

RELAÇÃO MICROESTRUTURA X TENACIDADE AO IMPACTO DE FLANGES FORJADOS DE AÇO C-Mn PARA TRABALHO EM BAIXAS TEMPERATURAS E EFEITOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

Guilherme Zeemann Pinho Emygdio

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Luiz Henrique de Almeida

Rio de Janeiro

AGOSTO/2012

RELAÇÃO MICROESTRUTURA X TENACIDADE AO IMPACTO DE FLANGES
FORJADOS DE AÇO C-Mn PARA TRABALHO EM BAIXAS TEMPERATURAS E
EFEITOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

Guilherme Zeemann Pinho Emygdio

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE MATERIAIS.

Examinada por:

Prof. Luiz Henrique de Almeida, D. Sc.
PEMM-COPPE/UFRJ (Orientador)

Prof. Dilson Silva dos Santos, D. Sc.
PEMM-COPPE/UFRJ

Prof. Enrique Mariano Castrodeza, D. Sc.
PEMM-COPPE/UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
AGOSTO de 2012

Emygdio, Guilherme Zeemann Pinho

Relação microestrutura x tenacidade ao impacto de flanges forjados de aço C-Mn para trabalho em baixas temperaturas e efeitos de tratamentos térmicos – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2012.

XII, 67 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luiz Henrique de Almeida

Projeto de graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia de Materiais, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 67-68.

1. Forjados de Aço ao C-Mn 2. Relação Microestrutura x Tenacidade 3. Tratamentos Térmicos

I. Almeida, Luiz Henrique II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia de Materiais III. Relação microestrutura x tenacidade ao impacto de flanges forjados de aço C-Mn para trabalho em baixas temperaturas e efeitos de tratamentos térmicos

Agradecimentos

Agradeço inicialmente aos meus pais, Paulo Roberto de Oliveira e Annelise Zeemann do Pinho por despertarem meu interesse pela engenharia metalúrgica e de materiais e auxiliarem na minha formação como pessoa e profissional.

Ao professor Luiz Henrique de Almeida, orientador deste trabalho, pelo empenho em ajudar na melhoria contínua dos meus conhecimentos e conceitos.

Aos professores do departamento de engenharia metalúrgica e de engenharia de materiais por terem a paciência e dedicação para me dar aula pelos 5 anos de faculdade.

À Tecmetal por me proporcionar o maior aprendizado da minha vida e auxiliar nos ensaios e análises para o presente trabalho, principalmente os engenheiros: Carlos Henrique Menezes Fontes, Gustavo Senna e Ricardo Couto. Além de todo o corpo técnico desta empresa.

Para finalizar agradeço a todos os meus colegas de faculdade, principalmente Gustavo Brandolin, Ian Martins, Jorge Martins e Anderson Mendes sem os quais talvez eu demorasse um pouco a mais para terminar a faculdade.

A todos vocês meu muito obrigado.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado ao DEMM/EP/UFRJ como parte integrante dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Materiais.

**RELAÇÃO MICROESTRUTURA X TENACIDADE AO IMPACTO DE FLANGES
FORJADOS DE AÇO C-Mn PARA TRABALHO EM BAIXAS TEMPERATURAS E
EFEITOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS**

Guilherme Zeemann Pinho Emygdio

Agosto/2012

Orientador: Luiz Henrique de Almeida

Curso: Engenharia de Materiais

Terminais aquaviários para recebimento e distribuição de GLP operam com componentes em temperaturas na ordem de -40°C e requerem, portanto materiais resistentes à baixa temperatura. Comumente são utilizados tubos e conexões forjadas em aços carbono e baixa liga que seguem especificações ASTM, sendo a A350 uma das mais comuns para flanges. O grau LF2 classe 1 desta especificação, que corresponde a aços ao carbono ou carbono-manganês, é adequado a temperaturas de até -46°C . Nestas temperaturas de operação torna-se perigosa a aplicação de aços com microestrutura predominantemente ferrítica devido à possibilidade de ocorrência de fraturas frágeis uma vez que se está muito próximo da transição dúctil-frágil, sendo o tipo de microestrutura, e conseqüentemente o processamento e tratamento térmico dos forjados, determinante para assegurar a tenacidade do material.

Este trabalho apresenta a caracterização de flanges forjados de três diferentes procedências, tendo sido evidenciadas diferentes microestruturas e propriedades mecânicas no estado como recebido.

Foi estudada a resposta dos materiais a tratamentos térmicos aplicados buscando refino microestrutural (normalização) e uniformização da composição (dupla normalização). Neste trabalho foi feita a caracterização metalográfica por microscopia ótica e as propriedades foram avaliadas por medidas de dureza Vickers, ensaios de tração na temperatura ambiente e Charpy à -46°C .

Verificou-se que o tratamento de normalização causa refino apenas em materiais cuja microestrutura de partida é do tipo ferrítico-perlítica, que uma dupla normalização utilizando mesma temperatura de austenitização não promove efeitos benéficos adicionais e que não necessariamente uma normalização melhora as propriedades de aços ao carbono.

Palavras chave: Forjados de Aço ao Carbono, Relação Microestrutura x Tenacidade, Tratamentos Térmicos.

Abstract of Undergraduate Project present to DEMM/POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Materials Engineer.

**MICROSTRUCTURE X IMPACT TOUGHNESS RELATIONSHIP FOR C-Mn STEEL
FORGED FLANGES TO OPERATE IN LOW TEMPERATURES AND HEAT
TREATMENTS EFFECTS**

Guilherme Zeemann Pinho Emygdio

August/2012

Advisor: Luiz Henrique de Almeida

Course: Engenharia de Materiais

Waterway terminals for receiving and distributing GLP operate at temperatures around -40°C and for this require low temperature resistant materials. Usually in Brazil pipes and fittings that meet ASTM specification are applied and the A350 is one of the most used for carbon and low alloy steel forged fittings to operate in low temperature; and the grade LF2 class 1 is a carbon or C-Mn steel suitable for a minimum temperature of -46°C . In this low temperature the selection of a ferritic steel becomes dangerous due to the possibility of brittle failures, and the microstructure, resulting from the forging process and applied heat treatments, is important to assure the material toughness.

This work presents the characterization of forged flanges from three different sources, manufactured to meet the ASTM A350 LF2 class 1. Different microstructures and mechanical properties have been highlighted for different materials in the as received condition. Additionally it was studied the response of materials to heat treatments applied for microstructural refining (normalization) and chemistry uniformity (double normalization). Also it was performed the metallographic characterization by

optical microscope and the properties were evaluated by Vickers hardness, tensile test at ambient temperature and Charpy at -46°C .

It was verified that the normalization treatment caused refinement only in materials with starting microstructure formed by ferrite + perlite; also that the double normalization at the same austenitizing temperature did not promote any additional beneficial effect; and that not necessarily the normalization improved the carbon steel properties.

Keywords: Carbon steel forgings, microstructure/toughness relationship, heat treatments.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. PROJETO DE TUBULAÇÕES DE PROCESSO	3
2.2. FORJADOS ASTM A350	5
2.3. SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	8
2.4. RESISTÊNCIA AO IMPACTO	11
2.4.1. ENSAIO DE IMPACTO	12
2.4.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS DE IMPACTO	17
2.5. COMPORTAMENTO DE METAL E LIGAS METÁLICAS EM BAIXAS TEMPERATURAS.....	19
2.5.1. TRANSIÇÃO DÚCTIL – FRÁGIL	20
2.5.1.1. EFEITO DE CONCENTRADORES DE TENSÕES.....	20
2.5.1.2. EFEITO DE VARIÁVEIS METALÚRGICAS NA TENACIDADE À FRATURA DOS METAIS	21
2.5.1.2.1. ESTRUTURA CRISTALINA.....	22
2.5.1.2.2. TAMANHO DE GRÃO	22
2.5.1.2.3. ANISTROPIA DOS MICROCONSTITUINTES	23
2.5.1.2.4. COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	24
MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1. MATERIAIS.....	27
3.2. METODOLOGIA	35
3.2.1. TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	35
3.2.2. METALOGRAFIA.....	37
3.2.3. ENSAIOS DE TRAÇÃO	39
3.2.4. RESISTÊNCIA AO IMPACTO	40
3.2.5. ENSAIOS DE DUREZA VICKERS	41
RESULTADOS	42
4.1. PROPRIEDADES E MICROESTRUTURAS	42
DISCUSSÃO.....	49
5.1 ANISOTROPIA DE PROPRIEDADES.....	49
5.2 EFEITO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA RESISTÊNCIA MECÂNICA E NA DUREZA.....	51
5.3 EFEITO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA TENACIDADE	57
5.4 RELAÇÃO ENTRE TAMANHO DE GRÃO E TENACIDADE	62
5.5 RELAÇÃO ENTRE DUREZA E TENACIDADE	63
CONCLUSÕES.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 – Temperatura mínima de uso sem ensaio de impacto para aços carbono. ASME(2010).....	4
Figura 2.3.1 – Dados de entrada e saída em um projeto [ZEEMANN,2007].	9
Figura 2.3.2 - Interação entre características geométricas e de processamento que afetam as propriedades especificadas [ZEEMANN, 2007].....	9
FIGURA 2.4.1 - Fratura frágil ocorrida no navio tanque T-2 SS Schenectady (DIETER, 1981).11	
FIGURA 2.4.2 - Esquema de ensaio de impacto Charpy. O corpo de prova absorve na sua deformação na fratura a diferença de energia potencial do pêndulo, correspondente à variação da altura (h-h') (ASM, 1990).	13
A figura 2.4.3 apresenta os tipos de corpos de prova empregados nos ensaios Charpy e Izod.	13
FIGURA 2.4.3 - Corpos de prova Charpy e Izod. (ASTM E23, 2007).	14
FIGURA 2.4.4 - Comportamento típico dos materiais em função da temperatura no ensaio de impacto (DIETER, 1981).	15
FIGURA 2.4.5 - Critérios utilizados para definição da temperatura de transição (DIETER, 1981).	16
FIGURA 2.4.6 - Variação na energia absorvida nos ensaios de impacto com diferentes orientações (DIETER, 1981).	18
FIGURA 2.5.1 - Efeito de concentradores de tensões na ductilidade de metais que apresentam transição dúctil – frágil (ASM, 1990).	21
Figura 2.5.2 – Variação da energia absorvida em Charpy V com a temperatura para aços com diferentes teores de carbono (ASM, 1990).	25
Figura 2.5.3 – Variação da energia absorvida em Charpy V com a temperatura para aços com diferentes teores de manganês. (ASM, 1990)	25
Figura 3.1.1 – Aspecto como recebido do flange de 12" identificado como CP01	28
Figura 3.1.2 – Aspecto como recebido do flange de 10" identificado como CP02.	29
Figura 3.1.3 – Aspecto como recebido do flange de 8" identificado como CP03	29
Figura 3.1.4 - Macrografia da seção longitudinal dos flanges CP01 A, CP02 A e CP03 A, indicando as direções radial e axial.	31
Figura 3.1.5 – Aspecto metalográfico do CP01 na condição como recebida, mostrando microestrutura formada por ferrita + perlita com tamanho de grão ASTM de 10,0. Ataque de Nital 2%	32
Figura 3.1.6 – Aspecto metalográfico do CP02 na condição como recebida, mostrando microestrutura formada por ferrita + perlita com tamanho de grão ASTM de 8,2. Ataque de Nital 2%	33
Figura 3.1.7 – Aspecto metalográfico do CP03 na condição como recebida, mostrando microestrutura bainítica. Não foi possível medir o tamanho de grão ASTM. Ataque de Nital 2%	34
Figura 3.2.1 – Gráfico de temperatura versus tempo de tratamento para a normalização das amostras CP01B, CP01C, CP02B, CP02C, CP03B e CP03C.	36

Figura 3.2.2 – Gráfico de temperatura versus tempo de tratamento para a segunda normalização das amostras CP01C, CP02C e CP03C.	36
Figura 3.2.3 – Equipamentos de preparação metalográfica (lixamento e polimento).....	38
Figura 3.2.4 – Equipamentos de análise microestrutural (microscopia ótica).	38
Figura 3.2.5 – Formato e dimensões do corpo de prova de tração cilíndrico conforme norma ASTM A370.	39
Figura 3.2.6 – Equipamentos de ensaio tração.....	39
Figura 3.2.7 – Dimensões “standard” dos corpos de prova Charpy V (ASTM E23, 2007).....	40
Figura 3.2.8 – Equipamentos de ensaio Charpy V.....	41
Figura 3.2.9 – Equipamentos de ensaio dureza Vickers.....	41
Figura 4.1.1 – Evolução da microestrutura do CP01 com os tratamentos térmicos aplicados. Ataque Nital 2%.....	45
Figura 4.1.2 – Evolução da microestrutura do CP02 com os tratamentos térmicos aplicados. Ataque Nital 2%.....	46
Figura 4.1.3 – Evolução da microestrutura do CP03 com os tratamentos térmicos aplicados. Ataque Nital 2%.....	47
Figura 4.1.4 – Gráfico de tamanho de grão ASTM versus tratamento térmico.	48
Figura 5.1.1 – Diagrama com os resultados dos ensaios de Charpy V nas direções axial e radial para os três flanges na condição como recebido.....	49
Figura 5.1.2 – Diagrama com os resultados dos ensaios de tração nas direções axial e radial para os três flanges na condição como recebido.....	50
Figura 5.1.3 – Diagrama com os resultados da relação LE/LR obtidos nos ensaios tração nas direções axial e radial para os três flanges na condição como recebido.	50
Figura 5.2.1 – Gráfico de tensão limite de escoamento (axial) versus tratamento térmico, para todos os CPs.	52
Figura 5.2.2 – Gráfico de tensão limite de escoamento (radial) versus tratamento térmico, para todos os CPs.	52
Figura 5.2.3 – Gráfico da relação LE/LR (axial) versus tratamento térmico, para todos os CPs.	54
Figura 5.2.4 – Gráfico da relação LE/LR (radial) versus tratamento térmico, para todos os CPs.	54
Figura 5.2.5 – Gráfico de dureza versus tratamento térmico, para todos os CPs.....	55
Figura 5.2.6 – Gráfico de limite de resistência (axial) versus tratamento térmico, para todos os CPs.....	56
Figura 5.2.7 – Gráfico de limite de resistência (Radial) versus tratamento térmico, para todos os CPs.....	56
Figura 5.3.1 – Gráfico de energia absorvida nos ensaios de Charpy V na direção axial versus condição de tratamento térmico.	58
Figura 5.3.2 – Gráfico de energia absorvida no ensaios de Charpy V na direção radial versus condição de tratamento térmico.	58

Figura 5.3.3 – Micrografias, com ampliação de 500x, e a superfície de fratura do corpo de prova de Charpy V associado, para cada condição de tratamento térmico.	59
Figura 5.3.4 – Micrografias, com ampliação de 500x, e a superfície de fratura do corpo de prova de Charpy V associado, para cada condição de tratamento térmico.	60
Figura 5.3.5 – Micrografias, com ampliação de 500x, e a superfície de fratura do corpo de prova de Charpy V associado, para cada condição de tratamento térmico.	61
Figura 5.4.1 – Gráfico de energia absorvida (J) versus tamanho de grão ASTM.....	62
Figura 5.5.1 – Gráfico de energia absorvida (J) versus dureza vickers (HV5). Setas apontam para a direção dos resultados após os tratamentos térmico.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2.1 – Limites de composição química dos diversos graus da norma ASTM A350 (2012).	5
Tabela 2.2.2 – Requisitos de propriedades em tração para os diferentes graus LF da norma ASTM A350 (2012).	6
Tabela 2.2.3 – Tabela de requisitos de energia de impacto mínima requerida para cada grau da norma ASTM A350 (2012).	6
Tabela 2.2.4 – temperatura de ensaio de impacto (Charpy V) para cada grau da norma ASTM A350 (2012)..	7
Tabela 3.1.1 – Análise química por espectroscopia de emissão óptica.....	30
Tabela 3.1.2 – Ensaio de tração – conforme ASTM A370.	30
Tabela 3.1.3 – Ensaio de dureza VICKERS – 5 Kg	30
Tabela 3.1.4 – Ensaio de Charpy V à -46°C	30
Tabela 3.2.1 – Identificação das amostras em relação às dimensões e tratamentos.....	35
Tabela 4.1.1 - Apresentação dos resultados dos ensaios de tração para as diferentes condições de tratamento térmico.	42
Tabela 4.1.2 - Apresentação dos resultados dos ensaios de dureza, Charpy V e tamanho de grão para as diferentes condições de tratamento térmico.....	43
Tabela 5.5.1 – Resultados de dureza Vickers e Charpy V (-46°C) para os CPs.	63

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Na exploração de gás natural e de petróleo frequentemente necessita-se de equipamentos e tubulações para transporte e distribuição destas matérias primas, operando a baixas temperaturas de trabalho. Um exemplo desta aplicação são terminais aquaviários para recebimento e distribuição de GLP (gás liquefeito do petróleo) que operam em temperaturas tão baixas quanto de -40°C a -50°C .

A indústria petrolífera brasileira utiliza para especificação de materiais de tubulações e seus acessórios, normas americanas como a ASTM A333 para tubos e ASTM A350 aplicável a componentes forjados tubulares de aço ao carbono e baixa liga para trabalho em temperaturas de até -101°C , sendo que para aços ao carbono forjados – na especificação LF2 classe 1 – a mínima temperatura assegurada pelo ensaio Charpy é de -46°C .

Nestas temperaturas de operação torna-se perigosa a aplicação de aços ao carbono comum, de microestrutura predominantemente ferrítica ou ferrítico-perlítica, devido à possibilidade de ocorrência de fraturas frágeis pelo fato de que se está muito próximo à temperatura de transição dúctil-frágil. A temperatura em que ocorre essa transição está relacionada com as características microestruturais como a fração volumétrica de perlita, o tamanho de grão ferrítico e/ou a presença de impurezas e segregações. Estas características dependem muito da matéria-prima utilizada (composição química e método de processamento siderúrgico) e dos processos adotados para obtenção de forma e propriedades (forjamento e tratamentos térmicos).

Aços ao carbono para uso em temperaturas de até -29°C apresentam correlações bem estabelecidas entre os parâmetros microestruturais e a resistência ao impacto, mas quando a temperatura mínima de projeto se aproxima do limite de

uso de um aço ao carbono, na ordem de -46°C , pequenas variações microestruturais causam grande dispersão de resultados. Flanges forjados de aço ao carbono para uso em temperaturas tão baixas podem apresentar grandes variações de propriedades em função de espessura, tipos de resfriamento e graus de conformação diferenciados, e quando os componentes se apresentam com microestruturas de partida diferentes o que se conhece de efeitos benéficos de tratamentos térmicos pode não ser aplicável a este tipo de componente.

O objetivo deste trabalho é o de caracterizar o comportamento de três flanges fabricados para atendimento à norma ASTM A 350 LF2 classe 1, quanto ao comportamento dúctil ou frágil na temperatura de -46°C . Os resultados de energia absorvida nos ensaios de Charpy à -46°C foram associados aos parâmetros microestruturais, em seu estado como recebido, após tratamentos de normalização a 920°C com resfriamento em ar, e após um tratamento de dupla normalização. Esses tratamentos térmicos complementares foram realizados com o objetivo de refinar o grão e homogeneizar composição química, respectivamente.

Verificam-se em materiais de diferentes procedências microestruturas de partida diferentes e respostas ao tratamento em função do tipo de estrutura de partida. Os tratamentos de normalização refinaram o grão apenas de estruturas ferrítico-perlíticas com tamanho de grão original maior do que 10 micrometros, mas para estruturas de partida bainíticas o tratamento de normalização transformou a estrutura e não teve efeito benéfico na tenacidade. Em nenhuma das condições de dupla normalização foi verificado qualquer benefício.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROJETO DE TUBULAÇÕES DE PROCESSO

O ASME B 31.3 (2010), de tubulações de processo, que pertence ao código “American Society of Mechanical Engineers Code for Pressure Piping” prescreve requisitos para materiais, projeto, fabricação, montagem, construção, inspeção e testes de componentes de tubulações. Esta norma foi desenvolvida para projeto de tubulações encontradas em refinarias de petróleo, químicas, farmacêuticas, têxtil, papel, semicondutor e plantas criogênicas e pode ser aplicada para uma vasta gama de fluidos de processos encontrada nestas plantas.

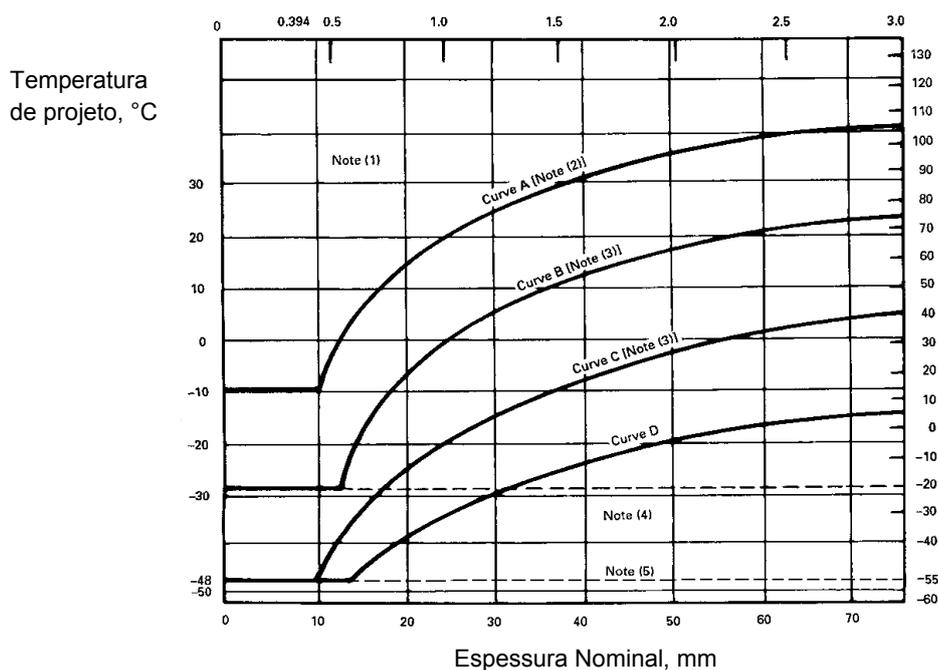
Dentre os requisitos prescritos por esta norma existem os mecânicos, de fluidos, pressão e geometria, além dos requisitos de materiais, que são o enfoque do presente trabalho.

No capítulo 3 do ASME B 31.3 (2010), intitulado “Materials”, estão apresentados os requisitos de materiais para trabalho em baixas temperaturas, associando os materiais aos respectivos testes que devem ser realizados para uma determinada aplicação. A figura 2.1.1, reproduzida deste código (ASME, 2010), relaciona o tipo de material, representado pelas curvas A, B, C e D, à temperatura mínima de projeto (MDMT – “minimum design metal temperature”) e à espessura do componente.

A norma indica que quando um ponto, combinação de temperatura e espessura, cai abaixo da curva do material especificado o projetista deve adicionalmente exigir ensaios de Charpy V na temperatura MDMT (ou menor) para qualificar o material para o serviço. Já quando este ponto cai acima da curva, o material pode ser utilizado apenas conforme especificação ASTM, sem requisitos adicionais de ensaios.

Assim, é feita uma divisão dos materiais aplicáveis em quatro grupos principais identificados pelas curvas da figura 2.1.1, onde a curva A está associada a materiais adquiridos sem controle microestrutural para assegurar suas propriedades, podendo ser utilizado sem restrição de espessura em temperaturas até -10°C . Conforme a especificação prevê requisitos de composição, tratamentos térmicos ou controles siderúrgicos, progride-se para curvas B, C ou D com limite em temperatura mais baixa.

O material ASTM A 350 LF2 classe 1 se enquadra na curva C da figura 2.1.1, sendo assim para espessuras de até 10 mm a uma temperatura de -48°C não seria necessária a realização de ensaios Charpy V para qualificação destas condições, porém no caso de flanges forjados, que tem espessuras e geometrias diferentes de um tubo, os limites operacionais não são bem definidos pelo ASME (2010).



