



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO – 2006/1**

Alexsandro Sanqueta Pandolfi

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA
RUGOSIDADE NA TENACIDADE AO
IMPACTO EM AÇO CARBONO**

VITÓRIA, 20 de JULHO DE 2006.

Alexsandro Sanqueta Pandolfi

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA
RUGOSIDADE NA TENACIDADE AO
IMPACTO EM AÇO CARBONO**

Estudo apresentado à disciplina Projeto
de Graduação do Centro Tecnológico
da Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito para graduação
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Camargo

VITÓRIA
2006

Alexsandro Sanqueta Pandolfi

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO
ACABAMENTO SUPERFICIAL EM
CORPOS DE PROVA CHARPY NOS
RESULTADOS DO ENSAIO**

COMISSÃO EXAMINADORA

**Professor Dr. Marcelo Camargo
Orientador**

Professor Flávio José da Silva

Professor Temístocles de Souza Luz

Vitória, _____ de _____ de 2006.

SUMÁRIO

RESUMO.....	1
OBJETIVO.....	2
1 - INTRODUÇÃO.....	3
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 - Limitações do Ensaio Charpy.....	7
2.2 - Importância do acabamento superficial.....	11
2.3 - Campo de Aplicação do Ensaio Charpy.....	12
2.4 - As informações obtidas no Ensaio de Impacto.....	13
2.5 - Definições de superfícies e perfil geométricos.....	16
3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	19
3.1 - Preparação dos corpos de prova.....	19
3.2 - Equipamentos utilizados na preparação dos corpos de prova.....	20
3.3 - Dimensões do corpo de prova.....	21
3.4 - Equipamentos utilizados na inspeção dos corpos de prova.....	22
3.5 - Realização dos Ensaios.....	23
3.6 - Equipamentos utilizados nos ensaios dos corpos de prova.....	24
4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
6 - CONCLUSÃO.....	33
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
8 - ANEXO – Tabela dos dados obtidos nos ensaios de Charpy.....	35

RESUMO

Os procedimentos para ensaio de impacto são geralmente baseados em normas internacionais como ASTM (American Society for Testing and Materials), DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.), sendo a norma ASTM a mais completa e portanto a mais utilizada. A norma apesar de definir o nível dos acabamentos superficiais para os corpos de prova, não menciona que tipo de equipamento deverá ser utilizado para obter tal resultado. Baseando-se nesta abertura que a norma deixa quanto à preparação dos corpos de prova e buscando uma melhor produtividade, este estudo busca avaliar se o acabamento utilizado atualmente através de retífica, poderia ser também conseguido utilizando uma fresadora, desde que seus parâmetros sejam bem controlados.

Além disto, como nos ensaios de impacto a fase de preparação dos corpos de prova é muito importante para garantir a confiabilidade dos resultados, pois o número de fatores que podem interferir no resultado do ensaio é muito grande, este trabalho avalia se a mudança do processo de fabricação altera de alguma forma o resultado obtido.

OBJETIVO

O objetivo desse projeto é diminuir o tempo de preparação de corpos de prova para ensaio de impacto Charpy, através da eliminação da fase de retífica durante a preparação dos corpos de prova, sem comprometer a confiabilidade dos resultados de ensaio.

Vantagens:

- Redução no tempo de preparação dos corpos de prova;
- Redução de custo da preparação (redução de homem/hora, ferramentas abrasivas, energia elétrica, etc.);
- Aumento da capacidade do laboratório da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) de liberação de resultados de ensaio de impacto Charpy;
- Acabamento superficial tão bom quanto ao da retífica, desde que seus parâmetros de corte estejam bem ajustados.

Desvantagens:

- Retirada da retífica de operação prematuramente;
- Restrições dimensionais;
- Restrições de forma (paralelismo, perpendicularidade, etc.).

1 - INTRODUÇÃO

Em projetos estruturais, uma das etapas importantes consiste na seleção dos materiais e na determinação da geometria e dimensões dos componentes, para que, sob um dado carregamento e condições ambientais, o componente desempenhe as funções propostas de maneira adequada. O dimensionamento, ou seja, o estabelecimento das dimensões do componente mecânico, normalmente é feito por intermédio da aplicação de um critério de falha ou projeto, o qual, em geral, considera a intensidade de carga aplicada e os parâmetros característicos de resistência do material. Para que se tenha êxito, é fundamental selecionar e aplicar o critério de falha mais apropriado.

Um componente mecânico cumprirá adequadamente a função para o qual foi projetado enquanto ele não falhar. Assim, toda a estratégia do projeto mecânico consiste em identificar as condições que podem conduzir a falhas e adotar as medidas adequadas para evitá-las. De um modo geral, existem quatro maneiras distintas segundo as quais um componente mecânico pode deixar de cumprir as funções pelas foi projetado:

- Danos superficiais;
- Deformação elástica excessiva;
- Deformação plástica;
- Fratura.

Nestas condições, há necessidade de se conhecer os valores limites suportados pelo material sem que ocorra colapso mecânico. Deste modo, será possível relacionar tensões e propriedades mecânicas do material de modo a se projetar com maior segurança.

Pode-se prever o comportamento mecânico de um componente através de suas propriedades medidas em ensaios. Os ensaios devem ser realizados em amostras sob as mesmas condições de processamento da peça e, sob as mesmas condições de serviço. Isto porque, o comportamento mecânico não depende somente de condições intrínsecas ao material depende também de fatores externos. O tipo de solicitação, a taxa de deformação, e a ação do meio, são exemplos de fatores que afetam na resposta dos materiais sob ação de forças. Por esta razão, existe uma grande variedade de ensaios que possibilitam avaliar o comportamento dos materiais, sob diferentes condições de carregamento.

De maneira simplista, um componente fratura porque as tensões aplicadas excedem a resistência do material. A fratura é o resultado final do processo de deformação plástica. A tenacidade de um dado material é uma medida da energia absorvida antes e durante o processo de fratura. Assim, a tenacidade indica a quantidade de trabalho que pode ser realizado sobre o material sem causar a sua fratura. A tenacidade pode ser medida por diferentes ensaios, sob diferentes taxas de deformação.

Dentre os ensaios tidos como convencionais, a tenacidade é mais comumente medida sob altas taxas de deformação como num ensaio de impacto. Os ensaios de impacto, são assim denominados por serem ensaios dinâmicos onde altas taxas de deformação estão envolvidas.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os principais responsáveis pela maioria das falhas do tipo frágil que ocorrem em serviço são descontinuidades que introduzem de um estado triaxial de tensões.

Os ensaios Charpy e Izod (Fig. 01), são refinamentos de ensaios que foram desenvolvidos no inicio do século XX [1]. Nesses ensaios, que atualmente são considerados clássicos, corpos de prova entalhados são ensaiados a uma temperatura conhecida, em uma máquina do tipo pendular. Os resultados são apresentados em termos da energia absorvida pelo corpo de prova durante o impacto.



Fig. 01 – Tipos de ensaios: (a) Ensaio Charpy e (b) Ensaio Izod [2]

Durante a Segunda Guerra Mundial, o fenômeno da fratura frágil despertou a atenção de projetistas e engenheiros metalúrgicos devido à alta incidência desse tipo fraturam em estruturas soldadas de aço de navios e tanques de guerra. Alguns navios simplesmente partiam-se ao meio, estivessem em mar aberto turbulento ou ancorado nos portos (Fig. 02). Entretanto, os navios eram construídos de aços liga que apresentavam razoável ductilidade, de acordo com ensaios realizados à temperatura ambiente. Notou-se também, que a incidência desse tipo de fratura ocorria nos meses de inverno, e que problemas semelhantes já haviam surgido em linhas de tubulação de petróleo, vasos de pressão e pontes de estrutura metálica. Tudo isso motivou a implantação de programas de pesquisas que determinassem as causas dessas rupturas em serviço e indicassem providências para impedir futuras ocorrências desse tipo de problema [2].

