UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2002

1110000513

"Estudo dos Parâmetros de Conformação Mecânica a Frio de Chapas em Aço Carbono e Baixa-Liga na Construção de Equipamentos Industriais"

JOÃO MARCOS ARNEIRO

198

BIBLIOTECA

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

JOÃO MARCOS ARNEIRO

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA A FRIO DE CHAPAS EM AÇO CARBONO E BAIXA-LIGA NA CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais.

Orientador: Marcelo dos Santos Pereira

513

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

513

Guaratinguetá – SP

2002

Data: 24/3/03
Valor: R$ 20,00
C/D/T: D

Arneiro, João Marcos
A748e Estudo dos parâmetros de conformação mecânica a frio de chapas em aço carbono e baixa-liga na contrução de equipamentos industriais / João Marcos Arneiro . – Guaratinguetá : [s.n.], 2002
87f. : il.

Bibliografia: f. 84-87
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2002
Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

1. Aço carbono. 2. Anisotropia. 3. Chapas grossas. 4. Conformação mecânica. I. Título

CDU 669.145

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

"ESTUDO DOS PARÂMETROS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA A FRIO DE CHAPAS EM AÇO CARBONO E BAIXA-LIGA NA CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS"

JOÃO MARCOS ARNEIRO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA
Orientador / Unesp-Feg

Prof. Dr. TOMAZ MANABU HASHIMOTO
Unesp-Feg

Prof. Dr. ANTONIO JORGE ABDALLA
CTA

Dezembro de 2002

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

DADOS CURRICULARES

JOÃO MARCOS ARNEIRO

NASCIMENTO	12.03.1960 – APARECIDA / SP
FILIAÇÃO	Mário Arneiro Cleopha de Lourdes Naldi Arneiro
1988/1993	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia Mecânica – UNITAU

unesp

de modo especial, à minha esposa Maria de Fátima que, com a sua enorme vontade de vencer, foi a grande incentivadora para que eu continuasse no curso, e aos meus filhos Lidia Carolina e Rafael pela paciência e confiança no meu sucesso.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos meus pais *Mário* (in memorian) *e Cleopha*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos e aos meus filhos *Lidia Carolina* e *Rafael* pela inestimável ajuda e compreensão.

Às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar, às secretárias da pós-graduação *Regina* e *Elisa* pela dedicação e alegria no atendimento, aos técnicos *Humberto Lopes Rodrigues, Domingos Hasmann Netto, Célio José de Souza, José Manoel Bernardes, Manoel F. dos Santos Filho, Wilson Roberto dos Santos, Odir Vieira da Silva* e *Ely de Almeida Fornitano*, por todo apoio oferecido nos laboratórios de computação, de usinagem, de metalografia e de metrologia.

À Confab Industrial S.A., em particular nas pessoas dos engenheiros *Arismaldo Carreão Santiago, Nasareno das Neves e Carlos Augusto Silveira Lima*, pelos dados utilizados no estudo e principalmente pela colaboração na solução de dúvidas pertinentes aos materiais em estudo. Ainda à Confab Industrial S.A., pela cessão dos materiais e equipamentos utilizados nos testes destrutivos e em particular nas pessoas *Benedito Cavalheiro e Felix Simões*, dos laboratórios de ensaios, pelo grande apoio. À Exiros.BR, na pessoa do *Sr. Ariel Pandiani*, pela compreensão e paciência e *Oscar Yamazi* pela colaboração.

À Usiminas, em particular nas pessoas dos engenheiros *José Antonio e Marcos Sampaio*, pelos dados utilizados no estudo.

Aos professores, *Dr. Hermann J. C. Voorwald, Dr. Tomaz Manabu Hashimoto, Dr. Luis Rogério de Oliveira Hein* e *Dr. Luis Eduardo Codaro*, pelo apoio e incentivo.

"O homem prudente não perde nenhuma oportunidade para instruir-se."

(Eclesiástico, 32)

ARNEIRO, J. M. **Estudo dos parâmetros de conformação mecânica a frio de chapas em aço carbono e baixa-liga na construção de equipamentos industriais**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2002.

RESUMO

Este trabalho objetivou estabelecer uma correlação entre as propriedades mecânicas de tração e dobramento, especificadas pelas American Society for Testing and Materials normas – ASTM A20, A516 e A387, e as propriedades não especificadas, ou seja anisotropia, dureza e características microestruturais. Os materiais estudados foram o ASTM A-516-Grau 70 e o ASTM A-387-Grau 11-Classe 1, que são normalmente utilizados na construção de vasos de pressão. Amostras destes materiais foram cedidas pela Confab Industrial S.A. e os ensaios foram realizados nas condições de fornecimento das chapas pelas usinas. Nos ensaios de tração, realizados em corpos-de-prova orientados na direção transversal a laminação das chapas, foram observados resultados dentro dos limites especificados nas normas dos aços estudados. Os resultados dos ensaios de dureza mostraram uniformidade das condições superficiais das amostras. Nos ensaios de dobramento foram observados resultados satisfatórios tanto em relação aos raios de dobra especificados quanto aos adotados neste estudo, destacando que nesta última condição os raios de dobra foram menores que os especificados. Para os ensaios de anisotropia foi adotado o seccionamento das espessuras das amostras, uma vez que este ensaio somente tem sido utilizado para chapas e tiras finas, de pequena espessura. Essa prática mostrou-se satisfatória, e os resultados mostraram que é maior a conformabilidade nas chapas de maior espessura.

PALAVRAS-CHAVE: Anisotropia, chapas grossas, aço-carbono, aço baixa-liga, conformabilidade, dobramento de chapas, A516, A387.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

ARNEIRO, J. M. **A Study of parameters of mechanical cold forming of low-alloy and carbon steel plates on construction of industrial equipment**. 87 f. Dissertation (Master Science in Mechanical Engineering) – University of Engineering of Guaratinguetá, São Paulo State University Guaratinguetá, 2002.

Abstract

This work aimed to establish a correlation between the mechanical properties of tensile and bending, specified by the standards ASTM A20, A516 and A387, and the properties not specified, that are anisotropy, hardness and microstrutural characteristics. The studied materials were ASTM A-516-Grade 70 and ASTM A-387-Grade 11-Class 1, which are usually used in the construction of pressure vessels. Samples of these materials were given up by Confab Industrial S.A. and the tests were accomplished in the conditions of supply of the plates by the mills. In the tension tests, accomplished in specimens guided in the transverse direction the lamination of the plates, were observed results inside of the limits specified in the standards of the studied steels. The results of the hardness tests showed uniformity of the superficial conditions of the samples. In the bending tests satisfactory results were observed so much in relation to the bending radius specified with relationship to the adopted in this study, highlighting that in this last condition the bend radius were smaller than the specified. For the anisotropy tests the slicing of the thickness of the samples was adopted, once this testing has only been used for sheets and strips, of small thickness. That practice was shown satisfactory, and the results showed that is larger the conformability in the plates of larger thickness.

KEYWORDS: Anisotropy, thicker plates, carbon steels, low-alloy steels, formability, plate bending, A516, A387.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1 **INTRODUÇÃO**.....14

1.1 Objetivo.....15

1.2 Metas.....15

2 **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**.....17

2.1 HISTÓRICO DO AÇO. ORIGEM E EVOLUÇÃO.....17

2.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS.....19

2.3 SELEÇÃO DE AÇOS APLICÁVEIS A FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS.....20

2.3.1 **Descrição geral**.....20

2.3.2 **Códigos de fabricação**.....20

2.3.3 **Materiais para equipamentos de processo**.....21

2.3.3.1 **Equipamentos de Processo**.....21

2.3.3.2 Seleção de materiais para equipamentos de processo.....22

2.3.3.3 Fatores gerais de influência.....23

2.3.4 **Aços mais comuns utilizados para construção de vasos de pressão**.....27

2.3.4.1 Aços-carbono.....28

2.3.4.2 Aços baixa-liga, em cromo-molibdênio.....30

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS DEFORMADOS PLASTICAMENTE.....31

2.4.1 **Deformação dos metais**.....32

2.4.1.1 Deformação elástica dos metais.....32

2.4.1.2 Deformação plástica de cristais metálicos.....32

2.4.2 **Propriedades dos metais deformados plasticamente**.....33

2.4.3 **Encruamento**.....33

2.4.4 **Efeitos do tratamento térmico de recozimento nas propriedades mecânicas e na microestrutura**.....33

unesp

2.4.5 **Critérios de conformabilidade**.....34
2.4.6 **Seleção de lâminas de aços baixo-carbono para conformabilidade**.....36
2.4.7 **Índices de anisotropia**.....37
2.4.7.1 Anisotropia normal.....30
2.4.7.2 Anisotropia planar.....40
2.4.8 **Avaliação da capacidade de dobramento**.....40
2.5 PLASTICIDADE.....42
2.6 CONFORMAÇÃO A FRIO.....47
2.7 O EFEITO DAS INTERAÇÕES ENTRE TRANSFORMAÇÕES DISPLACIVAS E TEXTURAS EM AÇOS.....51
3 **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**.....54
3.1 MATERIAIS.....54
3.1.1 **Origem do material**.....54
3.1.2 **Composição química**.....55
3.1.3 **Estado de fornecimento**.....55
3.2 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIOS MECÂNICOS.....56
3.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA PARA ENSAIOS MECÂNICOS.....57
3.3.1 **Ensaios mecânicos – tração normal, dureza e metalografia**.....57
3.3.1.1 Ensaios de tração.....57
3.3.1.2 Ensaios de dureza.....59
3.3.1.3 Ensaios metalográficos.....60
3.3.2 **Ensaios de dobramento**.....64
3.3.3 **Ensaios de anisotropia**.....66
4 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**.....70
4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO.....71
4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA.....72
4.2.1 **Análise qualitativa**.....73
4.2.2 **Análise quantitativa**.....74
4.3 ENSAIOS DE DUREZA.....75
4.4 ENSAIOS DE DOBRAMENTO.....76

unesp

4.5 ENSAIOS DE ANISOTROPIA PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ANISOTROPIA.....80
5 **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS**.....82
5.1 CONCLUSÕES.....82
5.2 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....83
REFERÊNCIAS.....84
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....86

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Movimentação de Discordância para Formação de Subgrãos.....44
FIGURA 2.2 – Calandra Thyssen – Capacidade: até 100 mm de espessura, a frio.....48
FIGURA 2.3 – Prensa S & P – Capacidade: 6000 t.....48
FIGURA 2.4 – Exemplo de Distribuição da Tensão Durante as Operações de Conformação a Frio.....50
FIGURA 2.5 – Energia de Deformação por Unidade de Volume Durante a Conformação.....50
FIGURA 2.6 – Comparação entre a Curva Tensão-Deformação Convencional e Real.....51
FIGURA 3.1 – "Lay-Out" Típico para Corte dos Corpos-de-Prova (esquemático).....56
FIGURA 3.2 – Máquina de Oxi-Corte.....57
FIGURA 3.3 – Representação dos Corpos-de-Prova Utilizados para o Ensaio de Tração das Amostras PR346, PD614 e PN972.....58
FIGURA 3.4 – Representação do Corpo de Prova Utilizado para o Ensaio de Tração da Amostra PQ101.....58
FIGURA 3.5 – Máquina de Ensaio de Tração do Laboratório de Ensaios da Confab Industrial.....59
FIGURA 3.6 – Diagrama dos Pontos de Impressão.....60
FIGURA 3.7 – Máquinas de Ensaio de Dureza.....60
FIGURA 3.8 – Posições de Retirada dos Corpos-de-Prova para Ensaios Metalográficos.....61
FIGURA 3.9 – Máquina "Cut-Off".....62
FIGURA 3.10 – Máquina Politriz.....62
FIGURA 3.11 – Banco Metalográfico.....63
FIGURA 3.12 – Representação do Corpo de Prova para Ensaio de Dobramento.....64
FIGURA 3.13 – Representação do Ensaio de Dobramento.....65
FIGURA 3.14 – Prensa Hidráulica Utilizada para o Ensaio de Dobramento.....65
FIGURA 3.15 – Seccionamento Proposto para o Estudo de Anisotropia em Chapas..66
FIGURA 3.16 – Máquina de Ensaio de Tração EMIC do LEM-FEG/UNESP.....69

unesp

FIGURA 4.1 – Metalografia da Chapa PN972.....73
FIGURA 4.2 – Metalografia da Chapa PD614.....73
FIGURA 4.3 – Metalografia da Chapa PQ101.....74
FIGURA 4.4 – Metalografia da Chapa PR346.....74
FIGURA 4.5 – Corpos-de-prova após o ensaio de dobramento.....79

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Propriedades Mecânicas – Requisitos de Ensaio de Tração.....28
TABELA 2.2 – Requisitos Químicos – em % (Análise de corrida).....29
TABELA 2.3 – Propriedades Mecânicas – Requisitos de Ensaio de Tração.....31
TABELA 2.4 – Requisitos Químicos – em % (Análise de corrida).....31
TABELA 3.1 – Identificação dos Materiais Através dos Códigos de Inspeção.....55
TABELA 3.2 – Composição Química dos Materiais Utilizados.....55
TABELA 3.3 – Estado de Fornecimento dos Materiais.....56
TABELA 3.4 – Cargas de Tração Utilizadas no Ensaio de Anisotropia.....68
TABELA 4.1 – Resultados Obtidos nos Ensaios de Tração Convencional.....71
TABELA 4.2 – Microscopia Óptica – Fração Volumétrica das Fases Presentes.....75
TABELA 4.3 – Resultados Obtidos Através do Ensaio de Dureza Vickers.....76
TABELA 4.4 – Taxas de Redução de Espessura nos Ensaios de Dobramento.....77
TABELA 4.5 – Resultados Obtidos Através do Ensaio de Anisotropia.....80

1 INTRODUÇÃO

Recentemente, a indústria de base, em especial a de transformação, tem feito grande esforço na pesquisa e desenvolvimento visando o aprimoramento dos diversos processos e métodos de produção e controle.

As chapas de aço carbono e de baixa liga, destinadas a um processamento mecânico a frio, são geralmente similares, variando suas características em pequena parte a composição química e mais fortemente os tratamentos térmicos aplicáveis a cada uma das diversas especificações, com a finalidade de se obterem as propriedades mecânicas especificadas nas normas. A espessura das chapas possui grande influência no projeto dos aços e é também o fator de maior responsabilidade nos cálculos mecânicos, e que poderá decidir pela escolha de um maior ou menor grau de resistência mecânica. Chamam-se chapas grossas àquelas com espessura maior que 6,3mm.

Embora o aperfeiçoamento nas propriedades mecânicas dos aços seja um dos principais objetivos da metalurgia física, e que os aços em geral tenham tido grande utilidade para as indústrias, é relativamente pouco o que se tem feito na pesquisa e desenvolvimento do tema relacionado à conformação mecânica dos materiais utilizados neste trabalho.

É conhecido o esforço das usinas siderúrgicas do mundo todo em produzir chapas de aço com determinadas características físico-químicas tais como baixos teores de impurezas – fósforo e enxofre; maiores níveis de tenacidade; que possuam boa qualidade interna e melhor condições de acabamento superficial. Também é conhecido, e muito se tem pesquisado, na melhoria da conformabilidade de lâminas de aço, seja pela busca de melhores processos de obtenção e processamento do aço, seja pelo aperfeiçoamento dos métodos de estampagem. Essas características são de grande aplicabilidade e é inegável a necessidade de que seja dada continuidade aos estudos que busquem cada vez a melhora desses métodos. Entretanto, como citado acima, a raridade em estudos dirigidos ao tema de conformabilidade em chapas grossas laminadas a quente, motivou o desenvolvimento desse trabalho. Na prática, é verificado que tais propriedades são muitas vezes determinadas de forma quase que

unesp

empíricas, o que não deixa de ser eficiente. Entretanto, não são totalmente eficazes e não possuem base científica.

Os aços utilizados nesse trabalho, ASTM A-516-Grau 70 e o ASTM A-387-Grau 11-Classe 1, por serem quase que utilizados exclusivamente na construção de vasos de pressão, são encontrados com relativa facilidade e, por essa razão, são caracterizados por uma padronização com pequenas alterações de suas características físico-químicas, permitindo assim, que esse trabalho possa ter maior alcance, mesmo para os outros graus, como por exemplo o ASTM A-516-Grau 60 e o ASTM A-387-Grau 22-Classes 1 e 2.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal, Executar ensaios de anisotropia para chapas grossas laminadas a quente, como forma de estudo para verificação da propriedade de conformabilidade, uma vez que não é especificada para os mesmos; investigar e buscar correlacionar as propriedades especificadas pelas normas (tração e dobramento) e não especificadas (anisotropia, dureza e análise metalográfica), em um estudo para qualificar os parâmetros de conformação a frio de chapas de aço e fornecer uma base científica para a eficiência dos parâmetros de conformabilidade em aços e incentivar novos estudos nessa mesma direção.

1.2 METAS

a) Discutir as características metalúrgicas dos aços utilizados para a construção dos equipamentos de processo, em especial os vasos de pressão, dando enfoque à obtenção e processamento das chapas, buscando melhorar a conformabilidade;

b) Reunir, analisar e interpretar as propriedades mecânicas que fazem dos aços utilizados neste trabalho como os mais indicados na seleção pelos códigos de projetos, fabricação e inspeção;

unesp

c) Apresentar, utilizando-se de testes convencionais estabelecidos nas normas relacionadas a estes aços, as propriedades mecânicas encontradas e compara-las com as especificadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DO AÇO: origem e evolução

Segundo Chiaverini (1984), a primeira vez que o homem teve contato com o material ferro foi sob a forma de meteoritos. Daí a etimologia da palavra siderurgia, cujo radical latino sider significa estrela ou astro. Este metal raro, vindo do céu, manteve durante muito tempo um caráter mágico.

A primeira indústria do ferro apareceu ao sul do Cáucaso, 1700 a.C., entre os Hititas. O minério de ferro apresentava-se sob a forma de pequenas pedras à flor da terra. Os Hititas aqueciam a mistura (minério e carvão vegetal) dentro de um buraco feito no solo e dessa maneira obtinham uma massa pastosa que era, em seguida, batida para que se desprendesse a escória. O que restava de massa de ferro era depois forjado.

O instrumento para produção de ferro se aperfeiçoou e evoluiu até se tornar um forno semi-enterrado no qual se colocava camadas de ferro e carvão vegetal, de acordo com os princípios aplicados pelos Hititas nos fornos primitivos.