Notas:

- (1) Qualquer material de aço carbono pode ser usado para a temperatura mínima de -29°C para categoria D de fluido de serviço.
- (2) Materiais graus X do API 5L, e ASTM A381, podem ser utilizados de acordo com a curva B se normalizados ou temperados e revenidos.
- (3) Os seguintes materiais podem ser utilizados de acordo com a curva D se normalizados:
 - a. ASTM A 516 chapa, todos os graus;
 - b. ASTM A 671 tubo, graus CE55, CE60, e todos os graus feitos com chapa de A516;
 - c. ASTM 672 tubo, graus E55, E60, e todos os graus feitos com chapa de A516

Figura 2.1.1 – Temperatura mínima de uso sem ensaio de impacto para aços carbono. ASME(2010).

2.2. FORJADOS ASTM A350

A norma ASTM A 350 (2012) trata da especificação de vários graus de aço carbono e baixa liga para flanges forjados ou confeccionados a partir de anéis laminados, acessórios forjados e válvulas, para serviço em baixa temperatura.

O controle sobre o produto acabado começa no processo de fabricação do aço, assim é descrita uma série de rotas de fabricação desde os processos de fundição permitidos – “open-hearth”, “basic oxygen”, “eletric-furnace” ou “vacum-induction melting” (VIM) – passando pelo forjamento e terminando nos possíveis tratamentos térmicos a serem aplicados, dentre os quais se pode citar a normalização, normalização e revenimento, tempera e revenimento e tratamento de normalização e precipitação. A função deste controle durante o processo de fabricação é principalmente atender aos requisitos da norma quanto à composição química e às propriedades mecânicas na temperatura desejada.

Os requisitos de composição química previstos na norma, tabela 2.2.1, limitam impurezas e classificam os graus dependendo dos elementos de liga.

Tabela 2.2.1 – Limites de composição química dos diversos graus da norma ASTM A350 (2012).

Elemento	Grau LF1	Grau LF2	Grau LF3	Grau LF5	Grau LF6	Grau LF9	Grau LF787
C, máx.	0,30	0,30	0,20	0,30	0,22	0,20	0,07
Mn	0,60 a 1,35	0,60 a 1,35	0,90 máx.	0,60 a 1,35	1,15 a 1,50	0,40 a 1,06	0,40 a 0,70
P máx.	0,035	0,035	0,035	0,035	0,025	0,035	0,025
S, máx.	0,040	0,040	0,040	0,040	0,025	0,040	0,025
Si	0,15 a 0,30	0,15 a 0,30	0,20 a 0,35	0,20 a 0,35	0,15 a 0,30	-	0,40 máx.
Ni	0,40 máx.	0,40 máx.	3,3 a 3,7	1,0 a 2,0	0,40 máx.	1,60 a 2,24	0,70 a 1,00
Cr	0,30 máx.	0,60 a 0,90					
Mo	0,12 máx.	0,60 a 0,90					
Cu	0,40 máx.	0,75 a 1,25	1,00 a 1,30				
Nb	0,02 máx.	0,02 mín.					

Quanto às propriedades mecânicas, existem requisitos para estas em tração, tabela 2.2.2 (tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência e alongamento); requisitos de resistência ao impacto (tabela 2.2.3 e 2.2.4) e através da escolha do grau (ex: LF2) é definida a temperatura de ensaio e a energia absorvida mínima requerida.

Tabela 2.2.2 – Requisitos de propriedades em tração para os diferentes graus LF da norma ASTM A350 (2012) (Temperatura ambiente)

ASTM A350 grau	Tensão limite de escoamento (mín.)	Tensão limite de resistência	Alongamento (mín.)
LF1 e LF5 classe 1	205 MPa	415 a 585 MPa	25%
LF2 classes 1 e 2	250 MPa	485 a 655 MPa	22%
LF3 classes 1 e 2 e LF5 classe 2	260 MPa	485 a 655 MPa	22%
LF6 classe 1	360 MPa	455 a 630 MPa	22%
LF6 classes 2 e 3	415 MPa	515 a 690 MPa	20%
LF9	315 MPa	435 a 605 MPa	25%
LF787 classe 2	380 MPa	450 a 585 MPa	20%
LF787 classe 3	450 MPa	515 a 655 MPa	20%

Tabela 2.2.3 – Tabela de requisitos de energia de impacto mínima requerida para cada grau da norma ASTM A350 (2012).

ASTM A350 grau	Mínima energia de impacto requerida para media de três CPs (J)	Mínima energia de impacto permitida para cada CP. (J)
LF1 e LF9	18	14
LF2 classe1	20	16
LF3 classe 1	20	16
LF5 classes 1 e 2	20	16
LF787 classes 2 e 3	20	16
LF6 classe 1	20	16
LF2 classe 2	27	20
LF3 classe 2	27	20
LF6 classe 2 e 3	27	20

Tabela 2.2.4 – temperatura de ensaio de impacto (Charpy V) para cada grau da norma ASTM A350 (2012)..

ASTM A350 grau	Temperatura de teste (°C)
LF1	-29
LF2 classe 1	-46
LF2 classe 2	-18
LF3 classes 1 e 2	-101
LF5 classes 1 e 2	-59
LF6 classes 1 e 2	-51
LF6 classe 3	-18
LF9	-73
LF787 classe 2	-59
LF787 classe 3	-73

Além destes requisitos principais, o comprador pode utilizar os requisitos suplementares de teste de impacto (que limita a temperatura máxima de ensaio para cada grau) e de carbono equivalente.

2.3. SELEÇÃO DE MATERIAIS

O projeto de um equipamento considera, além das informações fornecidas pelo cliente e seus requisitos especiais, os códigos segundo os quais o equipamento deve ser projetado, a experiência anterior do pessoal de engenharia e a disponibilidade no mercado local (ou global) de matéria-prima e de tecnologias de fabricação (cujas informações são provenientes da fábrica que executará o projeto e/ou pelos fornecedores).

O projeto inclui o dimensionamento do equipamento nos diferentes níveis (os desenhos de conjunto, de componente, de fabricação para processos especiais e, até mesmo de aquisição de matéria-prima) e a seleção do material desde sua especificação como matéria-prima até os requisitos de inspeção, passando pelos processos de fabricação (principalmente aqueles considerados processos especiais, que afetam a performance do equipamento a saber, conformação mecânica, soldagem e revestimentos).

A figura 2.3.1 apresenta um desenho esquemático com os dados de entrada na engenharia e os dados de saída genéricos para um dado projeto de equipamento e a figura 2.3.2 apresenta os principais fatores que determinam a *seleção e especificação* dos materiais metálicos, resumidos como:

1. o tipo de componente (pressurizado pelo fluido de produção, controlador de pressão, suspensor de coluna, anel de vedação, estrutural, fixador);
2. as características de serviço, a saber
 - 2.1. meio agressivo
 - 2.2. temperatura
3. o nível de especificação do produto;
4. o nível de resistência mecânica exigido pelo projeto;
5. as dimensões e a geometria;
6. o tipo de fabricação e os cuidados necessários.

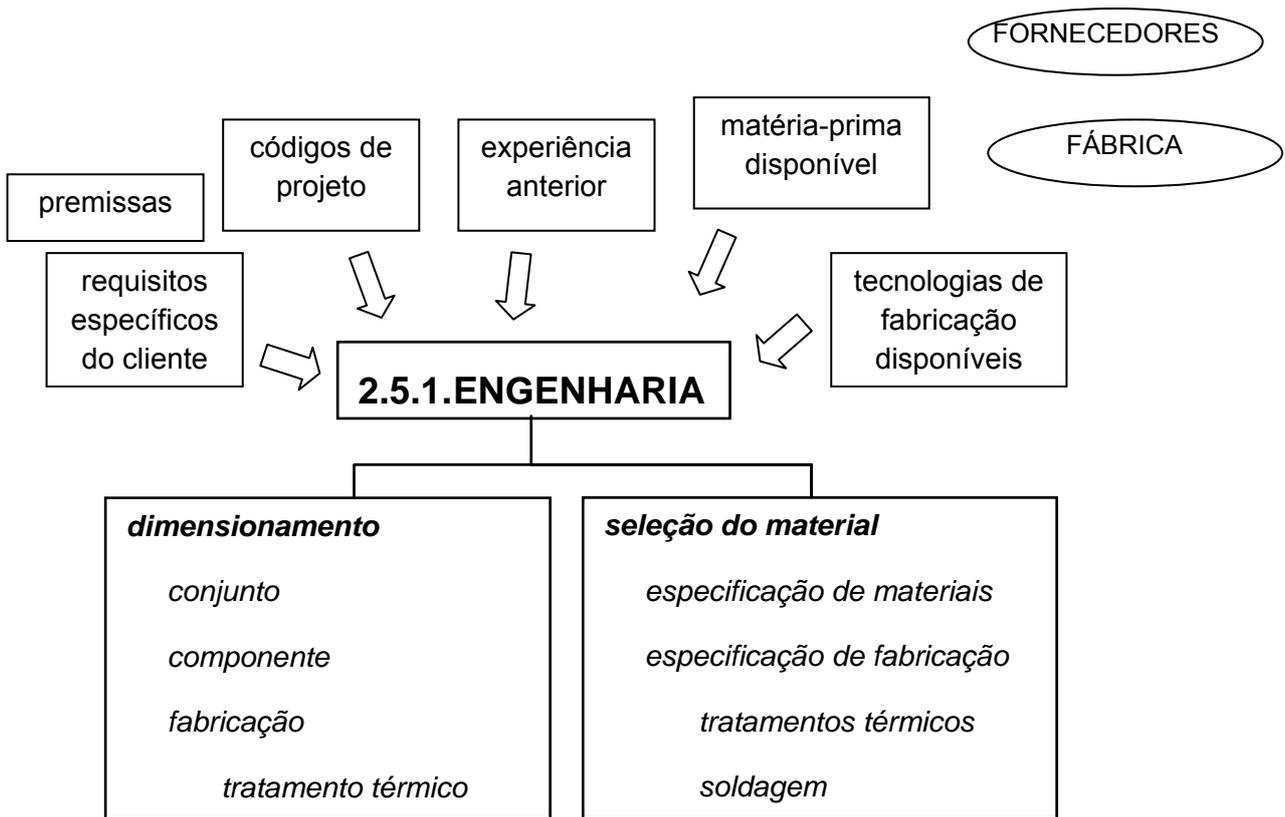


Figura 2.3.1 – Dados de entrada e saída em um projeto [ZEEMANN,2007].

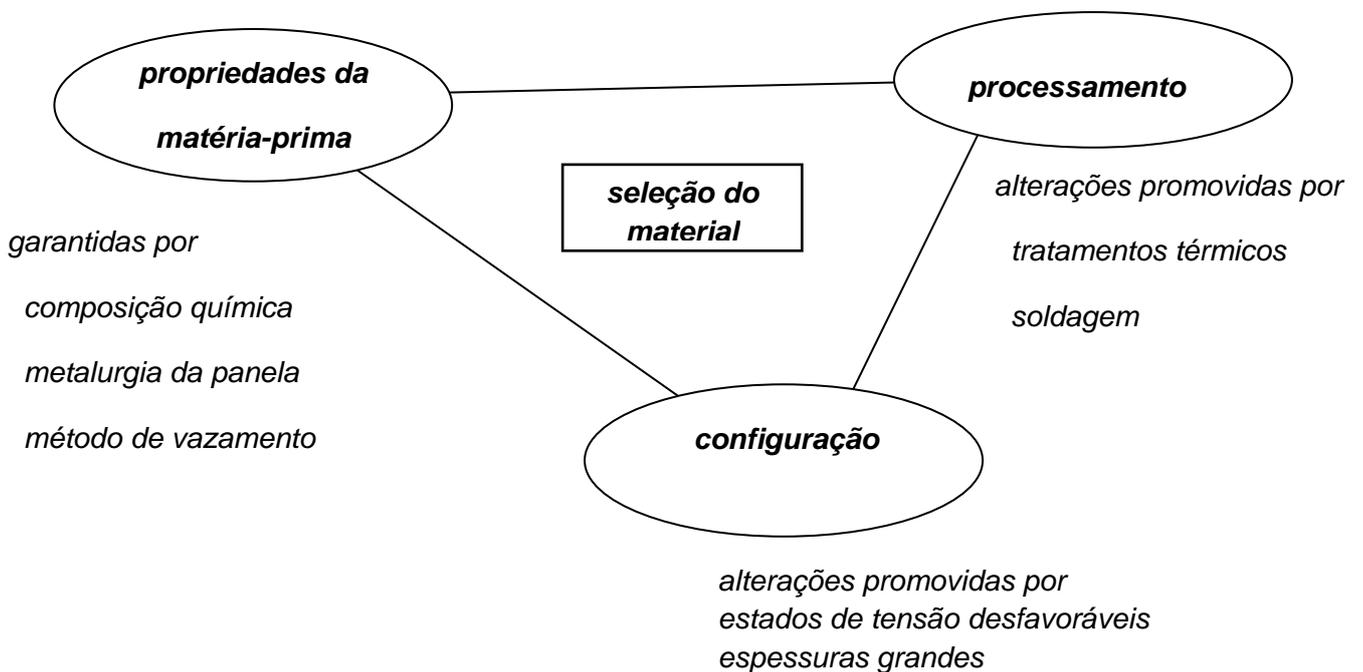


Figura 2.3.2 - Interação entre características geométricas e de processamento que afetam as propriedades especificadas [ZEEMANN, 2007].

Especificamente no caso de baixa temperatura, onde a propriedade requerida é a tenacidade (ou a resistência ao impacto), é importante compreender que o comportamento mecânico verificado em componentes reais nem sempre corresponde àquele especificado em projeto e muito menos corresponde às propriedades levantadas na matéria-prima. Isto ocorre, segundo ZEEMANN (2007), por dois motivos básicos:

- porque as propriedades (principalmente a tenacidade) são fortemente influenciadas por fatores geométricos, como concentradores de tensão, e pelo processamento, que pode promover alterações metalúrgicas ou tensionamento interno;
- porque as propriedades levantadas para a matéria-prima são normalmente retiradas de peças de qualificação (QTC's) cujas características metalúrgicas nem sempre correspondem às do componente real; e porque as propriedades são levantadas em corpos-de-prova de dimensões reduzidas que podem não conter detalhes de uma fabricação com problemas.

2.4. RESISTÊNCIA AO IMPACTO

A grande deformação plástica que ocorre até a fratura dúctil, é responsável pela absorção de uma grande quantidade de energia necessária para movimentar e multiplicar as discordâncias no material (DIETER, 1981).

Na fratura frágil tem-se que a energia necessária para propagar a fratura é geralmente baixa, devido ao predomínio do mecanismo de clivagem. Neste mecanismo, a energia absorvida é armazenada principalmente como energia superficial, presente nas áreas abertas pela fratura. Materiais de baixa tenacidade têm, portanto, maior tendência de sofrer fratura frágil.

Devido à pequena energia absorvida, geralmente as fraturas frágeis são catastróficas como no clássico exemplo dos navios da série Liberty e nos navios tanques T-2, construídos durante a Segunda Guerra Mundial. Foram construídos 4.694 navios destes tipos, dos quais 1.289 sofreram fratura frágil. Destas, 233 foram catastróficas, com perda completa do navio e, em 19 casos, os navios partiram-se ao meio, como o navio tanque SS-Schenectady apresentado na figura 2.4.1, que fraturou em 16 de janeiro de 1943 atracado no píer de acabamento do estaleiro, com mar calmo. A fratura frágil foi súbita, sem aviso e foi ouvida a 1500 metros de distância.

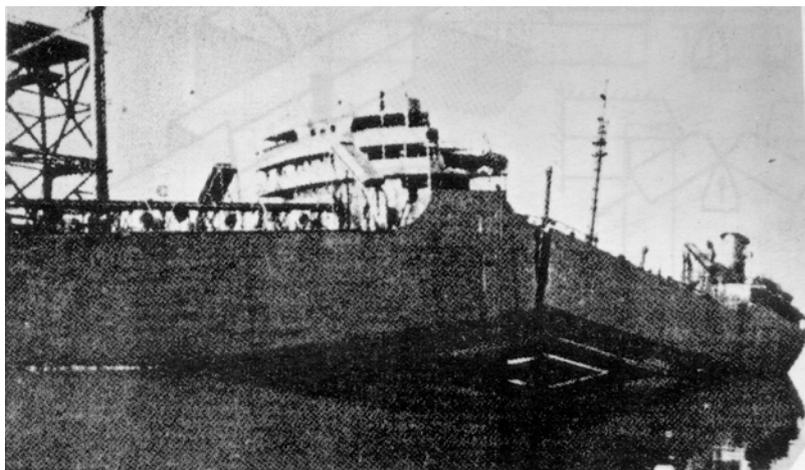


FIGURA 2.4.1 - Fratura frágil ocorrida no navio tanque T-2 SS Schenectady
(DIETER, 1981).

A grande incidência de falhas nos navios com certeza evidencia premissas de projeto erradas, e neste caso o ocorrido foi o uso incorreto do material, não especificado para trabalho em baixa temperatura e exposto a esta condição. A fratura dos navios com a diminuição da temperatura mostrou que o material sofreu uma modificação no comportamento, de dúctil para frágil. Como consequência, iniciou-se um grande estudo do assunto, embora o fenômeno já tivesse sido observado em tanques, vasos de pressão, dutos e pontes, conforme relatos desde 1886 (DIETER, 1981).

A ocorrência de fratura frágil por clivagem é favorecida pela presença de um entalhe (concentrador de tensões), pelo estado triaxial de tensões (maior restrição à deformação), pela temperatura baixa e pela velocidade de carregamento elevada.

Os ensaios então desenvolvidos para a avaliação de susceptibilidade à fratura frágil levaram em conta estas condições, tendo sido testados corpos de prova com entalhe, solicitados por cargas de impacto.

2.4.1. ENSAIO DE IMPACTO

O ensaio Charpy é o ensaio de impacto mais comum para avaliar e qualificar a tenacidade ao impacto de um material. Este é padronizado pelo método E23 da ASTM. Neste ensaio o corpo de prova contém um entalhe e recebe o impacto de um martelo, como indicado na figura 2.4.2.

Neste ensaio o pêndulo possui inicialmente uma energia potencial, que é convertida em energia cinética (SOUZA, 1982). Ao deformar e fraturar o corpo de prova, o pêndulo cede energia, alcançando uma altura de fim de curso inferior à inicial. A diferença de energia potencial do pêndulo é a energia absorvida.

As máquinas de ensaio de impacto possuem um braço ligado ao pêndulo que, no seu movimento, desloca um ponteiro, de modo a indicar diretamente a energia absorvida, figura 2.4.2. Os pêndulos empregados podem ser do tipo C ou do

tipo U. O tipo C passa entre os pontos de apoio do corpo de prova e o tipo U envolve o suporte do corpo de prova que é golpeado pelo pêndulo.

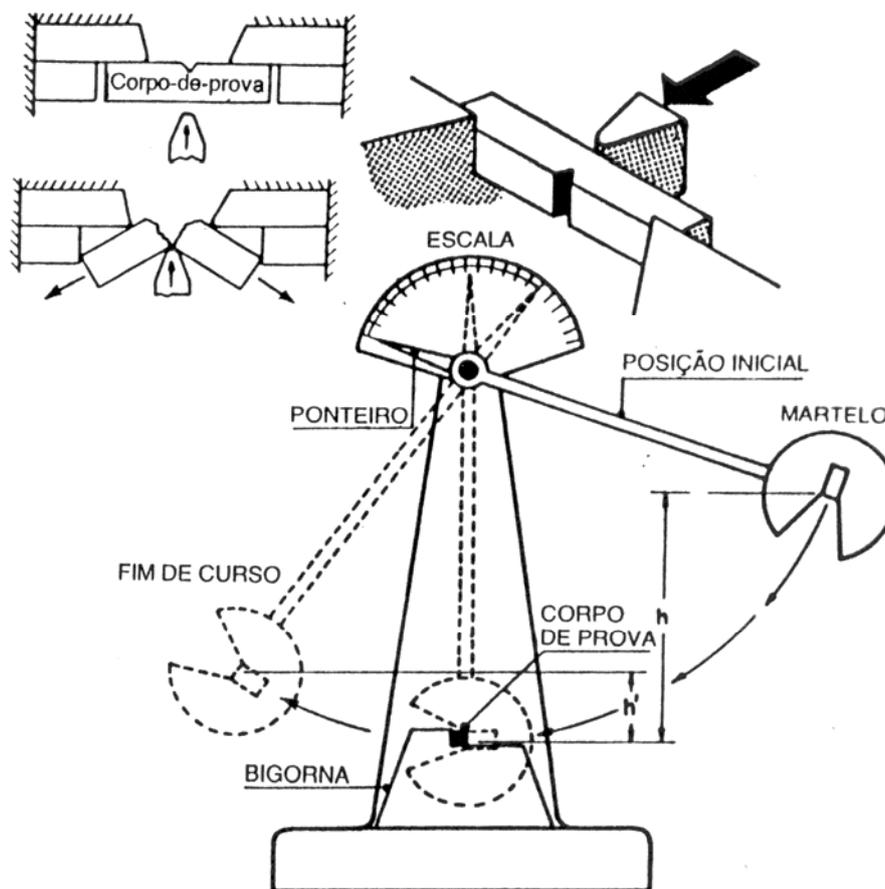


FIGURA 2.4.2 - Esquema de ensaio de impacto Charpy. O corpo de prova absorve na sua deformação na fratura a diferença de energia potencial do pêndulo, correspondente à variação da altura ($h-h'$) (ASM, 1990).

Os corpos de prova Charpy podem ser feitos em tamanhos reduzidos ou com entalhes, como o “buraco de chave” ou U invertido.

No ensaio Izod o impacto é aplicado com o corpo de prova na posição vertical. Neste ensaio as tensões do corpo de prova são diferentes, podendo o entalhe ser dispensado em materiais fundidos.

A figura 2.4.3 apresenta os tipos de corpos de prova empregados nos ensaios Charpy e Izod.

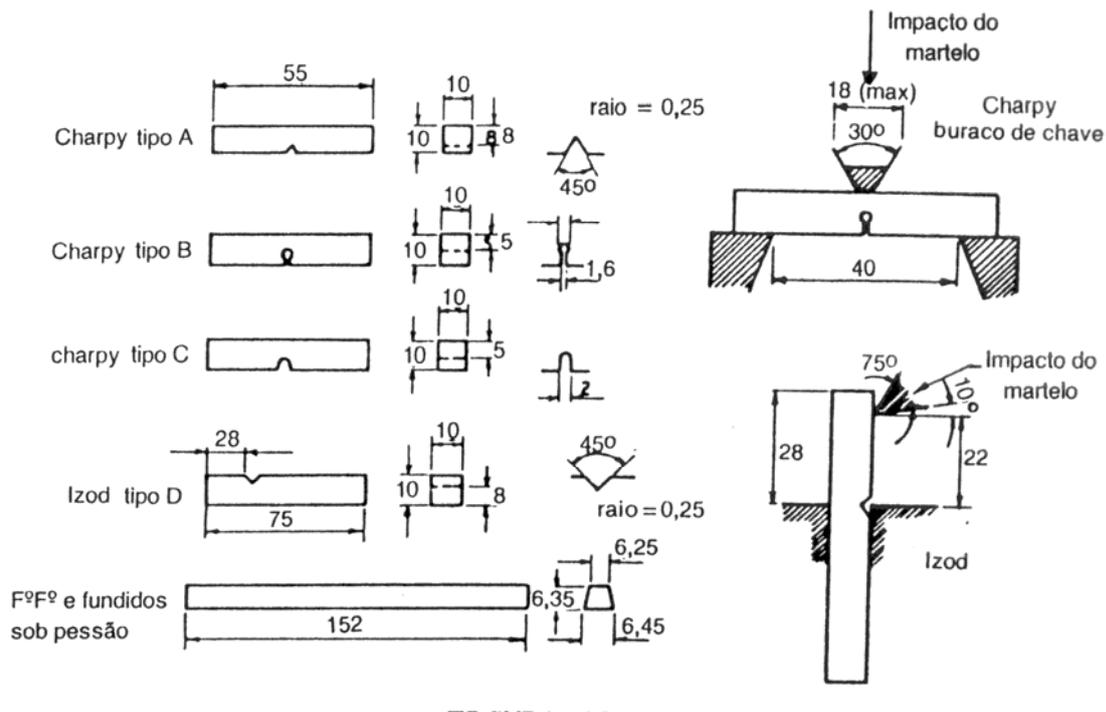


FIGURA 2.4.3 - Corpos de prova Charpy e Izod. (ASTM E23, 2007).