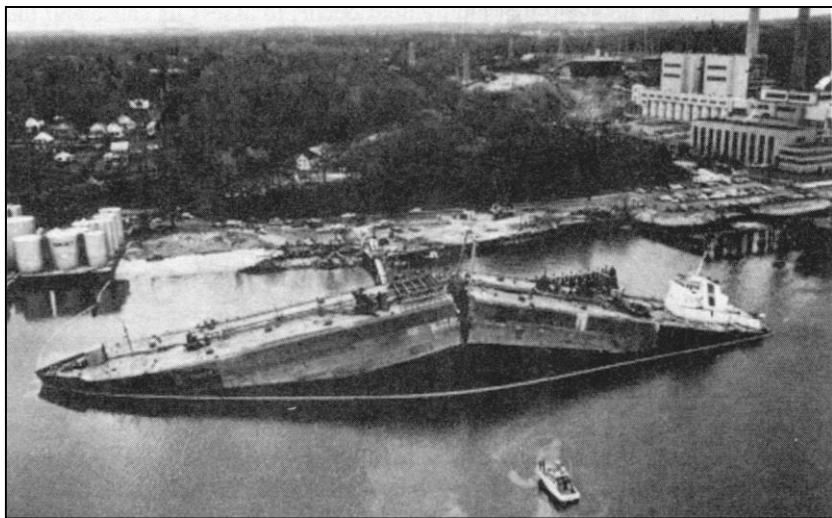


Fig. 02 – Navio com fratura abrupta devido a fragilização do material [2].

No transcorrer dessas e outras pesquisas, vários novos ensaios foram desenvolvidos para avaliar a resistência ao entalhe.

Apesar de muitos ensaios diferentes terem sido desenvolvidos para o estudo das fraturas dos navios, avaliações posteriores comprovaram a eficácia do ensaio Charpy.

Revisões rigorosas das informações obtidas no ensaio de impacto Charpy, entalhe em V, indicaram claramente que a temperatura de transição obtida por esse ensaio se correlacionava bem com a temperatura de ocorrência das falhas das chapas dos navios. Todas as chapas, na qual havia ocorrido fratura, que foram posteriormente ensaiadas, na temperatura de ocorrência das falhas, apresentaram um baixo valor de energia absorvida no ensaio Charpy, menos que 15 J. Devido a esta comprovação e, algumas comprovações subsequentes o ensaio Charpy-V é, até hoje, um método muito usado para avaliar a resistência ao entalhe de aços [1].

No "Watertown Arsenal Laboratory", em 1956, realizou-se um amplo programa de ensaios, em aços 4340, de qualidade aeronáutica, onde os experimentos foram rigorosamente controlados e, constatou-se que o ensaio Charpy é confiável, reproduzível, e os resultados são pouco dispersivos. Porém, quando a preparação dos corpos de prova não é adequada, mesmo que o ensaio seja rigorosamente controlado, ocorre uma maior dispersão dos resultados. Por exemplo, tratamentos térmicos realizados sem o devido controle das variáveis significativas, podem levar a resultados extremamente dispersivos [1]. A dispersão dos resultados se deve também a variações

locais nas propriedades do aço (material mal elaborado), enquanto que outras ocorrem devido a dificuldades em preparar entalhes perfeitamente reproduzíveis.

Tanto a forma, a profundidade do entalhe, quanto o posicionamento adequado do corpo de prova na máquina de impacto são variáveis críticas [1].

A norma ASTM menciona que entalhes devem ser suavemente usinados, porém tem se mostrado desnecessário a realização de polimento. Entretanto, variações nas dimensões do entalhe afetam seriamente o resultado dos testes, aderindo para a tolerância.

A tabela 01 mostra o efeito da variação dimensional do entalhe no resultado de ensaio em corpos de prova padronizados.

Tabela 01 - Efeito da variação dimensional do entalhe em corpos de prova padronizados [3]

	Corpos de prova de Alta Energia (J)	Corpos de prova de Media Energia (J)	Corpos de prova de Baixa Energia (J)
Corpos de prova com dimensões padronizadas	$103,0 \pm 5,2$	$60,3 \pm 3,0$	$16,9 \pm 1,4$
Profundidade de entalhe - 2,13 mm ^(A)	97,9	56,0	15,5
Profundidade de entalhe - 2,04 mm ^(A)	101,8	57,2	16,8
Profundidade de entalhe - 1,97 mm ^(A)	104,1	61,4	17,2
Profundidade de entalhe - 1,88 mm ^(A)	107,9	62,4	17,4
Raio da base do entalhe - 0,13 mm ^(B)	98,0	56,5	14,6
Raio da base do entalhe - 0,38 mm ^(B)	108,5	64,3	21,4
^(A) Padrão $2,0 \pm 0,025$ mm			
^(B) Padrão $0,25 \pm 0,025$ mm			

O ensaio Charpy, como qualquer outro tipo de ensaio possui vantagens e desvantagens e, sendo assim é importante analisar as suas limitações e delinear seu campo de aplicação com intuito de utilizá-lo de maneira eficaz.

2.1 - Limitações do Ensaio Charpy

Apesar da grande importância do ensaio de impacto Charpy como indicador da resistência ao entalhe na seleção de materiais, os resultados obtidos não podem ser usados diretamente nos cálculos de projetos de engenharia. Isto porque, neste ensaio, não há medidas em termos do nível de tensão, o que dificulta correlacionar a energia absorvida com o desempenho em serviço.

Além de não fornecer um parâmetro qualitativo para projetos de engenharia o ensaio Charpy possui outras limitações. A principal medida obtida no ensaio de impacto Charpy é a energia absorvida para fraturar o corpo de prova. Entretanto, é importante compreender que a energia medida no ensaio Charpy é apenas uma energia relativa, não

podendo ser utilizada diretamente nas equações energéticas. As condições de ensaio e do corpo de prova podem diferir muito das condições reais e, dessa forma, o comportamento mecânico em serviço poderia ser muito diferente do resultado do ensaio. As principais deficiências do ensaio de Charpy, que restringem sua aplicação, estão relacionadas com os seguintes aspectos:

- tipo de carregamento;
- fator geométrico;
- temperatura de transição.

• **Tipo de Carregamento**

Poucos componentes mecânicos em serviço estão sujeitos a choques tão drásticos como, por exemplo, na condição inerente ao ensaio Charpy. A taxa de deformação pode ter um efeito pronunciado sobre o mecanismo de fratura. Materiais que se comportam de maneira dúctil no ensaio de tração podem apresentar comportamento frágil no ensaio de impacto Charpy. Desta forma, uma correlação do comportamento à fratura para altas e baixas taxas de deformação não é sempre bem definida. A taxa de carregamento no ensaio de impacto é aproximadamente 10 milhões de vezes maior do que a de um ensaio de tração convencional [1].

Sob altas taxas de carregamento o escoamento plástico é retardado e, portanto, uma trinca de alta velocidade de propagação pode ultrapassar uma região do metal antes do escoamento plástico ocorrer. A deformação plástica é um mecanismo importante e eficiente para desacelerar uma trinca, e tem sua influência minimizada no ensaio de impacto devido a forte restrição ao escoamento plástico. Este fato impede que exista uma correlação direta entre os resultados do ensaio de Charpy e as condições reais de solicitação em serviço de muitos componentes mecânicos [1].

