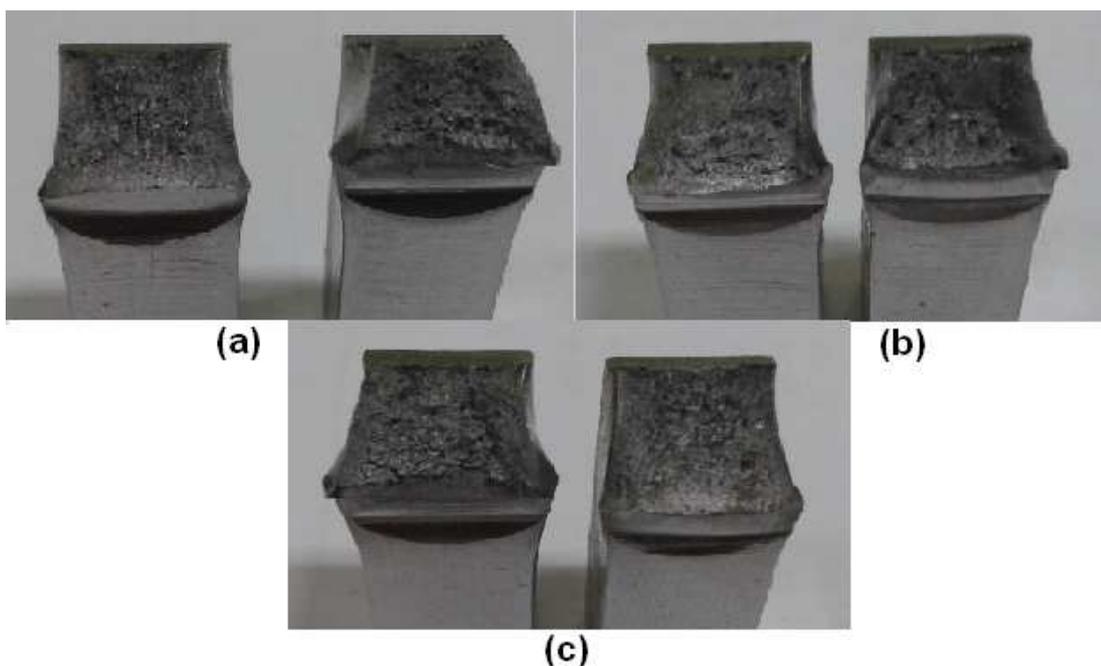


Figura 34 – Aspecto das superfícies de fratura dos corpos de prova de Charpy (a) Corpo de prova 3, (b) Corpo de prova 2, (c) Corpo de prova 1. Apresentam aspecto de fratura com expansão lateral, fibrosa, dúctil.

Na Tabela 11, a seguir, são apresentados os valores obtidos no ensaio.

Tabela 11 – Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy realizado a 0°C no material em estado de fornecimento

Energia Absorvida a 0°C – Estado de Fornecimento	
Corpo de prova de Charpy 1	190 J
Corpo de prova de Charpy 2	224 J
Corpo de prova de Charpy 3	207 J
Média das amostras	207 J

Os corpos de prova ensaiados em estado de fornecimento possuem fraturas de característica dúctil. Pode-se observar que as fraturas são em torno de 95% fibrosas e com grande expansão lateral.

4.4.1 Análise da Tenacidade a Fratura após o envelhecimento por deformação

O segundo ensaio de impacto de Charpy realizado no aço A516 foram três amostras retiradas do corpo de prova de tração deformado em 10% e envelhecido em forno a 250°C em um período de 30min (Corpo de prova 1), ensaiados a 0°C. E

outras três amostras preparadas na mesma condição, porém ensaiadas a 20°C. O objetivo foi verificar a perda de tenacidade devido ao envelhecimento por deformação.

Na Figura 35, a seguir, são apresentados os corpos de prova ensaiados a 20°C..