A fratura se propaga a partir do entalhe como clivagem (materiais frágeis) ou pelo coalescimento de microcavidades (fratura fibrosa em materiais dúcteis).

O crescimento do entalhe pela fratura fibrosa pode modificar o mecanismo de propagação para clivagem. No final da fratura, como a seção resistente é reduzida, ocorre a fratura por cisalhamento.

É usual avaliar-se na superfície fratura do corpo de prova a proporção entre as áreas fraturadas por clivagem e por rasgamento (fratura fibrosa) e cisalhamento.

Curvas como a da figura 2.4.4 são obtidas ensaiando-se um conjunto de corpos de prova do mesmo material em temperaturas diferentes.

Verifica-se de um modo geral, que a energia absorvida no impacto mantém-se elevada nos materiais de estrutura CFC, mesmo em baixas temperaturas. Materiais de estrutura CCC geralmente apresentam uma transição no comportamento dúctil para o comportamento frágil com a diminuição da temperatura. Materiais com limite de escoamento superior ao módulo de elasticidade dividido por 150 (aços de alta resistência, ligas de titânio e também ligas de

alumínio, mesmo CFC) apresentam menor energia acumulada, mesmo em temperaturas relativamente elevadas (DIETER, 1981). Algumas exceções a este comportamento genérico podem ocorrer.

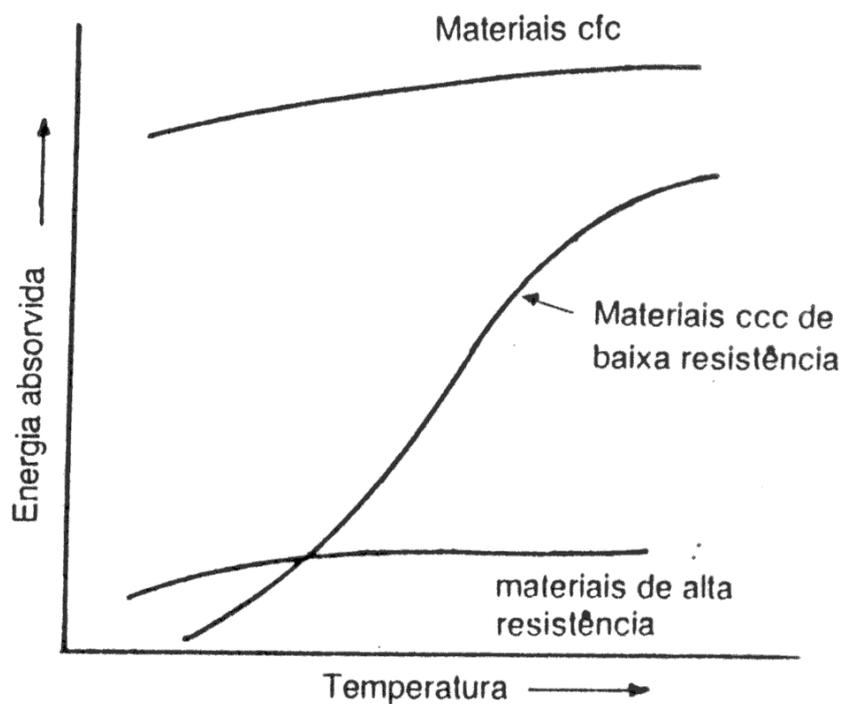


FIGURA 2.4.4 - Comportamento típico dos materiais em função da temperatura no ensaio de impacto (DIETER, 1981).

A transição no comportamento dúctil – frágil de materiais de estrutura ferrítica (CFC) pode ser avaliada por vários critérios, como indicado na figura 2.4.5. Estes critérios definem a temperatura de transição. Quanto menor for esta temperatura, maior será a tenacidade do material. O critério mais conservativo caracteriza a temperatura de transição como a menor temperatura, onde a fratura é 100% fibrosa (T1 na figura 2.4.5), denominada de “transição para fratura plástica”, FTP em inglês (fracture transition plastic).

Outro critério considera a temperatura T2 onde 50% da superfície da fratura ocorre por clivagem. Esta temperatura é chamada de “temperatura de transição de aparência da fratura”, FATT em inglês (fracture appearance transition temperature).

A temperatura T3 é a média entre as temperaturas dos patamares superior e inferior. A temperatura T4 corresponde a uma energia absorvida no ensaio de impacto igual a um valor especificado. Este critério é usualmente considerado nos códigos de projeto. No projeto de vasos de pressão, a energia absorvida especificada é função da resistência mecânica do aço empregado. T5 é a temperatura onde no ensaio de impacto Charpy, a fratura é essencialmente frágil. Esta temperatura é denominada de “temperatura de ductilidade nula”, NDT em inglês (nil ductility temperature).

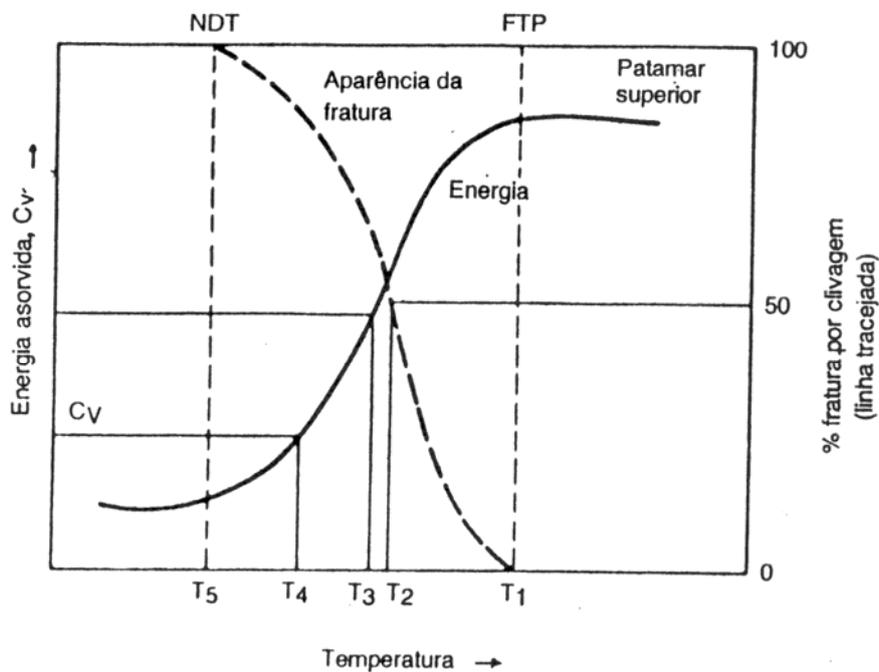


FIGURA 2.4.5 - Critérios utilizados para definição da temperatura de transição

(DIETER, 1981).

FTP – Completamente dúctil

FATT – 50% frágil

T3 – $(T1 + T5)/2$ – energia de impacto especificada

NDT – completamente frágil

2.4.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS DE IMPACTO

O valor da energia absorvida no ensaio de impacto Charpy é dependente da orientação do corpo de prova em relação a direção de laminação de uma chapa de aço, conforme na figura 2.4.6, devido ao formato e tamanho dos grãos laminados em cada direção. Isto ocorre devido ao alongamento preferencial de inclusões e regiões de segregação, segundo a direção de laminação.

Deste modo, a menos que seja expressamente recomendada outra forma, os ensaios de impacto são realizados com o entalhe na posição A da figura 2.4.6, onde o corpo de prova é retirado na direção longitudinal, paralela à direção da laminação. A aresta do entalhe é perpendicular à superfície da chapa. Quando se trata de um forjado a direção de ensaio é determinada na especificação do material.

Em normas de projeto pode-se utilizar adicionalmente o corpo de prova transversal, posição da figura 2.4.6. De qualquer modo, a posição do entalhe deve ser definida pois os valores podem ser muito diferentes, principalmente quando existe anisotropia microestrutural.

Além da energia absorvida, pode-se considerar também a expansão lateral do corpo de prova após a fratura. O valor da energia determinada pelo ensaio de impacto é útil na comparação entre materiais e critérios de projeto. Entretanto este valor não deve ser utilizado em cálculos de projeto, nem extrapolado para outras situações, pois se refere às condições particulares de solicitação mecânica e dimensões do corpo de prova e entalhe.

É importante que no preparo dos corpos de prova sejam seguidas rigorosamente as características especificadas para o entalhe, pois resultados diferentes podem ser obtidos com pequenas variações dimensionais.

O pequeno tamanho do corpo de prova Charpy favorece a dispersão dos resultados experimentais e também não apresenta uma restrição à deformação tão grande quanto em peças de maior espessura, e por isso nem sempre o

comportamento esperado no projeto pode ser representado pela propriedade medida no material.

Aumentando-se o tamanho do corpo de prova, a energia necessária para a fratura tenderá a ser maior se predominar a fratura dúctil, pois um volume maior de material irá se deformar. Se o comportamento for frágil, a maior restrição à deformação pela maior espessura, irá favorecer a fratura frágil e a energia absorvida poderá até mesmo ser menor. A correlação entre os tamanhos dos corpos de prova, temperatura de ensaio e energia absorvida não é geral. As normas adotam valores que são considerados válidos apenas para os materiais que nelas são considerados, em função de estudos realizados nestes casos específicos.

A temperatura de transição tende a ser mais elevada quanto maior for a espessura. Por este motivo, quando não for possível a obtenção de corpos de prova de seção 10 mm x 10 mm, as especificações adotam corpos de prova em tamanho reduzido, indicando outros requisitos para a temperatura em que deve ser conduzido o ensaio de impacto e para a energia absorvida.

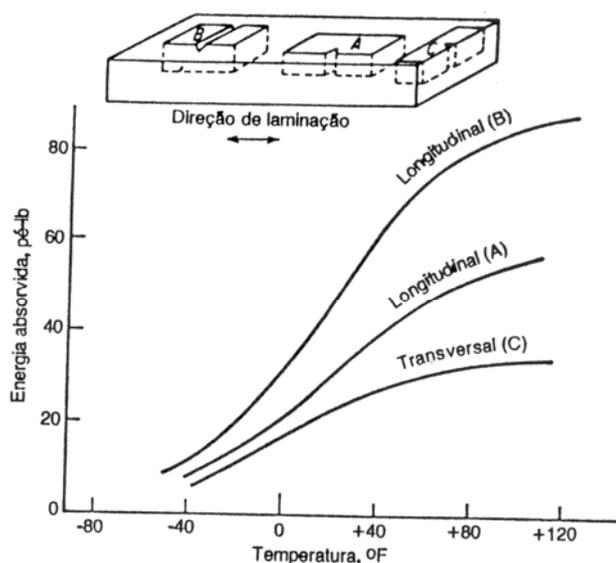


FIGURA 2.4.6 - Variação na energia absorvida nos ensaios de impacto com diferentes orientações (DIETER, 1981).

2.5. COMPORTAMENTO DE METAL E LIGAS METÁLICAS EM BAIXAS TEMPERATURAS

Os metais e ligas metálicas ao trabalharem na temperatura ambiente ou em temperaturas mais elevadas normalmente apresentam uma resistência à fratura relativamente elevada, o que se traduz, entre outras coisas, num elevado consumo de energia para levar à fratura. Em outras palavras, isso significa que uma elevada quantidade de energia deve ser fornecida ao componente ou estrutura para que a fratura ocorra.

Quando existem condições em que a temperatura de serviço é menor que a temperatura ambiente, certos metais e suas ligas podem absorver menos energia para sofrerem um processo de fratura, caracterizando, desse modo, um maior risco de falha dos mesmos, quando trabalhando em baixa temperatura.

A resistência que os metais e ligas metálicas apresentam à fratura é normalmente chamada de tenacidade à fratura, podendo ela ser medida de várias maneiras sendo a mais popular a medida da energia absorvida no processo de fratura, embora existam várias outras medidas de tenacidade. A propriedade de tenacidade ao impacto pode ser medida por ensaios de impacto, como mencionado anteriormente, mas nem sempre esta propriedade está diretamente relacionada ao comportamento, pois podem existir condições de projeto, como espessura e concentradores de tensão que causam efeitos fragilizantes em materiais cuja propriedade de resistência ao impacto é alta.

Quando os metais apresentam elevada resistência à fratura eles são ditos tenazes ou de elevada tenacidade à fratura. O oposto, quando os metais são poucos resistentes à fratura, caracteriza uma condição de baixa tenacidade à fratura, em cujo extremo situam-se os metais de comportamento frágil.

Ao comportamento tenaz normalmente está associado um modo de fratura característico, dúctil. O comportamento frágil, por outro lado, está normalmente associado à fratura por clivagem.

2.5.1. TRANSIÇÃO DÚCTIL – FRÁGIL

Os metais de estrutura ferrítica, CCC, podem apresentar comportamento tenaz ou frágil dependendo da temperatura em que eles forem submetidos a esforços elevados (que requeiram deformação). Além do efeito da temperatura são também importantes o estado de tensão, a velocidade de deformação e algumas variáveis metalúrgicas.

Desta forma existe um risco de utilizar materiais em temperaturas baixas, próximas à transição, pois existe a possibilidade dos mesmos virem a enfrentar condições de utilização que levem a um comportamento frágil. São apresentados a seguir os fatores que mais influenciam no comportamento de materiais que sofrem transição dúctil-frágil.

2.5.1.1. EFEITO DE CONCENTRADORES DE TENSÕES

Durante a fase de projeto e fabricação de plantas ou equipamentos de processos é importante atentar para regiões que podem agir como concentradores de tensões (EMYGDIO, 2007), principalmente devido ao possível estado de triaxialidade de tensões criado nas pontas dos concentradores, o que acarreta maior dificuldade de plastificação nessas regiões. Devido a esse fato, a presença de concentradores na forma de entalhes, marcas de usinagem, variações bruscas de diâmetros em eixos, etc., nos componentes ou estruturas, aumentam a possibilidade de um comportamento frágil.

Os concentradores fazem com que a tenacidade do componente seja reduzida, para uma dada temperatura de ensaio, mesmo com mecanismo de fratura dúctil. Acarretam também um acréscimo na temperatura de transição dúctil - frágil, fazendo que o risco de fratura catastrófica exista para temperaturas superiores

àquelas em que haveria tal risco se o componente não apresentasse esses concentradores de tensão. O efeito da presença de um concentrador de tensões na ductilidade de um aço que tem transição dúctil – frágil está apresentado esquematicamente na figura 2.5.1, ou seja os fatores que dificultam a deformação plástica nos metais e ligas metálicas tem um efeito de diminuir sua ductilidade e sua tenacidade à fratura. .

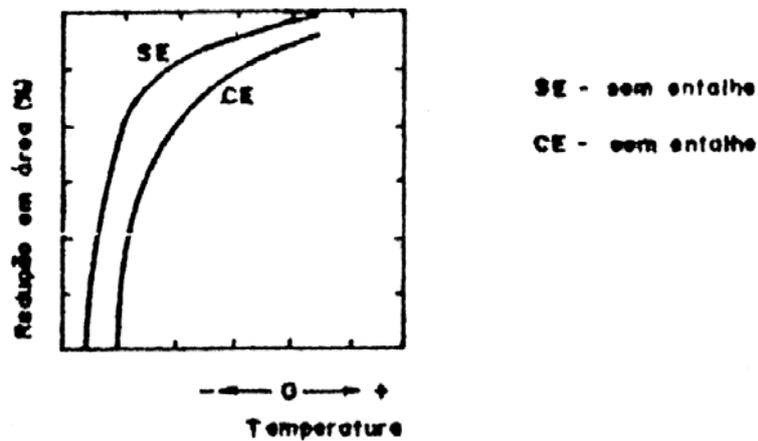


FIGURA 2.5.1 - Efeito de concentradores de tensões na ductilidade de metais que apresentam transição dúctil – frágil (ASM, 1990).

2.5.1.2. EFEITO DE VARIÁVEIS METALÚRGICAS NA TENACIDADE À FRATURA DOS METAIS

As principais variáveis metalúrgicas que influenciam na tenacidade à fratura dos metais são:

- estrutura cristalina
- tamanho de grão
- anisotropia dos microconstituintes
- composição química

2.5.1.2.1. ESTRUTURA CRISTALINA

Metais e ligas com estruturas CFC como o cobre, alumínio, níquel, aço inoxidável austenítico e outros não fraturam por clivagem, não apresentando portanto transição dúctil – frágil. Essas ligas são, conseqüentemente, as mais indicadas para condições criogênicas.

Os metais e ligas CCC como o ferro e aços ferríticos e HC como o titânio, zinco, zircônio e suas ligas podem fraturar por clivagem, apresentando a transição dúctil – frágil para combinações de baixas temperaturas, elevadas velocidades de deformação e concentradores de tensões. Essas ligas devem ser utilizadas levando-se em conta o risco que elas apresentam de fratura frágil, para certas condições críticas, levando eventualmente a situações de fratura catastrófica. Essas ligas evidentemente não devem ser utilizadas em temperaturas próximas e abaixo da TTDF (temperatura de transição dúctil-frágil).

2.5.1.2.2. TAMANHO DE GRÃO

Em aços ferríticos de baixo e médio carbono a temperatura de transição dúctil – frágil aumenta com o aumento do tamanho de grão da ferrita. Esse efeito fragilizante associado à granulometria grosseira pode ser atribuído à concentração de tensões nos finais das bandas de deslizamento, nos contornos de grão. Quanto maior for o tamanho de grão, maiores serão as bandas de deslizamento e maiores as concentrações de tensões. Essas concentrações de tensões elevadas induzem uma nucleação de microtrincas nos contornos de grão causando a fratura catastrófica prematura do material, por clivagem (DIETER, 1981).

Desse modo, é uma boa prática metalúrgica reduzir tanto quanto possível o tamanho de grão de aços de estrutura ferrítica ou ferrítico-perlítica (que sofrem transição de comportamento com a temperatura). Este refino pode ser realizado através de processos térmicos, mecânicos ou termo-mecânicos, resultando assim

em aços de elevada tenacidade à fratura e cujas tensões limite de escoamento também sejam mais elevadas pelo refino do grão.

Especificamente no caso de forjados de aço ao carbono, existem correlações específicas entre o tamanho de grão e a tenacidade onde, segundo CRD (2003), em aços ASTM A105 para a temperatura mínima de projeto de -29°C o tamanho de grão ASTM máximo deve ser de 8,1, baseado em um requisito mínimo de 27J em Charpy V.

Caso o forjado ASTM A105 não apresente este requisito mínimo para tamanho de grão, a principal recomendação para ter a confiabilidade de que este material não irá sofrer fratura catastrófica é a realização de tratamentos térmicos de normalização para refino de grão e consequente melhora nas propriedades em baixas temperaturas.

No caso deste estudo o material é um aço ASTM A350 grau LF2, especificado para uso onde as temperaturas de projeto são mais baixas do que a apresentada na relação de tamanho de grão x energia Charpy anterior, (na ordem de -46°C), porém teoricamente para aços ferríticos tem-se o mesmo princípio de refino de grão durante o tratamento térmico, fator que motiva o estudo do efeito do tratamento térmico no comportamento deste material em baixas temperaturas.

2.5.1.2.3. ANISTROPIA DOS MICROCONSTITUINTES

Os metais adquirem orientação preferencial ou direcionalidade em função da deformação preferencial e fibramento mecânico, promovido pelos tratamentos termo-mecânicos aplicado a diferentes produtos

Desse modo, os resultados de testes de avaliação de tenacidade à fratura e outras propriedades mecânicas de metais trabalhados mecanicamente variam com a orientação do corpo de prova em relação às direções do trabalho mecânico sofrido pelo componente. A anisotropia das propriedades é portanto uma consideração

importante no projeto, fabricação e análise de fraturas de componentes forjados, laminados ou extrudados. (DIETER, 1981).

Produtos laminados apresentam forte anisotropia devido à imposição de deformação preferencial em uma direção, com grandes variações de tenacidade em diferentes direções, como anteriormente apresentado na figura 2.4.6. No caso específico de forjados, como as taxas de deformação variam muito e existe deformação em várias direções, não existem correlações bem estabelecidas, sendo que diferentes processos de fabricação podem promover diferentes variações de energia Charpy V para as diferentes direções.

2.5.1.2.4. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química de um aço assim como sua microestrutura e histórico de fabricação afeta drasticamente tanto a temperatura de transição dúctil-frágil, quanto a energia absorvida em qualquer temperatura (patamar dúctil e patamar frágil), lembrando que todos os fatores são inter-relacionados de forma que não é simples mudar um fator sem influenciar os demais.

Os principais elementos que compõe um aço e que afetam a tenacidade de aços ao carbono e carbono manganês são:

- Carbono – é o elemento químico com maior capacidade de alterar a tenacidade, dureza e resistência. Com o aumento do teor de carbono, figura 2.5.2, a temperatura de transição dúctil-frágil é deslocada para temperaturas superiores e o patamar dúctil é levado para energias menores. Estes fatores são consequência de um aumento de resistência ou dureza. Para obtenção de maior tenacidade deve-se utilizar aços com menor teor de carbono.
- Manganês – para aços de baixo carbono o aumento do teor de Mn está associado a um refino microestrutural e natural deslocamento da temperatura de transição para temperaturas inferiores, com aumento da energia

absorvida no patamar dúctil, figura 2.5.3. Aços de mais alto teor de carbono não apresentam estes efeitos benéficos.

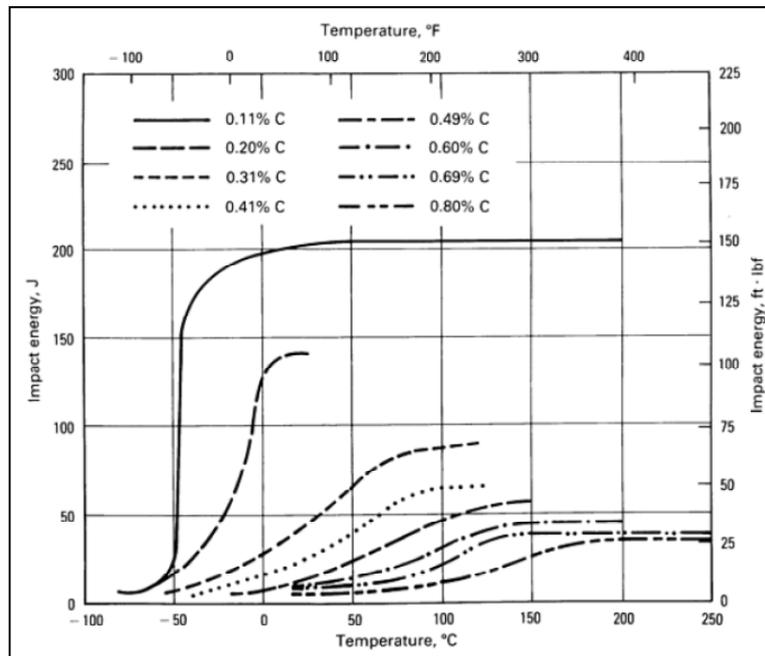


Figura 2.5.2 – Variação da energia absorvida em Charpy V com a temperatura para aços com diferentes teores de carbono (ASM, 1990).