• Fator Geométrico

Uma grande deficiência do ensaio de impacto Charpy é o pequeno tamanho do corpo de prova usado, o que nem sempre representa um modelo realístico da situação encontrada na prática. Uma amostra de espessura igual a 10 mm pode não apresentar as mesmas restrições encontradas em uma estrutura com espessura muito maior.

Estruturas grandes são mais susceptíveis à fratura frágil do que estruturas pequenas. Normalmente, ocorre uma redução da tenacidade com o aumento da espessura do componente mecânico. No que diz respeito ao fator geométrico três aspectos merecem destaque [1].

- o estado de tensões;
- as variações metalúrgicas;
- a questão probabilística.

A espessura do componente exerce forte influência sobre o estado de tensões.

Dependendo da espessura pode predominar deformação plana ou tensão plana. Componentes mais espessos estão sob o estado de deformação plana e, portanto, sujeitos às maiores restrições ao escoamento plástico, o que acarreta em menor ductilidade e tenacidade quando comparado com componentes finos, onde predomina o estado de tensão plana [1].

Variações no comportamento à fratura entre componentes de seção fina e espessa, de um mesmo material podem ser decorrentes de diferentes estruturas metalúrgicas formadas durante o processamento. Por exemplo, seções finas e espessas, durante à témpera, estão submetidas a diferentes taxas de resfriamento e, consequentemente, sujeitas à formação de diferentes microestruturas. Devido às características inerentes aos processos comerciais, a estrutura metalúrgica de seções espessas é diferente das de seções mais fina, resultando, normalmente, em menor tenacidade nas seções mais espessas.

Quanto mais espessa a seção de um componente maior a probabilidade dela conter um defeito ou uma trinca, consequentemente, maior a probabilidade de ocorrência de fratura frágil.

Portanto, devido a ação combinada desses três fatores geométricos, componentes mecânicos mais espessos são mais susceptíveis à fratura frágil do que componentes finos. Em muitas situações, os valores obtidos no ensaio Charpy só medem o efeito de

aspectos metalúrgicos (influência da composição química, do tamanho de grão, tratamentos térmicos, e outros), o efeito geométrico não é medido, visto que, o corpo de prova é padronizado (espessura – 10 mm).

- **Temperatura de Transição**

Certos metais são tenazes a temperaturas mais altas, mas fragilizam a baixas temperaturas. Estes metais apresentam uma transição dúctil-frágil no comportamento à fratura.

Se um componente mecânico feito de um desses metais é utilizado próximo ou abaixo da temperatura na qual fica frágil, o componente pode falhar inesperadamente em serviço.

Assim, é importante efetuar-se uma análise prévia do comportamento à fratura do metal, para se certificar que o componente será suficientemente tenaz na temperatura de serviço.

De fato, a temperatura de transição, não é realmente uma constante física, mas depende de alguns fatores físicos tais como a forma e o tamanho do corpo de prova, tipo de entalhe, taxa de deformação, e também é claro, de fatores metalúrgicos [3]. Todavia, por conveniência, é comum utilizar-se o termo temperatura de transição de um metal. Este termo, contudo, necessita de uma definição cuidadosa, havendo diversos modos de expressá-los.

Diversos ensaios e diferentes métodos foram desenvolvidos para determinar a temperatura de transição da fratura de dúctil para frágil dos aços. Infelizmente, o critério de determinação da temperatura de transição não é único. Existem vários métodos pelos quais a tenacidade é medida sob o efeito da temperatura[1]. Os critérios baseiam-se fundamentalmente em três parâmetros de análise:

- energia absorvida;
- ductilidade;
- aparência da fratura.

Um grande inconveniente decorre do fato de não existir concordância entre as temperaturas de transição medidas por estes diferentes critérios (transição para fratura plástica, temperatura de transição de aparência da fratura, temperatura de transição com base na media entre os patamares superior e inferior, temperatura de transição da

ductilidade, temperatura nula, entre outros). Um método muito utilizado se baseia na energia absorvida no ensaio de impacto Charpy-V. A importância desse ensaio reside no fato de que ele reproduz a transição dúctil-frágil do aço, a temperaturas aproximadamente no mesmo intervalo das observadas em estruturas reais em serviço [1], sobretudo, quando a espessura não é relevante.

2.2 - Importância do acabamento superficial

Superfícies reais, por mais perfeitas que sejam, apresentam particularidades que são uma herança do método empregado em sua obtenção, por exemplo: torneamento, fresamento, retífica, brunimento, lapidação, etc. As superfícies assim produzidas se apresentam como um conjunto de irregularidades, com espaçamento regular ou irregular e que tendem a formar um padrão ou textura característicos em sua extensão.

A rugosidade ou textura primária, está formada por sulcos ou marcas deixadas pelo agente que atacou a superfície no processo de usinagem (ferramenta, rebolo, partículas abrasivas, ação química, etc.) e se encontra superposta a um perfil de ondulação provocado por deficiência nos movimentos da máquina, deformação no tratamento térmico, tensões residuais de forjamento ou fundição, etc.[4].

Segundo a Norma ASTM, quando estão sendo avaliados materiais tratados termicamente, os corpos de prova devem ter acabamento de usinagem, incluindo o entalhe, depois do tratamento térmico, a não ser que possa ser demonstrado que as propriedades dos corpos de prova antes do tratamento térmico sejam idênticas a esses usinados depois do tratamento.

No acabamento superficial de um componente usinado deve-se levar em conta não somente o aspecto estético ou uma função específica, mas também que deve ser produzido ao menor custo possível, considerando que existe uma relação direta entre o grau de acabamento e o tempo necessário para atingi-lo, como mostra o gráfico 01.

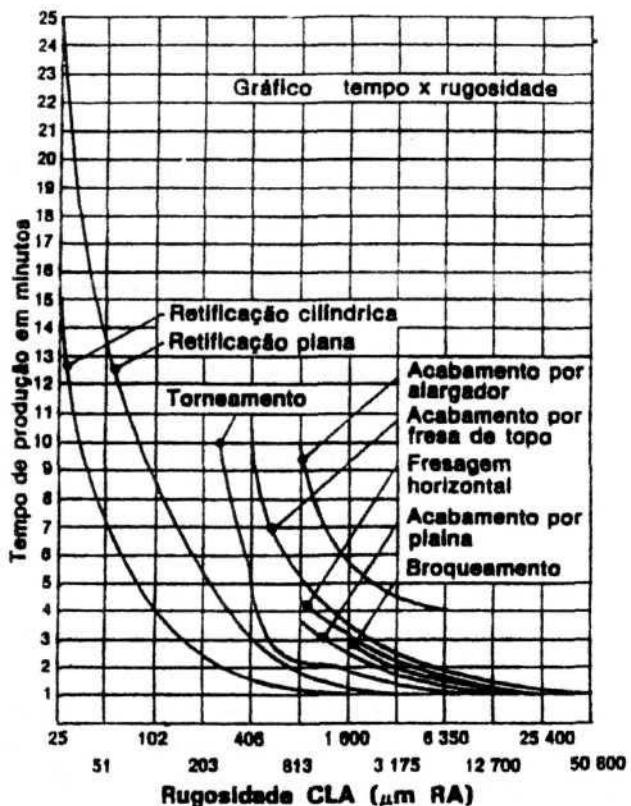


Gráfico 01 - Processos de acabamento superficial em relação ao seu tempo de obtenção e correspondente valor de rugosidade no parâmetro Ra [4].