O ar insuflado por um fole manual ativava a combustão. A temperatura atingia uma faixa entre 1000 e 1200º C e assim se obtinha por redução, isso é, por eliminação do oxigênio do minério, uma massa pastosa de ferro pesando alguns quilos.

Depois do Cáucaso, o ferro apareceu no Egito em torno de 1100 a.C. Posteriormente, foi encontrado em regiões às quais, hoje, damos o nome de Grécia (1100 a.C.), Áustria (920 a.C.), Itália (600 a.C..), Espanha, França e Suíça (500 a.C.).

Os chineses não apenas inventaram a roda, mas já no século V a.C. fabricavam o ferro carburado, mais tarde chamado **ferro-gusa**.

Depois de sucessivas melhorias, já na idade média, os fornos aumentaram e suas cubas se elevaram acima do solo. A combustão passou a ser ativada por foles movidos a energia hidráulica, assim como o acionamento dos martelos que serviam para bater a massa de metal impuro saída do forno. Começaram também os problemas ecológicos, pois para obter alguns quilos de ferro, tornava-se necessário abater muitas árvores para conseguir o carvão vegetal.

unesp

Dentro das minas, o trabalho era feito à luz de velas e o minério de ferro era retirado em cestas puxadas por cordas.

No começo do século XIV, a altura dos fornos tinha aumentado e as condições de sopro se aperfeiçoado. A temperatura de combustão aumentou o suficiente para que o ferro pudesse absorver quantidades crescentes de carbono. Com o aumento do teor de carbono o metal se fundia a uma temperatura mais baixa e assim obteve-se pela primeira vez um metal líquido na parte baixa do **alto-forno**. Isto se deu na região do Rhur e perto de Liège ou Lorena. Com os fornos transformados em altos-fornos, a produção de ferro aumenta e por volta de 1350 surge a fundição de objetos de uso doméstico, instrumentos agrícolas e muitos outros.

Com a fundição, a indústria siderúrgica ganha novo impulso a partir da segunda metade do século XV. Começa-se a produzir ferro pelo "refino" do ferro-gusa. A crescente utilização de força motriz de água permite girar os cilindros dos laminadores e trefilar a frio. No início do século XVIII, o consumo de aço conhece um grande avanço. Em 1709, o inglês Abraham Darly começa a produzir o ferro-gusa a partir do coque.

Em 1745, na França, Reáumur realiza estudos teóricos sobre a redução do ferro-gusa em aço, enquanto Huntsman obtém pequenas quantidades de aço no cadinho.

Na metade do século XIX, em 1856, a descoberta do inglês Bessemer permite realizar uma produção realmente industrial de aço pelo refino do gusa em um convertedor através do sopro de uma corrente de ar que atravessava o banho de gusa convertendo-o por oxidação em aço líquido. A partir dessa época, pôde-se dispor, graças a estes processos, de grandes quantidades desta liga ferro-carbono, que se chamava aço, cujas propriedades permitiram as maravilhas tecnológicas do século XX.

A siderurgia moderna como conhecemos hoje, nasceu durante os anos 60. Enormes usinas integradas com capacidade de seis a dez milhões de toneladas de aço foram criadas e os dispositivos de controle e automação aprimoram-se assim como os equipamentos.

Quase nada pode ser fabricado sem recorrer a máquinas e equipamentos que, na maioria, são fabricados de aço. Isto nos fornece uma boa idéia do importante papel

unesp

do aço em nosso cotidiano, papel este que não parou de crescer desde os tempos remotos dos Hititas.

2.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS

Segundo Telles (1976), a seleção de um material para fabricação de um componente mecânico depende, além de critérios técnicos inerentes ao processo, do custo de produção. Geralmente a seleção pesa sobre uma ou mais propriedades importantes, combinadas com outras de menor nível. Como exemplo, um aço com alta resistência à tração deve ser preferencialmente tão soldável quanto um aço de menor teor de carbono e média resistência à tração com alta resistência à corrosão, para permitir menor seção a ser usada. As principais propriedades a serem consideradas são:

Resistência à tração em temperaturas ambiente e elevada;
Tenacidade e sensibilidade ao entalhe;
Fragilização em serviço;
Fragilidade em temperaturas criogênicas;
Rigidez em uma coluna e resiliência elástica em uma mola;
Efeito tamanho e massa;
Resistência à fadiga;
Dureza;
Razão resistência/peso;
Peso/kg; custo/área;
Densidade;
Alto ou baixo ponto de fusão;
Resistência à corrosão atmosférica;
Resistência à corrosão sob tensão;
Corrosão sob fadiga;
Propriedades elétricas e magnéticas; e
Complexidade geométrica, seção e espessura, soldabilidade.

unesp

2.3 SELEÇÃO DE AÇOS APLICÁVEIS A FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

2.3.1 Descrição geral

Conforme o código American Society of Mechanical Engineers – ASME VIII – Divisão 1, a escolha de aços para a construção de equipamentos industriais baseia-se fundamentalmente nas características funcionais dos mesmos, ou seja, nas condições de projeto. A folha de dados do projeto de um equipamento, como, por exemplo, um vaso de pressão, fornece as informações fundamentais que norteiam a correta escolha dos materiais a serem empregados. Basicamente, devem-se ter:

Pressão e temperatura de operação;

Pressão e temperatura de projeto;

Temperatura mínima de projeto do metal; e

Tipo de serviço (letal, corrosivo, etc.).

2.3.2 Códigos de fabricação

O código de fabricação a ser utilizado para dimensionamento define utilizando-se de cálculos de projeto baseados nas tensões admissíveis, determinação dos critérios para inspeção e ensaios não destrutivos (radiografia, principalmente), além de outros, tais como regras específicas para tratamentos térmicos. Na grande maioria das indústrias brasileiras, utiliza-se o código ASME – American Society of Mechanical Engineers, em suas diversas seções:

Seção I – caldeiras

Seção II – materiais e suas propriedades

Seção V – ensaios não destrutivos

Seção VIII Divisões 1, 2 e 3 – critérios para projeto, fabricação e inspeção.

unesp

Seção IX – critérios para especificação e qualificação dos procedimentos de soldagem

Dentro da seção VIII, encontramos as tabelas com os tipos de materiais adotados por aquela sociedade e, na seção II, que é constituída por três partes, A, B e C, podemos encontrar as propriedades e características gerais, respectivamente, das ligas ferrosas, não ferrosos e consumíveis de soldagem. Cada qual com suas características exclusivas, que devem ser avaliadas pelos engenheiros e projetistas. A aplicabilidade e forma de uso de cada material são de responsabilidade do usuário.

2.3.3 **Materiais para equipamentos de processos**

2.3.3.1 Equipamentos de processos

Ainda segundo Telles (1976), denominam-se equipamentos de processo os equipamentos utilizados em indústrias de processamento, que são aquelas nas quais materiais sólidos ou fluidos sofrem transformações físicas ou químicas ou as que se dedicam à armazenagem, manuseio ou distribuição de fluidos. Entre essas indústrias pode-se citar as refinarias de petróleo, as indústrias químicas e petroquímicas, grande parte das indústrias alimentícias e farmacêuticas, a parte térmica das centrais termoelétricas, os terminais de armazenagem e distribuição de produtos de petróleo, bem como as instalações de petróleo e/ou de gás natural em terra ou no mar.

Os equipamentos de processo podem ser classificados em três grupos gerais: os equipamentos de processo, as máquinas, e as tubulações. Sendo que estes últimos são os elementos físicos de interligação entre os demais equipamentos. Os equipamentos de processo incluem os vasos de pressão, em geral, e também tanques, esferas, torres, reatores, gasômetros, fornos, caldeiras, permutadores de calor, resfriadores, aquecedores, filtros, separadores, silos, etc. As máquinas usualmente existentes são as bombas, compressores e outras máquinas de movimentar fluidos. Neste trabalho não serão tratados os materiais para as máquinas nem para as tubulações, limitando-se aos materiais para os equipamentos de processo.

unesp

Nas indústrias de processamento existem três condições específicas características que tornam necessário um maior grau de confiabilidade para os equipamentos e, consequentemente, para os materiais utilizados nesses equipamentos, em comparação com o que é normalmente exigido para as demais indústrias em geral: ritmo de trabalho, integração entre equipamentos e riscos decorrentes dos processos.

As indústrias de processamento trabalham quase sempre em forma contínua e ininterrupta durante muitos meses. Os equipamentos ficam, portanto, submetidos a um regime severo de operação, pois ficam sem paradas para manutenção e inspeção.

Os diversos equipamentos formam uma cadeia contínua, através da qual circulam os fluidos de processo. Desse modo, uma falha ou paralisação de um único equipamento, por qualquer motivo, obriga geralmente à paralisação, ou redução de produção de toda a instalação ou planta. É evidente que toda a paralisação não programada de uma indústria resulta sempre em vultuosos prejuízos, perda de produção e lucros cessantes, vindo daí a necessidade do máximo de segurança e confiabilidade de funcionamento desses equipamentos.

Nessas indústrias existem muitas vezes condições de grande risco, devido ao manuseio de fluidos inflamáveis, tóxicos, explosivos ou sob condições de elevadas pressões e/ou temperaturas, nas quais uma pequena falha ou vazamento pode resultar em um acidente grave ou mesmo em um desastre de grandes proporções.

Os equipamentos de processo constituem não só a parte mais importante da maioria das indústrias de processamento, como também são, geralmente, os itens de maior tamanho, peso e custo unitário nessas indústrias.

2.3.3.2 Seleção de materiais para equipamentos de processos

A seleção do material adequado para cada uma das partes de um equipamento de processo é, freqüentemente, um dos problemas mais difíceis com que se defrontam os projetistas ou os usuários desses equipamentos.

A seguir, serão apresentados os principais fatores que podem influenciar na escolha dos materiais. Existem quase sempre fatores que são conflitantes entre si: por exemplo, um material melhor do ponto de vista de resistência à corrosão é geralmente

unesp

o mais caro. Por esse motivo, cada projetista, em cada caso, deve balizar os diversos fatores de influência presentes, verificar os que forem conflitantes e decidir os que devem prevalecer, de acordo com a importância relativa de cada um dentro das circunstâncias do caso em que estão.

Em resumo, o problema consiste em selecionar um material que atenda com segurança às condições de serviço de uma determinada aplicação, com o menos custo possível, levando-se em conta as propriedades mecânicas dos materiais, resistência à corrosão, facilidade de obtenção e de fabricação, etc.

2.3.3.3 Fatores gerais de influência:

a) Fatores relativos à resistência mecânica do material:

Propriedades mecânicas do material: as seguintes propriedades mecânicas dos materiais podem, com mais freqüência, influir na sua seleção, devendo, em cada caso serem conhecidas as que se aplicarem: limites de resistência à tração e de escoamento, alongamento e redução de área, resistência à fluência e à fadiga, tenacidade ao entalhe, temperatura de transição, dureza e módulo de elasticidade.

b) Fatores relativos ao serviço:

Temperatura em que o material deva trabalhar – essa temperatura é em geral igual, ou relacionada com a temperatura do fluido em contato com o material.

Observações:

Todos os fatores relacionados com o serviço (fluidos em contato e suas pressões, temperaturas, propriedades, etc.) são, em geral, variáveis ao longo do tempo, isto é, tem-se, quase sempre, uma série de valores considerados normais, ou de regime, e uma faixa, às vezes ampla, de variação desses valores, inclusive para situações anormais ou eventuais de serviço que possam ocorrer. Interessa, e é freqüentemente

unesp

necessário conhecer os extremos e saber a probabilidade e a duração de ocorrência desses extremos.

É muito importante observar que todas as propriedades mecânicas bem como a resistência à corrosão dos materiais têm grandes variações em função da temperatura, sendo, por isso, sempre necessário conhecer essas propriedades em toda faixa de temperaturas a que o material possa ser submetido.

Para muitos fluidos, as propriedades também podem variar bastante com a temperatura.

c) Fluidos em contato:

Devem ser considerados os seguintes fatores em relação aos fluidos em contato com o material:

- ✓ Composição química e concentração do fluido (ou dos fluidos).
- ✓ Caráter acido ou básico (pH) e oxidante ou redutor do fluido.
- ✓ Impurezas e contaminantes existente ou possíveis de existir: existência ou não de gases dissolvidos e de sólidos em suspensão
- ✓ Pressão, temperatura e velocidade do fluido em relação ao material.
- ✓ Flamabilidade e ponto de fulgor.
- ✓ Toxidez, explosividade ou outros efeitos deletérios do fluido.

d) Ação dos fluidos sobre os materiais:

Nesse aspecto devem ser considerados não só diversos fenômenos de corrosão, mas também outros possíveis efeitos deletérios do fluido sobre o material, com a fragilização, alterações químicas e metalúrgicas, etc.

e) Possibilidade de contaminação do fluido pelos resíduos da corrosão:

unesp

Contaminação máxima tolerável sobre a cor, o gosto, a toxidez ou sobre outras propriedades do fluido. O chumbo, por exemplo, é um material de alta resistência à corrosão, mas de emprego limitado por ser altamente tóxico.

Em alguns equipamentos existem peças em contato simultâneo com dois diferentes meios, como é o caso dos espelhos, feixe tubular e serpentina dos aparelhos de troca de calor. Para esses casos, a escolha dos materiais adequados é difícil, devido à diversidade de efeitos corrosivos e de temperatura dos dois fluidos em contato.

f) Níveis de tensão no material:

Um material deve resistir aos esforços solicitantes e, por isso, a sua resistência mecânica deve ser compatível com o nível de tensão que se tenha, isto é, com a ordem de grandeza dos esforços presente. Para que as espessuras das diversas peças sejam razoáveis, é necessário que sejam empregados materiais de grande resistência quando os esforços forem grandes e vice-versa. Deve ser observado que em qualquer tipo de equipamento existem sempre numerosos esforços além da pressão do fluido (que às vezes não é o esforço predominante), tais como: peso, ação do vento, relações de dilatações térmicas, sobrecargas externas, esforços de montagem, etc.

O valor da pressão também pode determinar, em alguns casos, a seleção do material, como no denominado "Serviço com Hidrogênio".

g) Natureza dos esforços mecânicos:

Além do nível de tensão, a natureza dos esforços existentes (tração, compressão, flexão, esforços estáticos ou dinâmicos, choques, vibrações, esforços cíclicos, etc.) também condicionam a escolha do material. Os materiais frágeis, por exemplo, não devem ser utilizados quando ocorrem esforços dinâmicos, choques ou altas concentrações de tensões. São exemplos de materiais frágeis o ferro fundido, o vidro, a cerâmica e alguns metais em temperaturas inferiores a um certo valor.

Tratando-se de materiais de boa ductilidade, os pontos de concentração de tensões, mesmo quando graves, podem não ter maior importância, porque o metal

unesp

deforma-se localmente, onde as tensões forem elevadas e, com isso, há um relaxamento que alivia e que distribui as tensões. Essas deformações não podem ser toleradas quando houver repetição ou inversão cíclica das tensões, devido à possibilidade de trincar por fadiga.

Em materiais frágeis, a deformação local e o relaxamento das tensões não são possíveis.

h) Fatores relativos à fabricação do equipamento:

Todos os materiais têm determinadas limitações quanto às possibilidades de fabricação e de montagem. Por essa razão, independente de outras considerações, tais como o tipo, o formato e o tamanho da peça ou do equipamento podem excluir o emprego de determinados materiais, com os quais não seja possível ou não seja econômico fabricar ou montar a peça ou o equipamento em questão. Sobre esse assunto deve ainda ser considerada a soldabilidade, usinabilidade e facilidade conformação do material. Soldabilidade não é apenas a possibilidade do emprego de solda como também maior ou menor dificuldade de soldagem e a necessidade ou não de tratamentos térmicos e de outros cuidados especiais.

i) Disponibilidade dos materiais e facilidade de obtenção do material:

Devem ser consideradas as facilidades de obtenção dos diversos materiais possíveis, a necessidade ou não de importação, os prazos de entrega, a quantidade mínima para a compra, a existência de estoques, etc.

j) Forma de apresentação do material:

As matérias-primas necessárias para a fabricação dos equipamentos de processo (ou de suas partes) podem se apresentar sob várias formas, dependendo do tipo do equipamento ou da parte a ser fabricada: chapas grossas, chapas finas, tubos para condução, tubos de troca de calor, forjados, fundidos, acessórios de tubulação,

unesp

etc. Na prática, muitos materiais não são encontrados no comércio em todas essas formas de apresentação. Por esse motivo, dependendo da forma desejada da matéria-prima, alguns materiais devem ser preliminarmente eliminados, para os quais a forma necessária não exista ou seja de obtenção muito difícil.

k) Custo do material:

Este é evidentemente um fator importantíssimo e, freqüentemente, decisivo na escolha. Para cada aplicação existem quase sempre vários materiais possíveis; o melhor será o que for mais econômico. Para a decisão de qual o material mais econômico, deve ser considerado não só o custo direto do material, como também uma série de outros fatores: custo de fabricação do equipamento, tempo de vida, custo de paralisação e de reposição do equipamento, etc. Por exemplo, o custo por quilo de um aço inoxidável austenítico tipo 304 é aproximadamente 2,7 vezes superior ao custo de um aço-liga 1,25Cr-0,5Mo, entretanto, a construção de um equipamento em aço tipo 304 pode resultar em maior economia do que um aço liga, porque a soldagem do aço inoxidável é muito mais fácil, além de serem dispensáveis os tratamentos térmicos.

l) Experiência prévia

A decisão por um determinado material obriga que sempre se investigue e analise a experiência prévia que possa existir com esse material, no mesmo tipo de serviço. Em casos importantes é, em geral, muito arriscado decidir-se por um material para o qual não exista nenhuma experiência em serviço semelhante.

2.3.4 Aços mais comuns utilizados para construção de vasos de pressão

Foi dedicada especial atenção a dois grupos distintos que serão alvo deste trabalho.

No primeiro grupo foram considerados os aços ASTM A-516, graus 60 e 70, enquanto no segundo grupo, os aços ASTM A387, graus 11 e 22.

unesp

2.3.4.1 Aços carbono

Devido à grande diversidade existente dentro de cada grupo, no primeiro grupo foram considerados somente os aços da norma ASTM A 516 graus 60 e 70, que são os mais comumente utilizados na construção de vasos de pressão sujeitos a moderadas e baixas temperaturas (de –45 ºC até + 426 ºC). A pressão de projeto ou teste hidrostático e tolerância para corrosão determinam a espessura dos componentes.