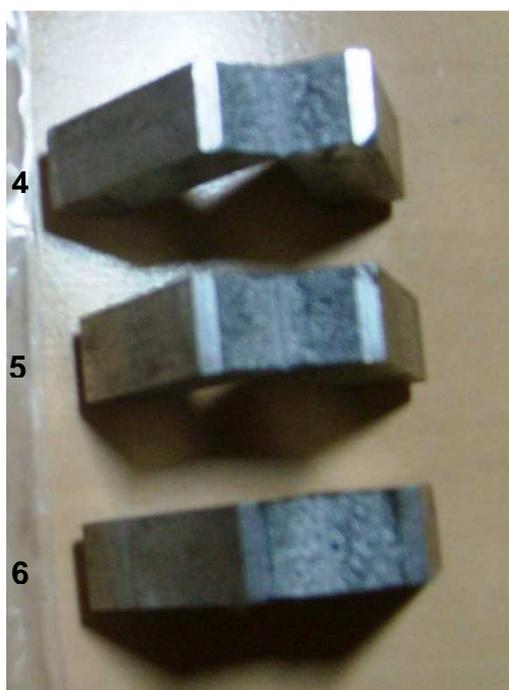


Figura 35 – Aspecto das superfícies de fratura dos Corpos de prova de Charpy ensaiados a 20°C – Envelhecidos. Apresentam características de fratura dominante cristalina.

Na Tabela 12, a seguir, são apresentados os valores obtidos no ensaio.

Tabela 12 – Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy realizado a 20°C no material após envelhecimento

Energia Absorvida a 20°C – Envelhecido	
Corpo de prova de Charpy 4	34 J
Corpo de prova de Charpy 5	15 J
Corpo de prova de Charpy 6	20 J
Média das amostras	23 J

Na Figura 36, a seguir, são apresentados os corpos de prova ensaiados a 0°C.

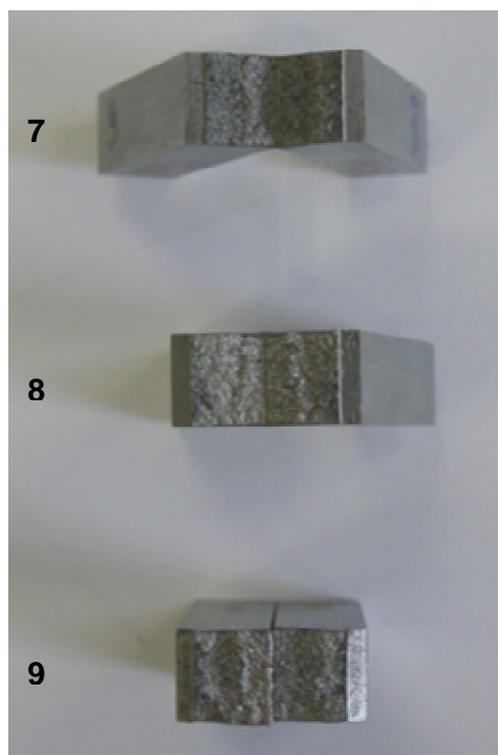


Figura 36 - Aspecto das superfícies de fratura dos Corpos de prova de Charpy ensaiados a 0°C – Envelhecidos. Apresentam características de fratura dominante cristalina.

Na Tabela 13, a seguir, são apresentados os valores obtidos no ensaio.

Tabela 13 – Resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy realizado a 0°C no material após envelhecimento

Energia Absorvida a 0°C – Envelhecido	
Corpo de prova de Charpy 4	10 J
Corpo de prova de Charpy 5	10 J
Corpo de prova de Charpy 6	22 J
Média das amostras	14 J

Tendo em vista estes resultados, conclui-se que o ensaio de impacto de Charpy realizado com os corpos de prova retirados do corpo de prova de tração 1, deformado em 10% e envelhecido em forno a 250°C em um período de 30min e ensaiados a 0°C tiveram uma grande perda de tenacidade à fratura. É possível observar que a fratura é do tipo frágil dominante e praticamente não fibrosa. Quanto aos corpos de prova ensaiados a 20°C, as fraturas também são de aspecto frágil então se pode concluir que mesmo em temperaturas acima de 0°C, no aço A516 envelhecido, ocorre a perda de tenacidade à fratura.