2.3 - Campo de Aplicação do Ensaio Charpy

Pelos motivos já expostos, fica claro que os resultados do ensaio Charpy estão sujeitos a algumas limitações. Apesar disso, o ensaio Charpy conserva um importante papel em muitas aplicações de engenharia. Na verdade, a adequabilidade do ensaio depende do objetivo de engenharia. O ensaio Charpy pode ser utilizado com segurança para: determinar a influência de fatores metalúrgicos (composição química, tamanho de grão, fases, etc.) na temperatura de transição; detectar o fenômeno da fragilização da martensita revenida; controle de qualidade; testes de aceitação de materiais, etc.

No projeto mecânico, os resultados do ensaio Charpy tornam-se significativos somente quando correlacionados com um tipo particular de componente mecânico, em um tipo particular de serviço. De maneira geral, em situações onde exista alta concentração de tensões, taxa de deformação elevada e baixa temperatura, o ensaio Charpy tem-se mostrado muito adequado para selecionar materiais.

2.4 - As informações obtidas no Ensaio de Impacto

Em relação às informações que podem ser obtidas do ensaio de impacto, tem-se:

Energia Absorvida

Medida diretamente pela máquina (Fig. 03). Quanto maior a energia absorvida pelo material maior será a sua tenacidade.

Energia absorvida no impacto corresponde a diferença entre a energia potencial do pêndulo na altura de queda e a energia potencial do pêndulo na altura de rebote, dada por:

$$E_{impacto} = M \cdot g \cdot (H_q - h_r) [2]$$

M – massa pendulo

g – gravidade

H_q – **h_r** – Variação de altura

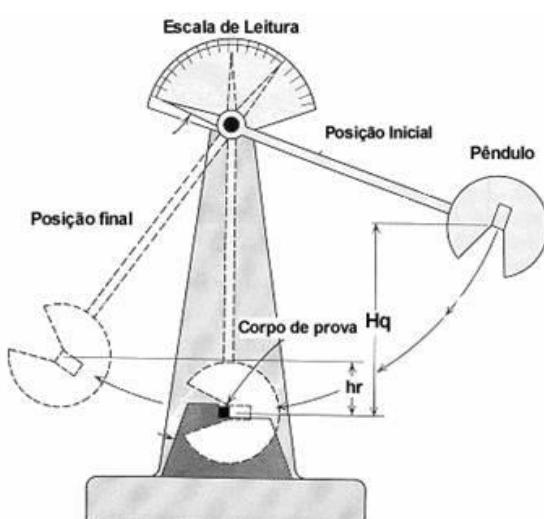


Fig. 03 – Configurações do equipamento de ensaio necessárias para os cálculos quantitativos [2].

Expansão Lateral

Quantidade de expansão em cada lado do corpo de prova fraturado (Fig. 04);

Fórmula:

$$(W_f - W_i)/W_i [3]$$

W_i – espessura inicial

W_f – espessura final

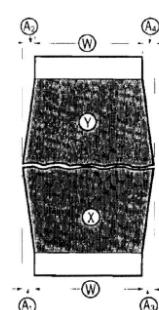


Fig. 04 – Medição expansão lateral em corpo de prova fraturado [3].

Aspecto da fratura

Determinação da porcentagem de fratura frágil ou dúctil ocorrida durante o processo de ruptura por métodos como medida direta em função do aspecto da superfície da fratura, comparação com resultados de outros ensaios ou ensaios-padrão, ou através de fotografias da superfície e interpretação adequada.

As fraturas produzidas por impacto podem ser frágeis ou dúcteis. As fraturas frágeis caracterizam-se pelo aspecto cristalino e as fraturas dúcteis apresentam aparência fibrosa.

Os materiais frágeis rompem-se sem nenhuma deformação plástica de forma brusca, por isso, esses materiais não podem ser utilizados em aplicações nas quais sejam comuns esforços bruscos, como eixos de máquinas, bielas e etc.

Pode-se medir o percentual de fratura dúctil de acordo com os métodos abaixo:

a) Por cálculo

Medir o comprimento e largura da porção de aparência cristalina da fratura (ver Fig. 05), e através da tabela 02 comparar esses valores com o percentual dúctil pré estabelecido.

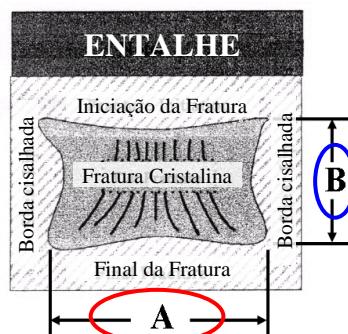


Fig. 05 – Esquema de medição de corpo de prova de Charpy fracturado [3].

Tabela 02 – Método segundo cálculo da % área dúctil [3].

Nota: Deve ser relatada fratura de 100% quando A ou B é zero

Dimensão B, mm	Dimensão A, mm																		
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
1,0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1,5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2,0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2,5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3,0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3,5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4,0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4,5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5,0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5,5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6,0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6,5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7,0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7,5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8,0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0

b) por comparação carta padrão.

Visualiza-se o aspecto da fratura do corpo de prova rompido e compara-o com a carta padrão estabelecida pela norma ASTM (Fig. 06).

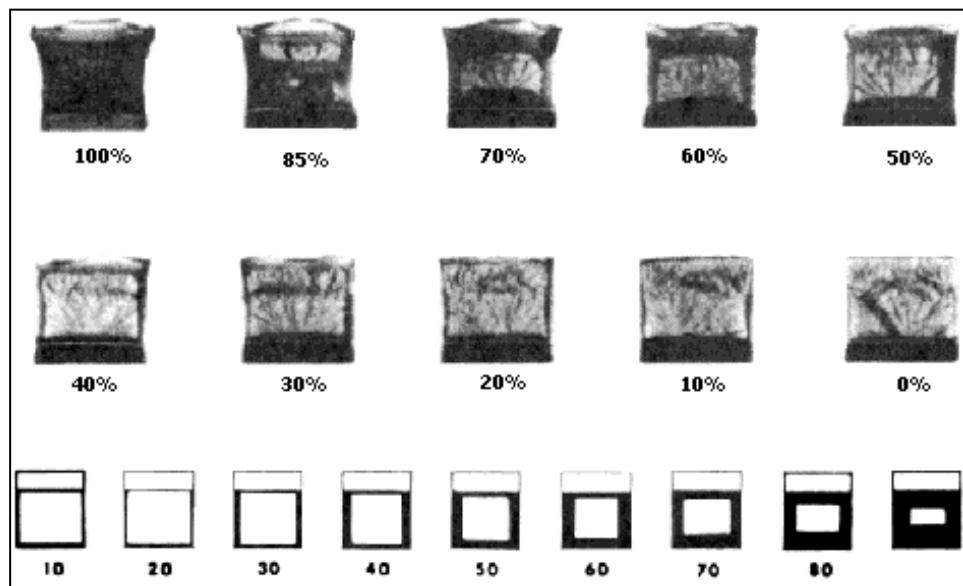


Fig. 06 – Método por comparação carta padrão para determinação % da área dúctil [3].

2.5 - Definições de superfícies e perfil geométricos

Superfície geométrica

Superfície ideal prescrita no projeto, na qual não existem erros de forma e acabamento. Por exemplo, superfície plana, cilíndrica, etc., ou seja, por definição perfeita. Na realidade não existe, é apenas uma referência (Fig. 07).

SUPERFÍCIE GEOMÉTRICA

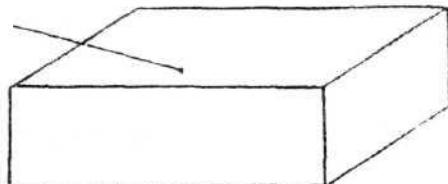


Fig. 07 - Superfície geométrica, por definição perfeita [4].