A seguir, encontram-se as características especificadas destes aços.

- ✓ Processo de obtenção utilizado pelas usinas;
- ✓ Laminação; e
- ✓ Tratamento Térmico.

Para estes dois aços, o tratamento térmico de normalização somente é especificado para chapas com espessura maior ou igual a 38,1 mm. Os objetivos deste tratamento são a homogeneização e refinamento da microestrutura e consiste no reaquecimento das chapas até uma temperatura acima da linha Ac3 do diagrama de equilíbrio Fe-C, na fase austenita (temperatura de normalização, Tn ºC), encharque naquela temperatura (tempo de encharque, t seg.) e resfriamento ao ar (velocidade de resfriamento, V ºC/s). As propriedades especificadas de tração encontram-se na Tabela 2.1 e as de composição química na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 – Propriedades Mecânicas – Requisitos de Ensaio de Tração

Propriedade	U. M.	Grau 60	Grau 70
Limite de Escoamento (mín.)	ksi	32	38
	(MPa)	(205)	(260)
Resistência à tração (mín.)	ksi	60 – 80	70 – 90
	(MPa)	(415 – 550)	(485 – 620)

unesp

Tabela 2.2. – Composição Química –% em massa (Análise de corrida)

Elementos	Espessura (mm)	Grau 60	Grau 70
Carbono (máx.)	Até 12,5	0,21	0,27
	Acima de 12,5 a 50	0,23	0,28
	Acima de 50 a 100	0,25	0,30
Manganês	Até 12,5	0,60 – 0,90	0,85 – 1,20
	Acima de 12,5	0,85 – 1,20	0,85 – 1,20
Fósforo (máx.)		0,035	0,035
Enxofre (máx.)		0,035	0,035
Silício		0,15 – 0,40	0,15 – 0,40

Observações:

Chapas com espessura abaixo de 38mm são normalmente fornecidas sem tratamento térmico, ou seja, como laminadas, a não ser que solicitado pelo comprador.

Chapas com espessura acima de 38mm serão normalizadas.

Quando o teste de impacto Charpy com entalhe em V for necessário, as chapas serão normalizadas, independentemente da espessura.

Aplicações:

Aplicado primariamente para serviço em vasos de pressão soldados, onde o requisito de melhor tenacidade ao entalhe for importante.

Características metalúrgicas típicas obtidas em um aço ASTM A-516-70:

Como Laminado:

- ✓ Tamanho de grão ferrítico: ASTM 9,0
- ✓ % de fases: ferrita (56%) + perlita (44%)
- ✓ Grau de bandeamento (long.): 0,25

unesp

Normalizado:

- ✓ Tamanho de grão ferrítico: ASTM 9,5
- ✓ % de fases: ferrita (82%) + perlita (18%)
- ✓ Grau de bandeamento (long.): 0,54

2.3.4.2 Aços baixa-liga, em cromo-molibdênio

Devido à grande diversidade existente dentro de cada grupo, no segundo grupo estaremos considerando somente os aços da norma ASTM A 387 graus 11 e 22 que são os mais comumente utilizados na construção de vasos de pressão sujeitos a moderadas e mais altas temperaturas (de 0 ºC até +648 ºC). Da mesma forma que nos aços A-516, a pressão de projeto ou teste hidrostático e tolerância para corrosão irão determinar a espessura dos componentes.

A seguir, encontram-se as características especificadas destes aços:

- ✓ Processo de obtenção;
- ✓ Laminação; e
- ✓ Tratamento Térmico.

Todas chapas são normalmente fornecidas com tratamento térmico de recozimento, normalização e revenimento ou, quando permitido pelo comprador, resfriamento a partir da temperatura de austenitização por ar forçado ou têmpera seguida de revenimento. Esta última categoria é a mais comumente utilizada para chapas Cr-Mo. A austenita transforma-se em martensita quando resfriada até uma temperatura (T) menor que a temperatura Ms do aço (curva CCT).

A transformação da austenita para martensita é isotérmica, isto é, para um determinado valor de T (<Ms), a quantidade de martensita formada é fixa.

Para aumentar a quantidade de martensita transformada é necessária a diminuição de T ainda mais, isto é, aumentar o super-resfriamento. As propriedades

especificadas de tração encontram-se na Tabela 2.3 e as de composição química na Tabela 2.4.

Tabela 2.3 – Propriedades Mecânicas – Requisitos de Ensaio de Tração – ASTM A387

Propriedade	U. M.	Grau 11-Cl.1	Grau 11-Cl.2	Grau 22-Cl.1	Grau 22-Cl.2
Limite de Escoamento (mín.)	ksi	35	45	30	45
	(MPa)	(205)	(310)	(210)	(310)
Resistência à tração	ksi	60 – 85	75 – 100	60 – 85	75 – 100
	(MPa)	(415 – 585)	(515 – 690)	(415 – 585)	(515 – 690)

Tabela 2.4 – Composição Química – % em massa (Análise de corrida) – ASTM A387

Elementos	Grau 11	Grau 22
Carbono	0,05 – 0,17	0,05 – 0,15
Manganês	0,40 – 0,65	0,30 – 0,60
Fósforo (máx.)	0,035	0,035
Enxofre (máx.)	0,035	0,035
Cromo	1,00 – 1,50	2,00 – 2,50
Molibdênio	0,45 – 0,65	0,90 – 1,10
Silício	0,50 – 0,80	0,50 máx.

Aplicações principais:

Em caldeiras soldadas e em vasos de pressão projetados para serviços em temperatura elevada.

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS DEFORMADOS PLASTICAMENTE

2.4.1 Deformação dos metais

2.4.1.1 Deformação elástica dos metais

A deformação elástica precede a deformação plástica. Quando uma pequena tensão de tração é aplicada a um metal ou, de uma maneira geral, a um material cristalino qualquer, ocorre a deformação elástica. Quando a solicitação é aplicada, o material se deforma na direção do esforço de tração. A remoção da carga, dentro da região elástica, faz com que o corpo de prova volte às suas dimensões originais, conforme descrito por Rollason (1973). Analogamente, quando um corpo sofre esforços de compressão na região elástica, ele se torna levemente menor, ou seja, o comprimento fica reduzido, retornando às suas dimensões originais após a remoção da carga de compressão.

2.4.1.2 Deformação Plástica de Cristais Metálicos

Os materiais podem ser solicitados por tensões de tração, de compressão, de cisalhamento ou torção. Como os dois primeiros tipos podem ser decompostos em tensões de cisalhamento, e como a maior parte dos metais é significativamente menos resistente ao cisalhamento do que à tração ou à compressão, os metais se deformam pelo cisalhamento plástico ou escorregamento de átomos em um plano cristalino em relação aos demais. O escorregamento causa uma deformação permanente, ou seja, a retirada da tensão não implica no retorno dos planos cristalinos às suas posições originais.

O escorregamento ocorre mais facilmente ao longo de certas direções e planos. A tensão de cisalhamento necessária para produzir escorregamento em um determinado plano cristalino é denominada de tensão crítica de cisalhamento.

O número de planos através dos quais pode ocorrer escorregamento com maior facilidade varia com a estrutura cristalina.

unesp

2.4.2 Propriedades dos metais deformados plasticamente

A deformação plástica altera a estrutura interna de um metal; logo, deve-se esperar que a deformação também mude as propriedades de um metal. Medidas de resistividade fornecem evidências dessas mudanças de propriedades. A estrutura distorcida reduz o livre percurso médio dos movimentos dos elétrons e, portanto, aumenta a resistividade.

O aumento na dureza resultante da deformação plástica é denominado de endurecimento pela deformação a frio ou encruamento. Ensaios de laboratório mostram que, acompanhando o aumento na dureza, também se elevam o limite de escoamento e o de resistência à tração. Por outro lado, o encruamento reduz a ductilidade, pois parte do alongamento é reduzido durante a deformação a frio. Logo, um alongamento menor é observado durante o ensaio. O processo de encruamento aumenta mais os níveis do limite de escoamento que os níveis de resistência à tração e ambos tendem à tensão verdadeira de ruptura com o aumento da deformação a frio.

2.4.3 Encruamento

Segundo Dieter (1961), a existência de tensão residual e sua importância para o encruamento em metais foi estabelecida, o próximo passo é identificar as barreiras ao movimento de deslocamento em cristais simples. Partículas precipitadas microscópicas e átomos estranhos podem servir como barreiras, mas são efetivos e simples cristais puros que devem ser encontrados. O encruamento ocorre nos processos de conformação a frio em que o escoamento do material pela movimentação das discordâncias é dificultado pela presença de barreiras (contornos de grão, partículas de segunda fase e outras discordâncias). O caminho livre para essa movimentação é diminuído e a energia interna elevada. Assim, o material torna-se mais resistente e menos dúctil, o que dificulta a continuidade do processo de deformação plástica devido ao aumento na densidade de discordâncias.

unesp

2.4.4 Efeitos do tratamento térmico de recozimento nas propriedades e na microestrutura

As três etapas do tratamento térmico de recozimento e seus efeitos nas propriedades e na microestrutura dos metais tratados são a recuperação, a recristalização e o crescimento de grãos.

Considerando um tratamento isotérmico, tem-se a recuperação como estágio inicial em que ocorre basicamente a movimentação e aniquilação de discordâncias, o que leva a uma queda acentuada das tensões internas do material deformado. As propriedades mecânicas relativas à resistência e à ductilidade não são substancialmente alteradas, o mesmo ocorrendo com a microestrutura deformada. Ao atingir a temperatura de recristalização ocorre a nucleação de novos grãos isentos de deformação que crescem às custas dos grãos vizinhos deformados, a resistência mecânica é sensivelmente reduzida e a ductilidade elevada. A microestrutura passa a apresentar grãos equiaxiais recristalizados. Nessa temperatura ocorre o crescimento de grãos e que deve ser evitado, pois pode ocorrer uma queda importante de ductilidade e resistência devido aos grãos de tamanho excessivo.

2.4.5 Critérios de conformabilidade

Os critérios de conformabilidade servem para definir se um material metálico poderá ser conformado, num determinado processo, sem que ocorram defeitos nos produtos ou nas ferramentas e equipamentos empregados. Assim, obtêm-se valores limites de conformabilidade de um determinado material para um processo de conformação específico. Um exemplo de critério é a estampabilidade que define a capacidade de um material ser conformado por estampagem profunda. Para quantificar a estampabilidade empregam-se ensaios como os de Erichsen e Swift.

a) Ensaio Erichsen. Associação deste ensaio com a conformabilidade de chapas para estampagem profunda: no ensaio Erichsen uma tira metálica é fixada sobre uma matriz e estirada por um punção semi-esférico. O estiramento prossegue até

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

que a tira se rompa, quando se mede a altura da calota formada e a força no momento da ruptura. Com o valor da altura da calota pode-se definir o grau de estampabilidade da tira ensaiada.

b) Texturização de materiais metálicos. A textura é definida como a presença de uma orientação cristalográfica preferencial para a maioria dos grãos de um material metálico. A texturização pode ser provocada pelo trabalho a frio com altos graus de deformação, em que os grãos giram de modo a posicionar planos cristalográficos específicos e favorecer a continuidade da deformação. A texturização também pode ser obtida no tratamento térmico de recozimento, pela recristalização de grãos a partir de núcleos orientados preferencialmente numa determinada direção cristalográfica.

c) A conformabilidade na estampagem profunda de corpos metálicos é afetada pela textura dos materiais. Materiais texturizados apresentam-se anisotrópicos, ou seja, apresentam propriedades distintas para as diferentes direções de solicitação. No caso da estampagem profunda o uso de uma chapa texturizada e consequentemente anisotrópica apresenta dois efeitos sobre a conformabilidade: no plano da chapa pode causar o surgimento de "orelhas" que exigirão sua remoção e o uso de um disco de maior diâmetro. Já uma chapa mais resistente em sua espessura do que em seu plano de laminação pode ser útil a fim de evitar a estricção e ruptura da parede do corpo submetida aos esforços de tração causados pelo embutimento.

d) Para o desenvolvimento dos métodos de definição da conformabilidade adotam-se hipóteses simplificadoras sobre o material, sobre o processo e sobre as ferramentas. Assume-se que o material seja uniforme, contínuo, homogêneo, isotrópico e incompressível. Também se pode assumir que o material apresente-se rígido ou elástico, perfeitamente plástico ou plástico com encruamento. Considera-se que as ferramentas e que os equipamentos sejam rígidos e que o atrito entre ferramentas e peça trabalhada permaneça constante ao longo do processo. São considerações simplificadoras e que para alguns processos, principalmente os realizados a quente, afastam-se das condições observadas no processamento.

unesp

e) Uma comparação do método da energia uniforme com o da divisão em elementos, com relação às considerações, pode ser descrita quando o método da energia uniforme é o método analítico mais simples, pois não considera o efeito do atrito ou do re-trabalho sobre a energia necessária num processo de conformação. Já o método da divisão em elementos é mais elaborado, pois considera a existência do atrito na interface ferramentas-peça, bem como a geometria dessas ferramentas, porém não permite avaliar o efeito do trabalho redundante na energia total necessária no processo.

2.4.6 Seleção de lâminas de aços baixo-carbono para conformabilidade

A seleção é discutida do ponto de vista da conformabilidade necessária para fabricar partes de severidade de conformação específica. Propriedades mecânicas são correlacionadas com conformabilidade, e o percentual de estiramento do metal no molde é a medida da severidade de deformação. Também discutido do ponto de vista dos seus efeitos na conformabilidade são acabamento superficial da lâmina, direcionalidade, tamanho de grão, envelhecimento, junto com os efeitos de processo tais como velocidade de formação, bordas aparadas, lubrificação e ferramental.

Uma classificação de severidade pode ser discutida e é difícil selecionar a classe mais econômica de aço para partes individuais com requisitos que podem variar desde uma dobra suave até uma estampagem severa. A seleção pode ser bastante simplificada; entretanto, pelo uso de um sistema de classificação de severidade para correlacionar a severidade da operação de formação com as propriedades mecânicas do aço. Os benefícios a serem derivados da classificação da severidade são: estimativas mais exatas podem ser feitas antecipadamente porque a escolha do aço adequado é assegurada; a qualidade de novos aços pode ser controlada mais proximamente e, por último, aços "sub-standard" ou rejeitados podem ser reclassificados e alocados para outras partes de um pouco menos severidade.

Pelo uso do sistema de classificação de severidade, qualquer uma das sete severidades de formação podem ser associadas com as propriedades mecânicas de uma das cinco classes de aços laminados a frio para partes conformadas.

unesp

A melhor maneira de construir o arquivo de dados e experiência necessária para uma classificação rápida e precisa de novas partes é primeiro classificar partes existentes. Classes de severidade um e dois são facilmente identificadas visualmente.

Segundo Dieter (1961), materiais cuja estrutura pode apresentar uma orientação preferencial dos grãos após algum processo de deformação são chamados de materiais anisotrópicos, já que tais materiais podem apresentar, por exemplo, diferentes comportamentos quando deformados (como ondulação nas bordas de objetos estampados ou variações de espessura das chapas numa determinada direção após a conformação mecânica da mesma). Assim, o trabalho citado apresentou um estudo a respeito do comportamento anisotrópico de chapas de aço inoxidável AISI 304, aço carbono ABNT 1008 e latão 67-33. A quantificação do comportamento anisotrópico foi possível através da obtenção dos índices de anisotropia normal e planar dos diferentes materiais estudados. Concluiu-se que os ensaios de anisotropia apresentaram resultados mais coerentes e reprodutíveis estatisticamente quando realizados em deformações elevadas dentro do regime de deformação plástica uniforme (onde a tensão aplicada é próxima do limite de resistência do material), do que quando realizados com pequenas porcentagens de deformação (em tensões pouco superiores ao limite de escoamento).

Para um mesmo material, propriedades físicas e mecânicas medidas em direções cristalográficas diferentes podem apresentar valores diferentes. Quando isso acontece se diz que o material é anisotrópico. Um material é dito isotrópico quando suas propriedades possuem um mesmo valor, independente da direção na qual elas são medidas.

As propriedades físicas dos monocristais são geralmente muito influenciadas pela direção na qual são medidas. Ou seja, na maioria dos casos os monocristais são anisotrópicos. Nessas situações, apesar de cada monocristal ser anisotrópico, o material (que é um agregado desses cristais) pode ser isotrópico. Isto ocorre, pois em um material policristalino considera-se que os cristais estão orientados ao acaso, compensando a anisotropia de cada cristal. No entanto essa compensação nunca é total. É impossível, através dos processos de fabricação utilizados atualmente, alcançar-se uma orientação uniforme ou totalmente ao acaso dos grãos. Durante o

unesp

processamento o material adquire uma orientação preferencial, e a existência desta orientação preferencial do material denomina-se textura.

2.4.7 Índices de anisotropia

A anisotropia cristalográfica afeta em maior escala a tensão limite de escoamento e a resistência à tração. Estas propriedades podem variar dependendo da direção na qual foram medidas. Em chapas, pode-se definir assim três direções principais. A direção principal de trabalho é a direção longitudinal. A direção transversal é a perpendicular à longitudinal. Determina-se também uma direção principal orientada a 45º da direção longitudinal.

2.4.7.1 Anisotropia normal

O fator r, que mede a anisotropia normal, é a razão entre a deformação na largura e a deformação na espessura de uma chapa, como pode ser visto na equação (1).

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w}\right)}{\ln\left(\frac{t_0}{t}\right)} \qquad (1)$$

onde,

w_o: largura inicial;

w: largura final;

t_o: espessura inicial; e

t: espessura final.

Se um material possui um alto valor de r significa que ele oferece grande resistência à deformação plástica na direção da espessura.

unesp

No caso de chapas finas, as medidas da espessura não são precisas. Assim, a equação (1) pode ser reescrita, aplicando-se a relação de volume constante. Obtém-se assim a equação (2).

$$r = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w}\right)}{\ln\left(\frac{Lw}{L_0 w_0}\right)} \tag{2}$$

onde:

L_o: comprimento inicial;

L: comprimento final.