A surpreendente perda de tenacidade à fratura, até mesmo em temperaturas próximas à ambiente, mostra que este aço é extremamente susceptível ao envelhecimento, o que torna um vaso de pressão fabricado em aço ASTM A516 frágil quando submetido a um impacto. Como este tipo de fragilidade é dificilmente detectado, recomenda-se que o vaso de pressão seja submetido a inspeções periódicas através de radiografia, ultrassom, entre outras técnicas para detecção de trincas.

Uma das medidas para minimizar o efeito do envelhecimento está no uso da normalização. Com esta prática ocorre o refino do grão cristalino com conseqüente ganho na resistência ao escoamento e manutenção ou ganho da tenacidade à fratura. Isto ocorre devido à influência no fator K , demonstrado na equação (1) abordada anteriormente na revisão bibliográfica.

5 CONCLUSÕES

Ao final deste projeto conclui-se que as atividades idealizadas para as etapas de Trabalho de Conclusão de Curso I e Trabalho de Conclusão de Curso II foram realizadas conforme planejado.

Através da fundamentação teórica observou-se a importância do controle na fabricação de vasos de pressão, por serem equipamentos de segurança e com alto valor agregado na indústria de processamento. Desta forma destacou-se a importância dos cuidados com seu projeto e seleção de materiais aplicados na sua fabricação, dentre eles o mais comum, aço carbono. Quanto ao fenômeno do envelhecimento, pode-se evidenciar o mecanismo da difusão de intersticiais nas discordâncias, que caracteriza o envelhecimento após deformação que ocorre na fabricação por calandragem ou rebordeamento de vasos de pressões.

Além destes dois importantes aspectos, outros assuntos foram descritos para o auxílio na compreensão do comportamento dos materiais, como por exemplo, seu comportamento dúctil e frágil, a propriedade de tenacidade e o ensaio de impacto, que tem como objetivo medi-la.

Através da descrição dos materiais e métodos pôde-se evidenciar o nível de exigência das normas regulamentadoras de aços para vasos de pressão e esclarecer as condições de condução dos ensaios a serem aplicados no material. A realização dos experimentos foi de grande enriquecimento para o projeto, pois muitos dos resultados são visíveis, como o tipo de fratura e as diferenças entre os ensaios com o material em estado de fornecimento e envelhecido.

Na análise de resultados e discussões pôde-se caracterizar o material e confirmar que em seu estado de fornecimento os critérios de aceitação determinados pela regulamentação de análise química e tração são atendidos. Evidenciou-se ainda o aumento na tensão de escoamento e limite de resistência à tração que o envelhecimento por deformação causou no material.

Finalmente pode-se concluir que o material foi susceptível à difusão de intersticiais e conseqüente envelhecimento, caracterizado principalmente pela perda de tenacidade à fratura.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **E112: Standard Test Methods and Definitions for Determining Average Grain Size**, 2004.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, **ASME Section II A SA20/SA20M-1998: Specification for general requirements for steel plates for pressure vessels**. New York, 1998.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, **ASME Section II A SA516-1998: Specification for general requirements for steel plates for pressure vessels**. New York, 1998.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, **ASME Boiler and Pressure Vessels Code – Rules for Construction of Pressure Vessels - Section VIII Div. 1**. New York, 1998
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, **ASME Boiler and Pressure Vessels Code – Alternative Rules for Pressure Vessels - Section VIII Div. 2**. New York, 1998
- CALLISTER JR., William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, c2002. xvii, 589 p.
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: E. Blücher, 2008, 652 p.
- COTTRELL, A. H.; BILBY, B. A. **Dislocation Theory of Yielding and Strain Aging of Iron**. Proc. of Phys. Soc. LXIII, I-A, p. 49-92, 1949.
- COTTRELL, Alan H. **Introdução à metalurgia**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1976. 810 p.
- DIETER, George Ellwood. **Metalurgia mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653 p.
- HARPER, S. Phys. Rev., vol. 83, p. 709-12, 1951.

HERTZBERG, Richard W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials**. 4 th ed. New York: J. Wiley, 1996. 786 p. ISBN 0-471-01214-9

JOHNSTON JR, E. Russell; BEER, Ferdinand Pierre; DEWOLF, John T.; FECCHIO, Mario Moro. **Resistência dos Materiais: Mecânica dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 1995. 774p.