Superfície real

Superfície que limita o corpo e o separa do meio que o envolve. É a superfície deixada pelo método empregado em sua produção, por exemplo torneamento, retífica, ataque químico, etc. Superfície que podemos ver e tocar (Fig. 08).

SUPERFÍCIE REAL

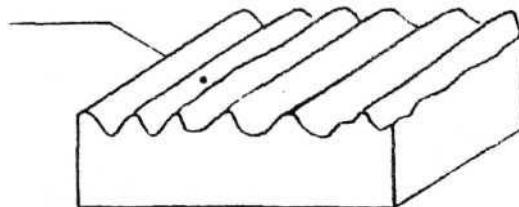


Fig. 08 - Superfície real. uma herança do método empregado na usinagem [4].

Superfície efetiva

Superfície avaliada pela técnica de medição, com forma aproximada da superfície real de um corpo. É importante esclarecer que diferentes sistemas de medição, por exemplo, com ou sem sapata, ou condições de medição como raio da ponta do apalpador, podem resultar em diferentes superfícies efetivas. É a superfície apresentada pelo instrumento de medição (Fig. 09).

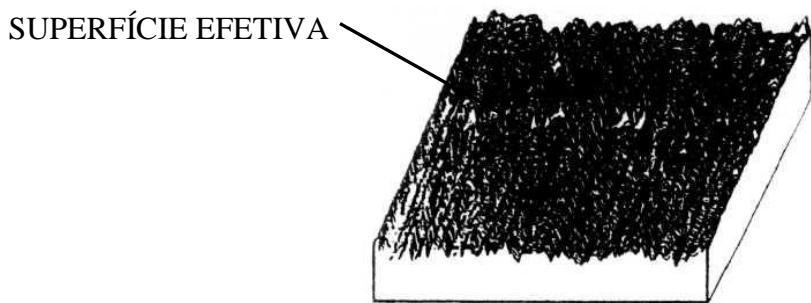


Fig. 09 - Superfície efetiva apresentada com ampliação por uma impressora [4].

Perfil geométrico

Intersecção da superfície geométrica com um plano perpendicular. Por exemplo, uma superfície plana perfeita cortada por um plano perpendicular originará um perfil geométrico que será uma linha reta (Fig. 10).

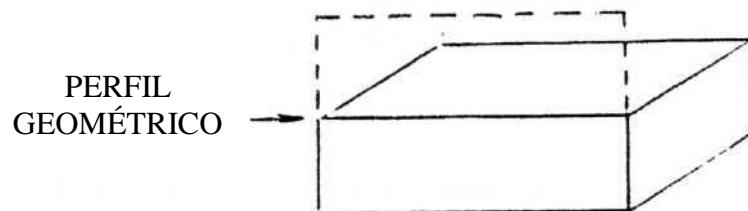


Fig. 10 - Perfil geométrico perfeito, por definição [4].

Perfil real

Intersecção da superfície real com um plano perpendicular. Neste caso o plano perpendicular (imaginário) cortará a superfície deixada pelo método de usinagem e originará uma linha irregular (Fig. 11).

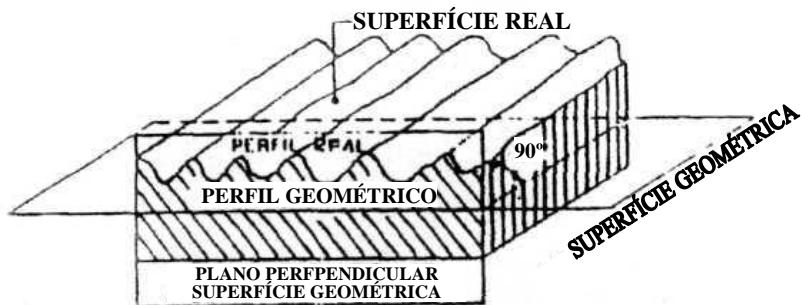


Fig. 11 - Perfil real, cortado por um plano perpendicular [4].

Perfil efetivo

Imagen aproximada do perfil real obtido por um meio de avaliação ou medição. Por exemplo o perfil apresentado por um registrador gráfico, sem qualquer filtragem (Fig. 12).

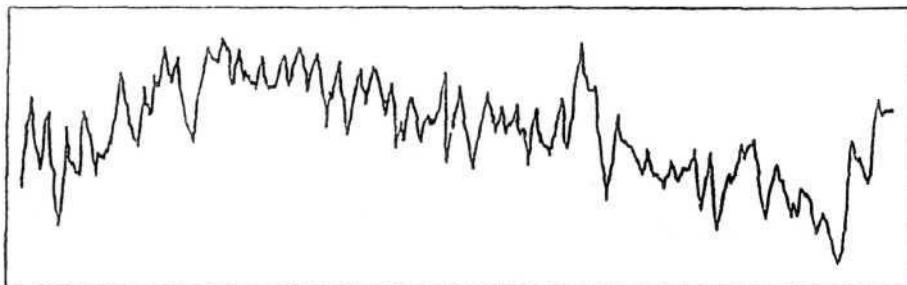


Fig. 12 - Perfil efetivo, obtido com impressora de rugosímetro (sem filtrar) [4].

Perfil de rugosidade

Obtido a partir do perfil efetivo, por um instrumento de avaliação, após filtragem. É o perfil apresentado por um registrador gráfico após uma filtragem para eliminar a ondulação à qual se sobrepõe geralmente a rugosidade (Fig. 13).

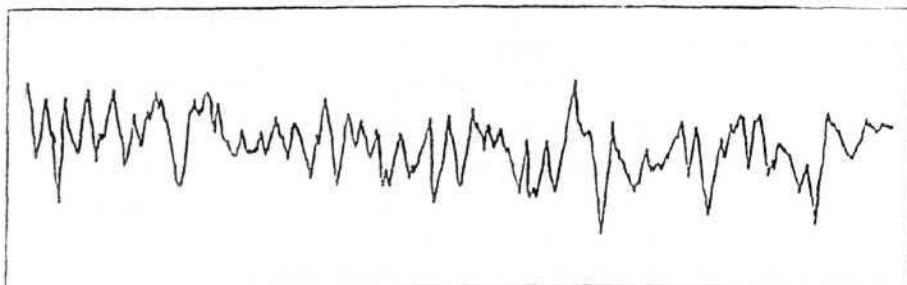


Fig. 13 - Perfil de rugosidade (após filtragem da ondulação) [4]

Outros componentes de uma superfície. Aos efeitos de facilitar e estudo da textura superficial, é oportuno definir ainda os seguintes itens (Fig. 14):

- (1) Comprimento da rugosidade
- (2) Comprimento da ondulação
- (3) Amplitude da rugosidade
- (4) Amplitude da ondulação
- (5) orientação dos sulcos

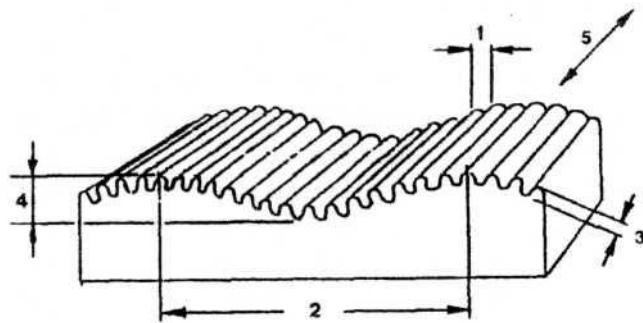


Fig. 14 - Elementos de uma superfície usinada [4].

3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 - Preparação dos corpos de prova

A preparação dos corpos de prova retificados foi realizada de acordo com o padrão interno da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST). O padrão interno da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) está baseado em normas específicas, garantindo que o resultado do ensaio seja o mais homogêneo possível entre várias peças de um mesmo material.