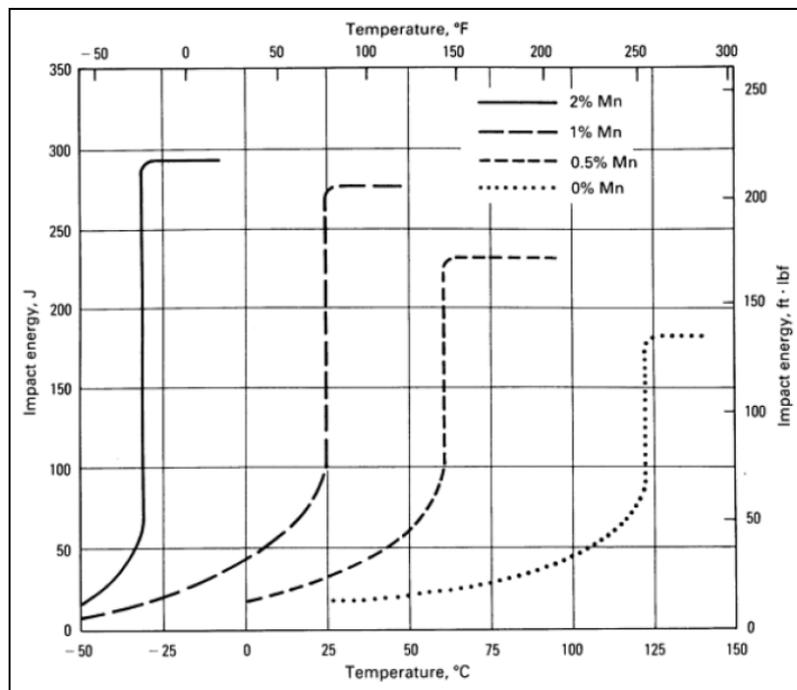


Figura 2.5.3 – Variação da energia absorvida em Charpy V com a temperatura para aços com diferentes teores de manganês. (ASM, 1990)

- Enxofre – a influência do enxofre está diretamente à formação de inclusões pode causar uma grande anisotropia levando a reduções de tenacidade na direção perpendicular a de laminação. Tratamentos para controle da forma de inclusões podem elevar a tenacidade de materiais conformados mecanicamente.
- Fósforo – reduz muito a tenacidade dos aços, sendo que a cada acréscimo de 0,01% de P tem-se um aumento de cerca de 7°C na temperatura de transição dúctil-frágil.
- Níquel – aumenta a tenacidade quando é especificado na liga, o que não ocorre para aços ao carbono ou C-Mn.
- Molibdênio – nas quantidades típicas de aços ao carbono e baixa liga (até 0,40%) eleva a temperatura de transição. O Mo é geralmente utilizado para aumento de dureza, o que influencia a tenacidade principalmente pelos efeitos microestruturais para o endurecimento.
- Cobre – em aços que não foram tratados termicamente para envelhecimento parece ter efeitos benéficos para a tenacidade em baixas temperaturas. Entretanto na faixa de revenimento (400 a 565°C) o cobre pode promover o endurecimento por precipitação, que tem efeitos adversos na tenacidade em baixas temperaturas.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Neste trabalho foram estudados três flanges de aço ao carbono de diferentes dimensões fabricados para atendimento à norma ASTM A350 grau LF2 classe 1, dos quais foram retiradas fatias que correspondem à direção longitudinal dos flanges, figuras 3.1.1.a a 3.1.3, para ensaios na condição como recebido (como fabricado) e em diferentes condições de tratamento térmico.

O material dos flanges na condição como recebido foi caracterizado através de análise química por espectroscopia de emissão ótica (após lixamento na seção transversal, centro), tabela 3.1.1 e ensaios mecânicos de tração, dureza e Charpy V, tabelas 3.1.2 a 3.1.4, além de análise metalográfica por microscopia ótica, figuras 3.1.4 a 3.1.7. Os procedimentos para estas análises estão descritos nos itens 3.2.2 a 3.2.5.

Os flanges foram identificados como CP01, diâmetro nominal (DN) de 12" (304,8 mm), CP02, DN 10" (254,0 mm) e CP03, DN 8" (203,2 mm).

A caracterização dos materiais dos flanges mostra que apesar de terem sido fabricados para atendimento à mesma norma, suas propriedades e microestrutura são muito diferentes. Nota-se basicamente que:

- Todos os componentes foram confeccionados em aço ao carbono com pequenas adições de Mn, Cr, Ni, Mo e Cu, elementos que favorecem o refino de grão em tratamentos térmicos como o de normalização.
- Todos os CPs apresentaram composição química compatível com os requisitos da norma ASTM A350 para o grau LF2. Quanto às propriedades mecânicas o CP02 apresentou energia absorvida em Charpy V inferior ao

requisito mínimo estabelecido pela norma. Os demais CPs atendem a todos os requisitos da norma.

- A realização de ensaios nas direções radial e axial indicados na figura 3.1.4 mostra que os materiais não apresentam anisotropia, ou seja, as propriedades mecânicas não variam significativamente entre a direção axial e a radial.
- Quanto as análises metalográficas os CPs 01 e 02 apresentam microestrutura com grãos de ferrita + perlita bem definidos e com tamanho de grão ASTM respectivamente de 10,0 e 8,2, condizente com as propriedades medidas nos ensaios mecânicos. Já o CP03 apresenta microestrutura bainítica refinada sem definição clara dos contornos de grão, também condizente com as propriedades de elevada resistência mecânica apresentadas por este CP.



Figura 3.1.1 – Aspecto como recebido do flange de 12” identificado como CP01

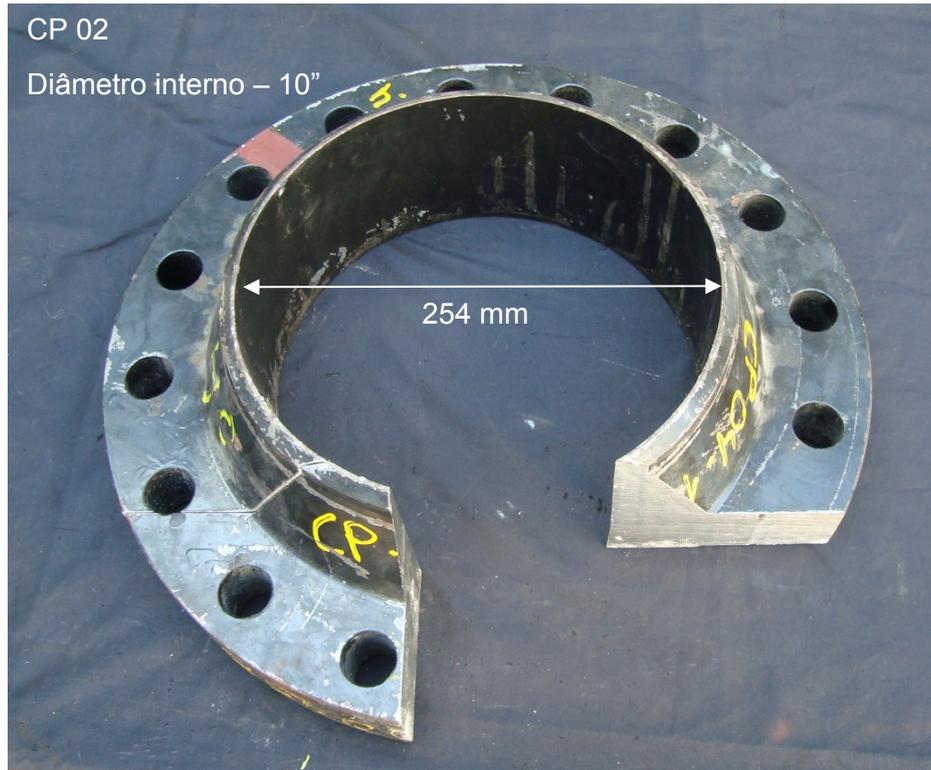


Figura 3.1.2 – Aspecto como recebido do flange de 10" identificado como CP02.



Figura 3.1.3 – Aspecto como recebido do flange de 8" identificado como CP03.

Tabela 3.1.1 – Análise química por espectroscopia de emissão ótica.

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
CP 01	0,21	0,18	1.14	0,008	0,012	0,14	0,19	0,06	0,24
CP 02	0,19	0,24	1,06	0,014	0,009	0,05	0,07	0,02	0,21
CP 03	0,19	0,19	1,14	0,015	0,016	0,07	0,08	0,02	0,23
<i>ASTM A350 grau LF2</i>	<i>0,30 máx.</i>	<i>0,15 a 0,30</i>	<i>0,60 a 1,35</i>	<i>0,035 máx.</i>	<i>0,040 máx.</i>	<i>0,30 máx.</i>	<i>0,40 máx.</i>	<i>0,12 máx.</i>	<i>0,40 máx.</i>

Tabela 3.1.2 – Ensaio de tração – conforme ASTM A370.

Material		Tensão limite de escoamento	Tensão limite de resistência	Alongamento	Redução de área
CP 01	Radial	340 MPa	534 MPa	22 %	68 %
	Axial	329 MPa	521 MPa	30 %	67 %
CP 02	Radial	426 MPa	516 MPa	24 %	62 %
	Axial	383 MPa	501 MPa	22 %	68 %
CP 03	Radial	387 MPa	553 MPa	26 %	70 %
	Axial	400 MPa	560 MPa	27 %	67%
<i>ASTM A350 grau LF2</i>		<i>250 MPa min.</i>	<i>485 a 655 MPa</i>	<i>22 % min.</i>	-

Tabela 3.1.3 – Ensaio de dureza VICKERS – 5 Kg .

Material	Medidas	Média
CP 01	139 – 142 – 147 – 139	142 HV5
CP 02	137 – 142 – 140 – 140	140 HV5
CP 03	192 – 185 – 176 – 188	185 HV5

Tabela 3.1.4 – Ensaio de Charpy V à -46°C .

Material		Medidas	Média
CP 01	Radial	54 – 64 -20	46 J
	Axial	64 – 29 – 59	51 J
CP 02	Radial	10 – 10 – 10	10 J
	Axial	10 – 15 – 10	11 J
CP 03	Radial	10 – 34 – 39	28 J
	Axial	34 – 27 – 47	36 J
<i>ASTM A350 grau LF2</i>		<i>Energia média mínima de 20 J para a classe 1.</i>	

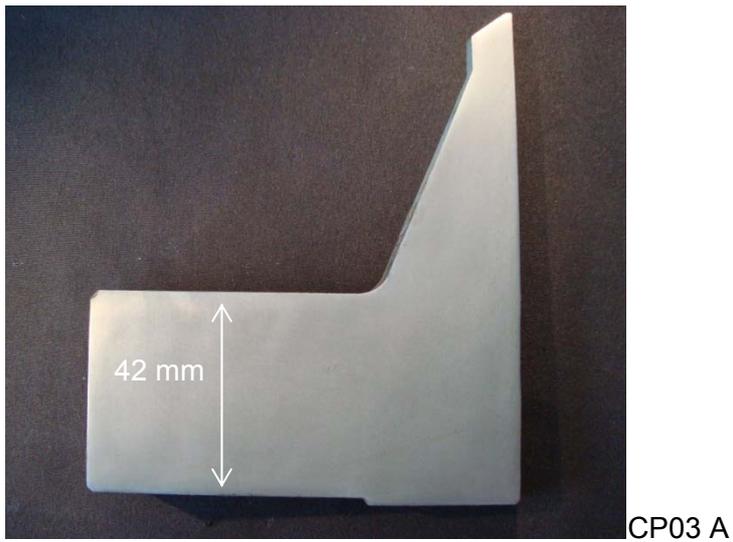
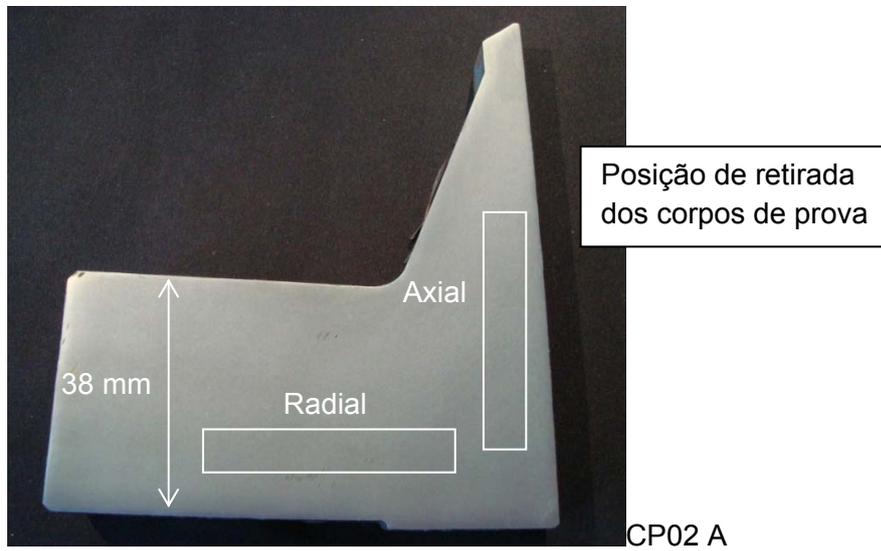
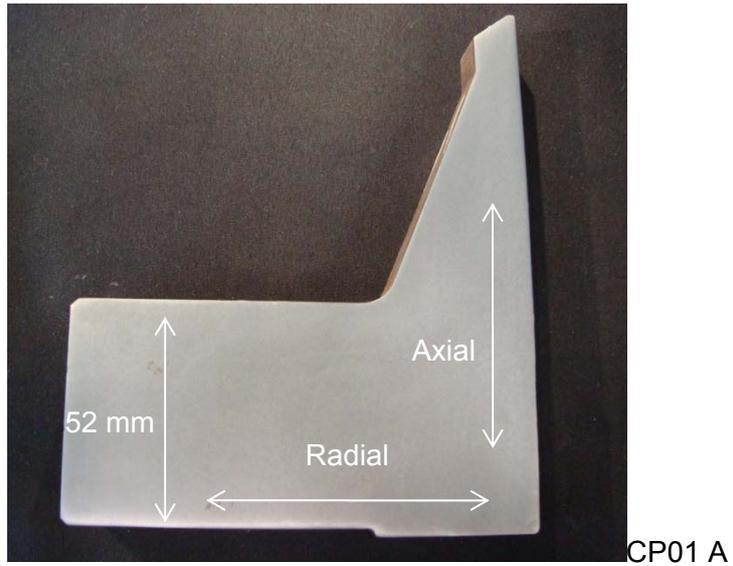
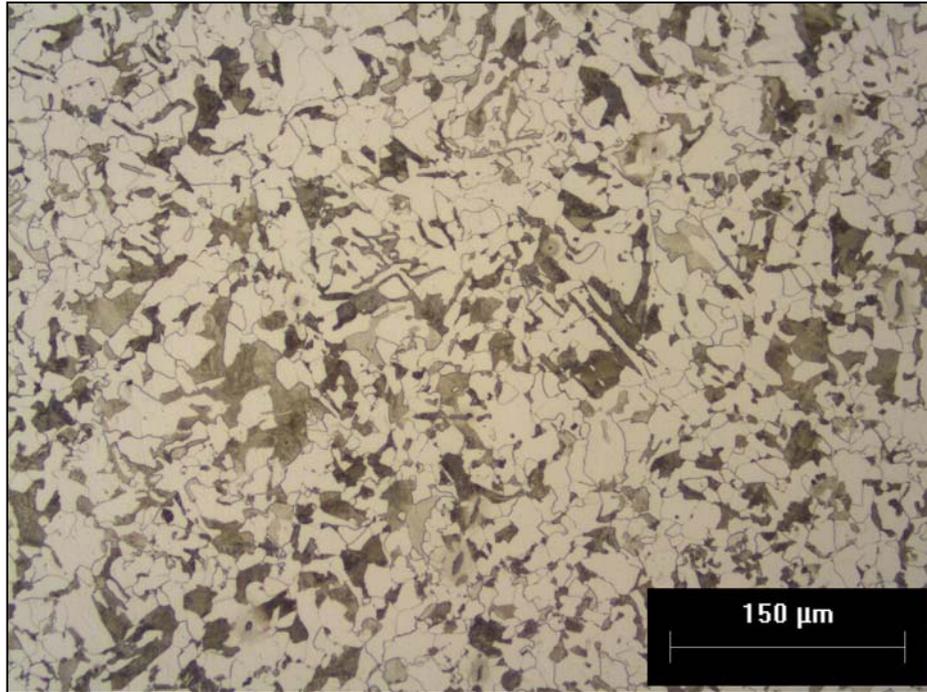
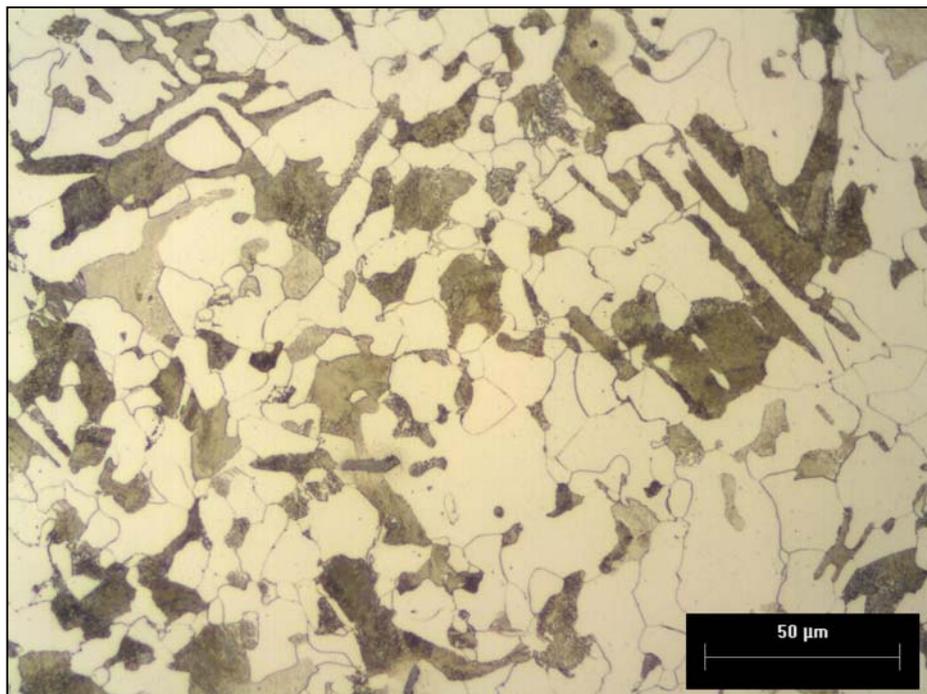


Figura 3.1.4 - Macrografia da seção longitudinal dos flanges CP01 A, CP02 A e CP03 A, indicando as direções radial e axial.



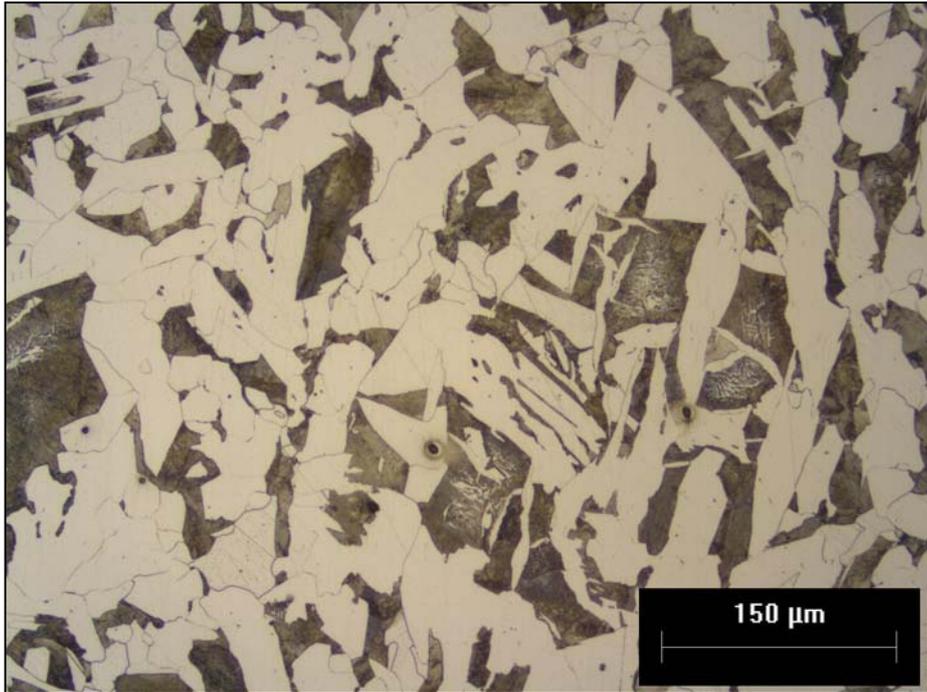
Aumento de 200x



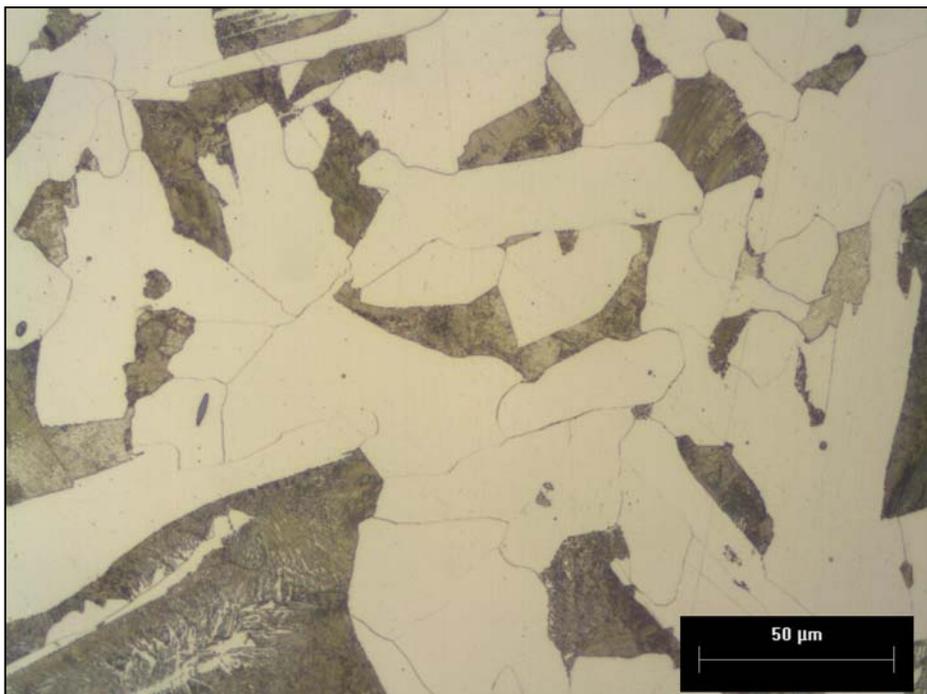
Aumento de 500x

Figura 3.1.5 – Aspecto metalográfico do CP01 na condição como recebida, mostrando microestrutura formada por ferrita + perlita com tamanho de grão

ASTM de 10,0. Ataque de Nital 2%



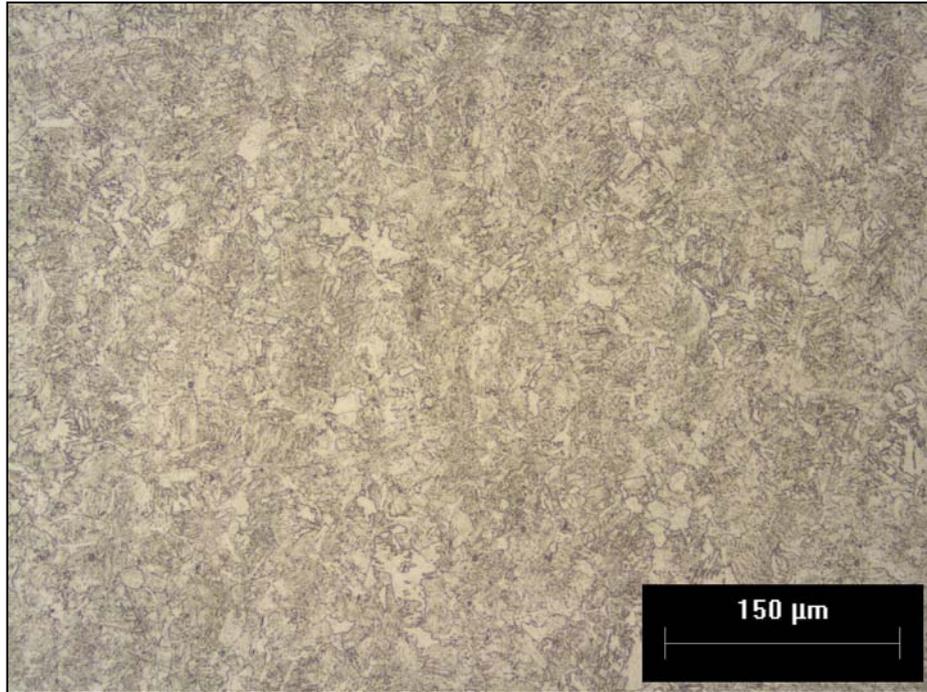
Aumento de 200 x



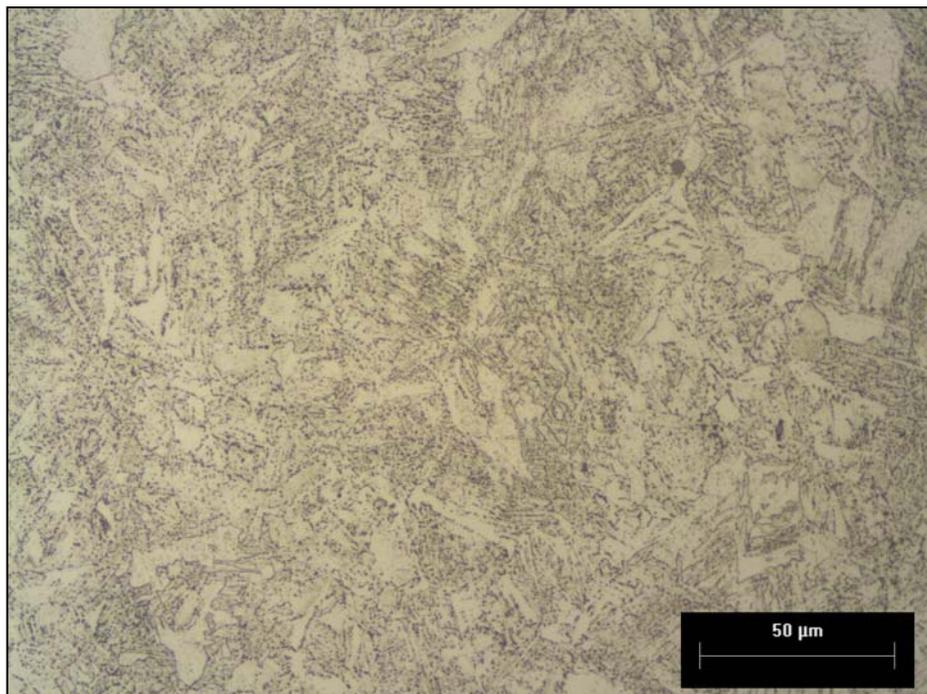
Aumento de 500 x

Figura 3.1.6 – Aspecto metalográfico do CP02 na condição como recebida, mostrando microestrutura formada por ferrita + perlita com tamanho de grão

ASTM de 8,2. Ataque de Nital 2%



Aumento de 200 x



Aumento de 500 x

Figura 3.1.7 – Aspecto metalográfico do CP03 na condição como recebida, mostrando microestrutura bainítica. Não foi possível medir o tamanho de grão

ASTM. Ataque de Nital 2%

3.2. METODOLOGIA

3.2.1. TRATAMENTOS TÉRMICOS

Para a realização dos tratamentos térmicos de refino e uniformização da estrutura (normalização e dupla normalização, respectivamente) foram utilizados fornos qualificados com variação máxima de temperaturas de 7°C entre pontos. As amostras (duas fatias de cada flange, equivalentes aquelas mostradas na figura 3.1.4) foram austenitizadas a 920°C com resfriamento em ar forçado (normalização). Depois uma fatia de cada flange sofreu nova normalização com ciclo similar (dupla normalização).