Chapas laminadas apresentam variação das propriedades elásticas e plásticas de acordo com a direção de laminação a qual foram sujeitas. O índice de anisotropia r pode ser medido em chapas com direções de laminação diferentes, variando de 0º a 90º. O índice $r_{0º}$ seria o índice de anisotropia medido em uma direção longitudinal à direção de laminação; e $r_{90º}$ o índice de anisotropia medido em uma direção transversal à direção de laminação. Neste caso costuma-se utilizar um valor de coeficiente de anisotropia médio (r_m) para diferentes direções, representado pela equação (3).

$$r_m = \frac{r_{o^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \tag{3}$$

Este valor está relacionado com o desempenho do material na estampagem. O ideal é que o material possua um alto valor de r_m, o que significa que não haverá grande redução da espessura. Para chapas de aço o valor de r_m varia entre um e dois, sendo que o limite teórico para materiais cúbico de corpo centrado é três.

unesp

2.4.7.2 Anisotropia planar

A anisotropia planar representa a variação da deformação no plano de uma chapa. O índice de anisotropia planar Δ_r é calculado de acordo com a equação (4).

$$\Delta_r = \frac{\left(r_{0^o} + r_{90^o} - 2r_{45^o}\right)}{2} \quad (4)$$

Este índice representa a diferença entre os valores de r na direção transversal, longitudinal e 45º. Se Δ_r apresenta um alto valor significa uma diferença grande entre os índices de anisotropia nas direções consideradas, o que não é ideal em um processo de conformação mecânica, pois podem aparecer "orelhas" indesejadas na peça estampada.

2.4.8 Avaliação da capacidade de dobramento

O dobramento em chapas é um importante processo de fabricação. O entendimento e desenvolvimento da mecânica da dobra são objetivados na obtenção das seguintes informações para aplicações práticas:

Projeto da ferramenta;
Processo/ prensa;
Controle da precisão do perfil do componente;
Previsão de falha; e
Capacidade de dobra (menor raio de dobra).

Embora muito progresso tenha sido alcançado para melhorar o modelamento da dobra ainda há a necessidade de avanço adicional nas teorias existentes. Os métodos de tentativa e erro ainda estão sendo utilizados para estabelecer procedimentos adequados para dobra de partes metálicas.

unesp

Chapas metálicas são fabricadas por laminação, tendo por isso propriedades variando em função da direção de laminação, devido à orientação cristalográfica preferencial. Isto é conhecido como anisotropia, a ser considerada para este estudo.

Hill (1950) apresentou uma teoria de anisotropia plástica para descrever as características de fibras mecânicas. Neste estudo, tanto a anisotropia como o encruamento são considerados nos efeitos da capacidade de dobra e efeito mola na conformação e podem ser confirmados pela prática.

Segundo Leu (1995), é muito difícil encontrar um limite de deformação adequada para as operações de dobra de chapas finas. O limite de dobra poderia ser definido como a soma da deformação que inicia uma granulação detectável na superfície externa da zona da dobra, para o qual um raio de dobra mínimo é induzido e é afetado por muitos fatores de processos, tais como a geometria da ferramenta, o procedimento de dobra, as propriedades do material, a espessura e as condições superficiais.

Os resultados experimentais mostram que a deformação no limite da dobra é maior que a deformação no limite do alongamento uniforme e menor que a ruptura no teste de tração. Poucos estudos no limite de dobra têm sido feitos. Datsko e Yang (1960) apresentaram uma equação simples que correlaciona o raio de dobra mínimo com a redução percentual de área do material.

Takenaka et al. (1973) registrou que o limite de dobra (o ângulo de dobra crítico) alongado é afetado pela resistência ao cisalhamento e coeficiente do expoente de encruamento.

É conhecido que a resistência à deformação de folhas de metal com o valor r anisotrópico médio, que induz o efeito reverso ao afinamento da espessura da folha na conformação de folhas de metal, onde r_m, já definido (ver equação (3)).

Leu (1995) demonstrou que maiores valores de r resultarão em maior capacidade de dobra, possibilitando um menor raio de dobra.

unesp

2.5 PLASTICIDADE

O agregado policristalino, presente na grande maioria dos materiais metálicos, deforma-se de maneira mais complexa do que o cristal isolado devido à presença dos contornos dos grãos e de segundas fases. Outros fatores contribuem para a alteração do comportamento do metal na transformação plástica; esses fatores que, contudo, têm a sua ação concentrada no âmbito de cada cristal individualmente, são a formação de sub grãos e o endurecimento por solução sólida. Os mecanismos de endurecimento do metal decorrentes da interação de discordâncias com contornos dos grãos ou dos sub-grãos, com os átomos de soluto e com as segundas fases são responsáveis pela redução da plasticidade dos materiais metálicos, e serão objetos de descrição mais detalhada a seguir.

As estruturas decorrentes de reações martensíticas apresentam propriedades mecânicas caracterizadas por elevada resistência mecânica e reduzida plasticidade. As estruturas endurecidas por solubilização e precipitação também apresentam pequena capacidade de deformação plástica. Então, os fenômenos que provocam esses efeitos não permitem aos materiais, assim endurecidos por tratamentos térmicos, a aplicação de processos de conformação plástica.

O contorno do cristal ou do grão do agregado policristalino, se apresenta irregular, caracterizando uma região de elevada imperfeição cristalina com átomos fora de suas posições regulares e de equilíbrio no reticulado cristalino.

Devido a esse fato, o movimento de discordâncias é dificultado, o que exige maior nível de solicitação mecânica para dar continuidade à deformação plástica. Além disso, a passagem de uma discordância – em seu movimento – de um cristal para o outro adjacente também é dificultada pelo fato desse segundo cristal apresentar, muito provavelmente, uma orientação diferente.

Como os contornos dos grãos dificultam a movimentação das discordâncias, e, conseqüentemente, a deformação plástica, pode-se concluir que um material metálico com uma granulação maior apresenta uma menor área de contornos de grãos e, em decorrência, uma maior deformabilidade plástica e uma menor resistência mecânica. Além disso, o coeficiente de encruamento, isto é, a relação entre o aumento de

unesp

resistência para um determinado nível de deformação plástica, também se reduz com o aumento do tamanho do grão.

A energia interna de um metal deformado é maior do que a existente antes da deformação e a permanência do material em uma temperatura mais elevada pode provocar a movimentação das discordâncias devido às tensões internas acumuladas.

A movimentação das discordâncias pode se dar, então, através de dois mecanismos: deslizamento ou escorregamento e salto. O salto da discordância consiste numa mudança do plano da discordância (no caso de discordância de cunha); a mudança de plano depende da movimentação de átomos e, portanto, do fenômeno de difusão atômica que é ativado pela elevação de temperatura.

A movimentação por saltos e por deslizamentos pode provocar a formação de subgrãos dentro do grão. Esses subgrãos apresentam contornos constituídos por discordâncias que formam linhas de pequenas inclinações, umas em relação às outras. Esse processo de formação de subgrãos denomina-se *poligonização*. A denominação deriva da figura formada dentro do grão que se aproxima de um polígono quando observado, num corte transversal de um corpo-de-prova, no microscópio, conforme ilustração na Figura 2.1, onde se visualiza a movimentação de discordâncias para formação de subgrãos com pequenos ângulos de inclinação entre si, caracterizando a poligonização.

Esses contornos de grão de pequena inclinação dificultam o movimento das discordâncias reduzindo a plasticidade do metal.

Tamanhos de grão, segundo a norma americana ASTM: indicação do aumento de área de contorno de grão com a diminuição do tamanho de grão (a numeração aumenta, passando de um para cinco). Aumento de microscópio óptico de 100X.

unesp

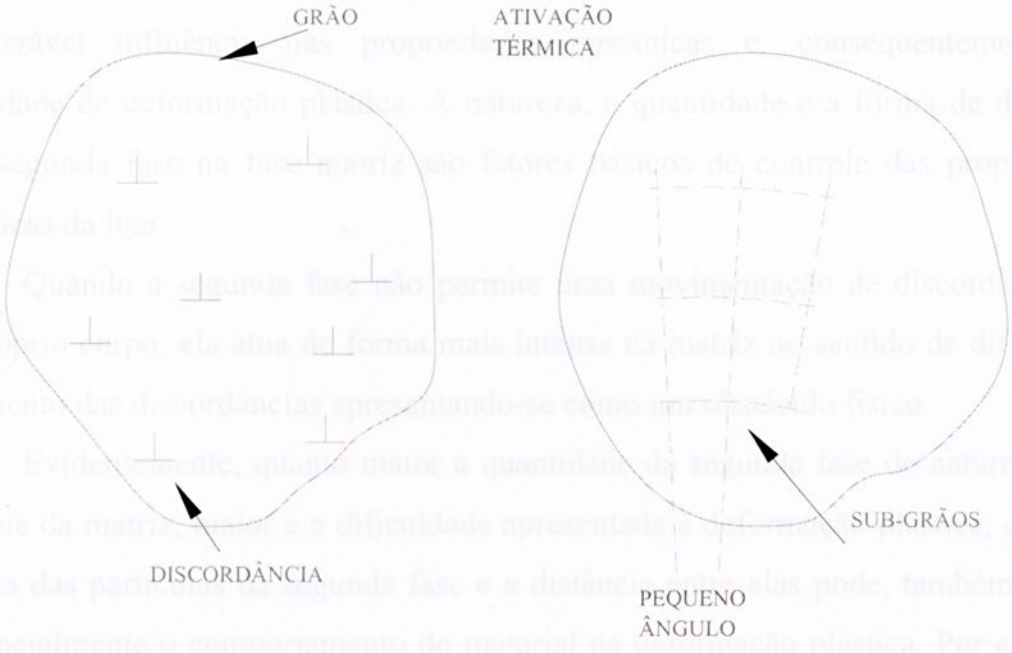


Figura 2.1 – Movimentação de discordância para formação de subgrãos

A presença de átomos de um outro elemento (átomos de soluto) no reticulado cristalino do elemento básico (solvente) formando soluções sólidas substitucionais ou intersticionais dificulta a movimentação de discordâncias devido à distorção provocada nesse reticulado cristalino: tanto um átomo estranho de diâmetro atômico maior que o do elemento solvente como um menor provoca um efeito no sentido de dificultar o movimento de discordâncias.

Além desse efeito, a presença do átomo de soluto pode ocasionar um outro efeito adicional, que é a imobilização da discordância a qual exige um nível de tensão mais elevado para permitir o prosseguimento da deformação plástica. Os átomos de soluto posicionam-se frente à direção de movimentação das discordâncias através do mecanismo de difusão atômica; ou, então, as próprias discordâncias em seus deslocamentos, se aproximam dos átomos de soluto.

Os fenômenos de formação de um patamar de escoamento com tensão variável em função da deformação e de envelhecimento por deformação plástica são decorrentes dos efeitos de interação de átomos de soluto com o movimento de discordância no reticulado do elemento solvente. Exemplo notável ocorre nos aços-doces recozidos onde os solutos atuantes são o carbono e o nitrogênio.

As segundas fases precipitadas na formação de uma liga podem ter considerável influência nas propriedades mecânicas e, consequentemente, na capacidade de deformação plástica. A natureza, a quantidade e a forma de dispersão desta segunda fase na fase matriz são fatores básicos de controle das propriedades mecânicas da liga.

Quando a segunda fase não permite uma movimentação de discordância em seu próprio corpo, ela atua de forma mais intensa na matriz no sentido de dificultar o movimento das discordâncias apresentando-se como um obstáculo físico.

Evidentemente, quanto maior a quantidade da segunda fase de natureza mais dura que da matriz, maior é a dificuldade apresentada à deformação plástica; contudo, a forma das partículas da segunda fase e a distância entre elas pode, também, alterar substancialmente o comportamento do material na deformação plástica. Por exemplo, partículas achatadas apresentam-se como um obstáculo maior à movimentação de discordâncias do que partículas esferoidais (como ocorre nos casos dos aços onde uma estrutura de perlita lamelar constituída de camadas alternadas de ferrita e cementita "achatadas", apresenta-se com um comportamento menos dúctil do que uma estrutura de ferrita com partículas de cementita esferoidizada).

As partículas de segunda fase mais finamente divididas – o que ocasiona uma área superficial maior para a mesma quantidade de partículas – provocam um efeito de redução de plasticidade mais acentuada. Uma parte da discordância fica impedida de se locomover quando encontra uma partícula dura e a outra parte da discordância move-se, então contornando a partícula; essa mesma discordância, em sua movimentação, irá também encontrar outras partículas. Esse mecanismo ocorre também para outras discordâncias e, em decorrência, o seguinte fato surge: a elevação da tensão de cisalhamento necessária para provocar, ou dar continuidade à deformação plástica – ou seja – um efeito de encruamento e uma taxa de encruamento maiores. Como exemplo, pode-se citar o efeito de endurecimento provocado por precipitação de partículas, coerente com a estrutura da matriz, como ocorre no tratamento térmico de solubilização e precipitação de ligas alumínio-cobre; outro exemplo notável encontra-se na presença de partículas finas de carbonetos nas estruturas martensíticas por tratamento térmico de revenido, após a têmpera nos aços, descrito por Dieter (1961).

unesp

O sistema cristalino do ferro α é cúbico de corpo centrado e a maior resistência é na direção [100] e a menor na direção [111], ficando a direção [110] na posição intermediária. Então, a estampabilidade da chapa de aço é maior quando a textura apresentar preponderantemente cristais com a direção [111] perpendicular ao plano da chapa. Por outro lado, a formação de orelhas ocorre nas direções onde a resistência à deformação é mínima, que coincide com as direções [100].

A ordenação atômica citada é definida por Van Vlack (1984). A Textura da chapa de aço laminada a frio apresenta as componentes de direções: (100) [011], (112) [110], (100) [112] e (111) [110], porém a componente preponderante é a (100) [011]; então, essa chapa apresenta orelhas a 45º com a direção de laminação e baixa estampabilidade, se, entretanto, a componente dominante fosse (111) [112] o coeficiente **r** seria elevado (aproximadamente três) e o coeficiente ΔR próximo a zero.

A textura da chapa de aço laminada a frio e recozida para a recristalização apresenta-se de forma semelhante a anterior com a possível rotação de algumas direções preferenciais ao redor de + ou – 20º; a estampabilidade, em decorrência disso, não melhora (**r** permanece o mesmo) mas a intensidade de formação de orelhas diminui (ΔR diminui); porém, se o processo de recristalização conduzir a formação de texturas com componentes [111] e com redução das componentes [100], a estampabilidade aumenta.

Convém ainda mencionar o fato de que a textura formada depende de variáveis de processamento como temperatura final de laminação a quente, temperatura de bobinamento, intensidade de redução a frio, condições de lubrificação e ciclo de recozimento, e também das variáveis do material, ou seja, do teor de alumínio e nitrogênio, no caso dos aços, do teor de outros elementos de ligas presentes e do tamanho do grão, conforme Schaller (1959).

unesp

2.6 CONFORMAÇÃO A FRIO

O processo de conformação a frio de metais é um método fundamental para fabricação de uma grande gama de produtos. Formalmente, conformação a frio foi associada exclusivamente com a produção de componentes para a engenharia industrial, entretanto, o escopo de aplicação tem levado a incluir toda gama de produtos domésticos também.

Por definição, segundo Schaller (1959), a conformação a frio é o processo de formar folhas de metal ou chapas por meios mecânicos na temperatura ambiente. Fundamentalmente, dois aspectos são incluídos na conformação a frio: ou o metal é deformado além do seu limite elástico até o ponto de deformação permanente ou é trabalhado além do limite de resistência até o ponto onde a fratura ocorre.

Em qualquer caso, a conformação a frio somente é aplicável aqueles metais que sejam plásticos na temperatura ambiente.

A conformação a frio resulta em perda da ductilidade no metal devido ao encruamento. Em alguns trabalhos de conformação a frio, é necessário se introduzir uma operação de recozimento na seqüência da produção a fim de se restaurar plasticidade para seguir as operações de conformação.

A conformação a frio é aplicada principalmente para folhas de metal, uma vez que tal material leva bem consigo a altas taxas de produção. Entretanto, equipamentos de conformação a frio de maiores capacidades são utilizados na indústria, aumentando o escopo de componentes que podem ser produzidos, como mostrado nas Figuras 2.2 e 2.3.

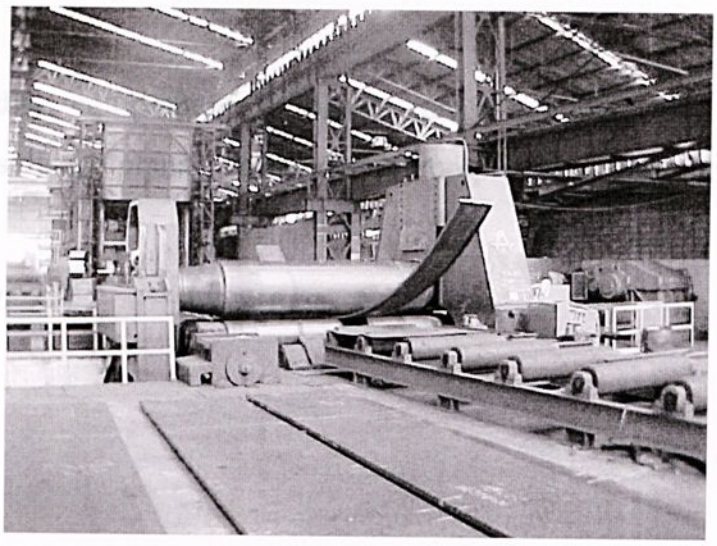


Figura 2.2 – Calandra Thyssen – capacidade: até 100 mm de espessura, a frio

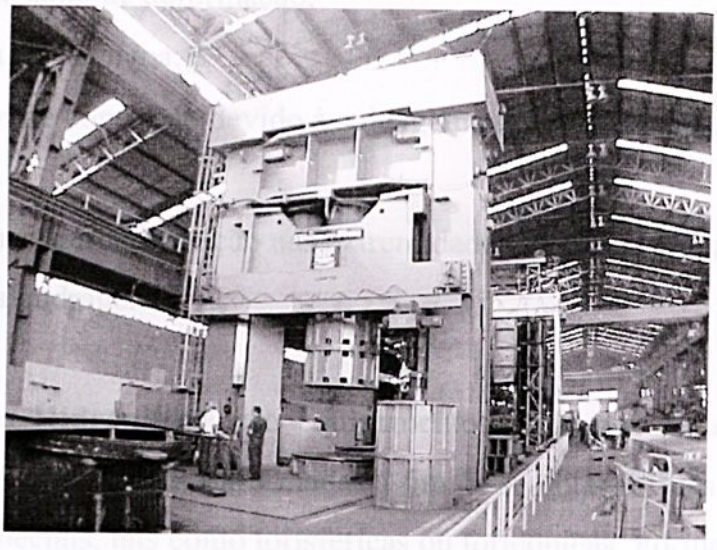


Figura 2.3 – Prensa S & P – capacidade: 6000 toneladas

(Fotografias cedidas pela Confab Industrial S.A.)