A seguir serão apresentadas duas situações de preparação de corpos de prova. As duas situações foram realizadas dentro das especificações e rigores da norma ASTM E 23, porém o que difere um procedimento do outro é a eliminação da fase de retífica dos corpos de prova (Fig. 15).

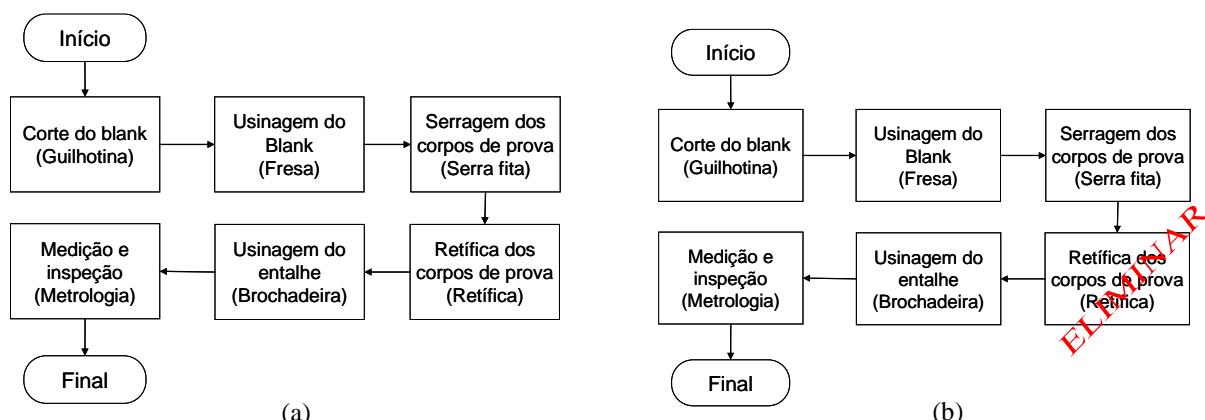


Fig. 15 – Fluxograma de preparação: (a) atual e (b) proposto

Os corpos de prova entalhados foram usinados e retificados, com dimensões e tolerâncias padronizadas, foram preparados cuidadosamente, evitando a presença de estriadas, endentações ou outras marcas de usinagem que pudessem prejudicar os resultados do ensaio.

3.2 – Equipamentos utilizados na preparação dos corpos de prova

Os equipamentos (Fig. 16) utilizados durante a fase de preparação dos corpos de prova foram:

- **Guilhotina Hidráulica:** utilizada para corte dos blanks;
- **Centro de Usinagem:** utilizado para fresagem dos blanks;
- **Serra Fita:** utilizado para corte dos corpos de prova;
- **Retífica:** utilizado para retificar os corpos de prova;
- **Brochadeira:** utilizado para confecção do entalhe.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 16 – Equipamentos utilizados na fase de preparação dos corpos de prova:
(a) Guilhotina Hidráulica, (b) Serra Fita, (c) Retífica, (d) Centro de Usinagem e (e) Brochadeira

3.3 - Dimensões do corpo de prova

Todos os corpos de prova foram medidos e inspecionados no laboratório de ensaios mecânicos da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST). Os corpos de prova que não atendiam as tolerâncias mencionadas na tabela acima foram descartados.

As dimensões e tolerâncias requeridas pela norma ASTM são mostradas na tabela 03.

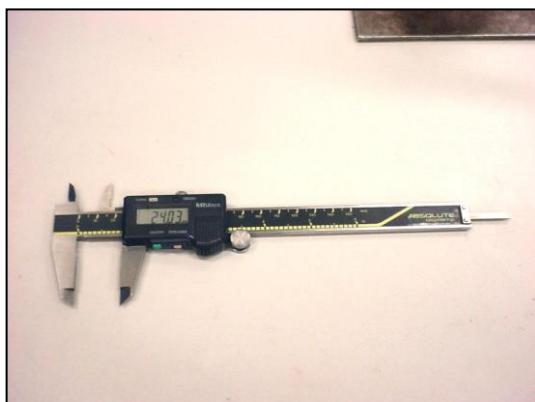
Tabela 03 – Dimensões e tolerâncias de corpos de prova Charpy pela ASTM E23

Variáveis	Ilustração	Dimensões	Tolerâncias	Equipamentos de medição
Perpendicularidade do entalhe		90°	$\pm 2^\circ$	Projetor de perfil
Lados adjacentes		90°	$90 \pm 10\text{min}$	Projetor de perfil
Seções		10x10mm	$\pm 0,075\text{mm}$	Micrômetro
Centro do entalhe		L/2	$\pm 1\text{mm}$	Paquímetro
Ângulo do entalhe		45°	$\pm 1^\circ$	Projetor de perfil
Raio do entalhe		0,25mm	$\pm 0,025\text{mm}$	Projetor de perfil
Profundidade do entalhe		2mm	$\pm 0,025\text{mm}$	Projetor de perfil
Rugosidade superficial		-	2µm para a superfície do entalhe e 4µm para as faces laterais	Rugosímetro

3.4 – Equipamentos utilizados na inspeção dos corpos de prova

Os equipamentos (Fig. 17) utilizados para realizar a inspeção dos corpos de prova foram:

- **Paquímetro:** medição do comprimento do corpo de prova;
- **Micrômetro:** medição da espessura e largura do corpo de prova;
- **Rugosímetro:** medição da rugosidade superficial dos corpos de prova;
- **Projetor de perfil:** medição da profundidade de entalhe, ângulos e raios diversos dos corpos de prova.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 17 – Equipamentos utilizados na fase de inspeção dos corpos de prova:
(a) Paquímetro, (b) Micrômetro, (c) Rugosímetro e (d) Projetor de Perfil

3.5 - Realização dos Ensaios

Todos os ensaios foram realizados de acordo com padrão interno da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST). Os padrões da CST estão baseados nas principais normas internacionais de ensaio de Impacto Charpy (ASTM e DIN). As principais etapas da realização do ensaio são:

- Verificar a perda por atrito da máquina de Charpy;
- Inspecionar os corpos de prova quanto a presença de defeitos que possam interferir no resultado de ensaio (visual);
- Inspecionar os corpos de prova quanto as dimensões para garantir que todos os corpos de prova estão atendo aos requisitos da norma (instrumentos);
- Disposição dos corpos de prova em ordem para o ensaio dentro da cuba de resfriamento;
- Resfriar os corpos de prova até a temperatura de ensaio (os corpos de prova devem ser mantidos a temperatura de ensaio durante um tempo de 10 minutos);
- Posicionar o pêndulo na posição inicial;
- Fazer o ajuste no indicador de energia absorvida da máquina (indicador analógico);
- Retirar o corpo de prova do nitrogênio líquido e posiciona-lo no batente da máquina (o tempo para executar essa etapa é de no máximo 5 segundos);
- Acionar o pêndulo quando a temperatura do corpo de prova alcançar -20°C (mais ou menos 1° C);
- Registrar o resultado do ensaio em formulário;
- Repetir esses passos até que todos os corpos de prova sejam ensaiados.

3.6 – Equipamentos utilizados nos ensaios dos corpos de prova

Os equipamentos (Fig. 18) utilizados durante a fase de ensaio dos corpos de prova foram:

- **Máquina de ensaio Charpy** – equipamento utilizado para romper os corpos de prova e fornecer a energia do ensaio;
- **Cuba de Resfriamento** – recipiente onde os corpos de prova são resfriados até a temperatura de ensaio;
- **Nitrogênio Líquido** – utilizado no resfriamento dos corpos de prova (mistura com álcool etílico);
- **Pinça específica** – utilizada pra posicionamento do corpo de prova na máquina.