As figuras 3.2.1 e 3.2.2 apresentam os gráficos de T (temperatura) x t (tempo) para os dois ciclos impostos ao material dos flanges.

A tabela 3.2.1 apresenta um quadro resumo com as amostras e sua condição de tratamento térmico, sabendo-se que a identificação corresponde a:

- Amostras "A" - aquelas foram ensaiadas na condição como recebida;
- Amostras "B" - aquelas que sofreram tratamento térmico de normalização a 920°C + ou - 5°C por uma hora com controle de temperatura a partir de 300°C e taxa de aquecimento de até 150°C por hora e resfriamento com ar forçado até 250°C
- Amostras "C" - aquelas sofreram dois tratamentos térmicos, um primeiro de normalização a 920°C + ou - 5°C por uma hora e um segundo também de normalização a 920°C + ou - 5°C por uma hora, ambos com controle de temperatura a partir de 300°C e taxa de aquecimento de até 150°C por hora e resfriamento com ar forçado até 250°C.

Tabela 3.2.1 – Identificação das amostras em relação às dimensões e tratamentos.

Material do Flange	Como recebido	Normalizado	Duplo Normalizado
CP 01 (DN 12")	CP01A	CP01B	CP01C
CP 02 (DN 10")	CP02A	CP02B	CP02C
CP 03 (DN 8")	CP03A	CP03B	CP03C

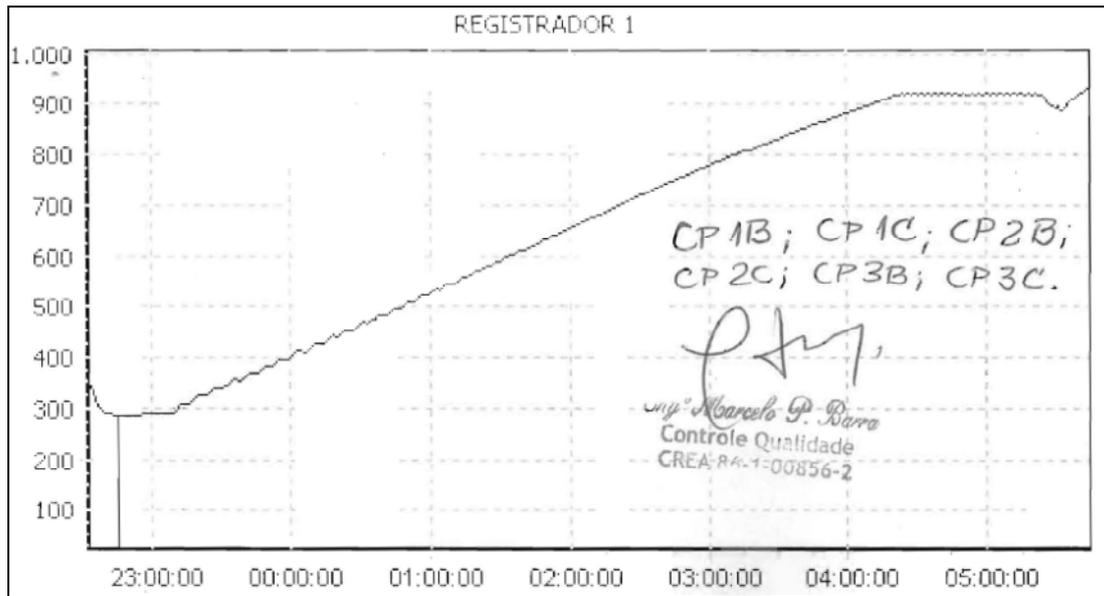


Figura 3.2.1 – Gráfico de temperatura versus tempo de tratamento para a normalização das amostras CP01B, CP01C, CP02B, CP02C, CP03B e CP03C.

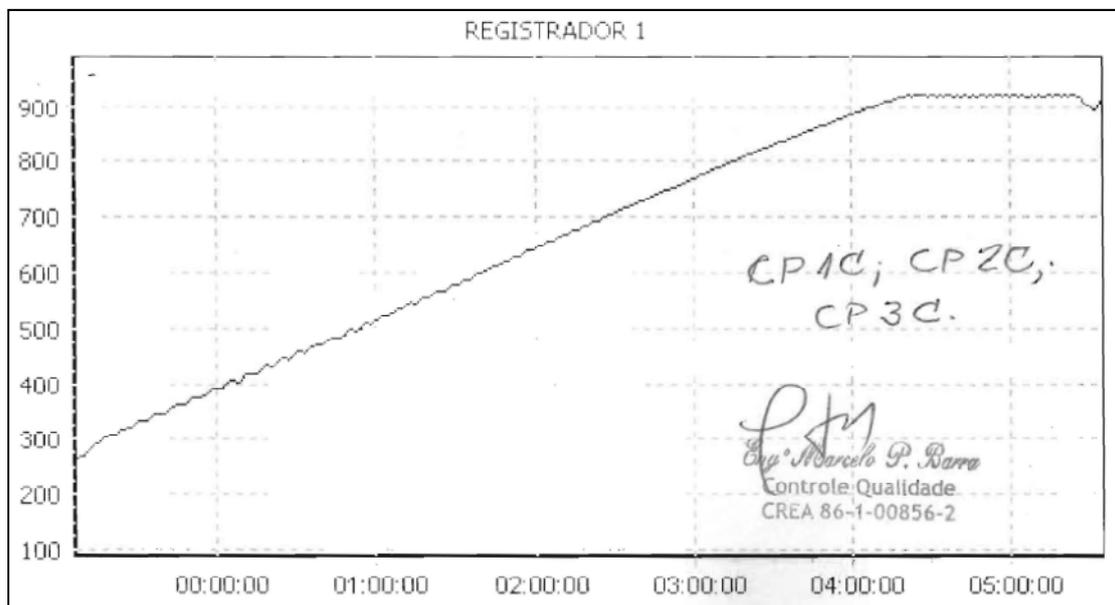


Figura 3.2.2 – Gráfico de temperatura versus tempo de tratamento para a segunda normalização das amostras CP01C, CP02C e CP03C.

3.2.2. METALOGRAFIA

As micrografias foram realizadas na seção longitudinal dos flanges, em regiões próximas ao local dos ensaios Charpy V, no pescoço dos flanges. A preparação metalográfica consistiu na sequência: lixamento por intermédio de lixa d'água grãos 80, 100, 220, 320, 400 e 600; seguido de polimento mecânico, onde se utilizam panos para polir e pasta de diamante industrial com granulometria de 15, 6, 3 e 1 μm . A figura 3.2.3 ilustra os equipamentos utilizados nesta preparação.

Após estas etapas as amostras foram submetidas a ataque químico por imersão em solução NITAL 2% (2 ml de ácido nítrico P.A. em 98 ml de álcool etílico) e observação em microscópio ótico. A figura 3.2.4 ilustra os equipamentos utilizados na análise microestrutural, onde o tamanho de grão ferrítico do material foi medido manualmente através de metalografia quantitativa, conforme ASTM E112 (2010), utilizando cinco campos com ampliação de 200x e análise em cinco linhas por campo.

Foi utilizado o método de análise pontual de interceptos por unidade de comprimento, com parâmetro NL para grãos equiaxiais orientados randomicamente. Cabe ressaltar que o parâmetro NL para estruturas contínuas é igual ao PL (VALERIANA, 1985).

Somente uma das amostras não pode ser medida através deste método, CP03A, pois sua microestrutura não era ferrítica, e sim bainítica.



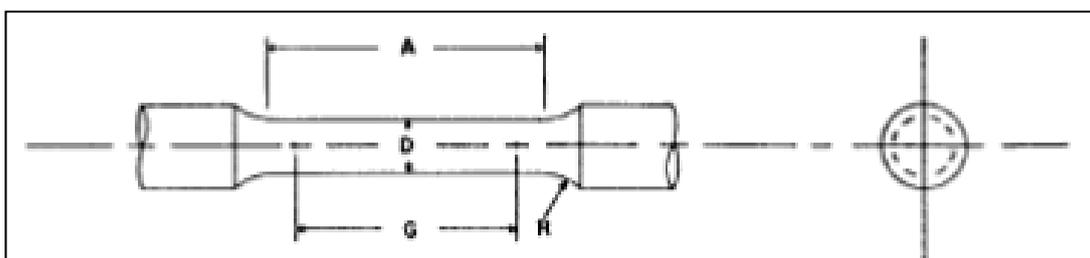
Figura 3.2.3 – Equipamentos de preparação metalográfica (lixamento e polimento).



Figura 3.2.4 – Equipamentos de análise microestrutural (microscopia ótica).

3.2.3. ENSAIOS DE TRAÇÃO

Foram realizados usinagem e ensaios de tração uniaxial, nas direções axial e radial dos CPs, a temperatura ambiente conforme norma ASTM A370 em máquina mecânica do tipo EMIC DL 20000. A figura 3.2.5 mostra o formato do corpo de prova de tração cilíndrico e identifica as dimensões utilizadas para levantamento da resistência mecânica, onde a tensão limite de escoamento levantada no ensaio corresponde a 0,2% de deformação plástica. A figura 3.2.6 mostra os equipamentos de ensaios mecânicos.



A	D	G	R
32 mm	25 mm	6,25	5 mm

Figura 3.2.5 – Formato e dimensões do corpo de prova de tração cilíndrico

conforme norma ASTM A370.



Figura 3.2.6 – Equipamentos de ensaio tração.

3.2.4.RESISTÊNCIA AO IMPACTO

A avaliação da resistência ao impacto dos flanges foi realizada através de ensaios de Charpy V (figura 3.2.8 mostra o equipamento de ensaio) utilizando 3 corpos de prova, de dimensões “standard”, para as condições: como recebida (A) e após tratamento térmico de normalização (B) e dupla normalização (C), retirados nas direções axial e radial dos flanges, com entalhe na espessura, conforme as normas ASTM A 370 e ASTM E 23 (figura 3.2.7).

Os corpos-de-prova foram mantidos na temperatura de ensaio (-46°C) imergindo-os em solução de álcool + gelo seco, por 10 minutos. O controle da temperatura foi realizado por intermédio de um termopar com sensor de imersão do tipo PT100, calibrado conforme a Rede Brasileira de Calibração (RBC). Imediatamente após os ensaios os corpos-de-prova foram secos com soprador industrial a fim de preservar as fraturas.

Os resultados dos ensaios Charpy V nas diferentes direções serviram para avaliar a anisotropia e os valores para as diferentes condições foram relacionados com os parâmetros metalográficos, de dureza e de resistência mecânica, além da influência do tratamento térmico na variação da tenacidade ao impacto

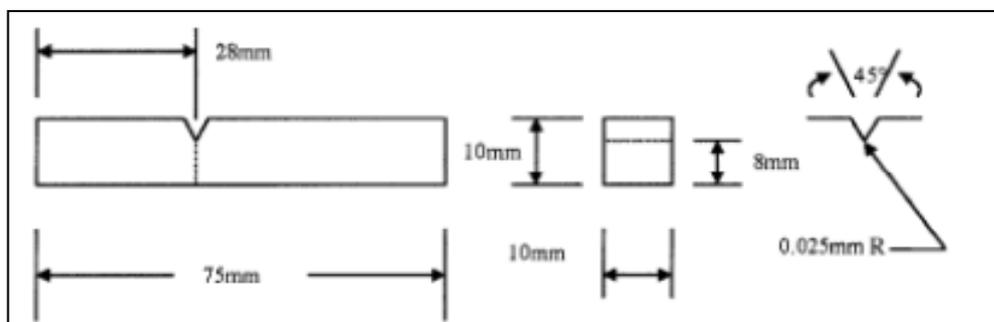


Figura 3.2.7 – Dimensões “standard” dos corpos de prova Charpy V (ASTM E23, 2007).



Figura 3.2.8 – Equipamentos de ensaio Charpy V.

3.2.5. ENSAIOS DE DUREZA VICKERS

Foram realizadas medidas de dureza Vickers com carga de 5 Kg (HV5), utilizando durômetro HVS10 – TIME (figura 3.2.9), em cada uma das amostras. Os valores foram medidos na seção longitudinal (4 pontos por amostra), no centro da espessura (região onde foram realizados os ensaios de Charpy V).



Figura 3.2.9 – Equipamentos de ensaio dureza Vickers

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1. PROPRIEDADES E MICROESTRUTURAS

Os resultados obtidos em ensaios de tração, dureza e Charpy V dos flanges nas diferentes condições de tratamento térmico: como recebido (como fabricado), normalizado e com dupla normalização, estão apresentados nas tabelas 4.1.1 e 4.1.2, nesta última estão apresentados também os valores medidos de tamanho de grão ferrítico.

As figuras 4.1.1 a 4.1.3 apresentam micrografias da seção longitudinal dos flanges, na condição como recebida e tratamentos térmicos impostos ao material.

Tabela 4.1.1- Apresentação dos resultados dos ensaios de tração e tamanho de grão para as diferentes condições de tratamento térmico.

CP	Tratamento Térmico	LE (MPa)		LR (MPa)		Tamanho de grão	
		Axial	Radial	Axial	Radial	ASTM	(μm)
01A	CR	329	340	521	534	10,0	11,2
01B	Normalização	341	336	532	534	10,7	8,8
01C	Dupla Normalização	358	345	559	538	10,6	9,1
02A	CR	383	426	501	516	8,2	21,0
02B	Normalização	341	350	516	524	10,6	9,1
02C	Dupla Normalização	342	340	505	519	10,4	9,8
03A	CR	400	387	560	553	-	-
03B	Normalização	325	338	530	542	9,8	11,9
03C	Dupla Normalização	332	337	531	536	10,1	10,9

Tabela 4.1.2- Apresentação dos resultados dos ensaios de dureza e Charpy V para as diferentes condições de tratamento térmico.

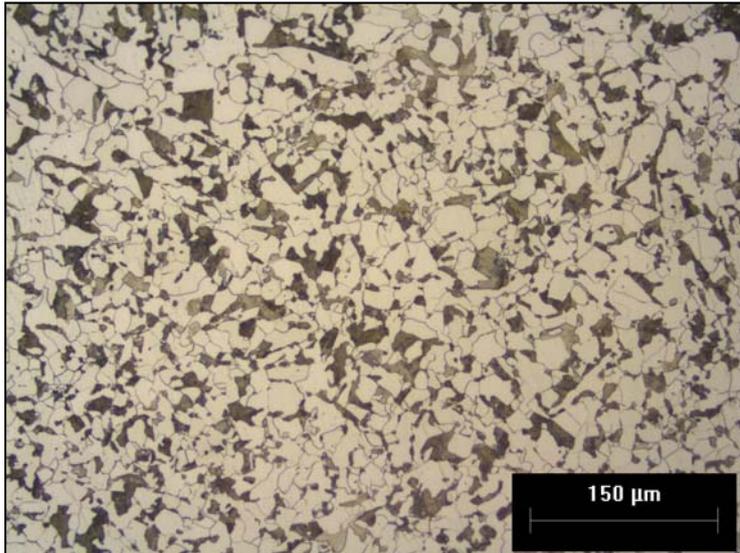
CP	Dureza (HV5)		Energia Charpy V (J) (-46°C)			
	Medidas	Média	Axial		Radial	
1A	139; 142; 147; 139;	142	64 - 29 - 59	51	54 - 64 - 20	46
1B	151; 153; 154; 154;	153	64 - 64 - 78	69	74 - 44 - 37	52
1C	152; 151; 154; 159;	154	44 - 54 - 59	52	72 - 83 - 69	75
2A	137; 142; 140; 140;	140	10 - 15 - 10	11	10 - 10 - 10	10
2B	148; 144; 147; 144;	146	54 - 69 - 108	77	93 - 118 - 98	103
2C	148; 144; 145; 145;	146	78 - 39 - 69	62	74 - 139 - 20	78
3A	192; 185; 176; 188;	185	34 - 27 - 47	36	10 - 34 - 39	28
3B	148; 150; 147; 146;	148	24 - 18 - 8	16	18 - 27 - 13	19
3C	147; 149; 149; 149;	149	20 - 15 - 14	16	13 - 18 - 16	15

Verifica-se que os flanges na condição como recebida variam de microestrutura, apesar de todos terem sido fabricados segundo a mesma especificação, ASTM A350 grau LF2. O flange de 12", CP01, apresenta microestrutura ferrítico-perlítica com tamanho de grão ASTM 10 que corresponde a uma granulometria refinada, na ordem de 11,2 microns. O flange de 10", CP02, apresenta microestrutura ferrítico-perlítica com regiões de ferrita Widmanstätten (acicular) e tamanho de grão mais grosseiro, ASTM 8,2. O flange de 8", CP03, apresenta microestrutura bainítica sem definição clara dos contornos de grão, impedindo a medição segundo a ASTM E112. Estas características mostram que não existe relação direta da microestrutura com as dimensões dos componentes, sendo provavelmente originadas pelas rotas dos processo de fabricação.

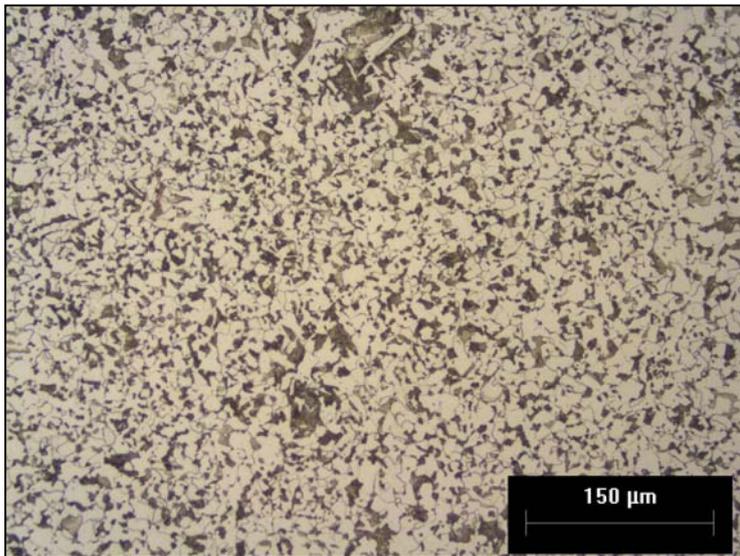
Estas constatações são explicáveis pelas microestruturas, conforme segue:

- Para o flange de 12”, figura 4.1.1, cuja microestrutura original era ferrítico-perlítica com granulometria fina, CP01A, o tratamento de normalização causou leve refino, além de melhorar a uniformidade, e a dupla normalização não apresentou efeitos adicionais à normalização, ou seja a estrutura do CP01B é similar à do CP01C;
- Para o flange de 10”, figura 4.1.2, cuja microestrutura original também era ferrítico-perlítica porém mais acicular e grosseira, CP02A, o tratamento de normalização causou grande refino e promoveu a formação de estruturas menos aciculares, e a dupla normalização não apresentou efeitos adicionais à normalização, ou seja a estrutura do CP02B é similar à do CP02C, como no CP01;
- Para o flange de 8”, figura 4.1.3, cuja microestrutura original era bainítica, CP03A, o tratamento de normalização causou a transformação da estrutura acicular em estruturas equiaxiais ferrítico-perlíticas, o que seria equivalente a um aumento no tamanho de grão, sem também ter qualquer alteração adicional na dupla normalização, CP03B e CP03C.

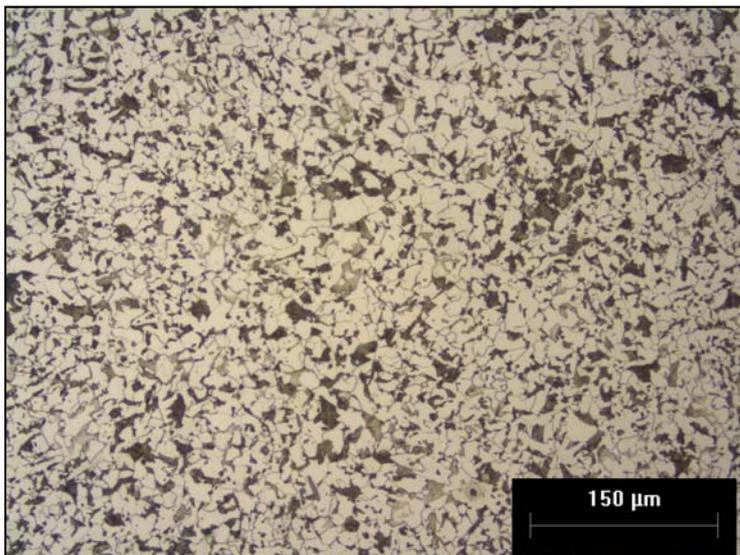
A figura 4.1.4 ilustra graficamente os efeitos mencionados acima dos tratamentos térmicos em relação ao tamanho de grão, mostrando não haver efeitos significativos dos tratamentos térmicos de dupla normalização sobre a microestrutura dos materiais.