Definição de operações:

Calandra: equipamento utilizado para a fabricação de seções cilíndricas a partir de chapas de aço planas, contendo um comprimento definido pela fórmula:

$$l = (\pi \times D_m) - (k \times t) - f_s \qquad (5)$$

Onde:

- ✓ l é o comprimento da chapa plana;
- ✓ D_m é o diâmetro interno da seção cilíndrica mais a espessura da chapa;
- ✓ k é uma constante de deformação;
- ✓ t é a espessura da chapa; e
- ✓ fs é um fator de contração devido à soldagem para grandes espessuras.

É necessária uma pré-deformação nas extremidades da chapa plana, antes do início das operações de calandragem.

Prensas Hidráulicas: são equipamentos utilizados para a conformação de chapas de aço planas ou pré-conformadas a fim de se obter formas cilíndricas, cônicas, esféricas, ou especiais, tais como torisféricas ou toricônicas. Formatos mais complexos exigem o projeto de ferramentas especiais. Chapas dobradas fazem grande uso dessa ferramenta.

A Figura 2.4 ilustra a distribuição das tensões na prensagem.

Estes dois métodos são extremamente práticos e de baixo custo. Daí a sua grande aplicabilidade na indústria de equipamentos tais como vasos de pressão, condensadores, reatores e outros.

unesp

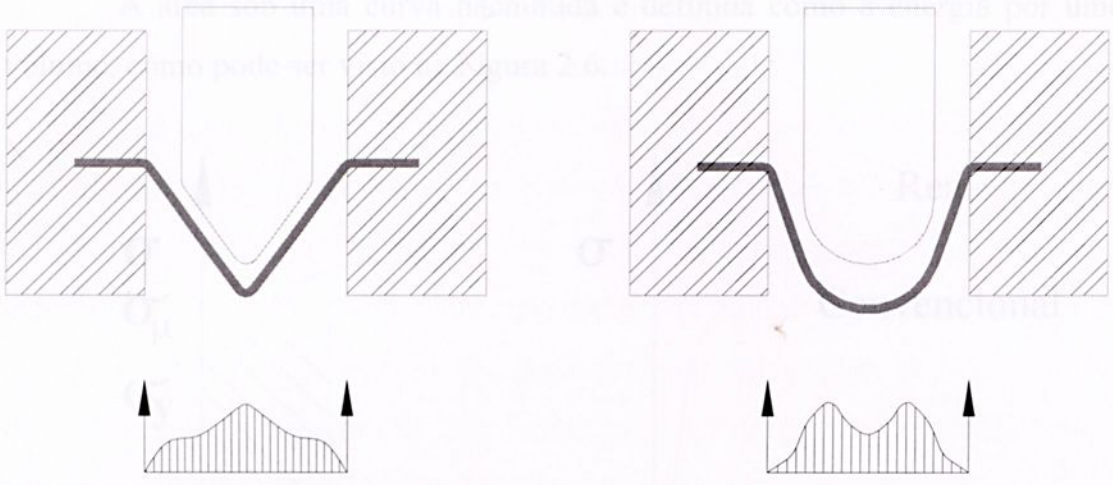


Figura 2.4 – Exemplo de distribuição da tensão durante as operações de conformação a frio:

A energia de deformação por unidade de volume durante a conformação pode ser determinada a partir da curva tensão-deformação real como mostrado na Figura 2.5.

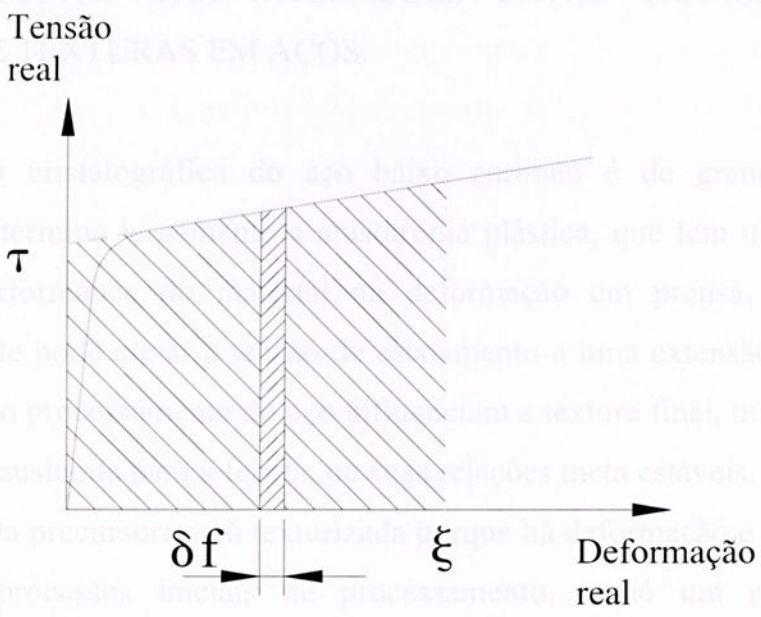


Figura 2.5 – Energia de deformação por unidade de volume durante a conformação.

A área sob uma curva hachurada é definida como a energia por unidade de volume, como pode ser visto na Figura 2.6.

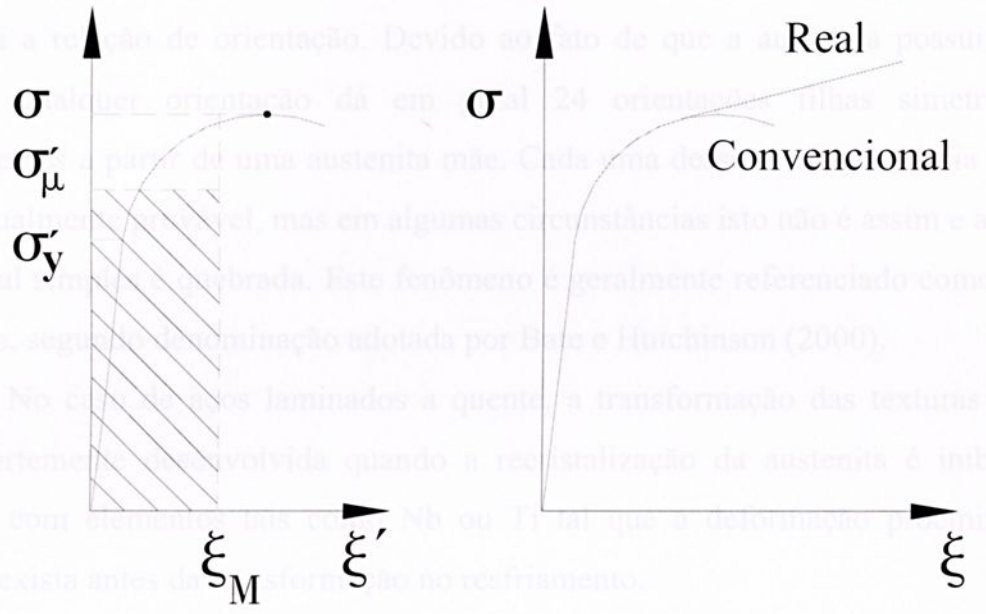


Figura 2.6 – Comparação entre a curva Tensão-Deformação convencional e real.

2.7 O EFEITO DAS INTERAÇÕES ENTRE TRANSFORMAÇÕES DISPLACIVAS E TEXTURAS EM AÇOS.

A textura cristalográfica do aço baixo carbono é de grande significado comercial. Ela determina largamente a anisotropia plástica, que tem uma importante influência na performance do material na deformação em prensa. Em produtos laminados a quente pode afetar a tensão de escoamento a uma extensão significativa. Muitos aspectos do processamento do aço influenciam a textura final, um dos quais é a transformação da austenita para a ferrita, ou suas relações meta estáveis.

A austenita precursora será texturizada porque há deformação e recristalização envolvidas nos processos iniciais de processamento, e há um relacionamento cristalográfico entre a orientação de um volume da austenita precursora (*mãe*) e a orientação da transformação do produto (*filha*).

Na ausência de fatores complicadores seria direto calcular a transformação da textura a partir da textura da austenita se a relação da orientação da transformação fosse conhecida. De fato seria igualmente direto determinar qual a textura da austenita tinha sido a partir da textura de transformação ou mesmo conhecendo ambas texturas, qual foi a relação de orientação. Devido ao fato de que a austenita possui simetria cúbica, qualquer orientação dá em geral 24 orientações filhas simetricamente equivalentes a partir de uma austenita mãe. Cada uma dessas variações seria esperada a ser igualmente provável, mas em algumas circunstâncias isto não é assim e a simetria do cristal simples é quebrada. Este fenômeno é geralmente referenciado como *seleção variante*, segundo denominação adotada por Bate e Hutchinson (2000).

No caso de aços laminados a quente, a transformação das texturas se torna mais fortemente desenvolvida quando a recristalização da austenita é inibida pela ligação com elementos tais como Nb ou Ti tal que a deformação proeminente da textura exista antes da transformação no resfriamento.

Por outro lado, quando a transformação envolve um mecanismo displacivo "militar" a textura final (de bainita ou martensita) é consideravelmente mais afiada, mostrando que certas variantes têm sido favorecidas sobre outras. Tal comportamento é reconhecido ou quando a transformação é controlada pela ligação para aumentar a endurecibilidade ou pelo uso de taxas de resfriamento mais rápidas. Tem sido mostrado que em um aço contendo produtos de transformação mistos, a fase bainita possui uma textura muito mais forte do que a ferrita poligonal.

Bate e Hutchinson (2000) mostraram que um critério mais justificável deve ser baseado na deformação do perfil total associado com fase de transformação que é completamente diferente a partir da deformação da bainita. Aquelas transformações displacivas podem ser influenciadas pelas tensões, confirmadas por Olsen, Jesser e Bhadeshia (1992).

Tais tensões não necessitam, entretanto, ser resultado de um processo de deformação anterior mas pode ser originado pela transformação em si, promovendo algumas variáveis e desfavorecendo outras. Bate, Ocejo e Gutierrez-solano (2000) sugeriram que a interação elástica entre as regiões de transformação é responsável pelo efeito da seleção variante.

unesp

Segundo Bannister et al. (2000), a razão de *tensão de escoamento (YS) / máxima tensão de tração (UTS)* (conhecido como a razão *Y/T*) é reconhecida como um fator de performance importante nas especificações de material, códigos de projeto e métodos de análise de integridade estrutural. Embora o parâmetro seja prontamente determinado a partir dos dados contidos dentro dos certificados de qualidade dos materiais, ele somente pode ser considerado um indicativo para a habilidade de um material para a deformação plástica e considerações devem ser feitas para outras características relacionadas. Historicamente, uma razão Y/T baixa tem sido considerada como providencial a uma alta capacidade de deformação plástica e, conseqüentemente, uma margem de segurança contra fratura. Na realidade, o significado da razão *Y/T* é mais complexo e deve ser considerada em combinação com a configuração estrutural, a espessura do componente, o comportamento de encruamento, a tenacidade à fratura e a resistência à fratura dúctil.

Limites a razão Y/T foram introduzidos a códigos de projeto baseados no comportamento de que aços de alta resistência, de *primeira geração*, e a noção que um valor alto de Y/T comparam-se a performance pobre de fratura, segundo Taylor (1997)

Aços modernos têm altos valores de alongamento e aumento de tenacidade para um determinado nível de resistência e razão Y/T e a preocupação inicial é de baixa relevância para estes aços. Aços modernos produzidos pelo processo de laminação controlada ou têmpera e revenimento geralmente possuem Y/T na razão entre 0,80 – 0,95 comparado a 0,65 – 0,75 para aços normalizados, conforme Defourny et al. (1998). Um alto Y/T é geralmente associado com uma baixa taxa de encruamento, *n*; a relação, entretanto, mostra considerável espalhamento.

Especificações de aço incluídos limites superiores para Y/T ou a razão entre o mínimo YS e UTS, ou, no caso de certos graus para plataformas marítimas e tubulação, como limites definidos especificamente. Limites atuais de códigos de projeto para Y/T variam entre 0,70 e 0,93, embora haja acordo geral que valores até 0,85 sejam satisfatórios para aplicações estruturais convencionais e valores até 0,95 para casos específicos. Entretanto, ainda não códigos de projeto e devem ser obtidos no contexto do nível de deformação aplicada e espessura.

unesp

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Origem do material

Os materiais utilizados neste trabalho foram produzidos pelas seguintes usinas:

Lukens Steel (E.U.A.)

Dillinger Hütte (Alemanha)

Usiminas (Brasil)

Foram doadas amostras à Universidade Estadual Paulista – UNESP, pela Confab Industrial S.A. São materiais produzidos normalmente em grande escala por diversas usinas de todo mundo e largamente utilizados na construção de vasos de pressão.

O estado de fornecimento foi em forma de chapas laminadas, em dimensões variadas, de onde foram extraídos todos os corpos-de-prova.

A Confab Industrial mantém um sistema informatizado que garante a rastreabilidade dos produtos laminados em seu estoque, através de Códigos de Inspeção alfanuméricos. Para tanto, definiremos cada material utilizado neste trabalho, suas respectivas propriedades e dados, por códigos, conforme Tabela 3.1.



Tabela 3.1 – Identificação dos materiais através dos Códigos de Inspeção.

Identificação	Material	Usina	Espessura
PQ101	A-387-Gr.11-Cl.1	Dillinger Hütte	60,3 mm
PD614	A-387-Gr.11-Cl.1	Lukens Steel	25,4 mm
PR346	A-516-70	Usiminas	25,0 mm
PN972	A-516-70	Usiminas	16,0 mm

3.1.2 Composição química

A análise química dos materiais, foi obtida dos próprios certificados fornecidos pelas usinas siderúrgicas, uma vez que é garantida a origem e a rastreabilidade dos materiais pela empresa que os adquiriu, ou seja, a Confab Industrial.

Tabela 3.2 – Composição química dos materiais utilizados. – % em massa (Análise de corrida)

Código	Material	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb
PQ101	A-387-Gr.11-Cl.1	0,115	0,57	0,014	0,001	0,542	0,013	0,042	1,18	0,5	0,001
PD614	A-387-Gr.11-Cl.1	0,14	0,45	0,006	0,007	0,55	0,14	0,13	1,36	0,54	0,002
PR346	A-516-70	0,21	1,16	0,018	0,009	0,28	0,01	0,02	0,03	0,02	0,019
PN972	A-516-70	0,22	1,02	0,023	0,007	0,21	0,01	0,16	0,17	-	0,02

3.1.3 Estado de fornecimento

O estado de fornecimento de um material pode ser especificado em função das necessidades da aplicação final, porém deve estar em conformidade com as características estabelecidas pelas respectivas normas, de tal forma que se possam ser garantidas as propriedades mecânicas finais desejadas.

No caso dos materiais estudados, não foram impostas às usinas siderúrgicas condições especiais ou específicas de fabricação ou tratamento térmico. As amostras fornecidas foram produzidas nas seguintes condições:

unesp

Tabela 3.3 – Estado de fornecimento dos materiais.

Código	Material	Normalização ao ar	Revenimento ao ar
PQ101	A-387-Gr.11-Cl.1	950 °C / 30 min.	730 °C / 30 min.
PD614	A-387-Gr.11-Cl.1	899 °C / 31 min.	682 °C / 68 min.
PR346	A-516-70	-	-
PN972	A-516-70	900 °C / 10 min.	-

3.2 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS PARA TESTES MECÂNICOS

Cada chapa foi cortada, para obtenção dos corpos-de-prova, na Confab Industrial, conforme mostra o lay-out na figura 3.1. Os corpos-de-prova foram secionados através de oxi-corte a gás (argônio e oxigênio), como pode ser visto na figura 3.2.

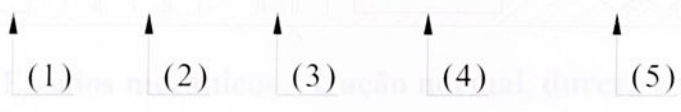


Figura 3.1 – *Lay-Out* típico para corte dos corpos-de-prova (esquemático).

Sendo:

(1) Um corpo de prova para ensaios de dureza, metalográfico e tração normal, direção transversal à laminação.

(2) Quatro corpos-de-prova para ensaio de dobramento, direção transversal à laminação.

(3) Três corpos-de-prova para ensaio de anisotropia, direção transversal à laminação (90°).

(4) Três corpos-de-prova para ensaio de anisotropia, direção longitudinal a laminação (0º).

(5) Três corpos-de-prova para ensaio de anisotropia, direção oblíqua à laminação (45º).

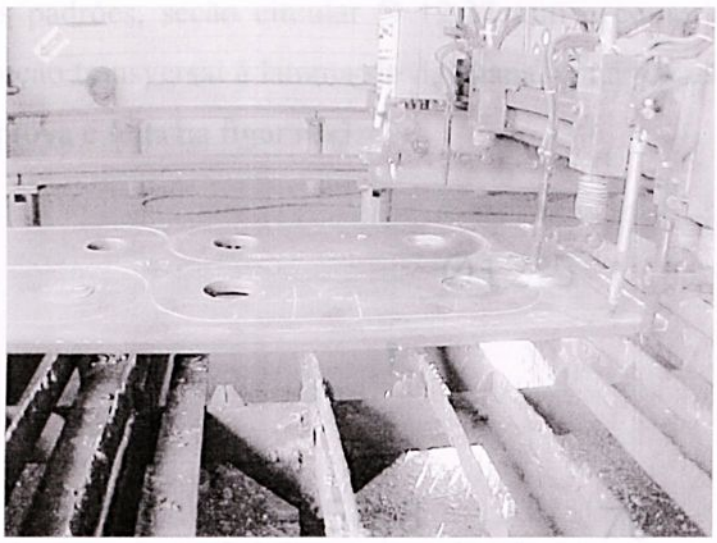


Figura 3.2 – Máquina de oxi-corte

3.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA PARA TESTES MECÂNICOS.

3.3.1 Ensaios mecânicos – tração normal, dureza e metalografia.

A preparação dos corpos-de-prova, para serem utilizados nos ensaios de tração normal, dureza e metalográficos foi realizada no laboratório da Confab Tubos, em Pindamonhangaba, SP.