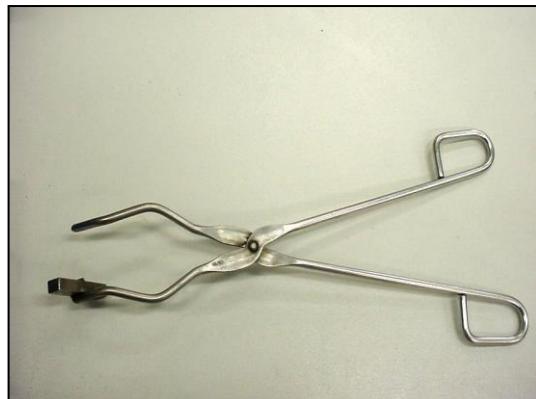
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 18 – Equipamentos utilizados na fase de ensaio dos corpos de prova:
(a) Maquina de ensaio Charpy, (b) Cuba de Resfriamento, (c) Nitrogênio líquido e (d) Pinça Específica.

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

As temperaturas para o ensaio foram escolhidas tomando como base o histórico de materiais ensaiados no laboratório da CST, onde grande parte dos testes foram realizados nas temperaturas de 0°C e -20°C.

Os corpos de prova foram retirados de uma única amostra de bobina, com o intuito de diminuir variações provenientes do processo de laminação.

Os corpos de prova foram confeccionados do aço API 5L X65-PSL2, material com grande solicitação de ensaios de Charpy.

Foram confeccionados 15 corpos de prova para cada condição de ensaio (sentido longitudinal e transversal, temperatura de 0°C e -20°C, acabamento usinado e retificado) O número total de corpos de prova foi de 120 unidades.

Os corpos de prova foram retirados de forma escalonada para diminuir a interferência de variações internas do material (heterogeneidades) (Fig. 19).

Para obtenção de resultados livres de interferência das variações dimensionais, os valores de energia foram divididos pela área abaixo de entalhe.

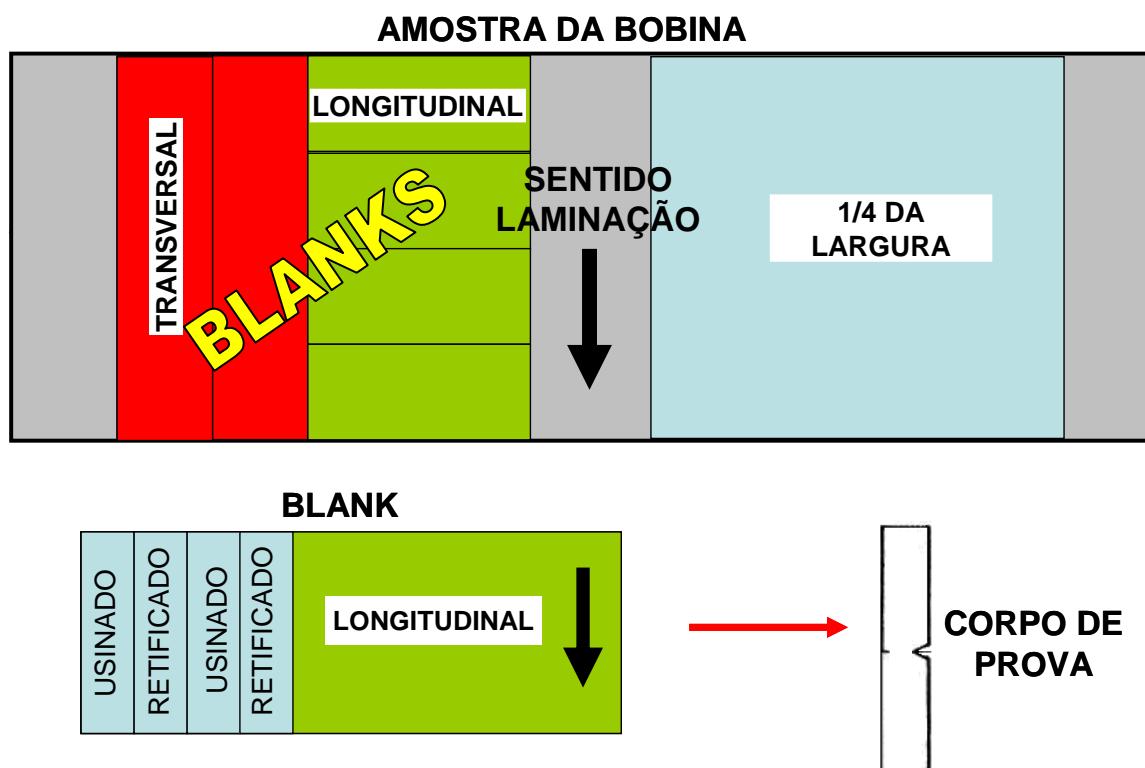


Fig. 19 – Esquema de retirada dos corpos de prova em amostra de bobina

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da figura 20, referentes aos testes transversais e temperatura de ensaio de 0° C, apresentaram variação pouco significativa da energia média por unidade de área.

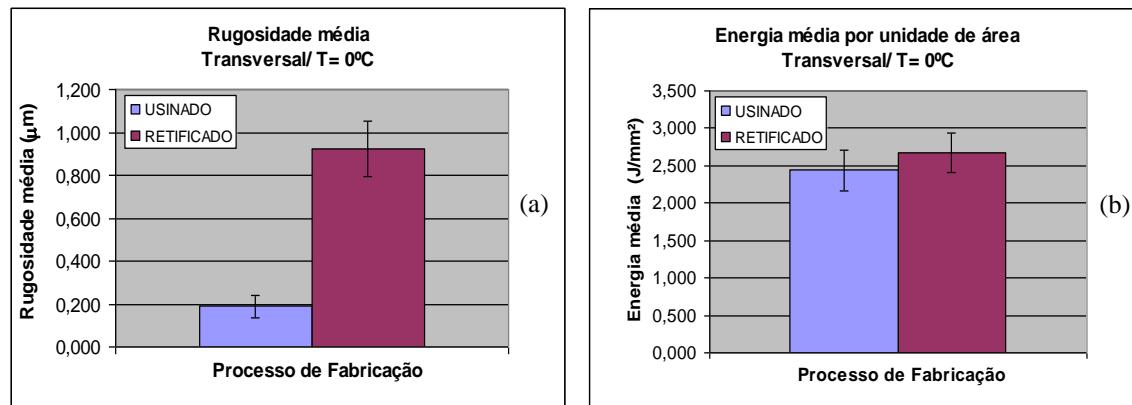


Fig. 20 – (a) Rugosidade média e (b) energia média por unidade de área
(Charpy transversal e Temperatura de 0 °C)

Os resultados da figura 21, referentes aos testes transversais e temperatura de ensaio de -20° C, também apresentaram variação pouco significativa da energia média por unidade de área.