CP01 A – Como Recebido



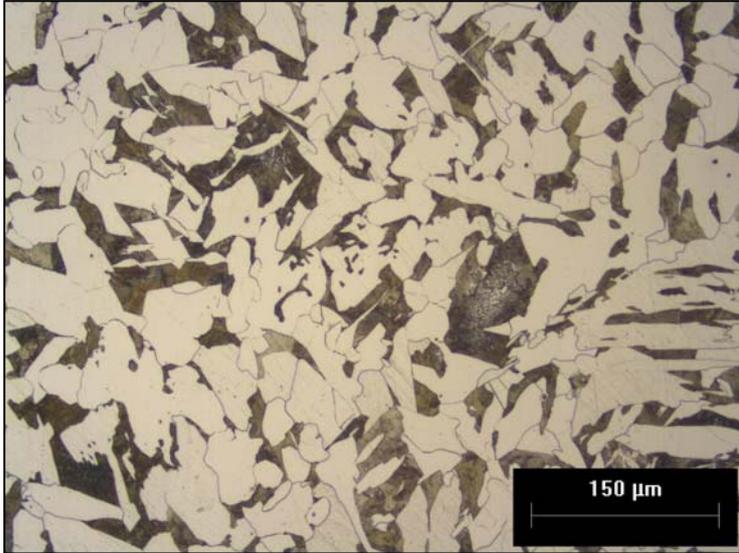
CP01 B - Normalizado



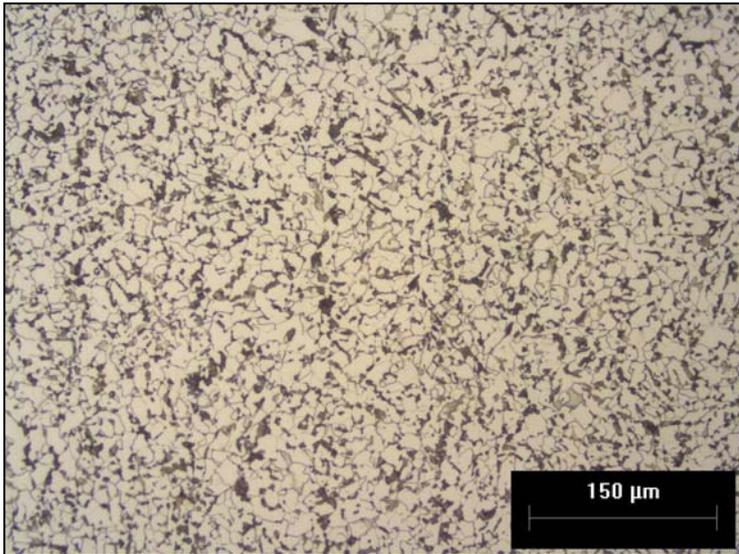
CP01 C – Dupla Normalização

Figura 4.1.1 – Evolução da microestrutura do CP01 com os tratamentos térmicos

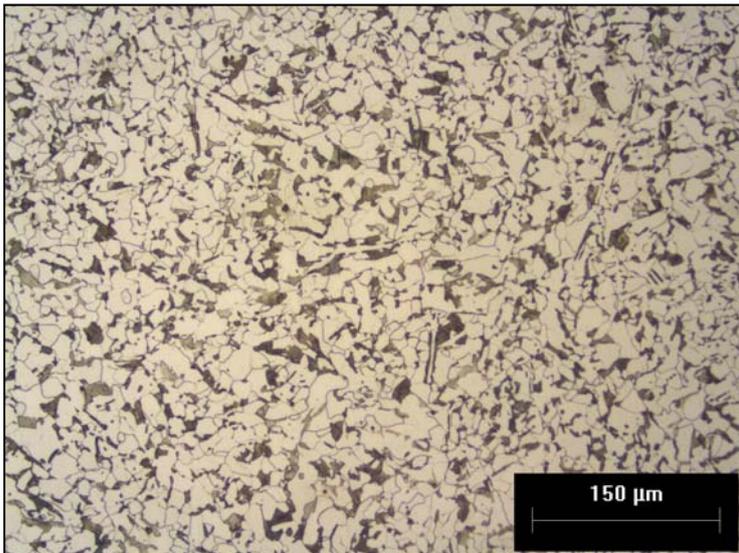
aplicados. Ataque Nital 2%



CP02 A – Como Recebido



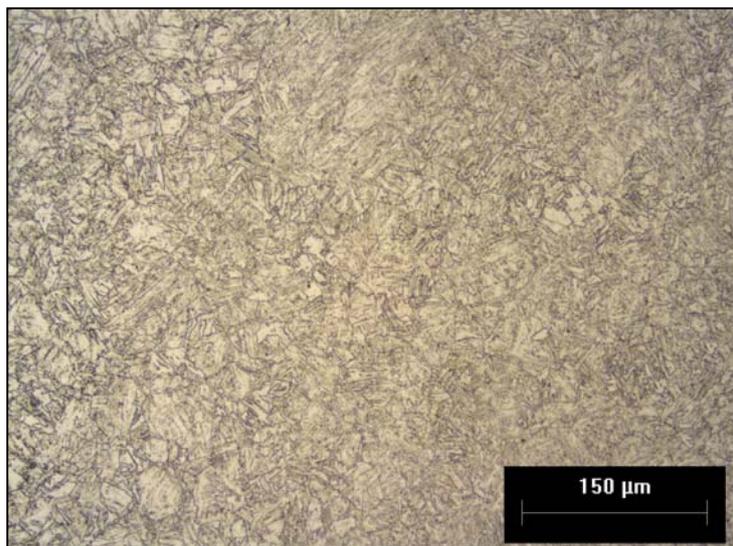
CP02 B - Normalizado



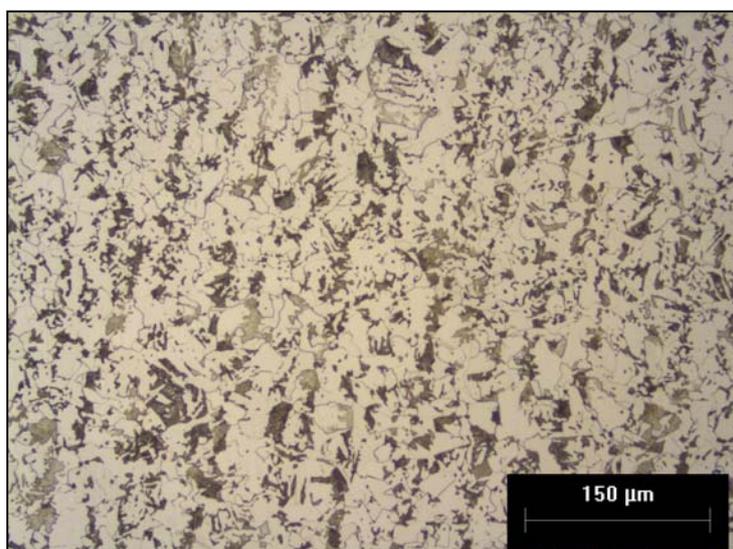
CP02 C – Dupla Normalização

Figura 4.1.2 – Evolução da microestrutura do CP02 com os tratamentos térmicos

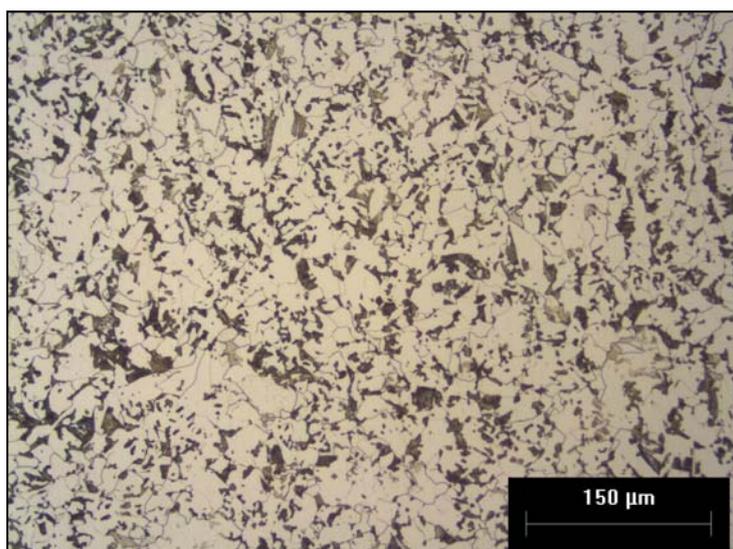
aplicados. Ataque Nital 2%



CP03 A – Como Recebido



CP03 B – Normalizado



CP03 C – Dupla Normalização

Figura 4.1.3 – Evolução da microestrutura do CP03 com os tratamentos térmicos

aplicados. Ataque Nital 2%

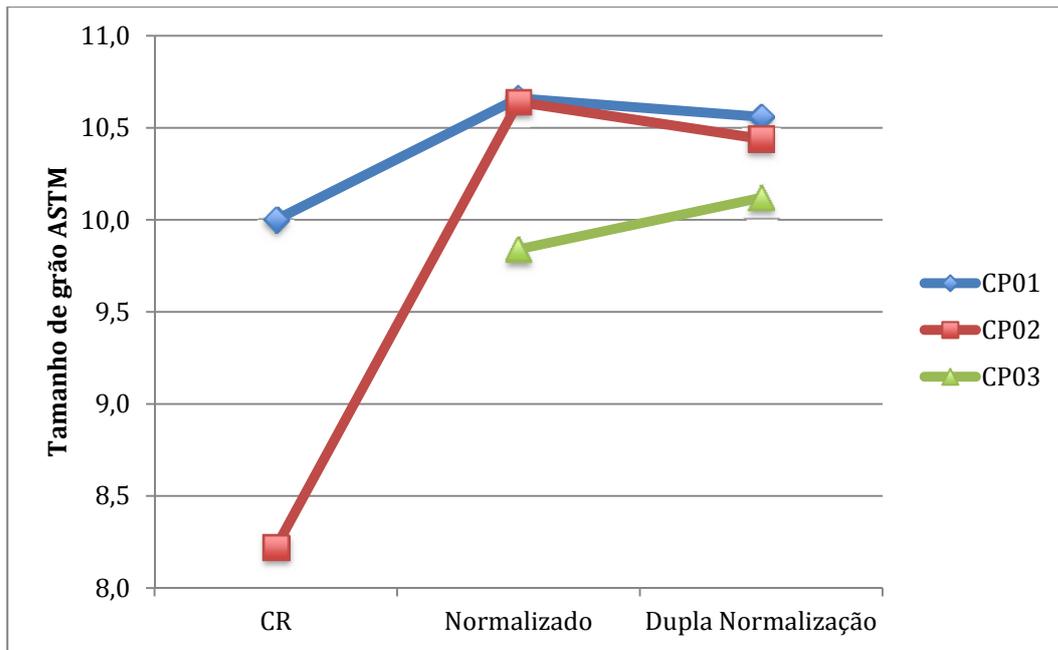


Figura 4.1.4 – Gráfico de tamanho de grão ASTM versus tratamento térmico.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO

5.1 ANISOTROPIA DE PROPRIEDADES

Verifica-se através dos diagramas das figuras e 5.1.1 a 5.1.3 que os materiais originais, na condição CR, não apresentam uma grande anisotropia, ou seja, as propriedades mecânicas não variam de forma significativa entre as direções axial e radial, como seria esperado para forjados. Os resultados de Charpy apresentaram grande dispersão nos CPs 01 e 03, tanto na direção axial quanto na radial, o que está associado provavelmente à proximidade da temperatura de transição dúctil frágil. Já o CP02 não apresentou a mesma dispersão por se encontrar no patamar frágil da curva de transição.

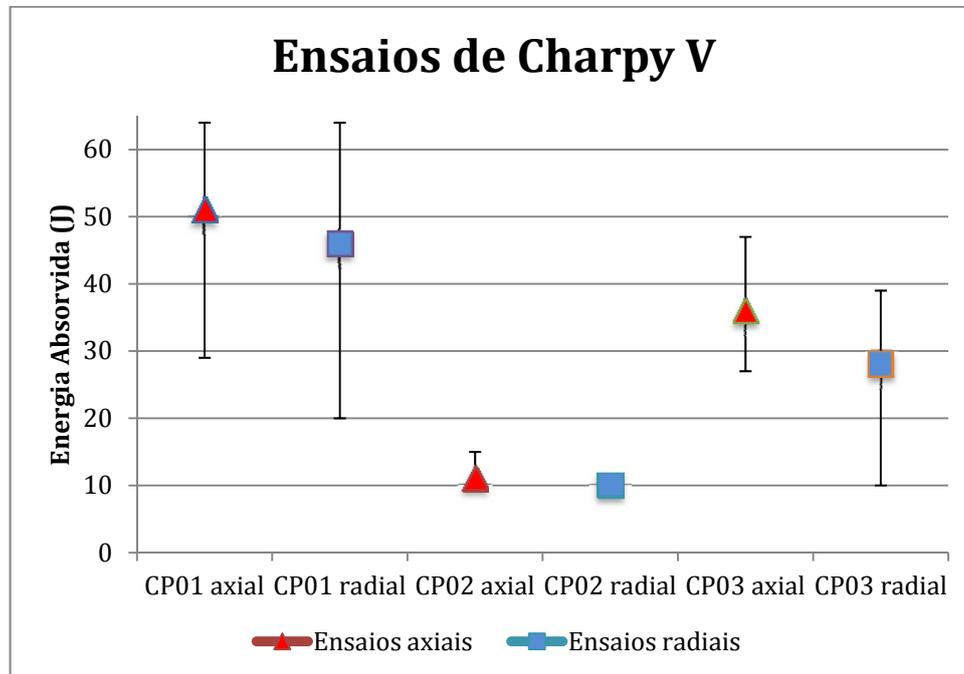


Figura 5.1.1 – Diagrama com os resultados dos ensaios de Charpy V nas direções axial e radial para os três flanges na condição como recebido.

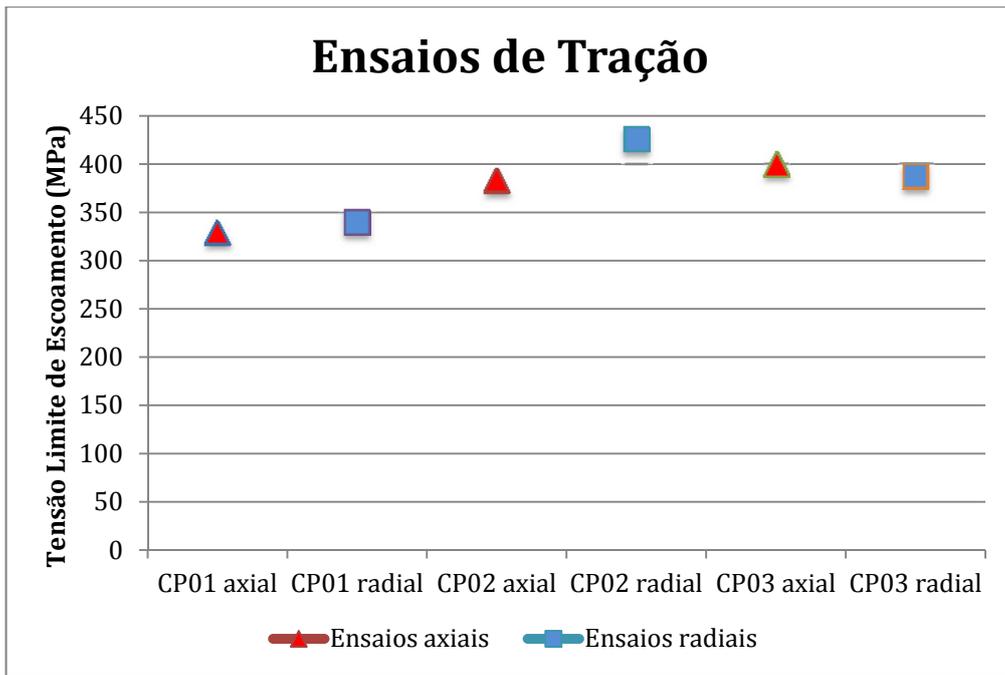


Figura 5.1.2 – Diagrama com os resultados dos ensaios de tração nas direções axial e radial para os três flanges na condição como recebido.

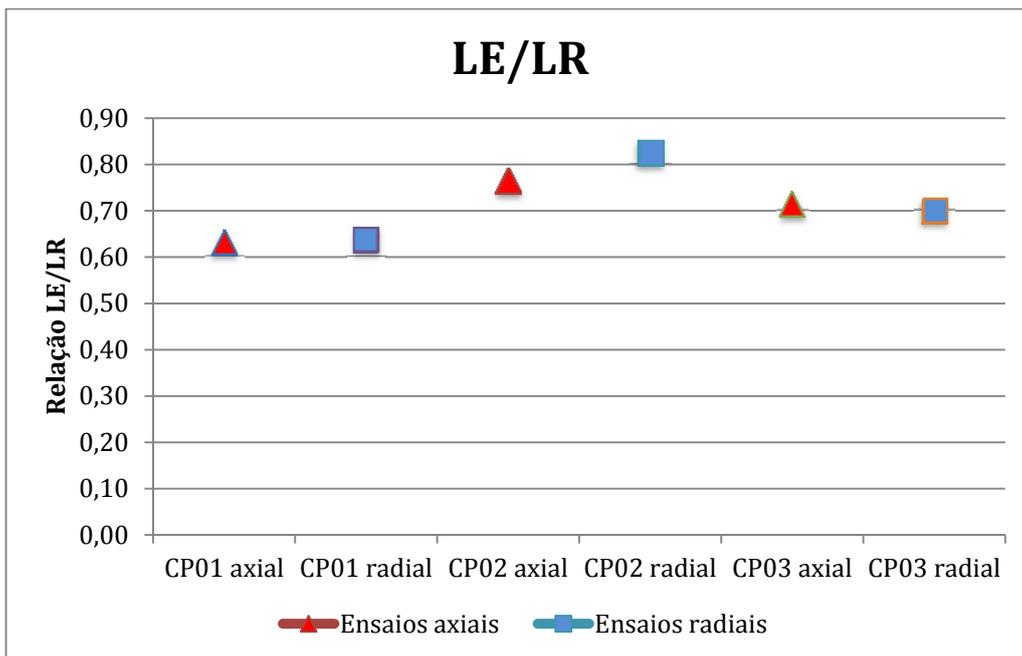


Figura 5.1.3 – Diagrama com os resultados da relação LE/LR obtidos nos ensaios tração nas direções axial e radial para os três flanges na condição como recebido.

5.2 EFEITO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA RESISTÊNCIA MECÂNICA E NA DUREZA

Os gráficos das figuras 5.2.1 e 5.2.2 mostram que os flanges CP02 e CP03 apresentaram redução na tensão limite de escoamento após o primeiro ciclo de normalização e esta se manteve praticamente nos mesmos níveis após o segundo ciclo de normalização. Um modo de entender este comportamento é analisando as microestruturas das figuras 4.1.2 e 4.1.3, onde se verifica que o alto limite de escoamento do CP02A está associado a uma microestrutura acicular, embora grosseira. Para este tipo de estrutura a normalização promove grande refino, o que tenderia a aumentar o LE, porém a formação de estruturas menos aciculares diminui a barreira para a movimentação de discordâncias, fazendo com que o LE decresça. A dupla normalização por sua vez não apresenta efeitos adicionais à microestrutura, ou seja o LE do CP02B é similar ao do CP02C, pois a temperatura de austenitização da normalização foi igual, com provável tamanho de grão austenítico similar.

Para o CP03A o maior LE, na condição como recebido, está associado com sua microestrutura bainítica que apresenta uma maior restrição à movimentação de discordâncias e causa este efeito de alto limite elástico (e alto LE/LR). Ao realizar-se o ciclo de normalização esta microestrutura é totalmente transformada para uma estrutura ferrítico-perlítica, aumentando o livre caminho médio das discordâncias e causando a diminuição do LE. Durante o segundo ciclo de normalização também neste caso não existem grandes alterações microestruturais e por isso o LE apenas se mantém.

O flange de 12", CP01, cujas propriedades também estão apresentadas nas figuras 5.2.1 e 5.2.2, ao contrário dos mencionados anteriormente, apresentou aumento do limite de escoamento com a normalização e dupla normalização, o que é explicado pelo leve refino de grão causado pelo tratamento (figura 4.1.2).

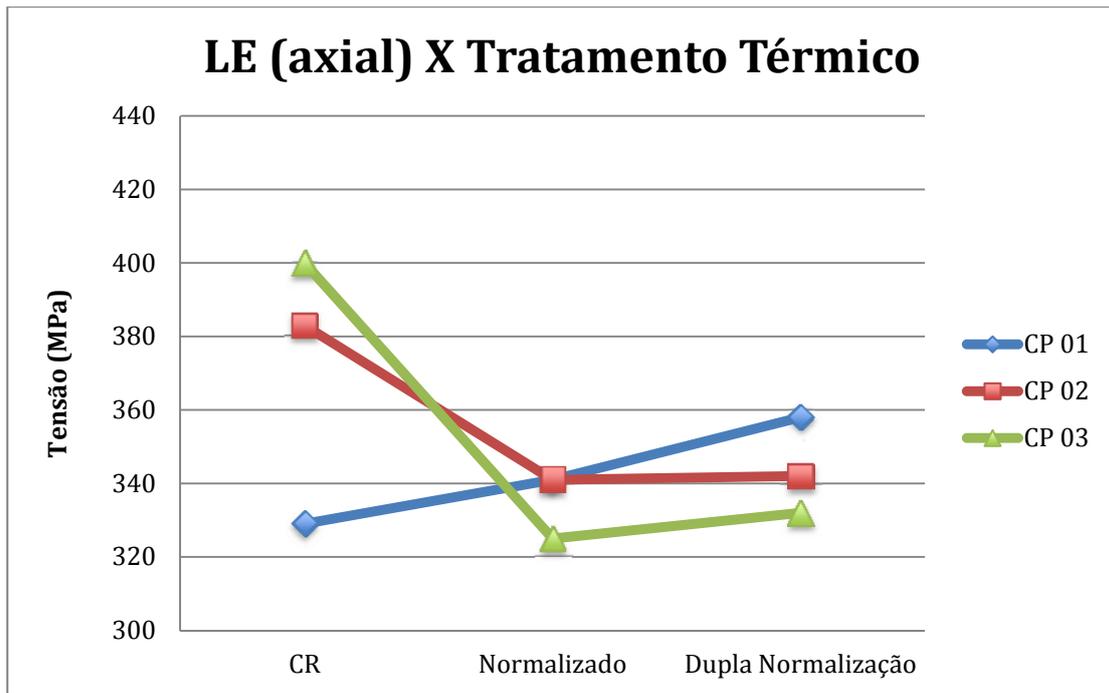


Figura 5.2.1 – Gráfico de tensão limite de escoamento (axial) versus tratamento térmico, para todos os CPs.

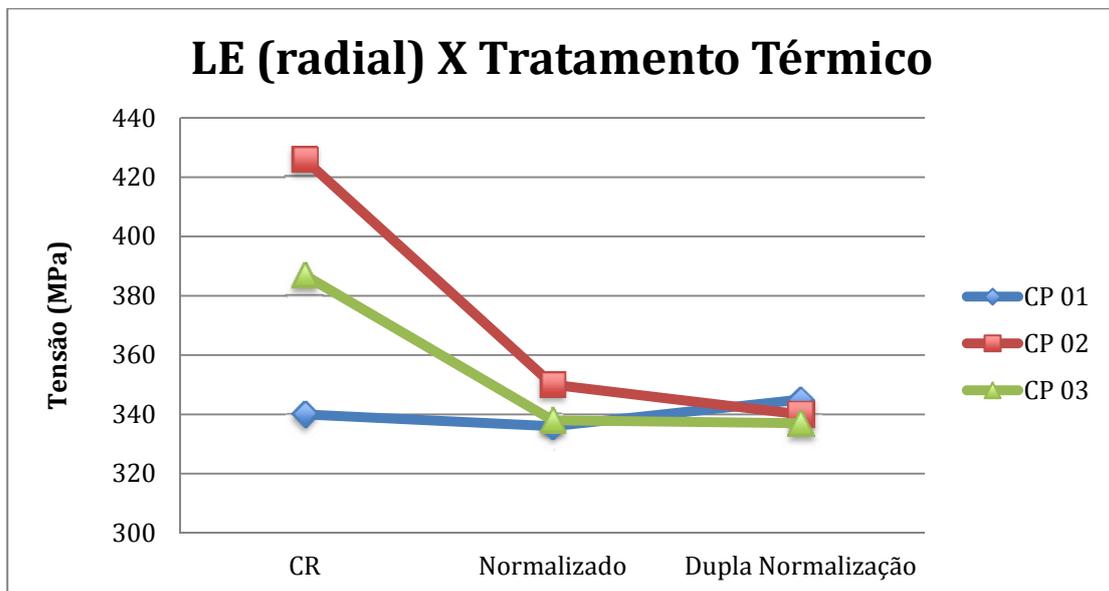


Figura 5.2.2 – Gráfico de tensão limite de escoamento (radial) versus tratamento térmico, para todos os CPs.