3.3.1.1 Ensaios de tração.

Os corpos-de-prova para os ensaios de tração foram usinados e ensaiados no laboratório da Confab Tubos, de acordo com as normas ASTM A-370/97a e ASTM E8/95a, que regem sobre as dimensões dos corpos-de-prova e a realização de ensaio de

tração para materiais metálicos em temperatura ambiente. O equipamento utilizado foi uma máquina de tração EMIC, servohidráulica com célula de carga com capacidade de 100 kN. A velocidade do deslocamento do cabeçote foi de 0,5 mm/min, com aquisição de pontos – carga e deformação – em intervalos de dois segundos.

Os corpos-de-prova das chapas PR346, PD614 e PN972 foram confeccionados com dimensões padrões, seção circular Ø 12,27 mm e comprimento de 50,8 mm, retirados na direção transversal à laminação da chapa. Uma representação esquemática dos corpos-de-prova é feita na figura 3.3.

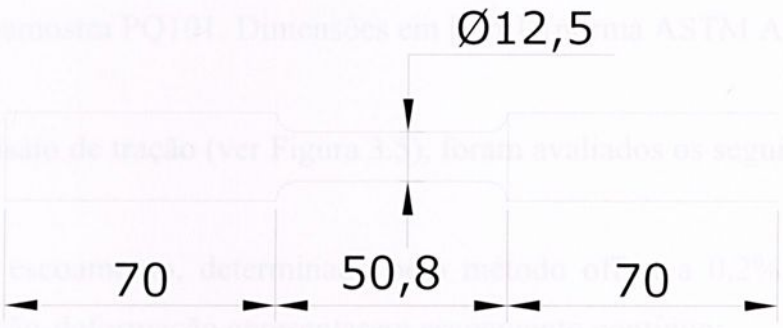


Figura 3.3 Representação dos corpos-de-prova utilizados para o ensaio de tração das amostras PR346, PD614 e PN972. Dimensões em [mm]. (norma ASTM A-370).

Para a chapa PQ101, o corpo de prova foi confeccionado com dimensões padrões, seção prismática e comprimento de 50,8 mm, retirado na direção transversal à laminação da chapa. Uma representação esquemática do corpo de prova é feita na Figura 3.4.

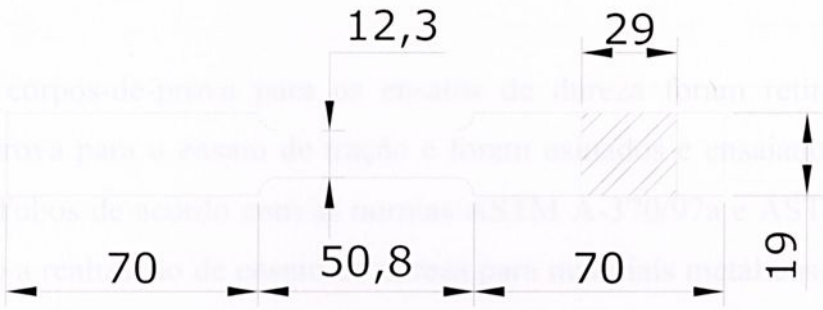


Figura 3.4 – Representação do corpo de prova utilizado para o ensaio de tração da amostra PQ101. Dimensões em [mm]. (norma ASTM A-370).

No ensaio de tração (ver Figura 3.5), foram avaliados os seguintes parâmetros:

- ✓ Limite de escoamento, determinado pelo método offset a 0,2%, em função das curvas tensão-deformação apresentarem escoamento contínuo;
- ✓ Resistência à tração, calculada através do carregamento máximo aplicado durante o ensaio dividido pela área inicial do corpo de prova; e
- ✓ Alongamento, calculado através da variação percentual no comprimento da seção reduzida dos corpos-de-prova, após o rompimento.

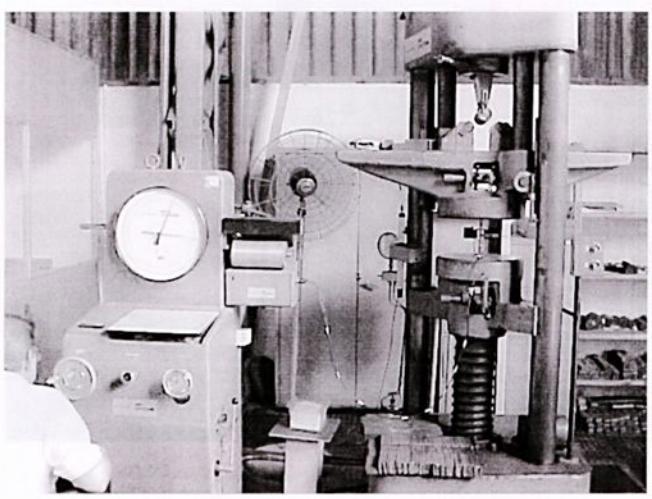


Figura 3.5 – Máquina de ensaio de tração do laboratório de ensaios da Confab Industrial

3.3.1.2 Ensaios de dureza.

Os corpos-de-prova para os ensaios de dureza foram retirados anexo aos corpos-de-prova para o ensaio de tração e foram usinados e ensaiados no laboratório da Confab Tubos de acordo com as normas ASTM A-370/97a e ASTM E10/95a, que regem sobre a realização de ensaio de dureza para materiais metálicos. O equipamento utilizado foi uma máquina de dureza Vickers, escala HV10 (Figura 3.7).

As medições foram realizadas em cinco pontos sobre uma linha reta. Uma representação esquemática desses pontos é feita na Figura 3.6.

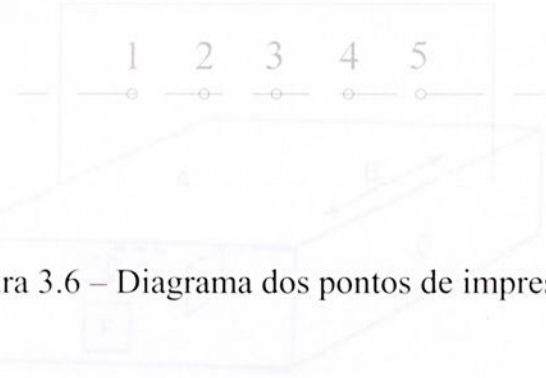


Figura 3.6 – Diagrama dos pontos de impressão.

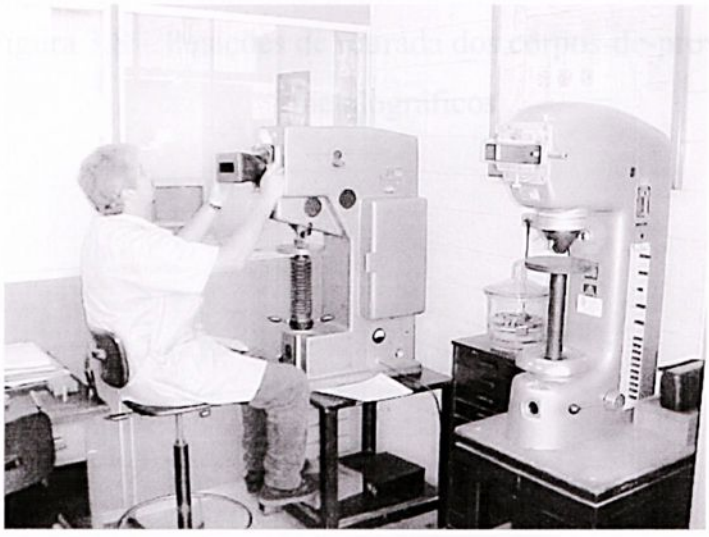


Figura 3.7 – Máquinas de ensaio de dureza

3.3.1.3 Ensaios metalográficos.

As amostras para os ensaios metalográficos foram retirados anexos aos corpos-de-prova para o ensaio de tração e foram usinados no laboratório da Confab Tubos de acordo com a norma ASTM E3/80 que rege sobre o esquema de retirada de amostras para ensaios metalográficos. As amostras utilizadas na microscopia óptica foram extraídas em três diferentes posições relativas as fibras do material laminado, ou sejam, "D", "E" e "F", onde "D" pode ser definida como a direção longitudinal à laminação, paralela à superfície; "E" pode ser definida como a direção longitudinal à laminação, perpendicular à superfície e "F" pode ser definida como a direção transversal à laminação, perpendicular à superfície. Uma representação esquemática é feita na Figura 3.8.

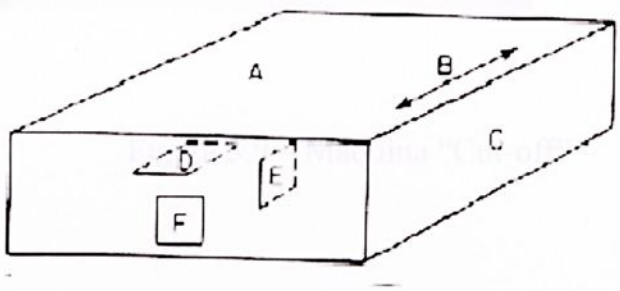


Figura 3.8 – Posições de retirada dos corpos-de-prova para ensaios metalográficos

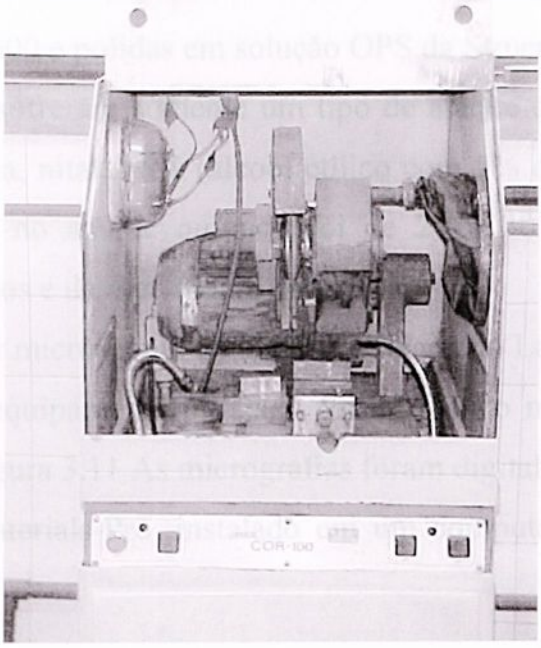


Figura 3.9 – Máquina "Cut-off"



Figura 3.10 – Máquina politriz

Os equipamentos utilizados na preparação (seccionamento e polimento) foram uma máquina "cut-off" e uma politriz com disco rotativo, como pode ser visto nas Figuras 3.9 e 3.10. As amostras foram lixadas em uma seqüência granulométrica de 100, 200, 320, 400 e 600 e polidas em solução OPS da Struers.

As amostras sofreram somente um tipo de ataque químico para revelação da microestrutura, ou seja, nital a 5% (álcool etílico com 5% de ácido nítrico). O tempo de imersão utilizado no ataque químico foi de 20 a 30 segundos, objetivando a revelação dos contornos e da morfologia dos grãos.

A análise por microscopia óptica foi realizada no Laboratório de Metalografia da FEG/UNESP. O equipamento utilizado foi um banco metalográfico Neophot 21, como mostrado na Figura 3.11 As micrografias foram digitalizadas através do software Image Pró-Plus e Materials-Pro, instalado em um computador interligado ao banco metalográfico.

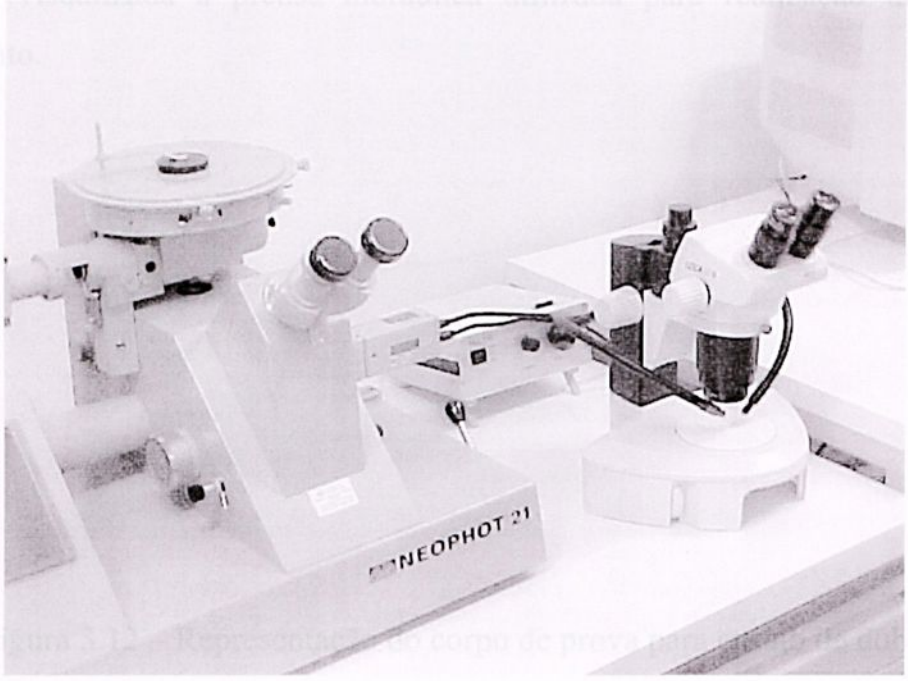


Figura 3.11 – Banco metalográfico

3.3.2 Ensaio de dobramento

Para preparação dos corpos-de-prova do ensaio de dobramento, os corpos-de-prova tiveram suas bordas rebarbadas e os cantos arredondados até 5mm de raio, conforme previsto nas normas ASTM A-20 e A-370-97a, que regem este tipo de ensaio. Uma representação esquemática é feita na Figura 3.12.

O critério adotado para definição dos raios de dobra foi o seguinte:

- ✓ Raio inicial = Tabela X4.2 da norma ASTM A-20;
- ✓ Raio 2 = 90% do raio inicial;
- ✓ Raio 3 = 50% do raio inicial; e
- ✓ Raio 4 = dependendo do comportamento das dobras anteriores, o raio 4 poderia ser adotado como 2/3 do raio inicial ou então de acordo com a disponibilidade de ferramental.

O ângulo de dobramento foi de 180º para todos os corpos-de-prova.

Uma representação do ensaio é feita através das Figuras 3.13 e 3.14, onde pode ser visualizada a prensa hidráulica utilizada para realização do ensaio de dobramento.

Figura 3.12 – Representação do corpo de prova para ensaio de dobramento.
Dimensões padrões: t x 65 x L [mm], onde:
t = espessura da chapa

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

L = comprimento em função do raio de dobra

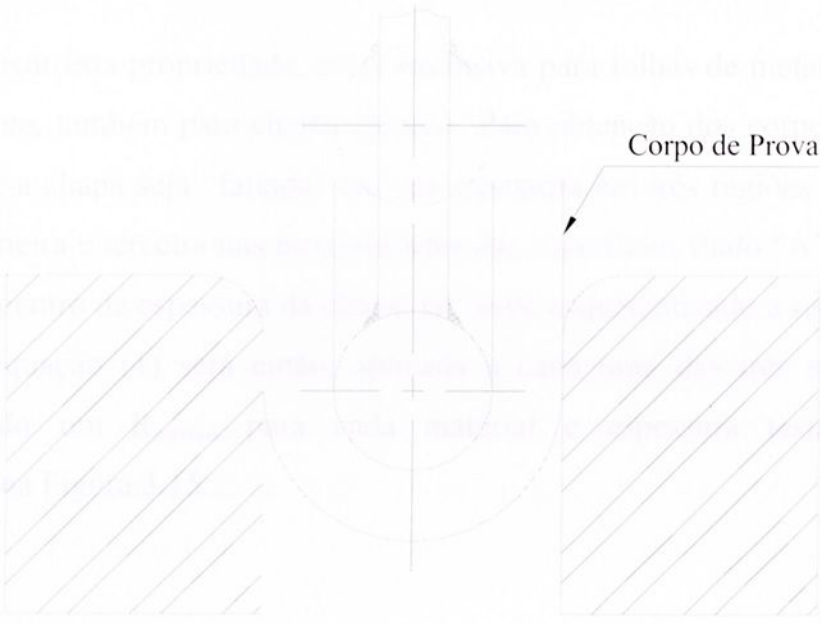


Figura 3.13 – Representação do ensaio de dobramento.

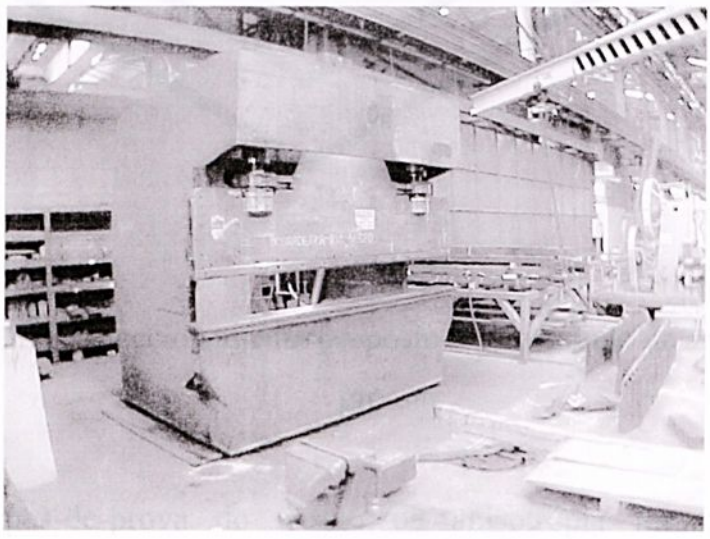


Figura 3.14 – Prensa hidráulica utilizada para o ensaio de dobramento.

3.3.3 Ensaio de anisotropia.

Aplicar esta propriedade, antes exclusiva para folhas de metal, faz parte deste trabalho agora, também para chapas grossas. Para obtenção dos corpos-de-prova, será adotado que a chapa seja "fatiada" em sua espessura em três regiões (subespessuras), sendo a primeira e terceira nas proximidades das superfícies (lado "A" e lado "B") e a segunda no centro da espessura da chapa, tal como esquematizado a seguir:

A equação (1) será então, aplicada a cada uma das três subespessuras t´, integralizando um $R_{médio}$, para cada material e espessura testados, conforme visualizado na Figura 3.15.