MSPC - Informações Técnicas. Disponível em <http://www.mspc.eng.br/>. Acesso em: 10 de novembro de 2011.

MURARI, Fabio D., **Cinética de Envelhecimento de Aços Dual Phase de Baixa Resistência Mecânica Laminados a Frio**. 2009. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

REED-HILL, Robert E. **Princípios de Metalurgia Física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 776 p.

RYBAKOVA, L. M.; BULYCHEV, S. I.; TUMASYAN, V. S.; KUKSENOVA, L. I.; ALEKHIN, O.V.. **Strain Aging in the Surface Layers of Low Alloy Steel**. Plenum Publishing Corporation, p. 846-851. 1991.

SARRAK, V.; SUVOROVA, S. O.; ENTIN, R.. **Investigation of the Phenomenon of Strain Aging in Iron**. SB TRUDY INST METALLOVED FIZ METALLOV TSENTR N-INST CHERNOI MET, no. 36, pp. 125-143. 1964

SOUZA, SERGIO A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos Teóricos e Práticos**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 282 p.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Vasos de pressão**. 2. ed. atual. Rio de Janeiro: LTC, c1996. 302 p. ISBN 85-216-1294-0.

WIKIPEDIA – The Free Encyclopedia. Disponível em http://en.wikipedia.org/wiki/Cottrell_atmosphere. Acesso em: 24 de junho de 2011.

APÊNDICE A – CINÉTICA DO ENVELHECIMENTO

Neste apêndice são apresentadas as equações que regem a teoria sobre a cinética do envelhecimento nos materiais.

Cottrell e Bilby (1949) definem o número de átomos de soluto que chegam à linha da discordância no tempo como representado na Equação (2):

$$n(t) = \alpha n_0 \left[\frac{ADt}{kT} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

Onde as variáveis e constantes são definidas como:

α – constante adimensional, aproximadamente 3 (três).

n_0 – concentração inicial de soluto

A – constante de interação soluto-discordância

D – coeficiente de difusão do intersticial

k – constante de Boltzmann

T – temperatura de envelhecimento [K].

Sabe-se que a migração de solutos para discordâncias obedece à lei representada pela Equação (3):

$$n(t) \propto t^{2/3} \quad (3)$$

Observações relativas à cinética de endurecimento também foram feitas e, constatou-se que existe uma relação proporcional entre o limite de escoamento e o número de soluto nas proximidades das discordâncias que pode ser escrita conforme a Equação (4):

$$\Delta LE \propto \alpha n_0 \left[\frac{ADt}{kT} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

Harper (1951), na tentativa de considerar a taxa de migração de soluto modificou a Equação (4). Embora ele não tenha considerado a difusão dos átomos de soluto, ele reescreveu a equação conforme a Equação (5):

$$W = 1 - \exp \left[- 3L \left(\frac{\pi}{2} \right)^{1/3} \left(\frac{ADt}{kT} \right)^{2/3} \right] \quad (5)$$

A equação proposta por Harper é usualmente utilizada para aços baixo carbono numa forma generalizada conforme representado na Equação (6):

$$Y = 1 - \exp \left[- (k_v t)^m \right] \quad (6)$$

Onde as variáveis e constantes são definidas como:

Y – fração envelhecida

K_v – constante de velocidade de envelhecimento

t – tempo

m – expoente do tempo

Deve-se lembrar que o expoente do tempo inicialmente proposto por Cottrell e Bilby possuía o valor definido de 2/3, podendo agora assumir valores diferentes, em consequência da disparidade da geometria no trajeto da difusão.

A constante k_v , é obtida através da Equação (7):

$$k_v = k_0 \exp \left(- \frac{\Delta H}{RT} \right) \quad (7)$$

Onde as variáveis e constantes são definidas como:

K_0 – constante

ΔH – energia de ativação

R – constante universal dos gases

Linearizando a equação para o cálculo de k_v é possível calcular a energia de ativação, obtida pela curva $\ln k_v$ versus $1/T$, e multiplicando-se por R, constante universal dos gases, chega-se a Equação (8):

$$\ln k_v = \ln k_0 - \frac{\Delta H}{RT} \quad (8)$$