A razão LE/LR é uma medida do quão próximo do limite de resistência está o limite de escoamento, sendo essa razão importante para ter uma ideia do quanto um material irá se deformar antes de falhar. Uma vez que esta razão seja elevada após atingir o limite de escoamento faltará apenas um pequeno incremento de tensão para atingir o limite de resistência, logo o material tende a não ter um bom alongamento.

Para materiais ferrítico-perlíticos esta razão tende a ser em torno de 0,60 a 0,70.

Nas figuras 5.2.3 e 5.2.4 observa-se graficamente a variação desta razão com os tratamentos impostos para todos os CPs e mais uma vez comparando as microestruturas das figuras 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.2, verifica-se que o alto valor da razão LE/LR para os CPs 02 A e 03 A estão associados a microestruturas aciculares que após o primeiro ciclo de normalização se transformaram em estruturas mais equiaxiais, fazendo com que esta razão diminua. Durante o segundo ciclo de normalização não existem variações microestruturais significativas nestes CPs, sendo o valor de LE/LR pouco alterado.

O CP01 apresentou baixo valor da tensão limite de escoamento em relação a sua tensão limite de resistência e não mostrou variações significativas no valor da razão LE/LR com os tratamentos devido ao pequeno aumento do LE ter sido compensado por um aumento no LR, ambos causados pelo refino de grão.

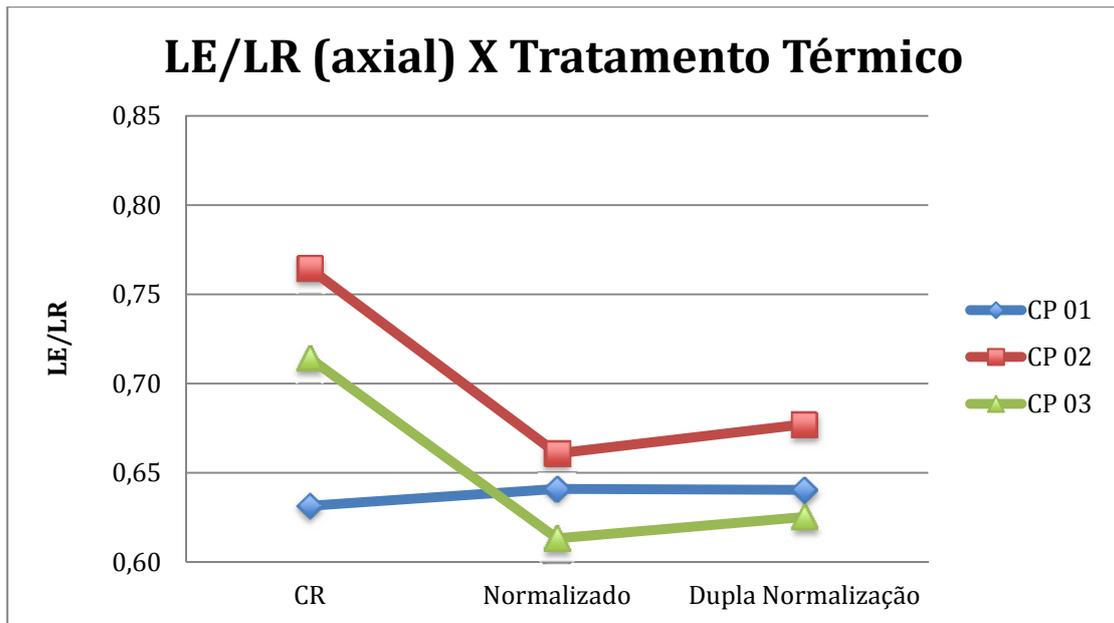


Figura 5.2.3 – Gráfico da relação LE/LR (axial) versus tratamento térmico, para todos os CPs.

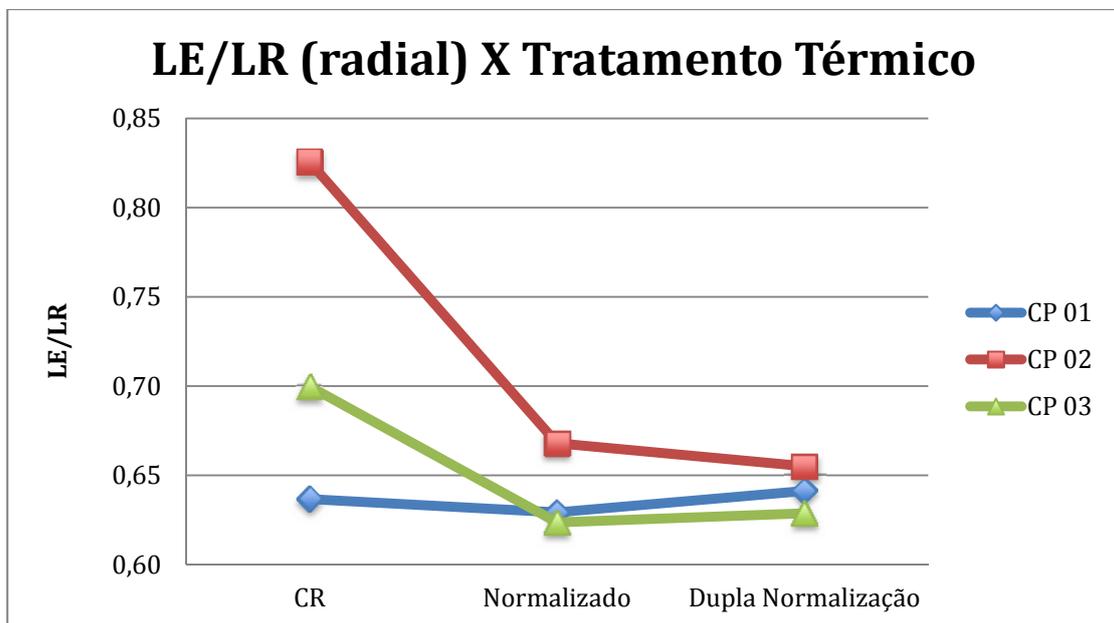


Figura 5.2.4 – Gráfico da relação LE/LR (radial) versus tratamento térmico, para todos os CPs.

O gráfico da figura 5.2.5, de variação de dureza Vickers com os tratamentos térmicos impostos aos flanges, mostra que durante o segundo ciclo de normalização não houve variação de dureza para nenhum dos materiais analisados. No entanto, durante o primeiro ciclo de normalização ocorreu leve aumento da dureza dos CPs 01 e 02 e grande decréscimo da dureza do CP 03. Comparando os gráficos das figuras 5.2.5, 5.2.6 e 5.2.7, constata-se que a dureza tem uma relação direta com o limite de resistência, notando-se que a dureza foi feita na seção longitudinal e os ensaios de tração foram feitos nas direções axial e radial. As variações de dureza e de resistência mecânica podem ser explicadas pelo fato de os CPs 01 e 02 terem sofrido refino enquanto o CP 03 sofreu transformação de sua microestrutura inicial bainítica para uma estrutura ferrítico-perlítica mais macia, após a normalização.

O fato de o CP02 apresentar um aumento na dureza com a normalização enquanto nos gráficos das figuras 5.2.1 e 5.2.2 ter sido constatada uma diminuição da tensão limite de escoamento, mostra que não há uma relação direta entre dureza e LE e pode estar associado à perda, após os tratamentos impostos, de sua microestrutura grosseira e acicular no estado como recebido, que conferia alto limite de escoamento mas com baixa dureza devido ao elevado tamanho de grão.

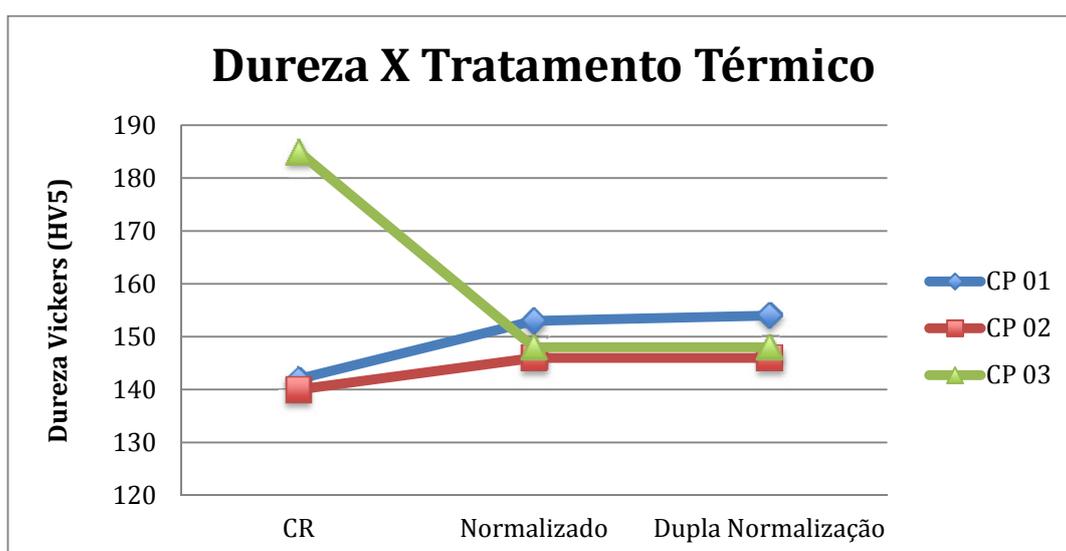


Figura 5.2.5 – Gráfico de dureza versus tratamento térmico, para todos os CPs.

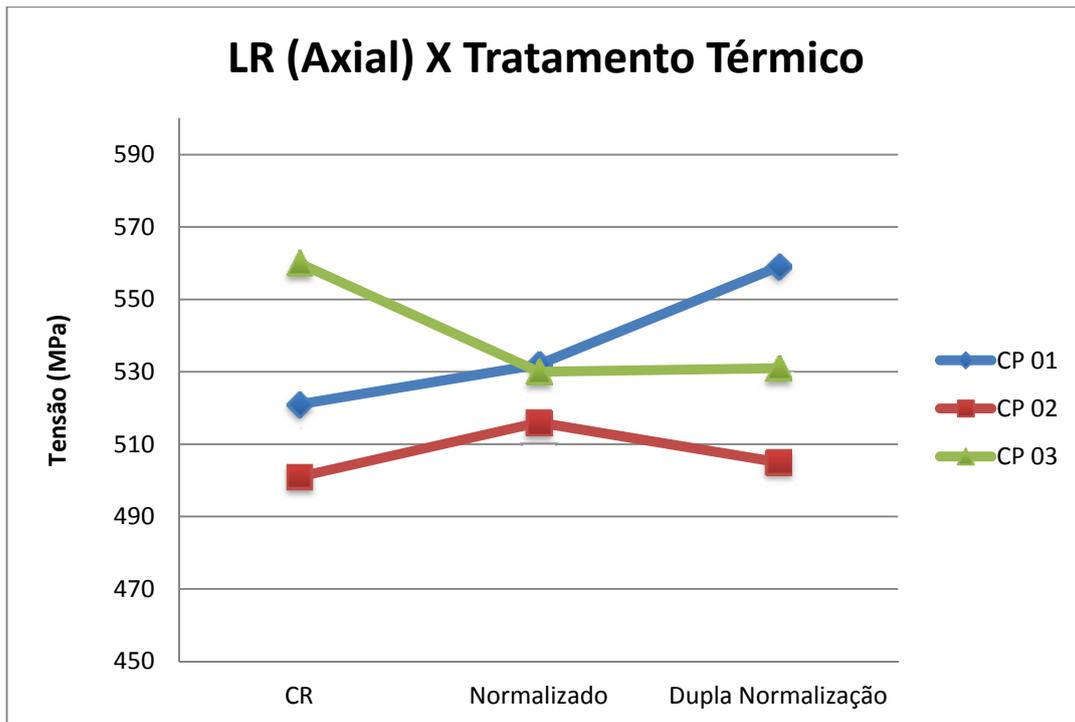


Figura 5.2.6 – Gráfico de limite de resistência (axial) versus tratamento térmico, para todos os CPs.

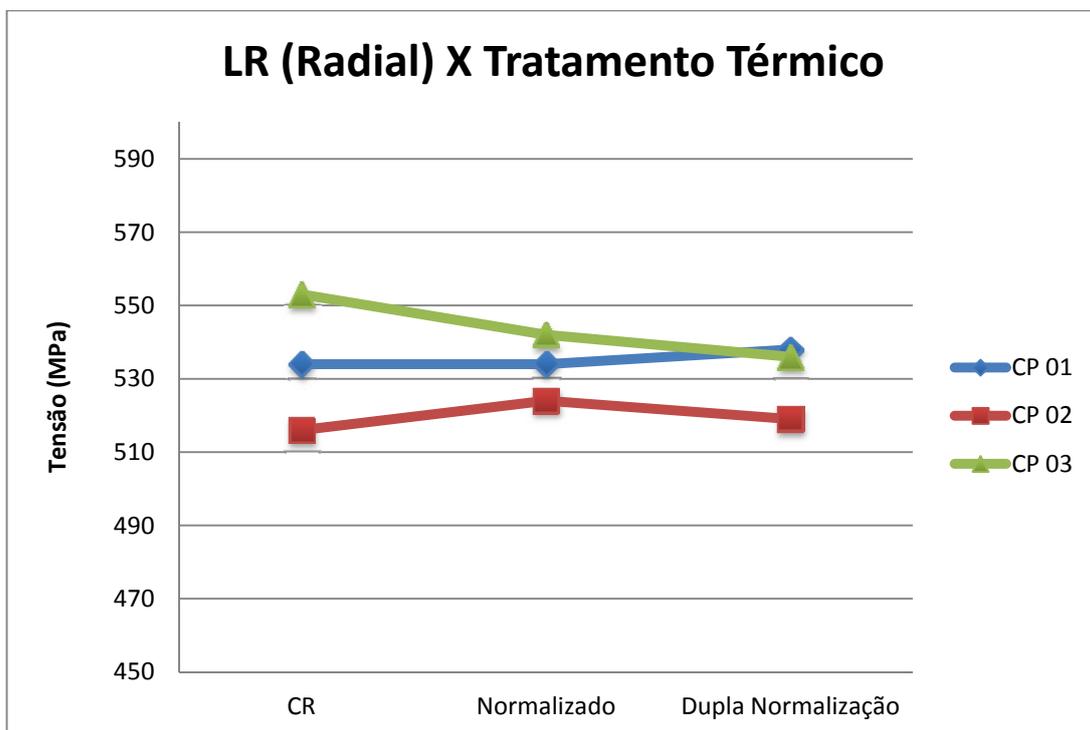


Figura 5.2.7 – Gráfico de limite de resistência (Radial) versus tratamento térmico, para todos os CPs.

5.3 EFEITO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA TENACIDADE AO IMPACTO

Os efeitos dos tratamentos térmicos na tenacidade ao impacto estão ilustrados nos gráficos das figuras 5.3.1 e 5.3.2, sendo discutidas as correlações com as microestruturas, conforme segue:

- O CP01 após a normalização teve pequenos incrementos de energia absorvida, já após a dupla normalização na direção radial a energia absorvida continuou a crescer enquanto na direção axial houve uma queda que pode estar associada a dispersão dos resultados. Estes incrementos de energia são devido a um pequeno refino de grão causado por estes tratamentos.
- O CP02 apresentou um aumento de energia absorvida em Charpy V após o primeiro ciclo de normalização, principalmente devido ao grande refino de grão e à formação de estruturas menos aciculares. Já no segundo ciclo de normalização obteve-se uma leve redução dos valores, o que pode estar associado a um pequeno aumento do tamanho de grão.
- O CP03 apresentou uma queda nos valores de energia absorvida nos ensaios após o tratamento de normalização, fato associado à transformação da microestrutura original bainítica em uma microestrutura ferrítico-perlítica. Após o tratamento de dupla normalização não foram observadas variações significativas de energias absorvidas ou de microestruturas, ou seja, o CP03 B é similar ao CP03 C.

As figuras 5.3.3 a 5.3.5 apresentam micrografias associadas às microestruturas de cada corpo de prova de Charpy V cujo aspecto da superfície de fratura está adjacente na foto, para cada flange em cada condição de tratamento térmico, ilustrando os efeitos mencionados acima. Verifica-se por exemplo uma

grande variação de aspecto da fratura Charpy V entre os CPs 02A, B e C (figura 5.3.4).

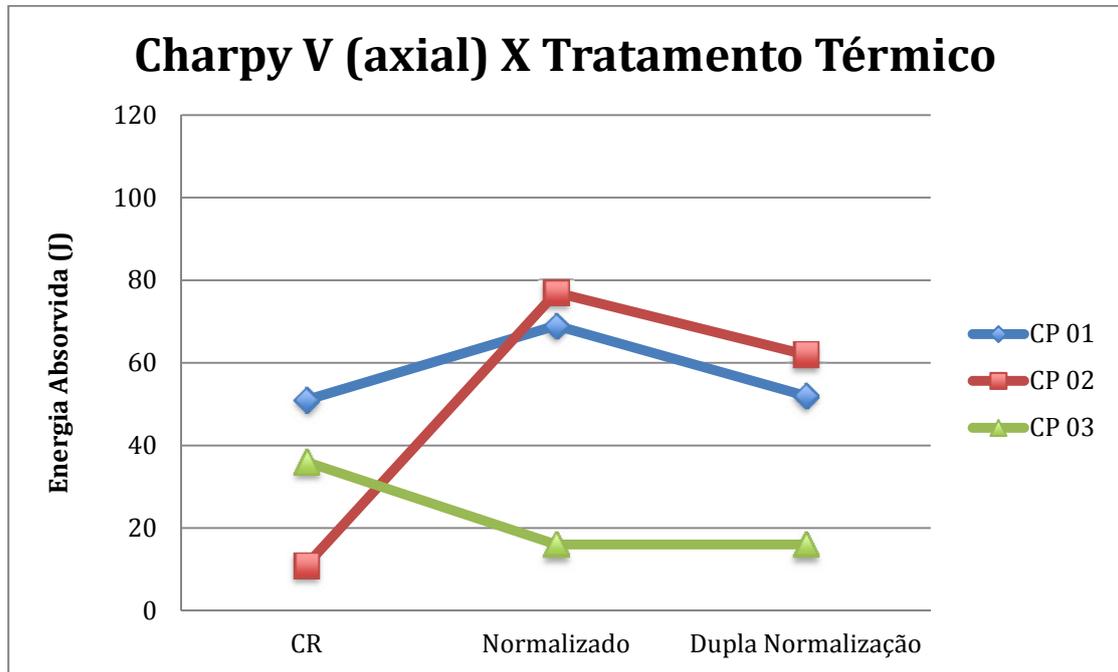


Figura 5.3.1 – Gráfico de energia absorvida nos ensaios de Charpy V na direção axial versus condição de tratamento térmico.

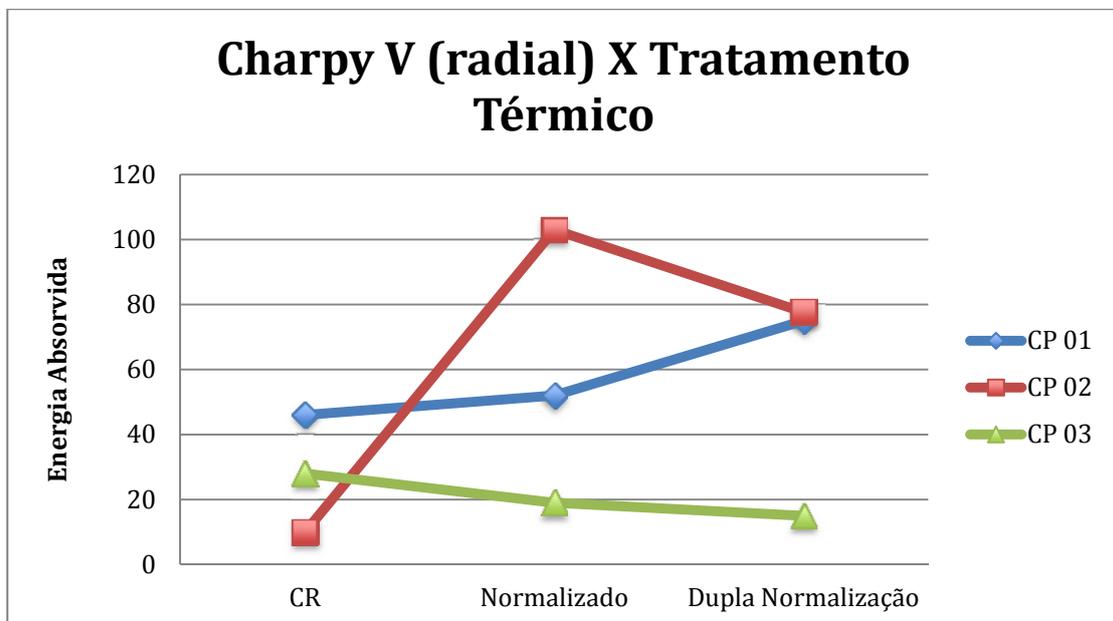
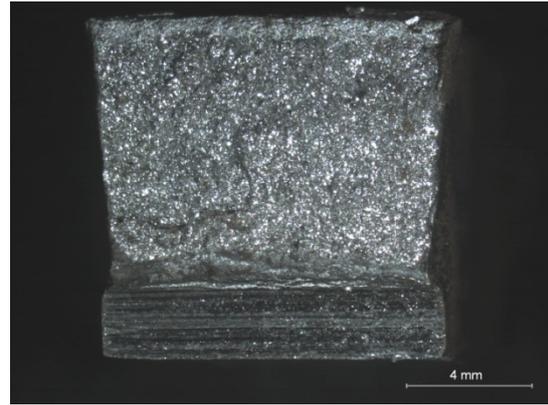
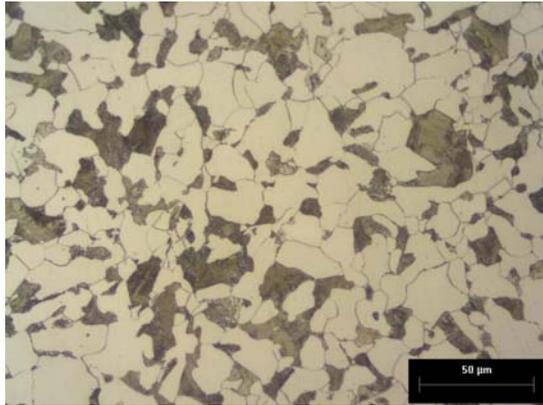
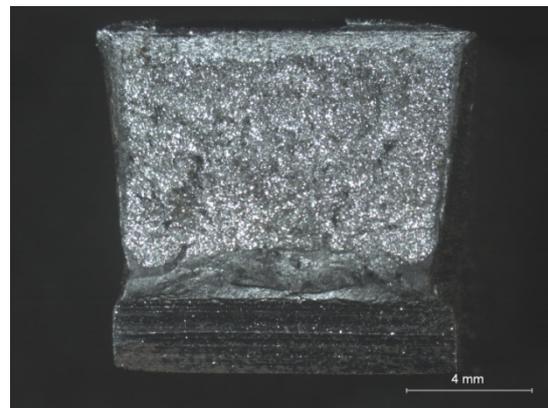
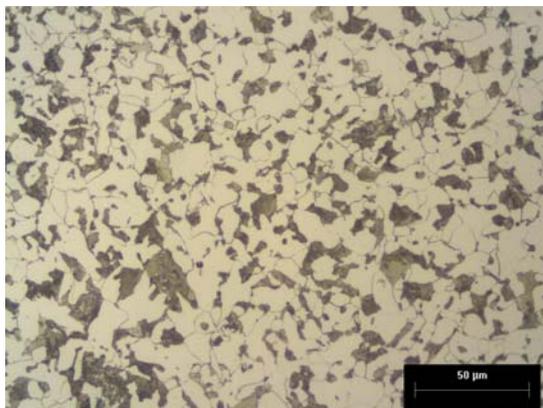


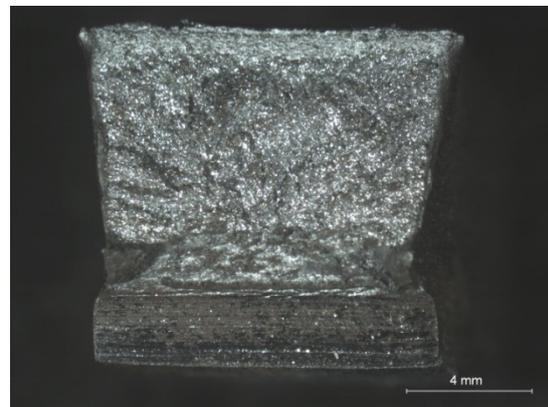
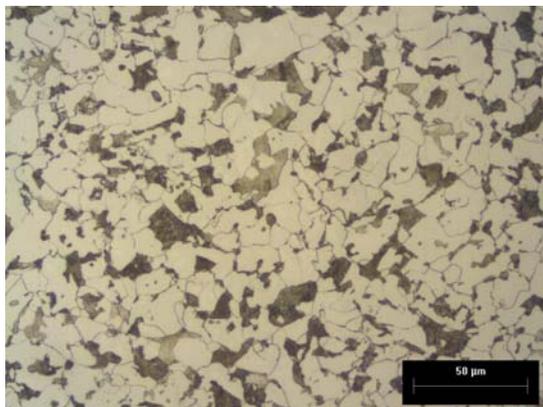
Figura 5.3.2 – Gráfico de energia absorvida no ensaios de Charpy V na direção radial versus condição de tratamento térmico.