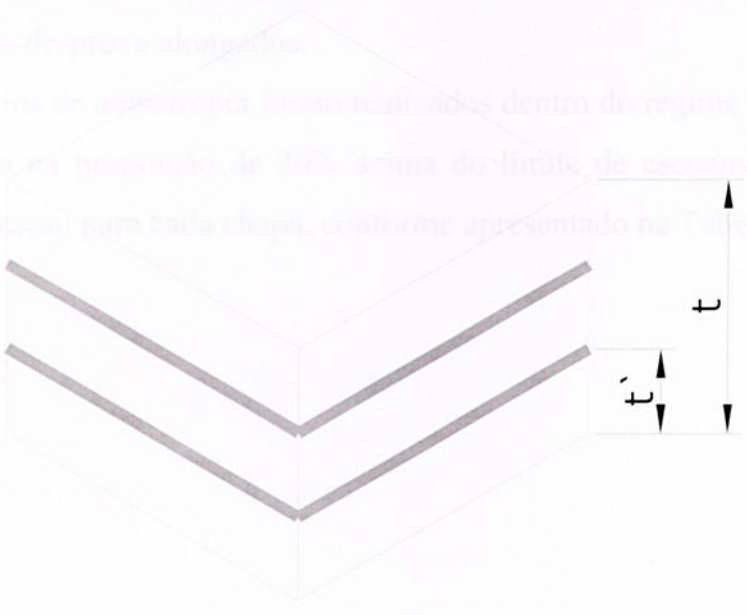


Figura 3.15 – Seccionamento proposto para o estudo de anisotropia em chapas grossas

Os corpos-de-prova do ensaio de anisotropia foram enviados para o Laboratório de Usinagem do DMT – Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP. Os corpos-de-prova foram usinados de acordo com a norma ASTM E8/95a e E-517/98, com dimensões reduzidas (tipo subsize), seção retangular,

retirados em três ângulos – 0º, 45º e 90º com relação à direção de laminação. O comprimento útil (seção reduzida) utilizado foi de 25 mm.

O ensaio para determinação do coeficiente de anisotropia, ou coeficiente de deformação plástica, foi realizado de acordo com a norma ASTM E-517/98, no laboratório de ensaios mecânicos da FEG/UNESP. O equipamento utilizado foi uma máquina EMIC MEM10000 (Figura 3.16), eletro-mecânica, equipada com célula de carga com capacidade de 10 kN e a uma velocidade de 0,5 mm/min.

Buscando maior exatidão no cálculo do alongamento, foi utilizado um projetor de perfis Carlzeiss-Jena MP320 para medição do comprimento final da região útil dos corpos-de-prova após a aplicação da carga. O equipamento, do laboratório de Metrologia da FEG/UNESP, tem como principais características iluminação episcópica e precisão de leitura milesimal. Um aumento de vinte vezes foi aplicado no perfil dos corpos-de-prova alongados.

Os ensaios de anisotropia foram realizados dentro do regime plástico, sendo as cargas de tração na proporção de 20% acima do limite de escoamento determinado pelo ensaio de tração para cada chapa, conforme apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Cargas de tração utilizadas no ensaio de anisotropia

Dados do material	Corpos-de-prova				Ensaio	
Material Espessura Código da chapa	Identificação	Orientação	Localização	Área [mm^2]	L.E. [MPa]	Carga [N]
A-516-70N 16 mm PN972	TA-1	0º	Face sup.	18,607	355	82,4
			Metade	18,562		82,2
			Face inferior	18,724		82,9
	TA-2	90º	Face sup.	18,766		83,1
			Metade	18,843		83,5
			Face inferior	19,170		84,9
	TA-3	45º	Face sup.	18,676		82,7
			Metade	19,183		85,0
			Face inferior	18,721		82,9
A-516-70 25 mm PR346	TA-1	0º	Face sup.	18,130	346	78,3
			Metade	18,206		78,3
			Face inferior	18,112		78,2
	TA-2	90º	Face sup.	18,249		78,8
			Metade	18,082		78,1
			Face inferior	17,976		77,6
	TA-3	45º	Face sup.	18,270		78,9
			Metade	18,306		79,0
			Face inferior	17,742		76,6
A-387-GR.11-CL.1 25,4 mm PD614	TA-1	0º	Face sup.	18,236	339	77,1
			Metade	17,881		75,6
			Face inferior	17,679		74,8
	TA-2	90º	Face sup.	18,229		77,1
			Metade	17,611		74,5
			Face inferior	17,837		75,5
	TA-3	45º	Face sup.	18,225		77,1
			Metade	18,367		77,7
			Face inferior	18,473		78,1
A-387-GR.11-CL.1 60,3 mm PQ101	TA-1	0º	Face sup.	19,488	300	73,0
			Metade	18,936		70,9
			Face inferior	19,606		73,4
	TA-2	90º	Face sup.	18,884		70,7
			Metade	19,278		72,2
			Face inferior	19,031		71,2
	TA-3	45º	Face sup.	18,641		69,8
			Metade	18,684		69,9
			Face inferior	19,021		71,2





Figura 3.16 Máquina de ensaio de tração EMIC do LEM-FEG/UNESP

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão abordados e discutidos os resultados obtidos referentes à microestrutura e às propriedades mecânicas. Será realizada uma avaliação individual desses dois tópicos, bem como uma análise conjunta dos mesmos, enfatizando sempre a importância e a influência dos resultados obtidos com relação aos fatos observados na vida cotidiana de uma fábrica, principalmente as que fazem uso da conformação mecânica, como uma de suas principais operações de transformação da matéria prima para se chegar ao produto final.

A caracterização microestrutural, embora de fundamental importância, terá uma abordagem principalmente qualitativa em relação às características estruturais dos aços utilizados para a construção dos equipamentos de caldeiraria.

Serão amplamente discutidas as propriedades mecânicas, que fazem dos aços utilizados neste trabalho, os mais indicados na seleção pelos códigos de projetos, fabricação e inspeção. Esta caracterização será apresentada por intermédio dos resultados de testes convencionais estabelecidos nas normas relacionadas a estes aços, como por exemplo os ensaios de tração convencional e de dobramento, e através de ensaios não especificados pela norma ASTM para os aços utilizados neste trabalho, como por exemplo o ensaio de dureza pelo método Vickers e o ensaio para determinação do coeficiente de anisotropia. Estes dois últimos ensaios foram realizados objetivando estabelecer referência e correlação com as propriedades determinadas por meio dos testes convencionais e da análise microestrutural.

Após esta investigação, utilizando-se das propriedades mecânicas (especificadas e não especificadas), serão qualificados os parâmetros de conformação a frio de chapas de aço.

Finalmente, será fornecida uma base científica para a eficiência destes parâmetros, e será sugerido novos estudos desse mesmo tema, como serão elencados nas "Sugestões para Próximos Trabalhos" (Item 5.2).

unesp

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO

A principal finalidade desse ensaio foi a de analisar e comparar os respectivos valores do limite de escoamento, da resistência à tração, do alongamento e da relação LE/RT com aqueles mencionados nos certificados de qualidade das usinas siderúrgicas produtoras das chapas.

Com base nos valores obtidos nos ensaios de tração, foi possível verificar que os mesmos apresentaram relativa coerência, tendo sido observado apenas um desvio no limite de resistência da chapa PQ101, com relação ao valor especificado pela norma. Todos os valores obtidos estão relacionados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos nos ensaios de tração convencional

Código de inspeção	Área Inicial	Cargas		Comprimentos		Resultados			
		LE	RT	Inicial	Final	$LE_{0,2\%}$	RT	LE/RT	Al
	mm^2	N	N	mm	mm	MPa	MPa	%	%
PQ101	359,14	1121,8	1798,2	50,8	73,3	300	481	62	44,3
PR346	119,60	430,0	683,6	50,8	66,9	346	550	63	31,7
PD614	118,82	419,2	673,2	50,8	65,5	339	545	62	28,9
PN972	115,94	428,0	644,6	50,8	66,4	355	535	66	30,7

O valor mínimo especificado para o limite de resistência à tração, pela norma ASTM A-516-70, é de 485 MPa. O valor encontrado para a chapa PQ101, ou seja 481 MPa, não interfere neste estudo devido ao fato que este não tem o caráter de especificar o aço para um determinado uso ou aplicação real. Além disso, de acordo com a norma ASTM A-20, poderia ser realizado um novo teste, se fosse o caso de um material a ser utilizado na construção de partes pressurizadas de um equipamento. Nessa circunstância, se confirmado um valor abaixo do especificado, caberia ao projetista verificar o cálculo da espessura real do componente em função da atual resistência mecânica da chapa. Além disso, conforme o parágrafo X2.4 da norma

como uma função de requisitos especificados; um desvio padrão igual a aproximadamente 3 % da resistência à tração, 5% do limite de escoamento, e três unidades percentuais do alongamento especificado.

Os valores de alongamento observados, conferem às chapas uma característica de boa ductilidade, suficiente com a necessidade de uma material que tem a necessidade de ser conformado mecanicamente a frio. Além disso, os baixos valores da razão LE/RT confirmam a hipótese de Bannister, Ocejo e Gutierrez-solano (2000), que consideram essa baixa relação como providencial para uma alta capacidade de deformação plástica e, conseqüentemente, uma margem de segurança contra fratura do material. Esse fato será evidenciado nas discussões dos ensaios de dobramento.

4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA

Neste item, serão apresentados os resultados microestruturais, realizados através de um estudo qualitativo e quantitativo, para os aços ASTM A-516-70 e ASTM A-387-GR.11-CL.1.

Devido à importância comercial de materiais ferrosos, um grande esforço de trabalho tem sido feito para correlacionar as suas propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração convencional, com a microestrutura. É evidente que a microestrutura é a variável metalúrgica chefe que controla as propriedades de tração dos aços. Devido à grande variedade de tipos de morfologia de microestruturas, que são possíveis com mudanças na composição química e no processamento térmico ou mecânico dos aços, este é um assunto que torna-se muito interessante, embora extremamente complexo.

As propriedades de tração dos aços recozidas e normalizadas são controladas pelas características da orientação e forma da ferrita e pela quantidade, forma e distribuição da perlita.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

4.2.1 Análise qualitativa

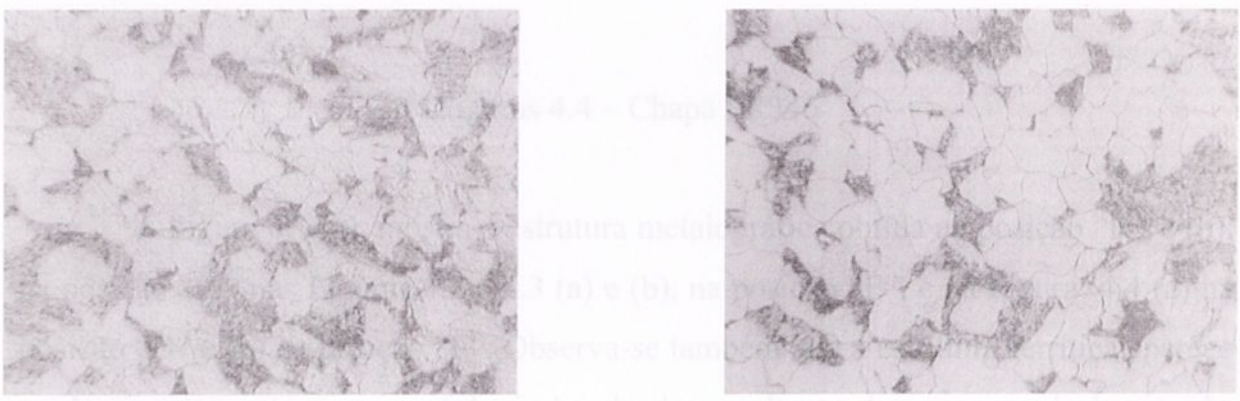
A análise qualitativa refere-se especificamente a identificação das fases presentes através do reagente químico Nital, em temperatura ambiente.

Nesta análise, sob um aumento de 150 X, foram reveladas as seguintes fases: a ferrítica e a perlítica, bastante comuns nestes tipos de aços. Pode-se observar que a coloração cinzenta representa o microconstituinte perlita e coloração branca representa a fase ferrítica. Algumas destas imagens podem ser visualizadas nas Figuras 4.1 a 4.4:



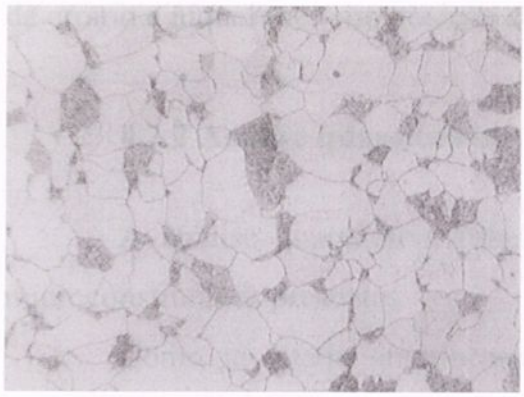
(a) (b)

Figuras 4.1 – Chapa PN972

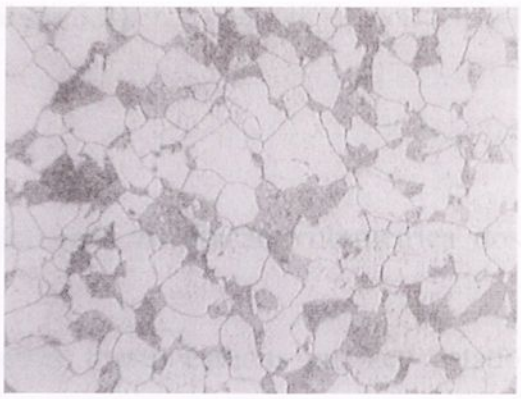


(a) (b)

Figuras 4.2 – Chapa PD614



(a)

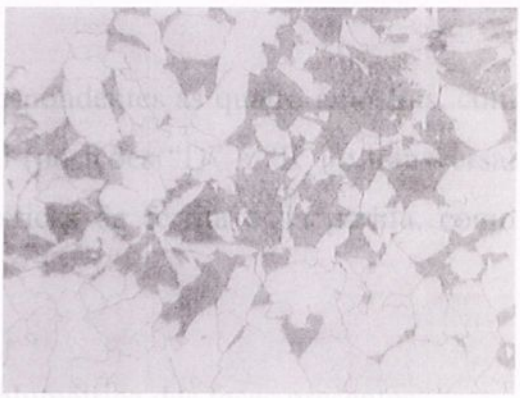


(b)

Figuras 4.3 – Chapa PQ101



(a)



(b)

Figuras 4.4 – Chapa PR346

A Figura 4.1 (a), mostra a estrutura metalográfica obtida na posição "F", e (b), na posição "E"; nas Figuras 4.2 e 4.3 (a) e (b), na posição "F", e na Figura 4.4 (a) na posição "D" e (b) na posição "F". Observa-se também que a estrutura ferrítica aparece predominantemente com morfologia bandeada, resultante do processo de laminação realizado durante a fabricação do aço. O tamanho de grão ferrítico, medido na posição "F", tem uma média de ASTM 9 para todas as chapas.

Pode ser visto ainda que, há uma pequena diferença entre as estruturas entre as chapas PN972 e PR346, e as chapas PD614 e PQ101, pois estas últimas foram tratadas

termicamente por normalização e revenimento, além de possuírem baixas quantidades de cromo e níquel (ver composição química na Tabela 3.2).

4.2.2 Análise quantitativa

A análise quantitativa refere-se à determinação da fração volumétrica dos microconstituintes presentes.

Como já citado anteriormente, as amostras foram estudas em seu estado original de fornecimento, ou seja, nenhum processamento térmico foi executado. Obviamente, foram tomadas todas as precauções para evitar um aquecimento significativo do material decorrente do processamento para obtenção das amostras, como por exemplo no seccionamento do aço, para que este não alterasse as características originais.

Após o processamento das imagens, correspondentes às quatro amostras, com fotomicrografias extraídas no sentido longitudinal (posições "D" e "E") e transversal (posição "F"), foram obtidas as frações volumétricas da ferrita e da perlita, como mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Microscopia óptica – fração volumétrica das fases presentes

Análise Estatística – fração volumétrica		
Código de Inspeção	Perlita [%]	Ferrita [%]
PN972	36,2 ±1,8	63,8 ±2,5
PD614	34,1 ±1,7	65,9 ±2,5
PQ101	32,0 ±1,7	68,0 ±2,6
PR346	31,5 ±1,6	68,5 ±2,6

4.3 ENSAIO DE DUREZA

As amostras utilizadas na medição de dureza foram extraídas de cada uma das quatro chapas selecionadas, em extensão àquelas utilizadas para o teste de tração.

Conforme já abordado, esse ensaio não é normalmente especificado para chapas em aço carbono ou baixa liga, que são as utilizadas nesse estudo. Assim, os valores de dureza obtidos foram utilizados para fornecer uma referência adicional ao ensaio de tração, como base para justificar a utilização de um raio de dobra maior ou menor, de acordo com as circunstâncias subseqüentes aos primeiros valores de raio de dobra, que são os especificados por norma.

Os valores aqui encontrados possibilitam verificar que os valores médios de dureza são diretamente proporcionais aos resultados do limite de escoamento e de resistência à tração e inversamente proporcionais aos valores de alongamento obtidos por intermédio do ensaio de tração convencional, comprovando o que na prática é verificado cotidianamente, de forma empírica, nas oficinas de caldeiraria. Estes resultados podem ser visualizados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados obtidos através do ensaio de dureza Vickers

ENSAIO DE DUREZA VICKERS Escala HV10						
Identificação	1	2	3	4	5	Média
PQ101	135	140	138	134	141	137,6
PR346	168	162	166	171	168	167,0
PD614	155	162	155	160	169	160,2
PN972	150	151	154	154	154	152,6

4.4 ENSAIOS DE DOBRAMENTO

Apesar de serem essencialmente qualitativos, os ensaios de dobramento foram importantes para verificação das taxas de redução de espessura, além de demonstrar a capacidade das amostras em suportar dobramentos iguais e mais severos que aqueles especificados. Os valores obtidos podem ser encontrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Taxas de redução de espessura nos ensaios de dobramento

ENSAIO DE DOBRAMENTO						
Identificação	Espessura nominal [mm]	Raio de dobra [mm]	Taxa de deformação [%]	Espessura real [mm]		Taxa de redução da espessura [%]
				e1	e2	
PQ101	60,0					
PR346	25,0	56	18,25	24,9	23,8	4,62
		50	20	26,0	25,2	3,17
		28	30,86	26,2	25,4	3,15
		12,5	50	25,9	25,5	1,57
PD614	25,4	56	18,49	26,5	25,3	4,74
		50	20,26	26,2	25,7	1,95
		28	31,2	26,5	25,0	6,00
		18	41,37	26,3	25,8	1,94
PN972	16,0	36	18,18	16,9	16,3	3,68
		32	20,0	16,7	16,0	4,38
		18	30,77	16,9	16,7	1,20

Observação: devido a indisponibilidade da prensa de capacidade 6000 t existente na Confab Industrial, não foi possível executar o teste de dobramento para as amostras da chapa PQ101.