CP01 A

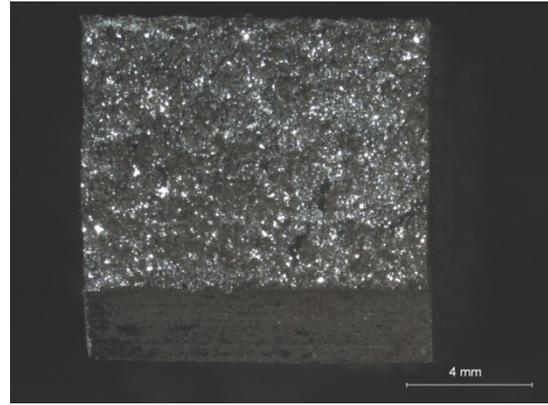
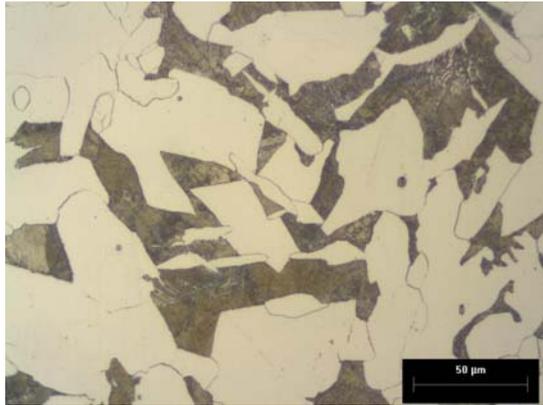


CP01 B

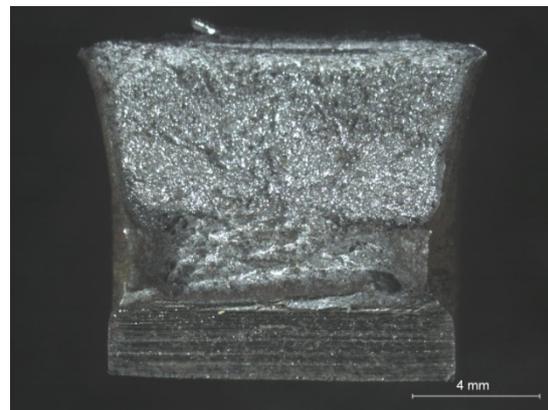
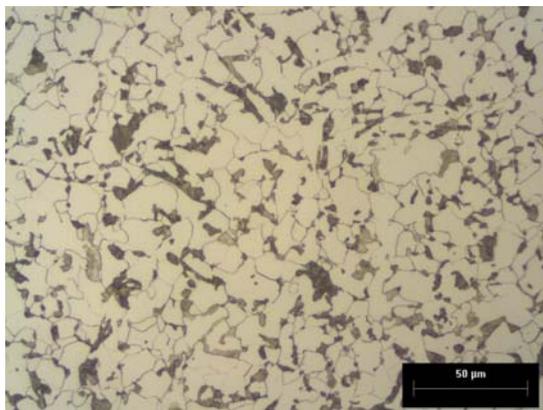


CP01 C

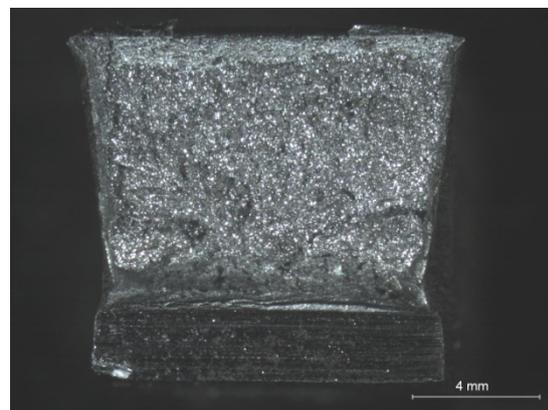
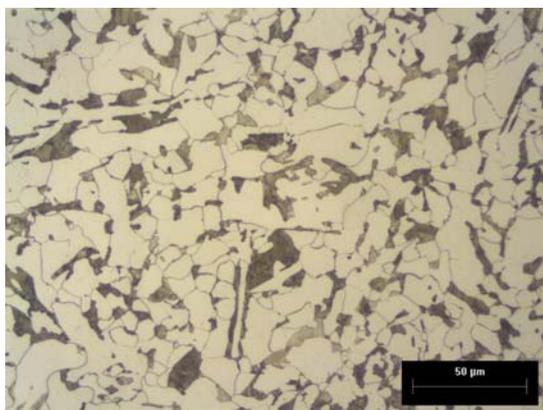
Figura 5.3.3 – Micrografias, com ampliação de 500x, e a superfície de fratura do corpo de prova de Charpy V associado, para cada condição de tratamento térmico.



CP02 A

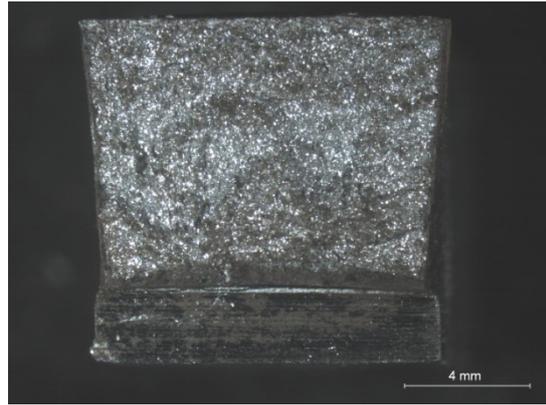
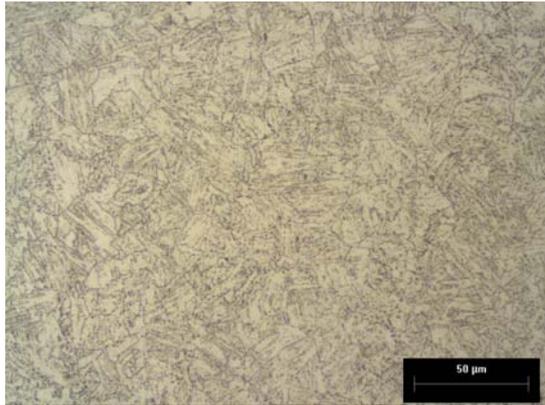


CP02 B

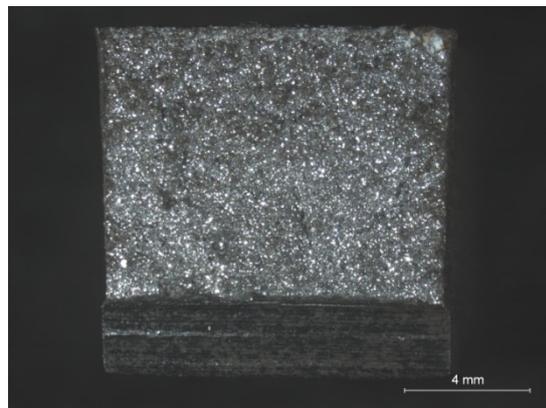
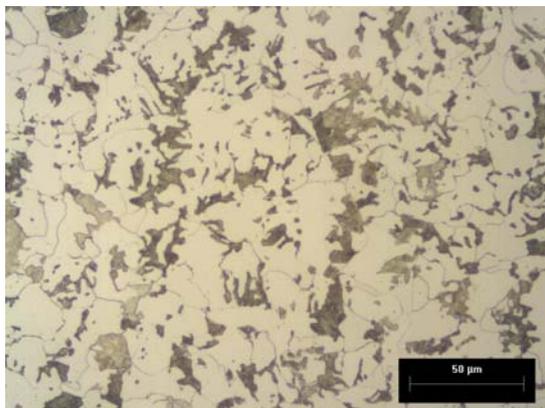


CP02 C

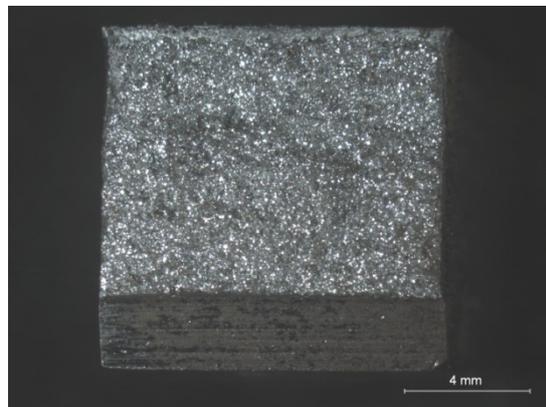
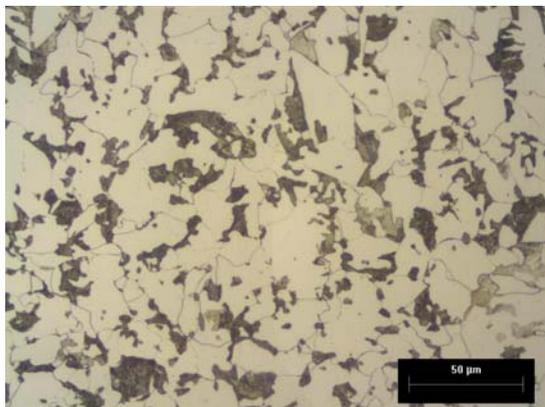
Figura 5.3.4 – Micrografias, com ampliação de 500x, e a superfície de fratura do corpo de prova de Charpy V associado, para cada condição de tratamento térmico.



CP03 A



CP03 B



CP03 C

Figura 5.3.5 – Micrografias, com ampliação de 500x, e a superfície de fratura do corpo de prova de Charpy V associado, para cada condição de tratamento térmico.

5.4 RELAÇÃO ENTRE TAMANHO DE GRÃO E TENACIDADE AO IMPACTO

Como mencionado na revisão bibliográfica com a diminuição do tamanho de grão ferrítico a tenacidade dos materiais tende a melhorar e os resultados deste estudo ratificam este comportamento para as estruturas de partida ferrítico-perlíticas, vide gráfico da figura 5.4.1 de energia Charpy V x tamanho de grão para os CPs 01 e 02. O mesmo não se mostrou válido entretanto para o CP de estrutura de partida bainítica, CP03, pois uma vez que haja uma transformação de microestrutura bainítica para uma ferrítico-perlítica deixa de existir uma relação direta entre o tamanho de grão e a tenacidade.

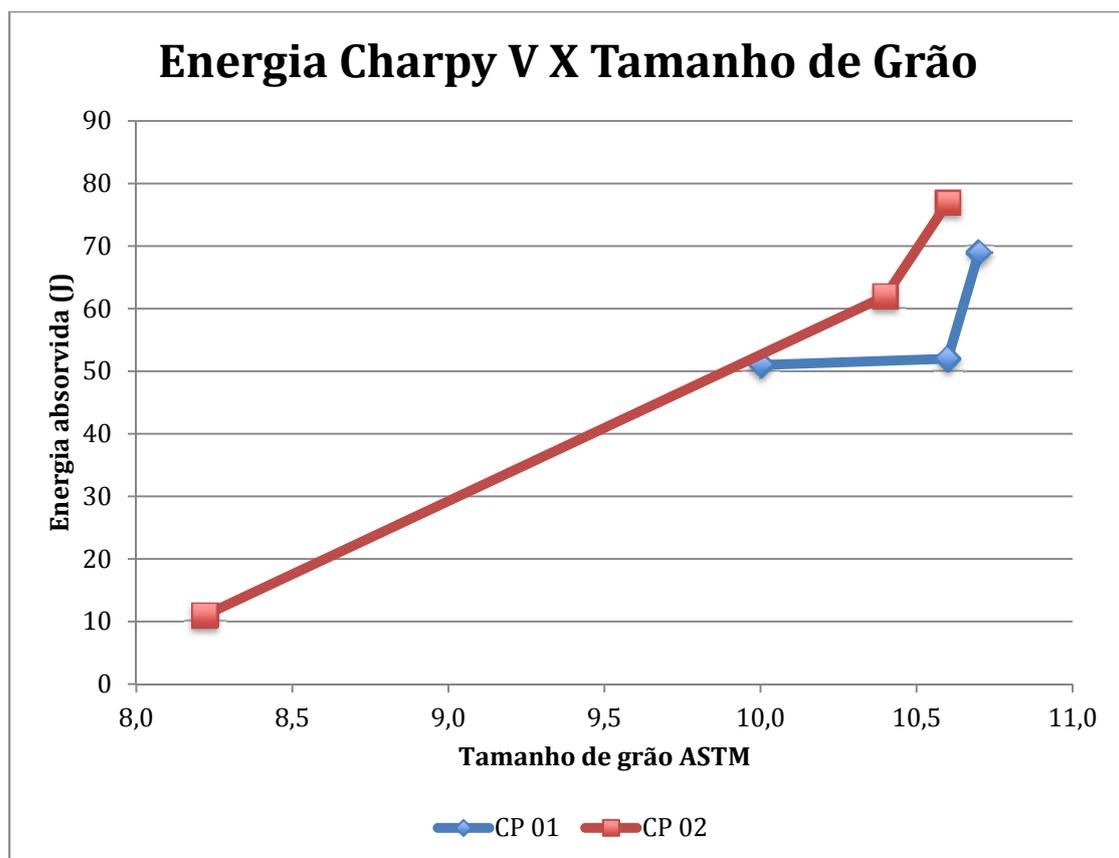


Figura 5.4.1 – Gráfico de energia absorvida (J) versus tamanho de grão ASTM.

5.5 RELAÇÃO ENTRE DUREZA E TENACIDADE AO IMPACTO

Utilizando o gráfico da figura 5.5.1 e a tabela 5.5.1 verifica-se que não há uma relação direta entre a dureza e a tenacidade, embora a tabela permita identificar uma relação entre refino e/ou dureza e tenacidade, e analisando de uma forma abrangente os resultados deste estudo, percebe-se que as variações tanto da tenacidade quanto da dureza estão relacionadas com as microestruturas.

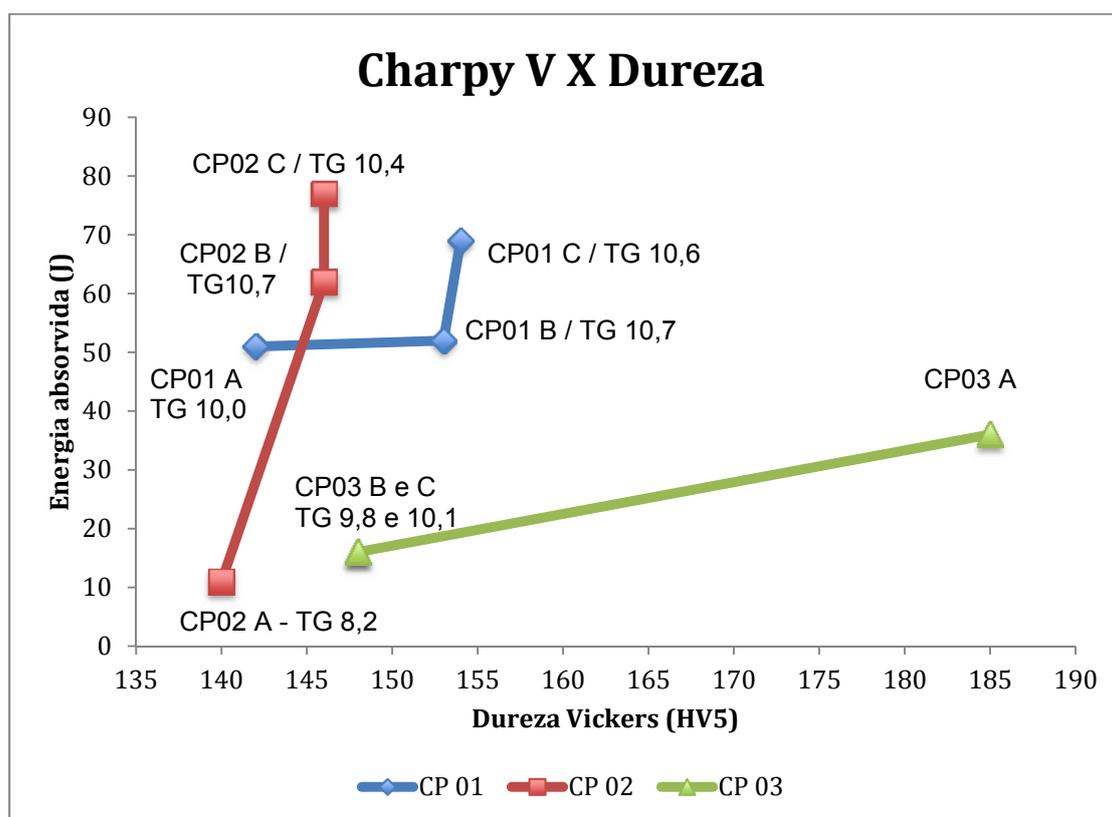


Figura 5.5.1 – Gráfico de energia absorvida (J) versus dureza vickers (HV5). Setas apontam para a direção dos resultados após os tratamentos térmico.

Tabela 5.5.1 – Resultados de dureza Vickers e Charpy V (-46°C) para os CPs..

CP	Dureza	Energia Charpy V (J)	TG ASTM	CP	Dureza	Energia Charpy V (J)	TG ASTM
01A	142	51	10,0	02C	146	62	10,4
01B	153	69	10,7	03A	185	36	-
01C	154	52	10,6	03B	148	16	9,8
02A	140	11	8,2	03C	148	16	10,1
02B	146	77	10,6	-	-	-	-

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Este trabalho procurou caracterizar o comportamento de três flanges fabricados para atendimento à norma ASTM A 350 LF2 classe 1, quanto à resistência ao impacto, associando os resultados de energia absorvida com os parâmetros microestruturais, em seu estado como recebido (que corresponde à condição de como fabricado), após tratamentos de normalização a 920°C com resfriamento em ar forçado (que é um tratamento aplicável para refino de grão), e após um tratamento de dupla normalização (buscando uniformizar composições e refino de grão).

Quanto a caracterização dos três flanges no estado como recebido, fornecidos como ASTM A 350 LF2 classe 1, foi possível perceber que os materiais se apresentaram com características diferentes, principalmente em relação à microestrutura, sendo que dois deles eram ferrítico-perlíticos (um deles com estrutura de Widmanstätten) e o terceiro era bainítico.

Apenas dois flanges, identificados como CP01 e CP03, atendiam a todos os requisitos de composição química e propriedades mecânicas da norma ASTM, enquanto o terceiro, CP02 (com estrutura grosseira de Widmanstätten), se apresentava com tenacidade inferior à esperada para a classe 1 da norma.

Com base nos resultados da caracterização dos flanges e dos ensaios após os tratamentos térmicos aplicados, pode-se concluir que:

- i. Após tratamentos de refino (normalização) cada flange apresentou uma resposta diferente ao ciclo de tratamento imposto, dependendo da estrutura de partida. Em componentes com microestrutura de partida ferrítico-perlítica (CPs 01 e 02) o tratamento de normalização se mostrou eficaz na melhora da tenacidade, principalmente para o que tinha estrutura mais grosseira, e apesar do decréscimo na tensão limite de escoamento os materiais

continuaram atendendo aos requisitos de resistência especificados, sendo que o CP02 que a princípio não atendia à tenacidade passou a atendê-la após a normalização. No componente de microestrutura de partida bainítica (CP 03) o tratamento térmico causou perda das propriedades, tanto em tração como em impacto, deixando inclusive de atender ao requisito de tenacidade depois da normalização, com um comportamento bastante inesperado.

- ii. O tratamento de dupla normalização não apresentou efeitos adicionais ao da normalização simples em nenhum dos materiais analisados, sendo que para todos os flanges as estruturas obtidas na normalização e na dupla normalização se mostraram equivalentes. Isto ocorreu pois as temperaturas de austenitização para normalização foram iguais nos dois tratamentos.

Como principal conclusão verificou-se que o tratamento de normalização causa refino apenas em materiais cuja microestrutura de partida é do tipo ferrítico-perlítica em tamanhos de grão ASTM entre 8 e 10; e independente da granulometria inicial o resultado foi a obtenção de um tamanho de grão ferrítico ASTM 10,6. Esta constatação ratifica estudos previamente publicados que relacionam tamanho de grão ferrítico e tenacidade para aços ao carbono.

Uma conclusão que não seria esperada para a indústria foi a de que a aplicação de uma normalização não necessariamente melhora as propriedades de materiais forjados para atendimento a norma ASTM A350 grau LF2, sendo que as causas desta perda de tenacidade com a normalização não ficaram explícitas através dos ensaios e análises realizados neste trabalho.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6023, **Informação e Documentação – Referências – Elaboração.**

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 24 p, Rio de Janeiro, Br, 2002

ASM METALS HANDBOOK, **Properties and Selection: Irons Steels and High**

Performance Alloys., ASM International, v. 1, 1990.

ASTM A350/A350M – 12, **Standard Specification for Carbon and Low-Alloy Steel Forgings, Requiring Notch Toughness Testing for Piping Components.**

ASTM International, 10 p, PA, USA, 2012.

ASTM A 370 -12, **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.** ASTM International, 47 p, PA, USA, 2012.

ASTM E 23 – 07a, **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.** ASTM International, 47 p, PA, USA, 2007.

ASTM E 112-10 **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size,** ASTM International, 26 p, PA, USA, 2010.

ASME B31.3-2010, **Process Piping ASME Code for Pressure Piping, B31:**

Chapter 3 - Materials. The American Society of Mechanical Engineers, p 45-54, NY, USA, 2010.

CRD (Chemical Risks Directorate), **Recommendations for pipe flanges made in**

forged steel complying with ASTM A105. BORGONJON, Isabelle Editor, FPS Employment, Labour and Social Dialogue, 30 p; Brussels, BE, 2003.

DIETER, G. E., **Metalurgia Mecânica.**, Editora Guanabara Dois S.A., segunda edição, 1981, .

EMYGDIO, P.R.O., **Metalurgia e Propriedades**. Apostila de Curso de Metalurgia, TECMETAL, 100 p., RJ, BR, 2007.

HULL, D.; BACON, D.J. **Introduction to Dislocations**. 4.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 242 p.

SOUZA, S. A., **Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos, Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5ª Edição, Editora EDGRAD BLUCHER LTDA, 1982.

TELES, P.C.S., **Materiais para Equipamentos de Processo**. Editora Interciência, 6ª Edição, RJ, BR, 2003.

VALERIANA, A.S. **Metalurgia Geral**. Editora Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Volume 3, Lisboa, PT, 1985.

ZEEMANN, A., **Seleção de Materiais**. Apostila de Curso de Seleção de Materiais, TECMETAL, 11 p, RJ, BR, 2007.