A determinação da carga mínima necessária para realização da dobra, foi feita através de cálculo utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\sigma_p = \frac{1{,}5.P.L}{b.h^2} \tag{6}$$

Onde:

σ_p é a resistência à tração em kgf/mm^2;

P é a carga de aplicação em kgf;

L é a distância entre apoios em mm;

b é a largura do corpo de prova em mm; e

h é a espessura do corpo de prova em mm;

Analisando os valores das taxas de deformação e de redução da espessura, temos alguns fatos a considerar, que são os seguintes:

a) Com relação às taxas de deformação, e ciente que nenhuma amostra foi reprovada no teste, percebe-se que os raios especificados a norma ASTM A-20 não representam uma exigência rigorosa para estes materiais, ou seja, estes apresentaram um desempenho muito acima daquilo que se esperava, ou seja, não apresentaram nenhuma trinca ou fissura;

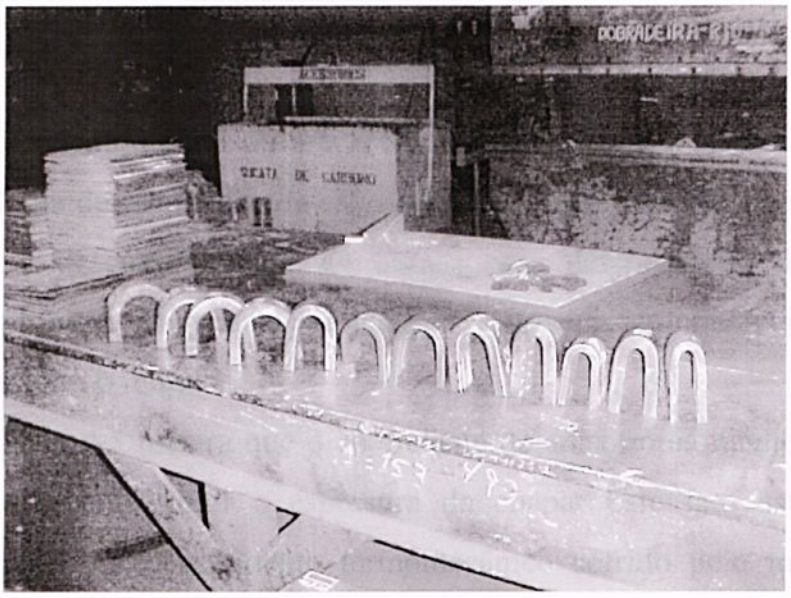
b) Os valores médios de redução da espessura encontram-se dentro de uma faixa esperada, ou seja, de 1 a 3 mm, e são normalmente previstos pelos projetistas e técnicos de métodos e processos;

c) Deve-se considerar que a exigência dos ensaios é relativamente mais atenuada do que aquela verificada na prática, pois a largura dos corpos-de-prova é muito menor do que a maioria das peças reais, embora conformadas com raios bem maiores;

d) A norma ASTM A-20, parágrafo X4.4, sugere que os componentes sejam conformados tais que a linha de dobra seja perpendicular à direção de laminação final. No caso desse estudo, a linha de dobra dos corpos-de-prova foi paralela à direção de laminação, numa condição de exigência máxima do material para o ensaio. Nessas condições, a referida norma sugere ainda, que os raios sejam mais generosos do que os especificados, na ordem de 1,5 vezes aos especificados.

Nas fotografias da Figura 4.5 podem ser visualizadas as amostras após o ensaio de dobramento. Segundo a norma ASTM A-20, o método de inspeção dos corpos-de-prova consiste em se observar, a olho nu, a região externa da dobra para detectar-se possíveis falhas, podendo ser: trincas, fissuras, rasgos ou rupturas. Assim, não são aplicáveis ensaios não destrutivos para essa inspeção.

unesp



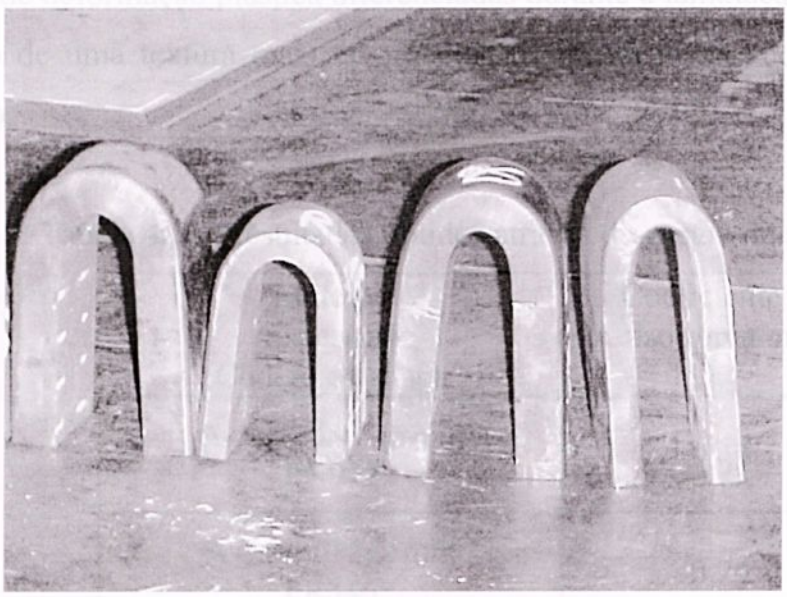


Figura 4.5 – Corpos-de-prova após o ensaio de dobramento

4.5 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ANISOTROPIA MÉDIO

O coeficiente de anisotropia médio ou valor de r_m é sem dúvida o parâmetro mais utilizado na determinação da estampabilidade dos materiais, em especial na área de pesquisa e desenvolvimento. O ensaio para determinação do coeficiente de anisotropia propicia a geração de dados facilmente comparáveis com trabalhos realizados em todo o mundo.

A Tabela 4.5 mostra que o coeficiente de anisotropia médio ou valor de r_m é mais elevado quanto maior a espessura da chapa. Este fato está provavelmente relacionado com o processamento termomecânico sofrido pelo material durante o processo de fabricação do aço. Os materiais com maior espessura sofreram quantidades de deformação plástica diferenciadas durante a laminação, o que acarretou na formação de uma textura mais favorável para aplicação do aço em operação de conformação.

Tabela 4.5 – Resultados obtidos através do ensaio de anisotropia

Material Espessura Código da chapa	Coeficiente de Anisotropia médio r_m
A-516-70N / 16 mm PN972	0,49
A-516-70 / 25mm PR346	0,76
A-387-GR.11-CL.1 / 25,4 mm PD614	0,72
A-387-GR.11-CL.1 / 60,3 mm PQ101	0,99

Além disso, o aumento no coeficiente r_m em função da espessura do material, demonstra que o aço A387-GR.11-CL.1 (60,3 mm) possa ter uma melhor

aplicabilidade quando, no processo de fabricação do componente, existirem esforços relativos a operação de estampagem.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

5.1 CONCLUSÕES.

Face aos temas discutidos e aos resultados obtidos referentes às propriedades mecânicas, quantitativamente e qualitativamente, pode-se concluir que:

a) Os valores relacionados pelo ensaio de tração, em especial o alongamento, associados ao ensaio de dobramento, demonstram que as chapas selecionadas para este estudo possuem excelente trabalhabilidade em operações de conformação, superando as expectativas iniciais. Além disso, consideramos que os raios de dobra especificados na norma não são rigorosos para os materiais estudados, tendo em vista que os resultados observados foram superados;

b) A conformabilidade dos aços também está evidenciada e comprovada pela verificação da relação LE/RT, que foi de 62% a 66% para todas as chapas;

c) Os resultados do ensaio de anisotropia, mostraram que os valores dos coeficientes de anisotropia médios foram mais altos para as chapas com valores mais elevados de espessura. Este comportamento foi verificado para uma pequena amostragem de chapas grossas, nos aços estudados neste trabalho;

d) Ainda que os aços ASTM A-387 e ASTM A-516 possuam diferentes composições químicas e tenham sofrido diferentes tratamentos térmicos, tratam-se de materiais de mesma característica microestrutural, analisando-se as semelhantes proporções e morfologias de ferrita e perlita, como por exemplo alinhamento e orientação (bandeamento). Com isso, pôde-se estabelecer uma correlação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas destes aços, evidenciados através de similaridades qualitativas, ou seja, os mesmos microconstituintes, nos resultados obtidos dos ensaios de tração, dureza, dobramento e anisotropia;

unesp

e) A aplicabilidade potencial desses aços em operações de conformação mecânica foi investigada, e a busca em correlacionar as propriedades especificadas (tração e dobramento) e não especificadas (anisotropia, dureza e microestrutura), forneceu uma base científica para a eficácia dos parâmetros de conformabilidade a frio , especificamente dobras, ou seja, biaxiais, de chapas em aço carbono e baixa-liga na construção de equipamentos industriais.

5.2 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

a) Desenvolver métodos semelhantes a este trabalho, porém destinado a simulações de conformação esférica;

b) Estudar os parâmetros de conformação a frio em calandra para o aço ASTM A-516-70 Temperado e Revenido.

c) Estudar o fenômeno de encruamento na região externa e sub-superfície dos corpos-de-prova após o ensaio de dobramento, por meio de medições das durezas nessas mesmas regiões e/ou modelamento e microscopia eletrônica de varredura;

d) Produzir e caracterizar chapas de aço carbono de igual natureza àqueles destinados à estampagem profunda, em conjunto com as usinas siderúrgicas;

e) Desenvolver métodos semelhantes a este trabalho, porém destinado a avaliar a influência da composição química, em especial os elementos residuais;

f) Verificar a influência da qualidade superficial obtida pelas usinas nas chapas de aço carbono, nos últimos passes de laminação.

unesp

REFERÊNCIAS

1. ASME Section VIII – Div. I Ed. 2000

2. ASTM A-20; A-370; A-387; A-516 – Volume 01.04 Ed. 2001

3. BANNISTER, A. C., OCEJO, J. R., GUTIERREZ-SOLANA, F. – Implications of the Yield Stress/Tensile Stress Ratio to the Sintap Failure Assessment Diagrams for Homogeneous Materials – Pergamon, 2000: Engineering Fracture Mechanics 67 (2000) 547 – 562

4. BATE, P. and HUTCHINSON, B. – The Effect of Elastic Interactions Between Displacive Transformations on Textures in Steels – Elsevier, 2000: Acta Mater. 48 (2000) 3183 – 3192

5. BHADESHIA, H. – Bainite In Steels – The Institute of Materials, London, 1992

6. CHIAVERINI, Aços e ferros fundidos. São Paulo: ABM, 1984

7. DATSKO, J. and YANG, C. T., J. Eng. Ind., 1960

8. DEFOURNY, J., DI-FANT, M., LANGENBERG, P., DAWL, W., ROHDE, W. – Fracture Behavior and Failure Analysis of Weldable High Strength Steels – Review of ECSC Research Projects, 1998

9. DIETER E. Mechanical metallurgy. 2nd ed. Tokyo. Mc Graw-Hill, 1961

10. HILL, R. – The Mathematical Theory of Plasticity, Clarendon Press – Oxford, 1950

11. LEU, DAW-KWEI – A Simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals – Elsevier, 1995: Journal of Materials Processing Technology 66 (1997) 9 – 17

12. OLSEN, G. H. and JESSER, W. A. – Acta Metal, 1971

13. ROLLASON, E. C. – Metallurgy for Engineers – University of Birmingham 4th Edition

14. SCHALLER, GILBERT S. – N.Y., 1959: Engineering Manufacturing Methods 2nd Edition

15. TAKENAKA, Y. N., TOZAWA, Y., TYIAMOTO, H. and KUDO, H., Ann CIRP, 1973

16. TAYLOR, J. C. – Origins of the Ultimate Tensile Strength/Yield Strength Ratio limit in Codes. Proceedings of Round Table Discussion on Relevance of the Yield to Tensile Ratio in Steels for Welded Construction. Düsseldorf - GmbH, 1997

17. TELLES, PEDRO CARLOS DA SILVA – Materiais para Equipamentos de Processo – Ed. Interciência, 1976

18. VAN VLACK, LAWRENCE H. – Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais – Ed. Campos, 1984

19. WILSON, FRANK W. – High Velocity Forming Of Metals – American Society Of Tool And Manufacturing Engineers

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA:

1. ASME Section II – Part A – Ed. 2000

2. ASTM E-517 Ed. 98

3. BESSON, J., RIVALIN F., PINEAU, A., FANT M .D. – Ductile tearing of pipeline steel wide plates II. Modeling of in-plate crack Propagation – Engineering Fracture Mechanics, Edition 2001

4. BILLINGHAM, J. HEALY, J., BOLT, H. – Yield strength steels the significance of yield ratio and work hardening for structural performance, Health and Safety Executive – UK, 1997

5. BRESCIANI, ETTOTORE – Conformação plástica de metais – Unicamp: vol II, 3ª Edição

6. BROOKS, J. W., LORETTO, M.H. and SNALLMAN, R.E. – Acta Metal, 1979

7. CALLISTER, JR., M.D. Materials Science and Engineering: an introduction – 4th Edition

8. DENYS, R. M., A study of the effect of yield point elongation and strain hardening rate on the fracture behavior of welded low carbon steels – OMAE, 1998

9. GARDINER, H. J., Aplpl. Mech, 1957

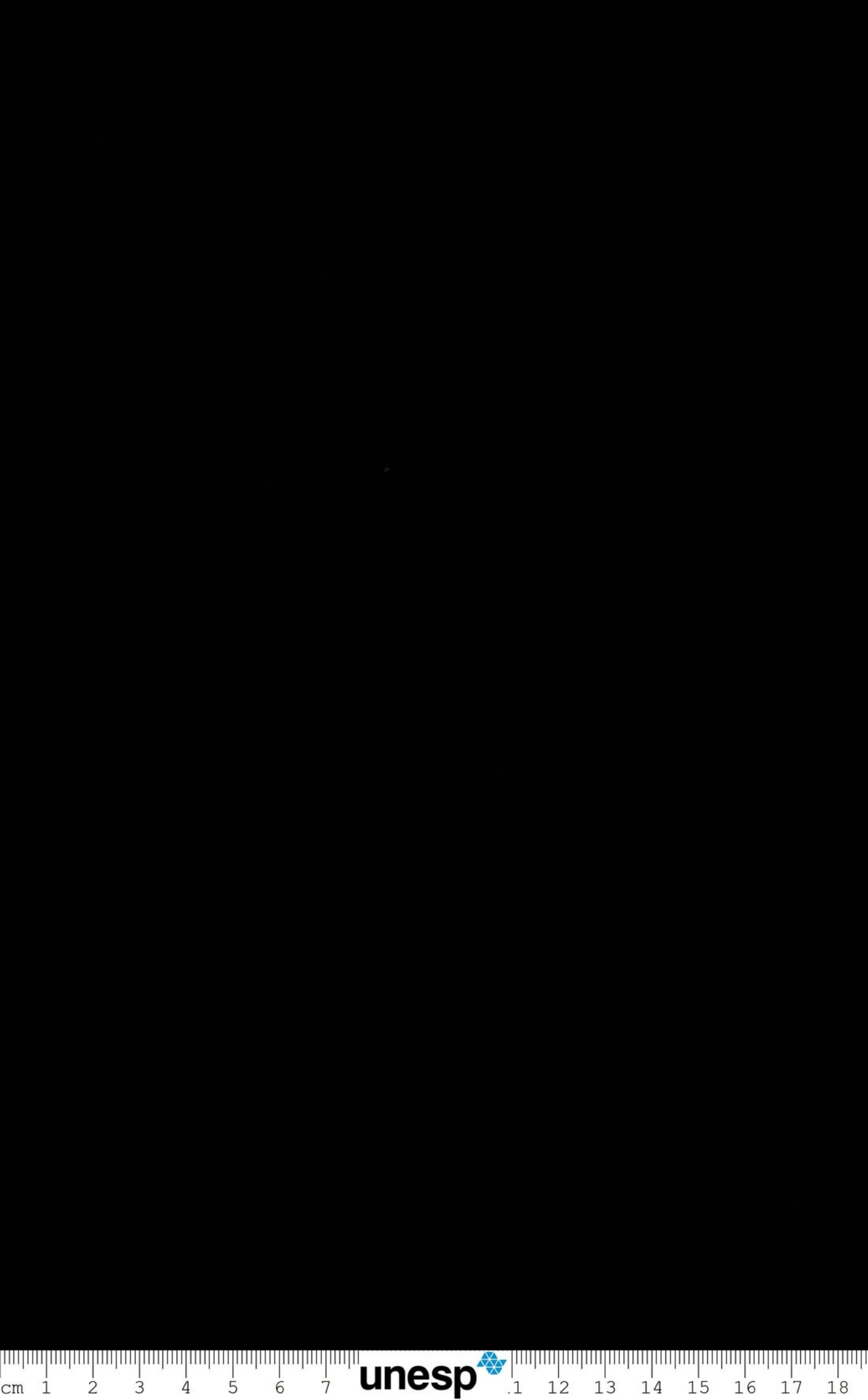
10. INAGAKI, H., In Process 6th International Conference on Textures of Materials, vol. I – Iron and Steel Institute of Japan, 1981

11. RUTCHINSON, B., RYDE, L., LINDH, E., TAGASHIRA, K., - Materials Science Engineering, 1998

12. SLOTERDIJK, W., The effect of tensile properties on the safety of pipelines, Bruxels, 1997

13. SOUZA, S. A., Ensaios mecânicos de materiais metáicos, Blücher, 1982

14. YOTURI, T. and OGAWA, R., In process 6th International Conference on Textures of Materials, Vol. I Iron and Steel Institute of Japan, 1981.


cm 1 2 3 4 5 6 7
unesp
11 12 13 14 15 16 17 18