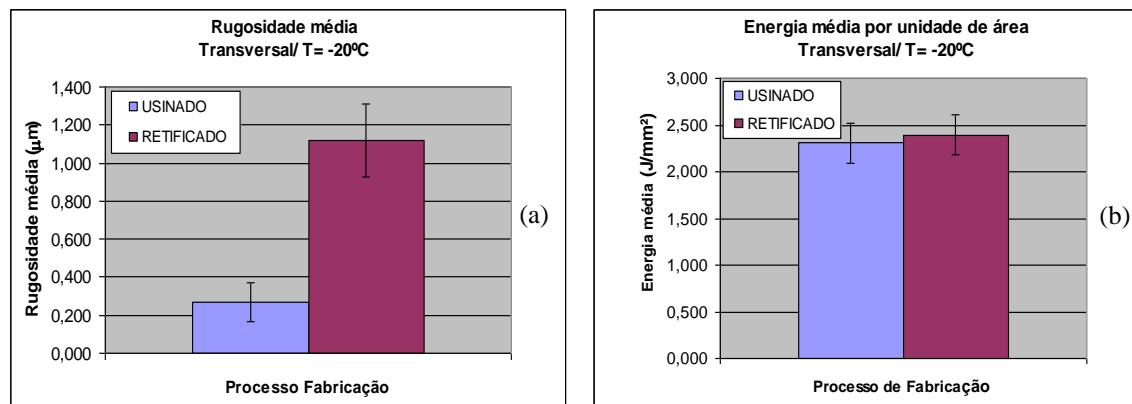


Fig. 21 – (a) Rugosidade média e (b) energia média por unidade de área
(Charpy transversal e Temperatura de -20 °C)

Os resultados da figura 22, referentes aos testes longitudinais e temperatura de ensaio de -20° C, não apresentaram nenhuma variação da energia média por unidade de área.

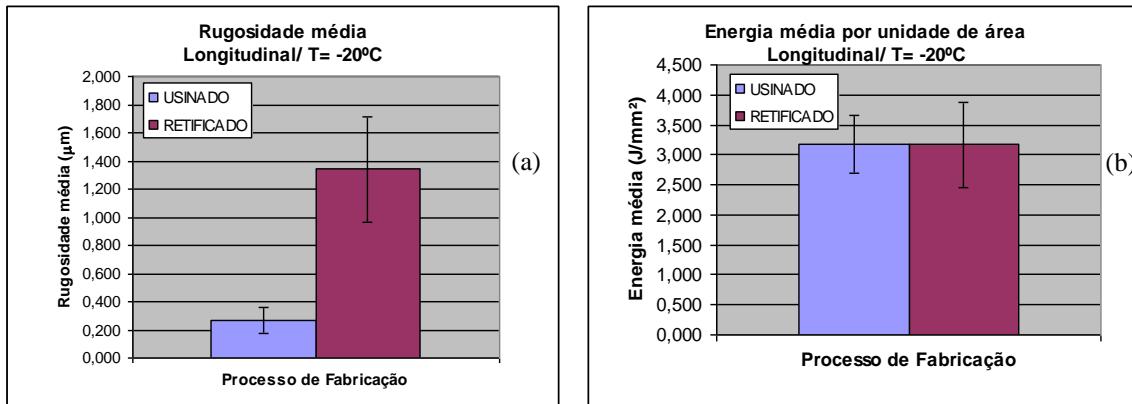


Fig. 22 – (a) Rugosidade média e (b) Energia média por unidade de área
(Charpy Longitudinal e Temperatura de -20 °C)

Para esta condição de ensaio a energia média por unidade de área não sofreu influência pela variação da rugosidade ou o número de ensaios foi insuficiente. Dentre os ensaios realizados, o teste longitudinal foi o que apresentou maior dispersão entre os dados encontrados. Esta dispersão se mostra normal em materiais laminados a quente devido a orientação dos grãos.

A temperatura de teste somente foi realizada a -20°C devido a capacidade da máquina de ensaio (450J) não ser suficiente para romper alguns corpos de prova.

Para o gráfico 02 foi possível observar pequeno aumento da energia média por unidade de área com o aumento da rugosidade (corpos de prova usinados, temperatura de ensaio de 0°C e direção de teste transversal).

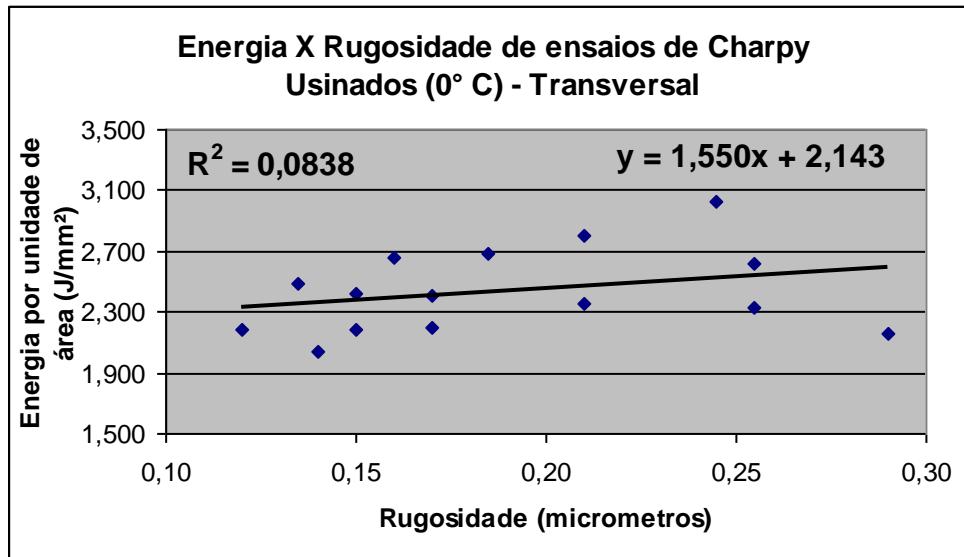


Gráfico 02 – Curva energia versus rugosidade para ensaios de Charpy transversal, usinados e temperatura de ensaio de 0° C.

Para o gráfico 03 também foi possível observar pequeno aumento da energia média por unidade de área com o aumento da rugosidade (corpos de prova retificados, temperatura de ensaio de 0°C e direção de teste transversal).

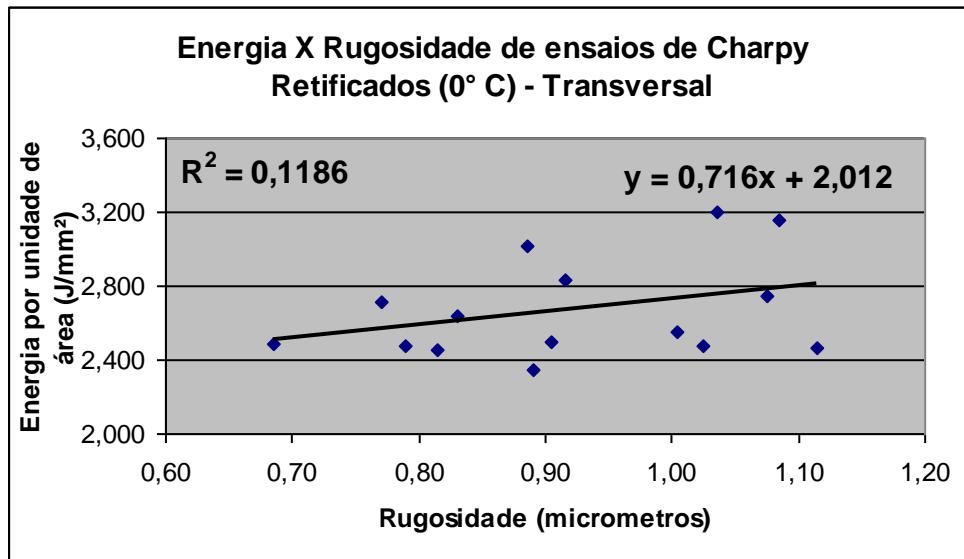


Gráfico 03 – Curva energia versus rugosidade para ensaios de Charpy transversal, retificados e temperatura de ensaio de 0° C.

Para o gráfico 04 também foi possível observar pequeno aumento da energia média por unidade de área com o aumento da rugosidade (corpos de prova usinados, temperatura de ensaio de -20°C e direção de teste transversal).

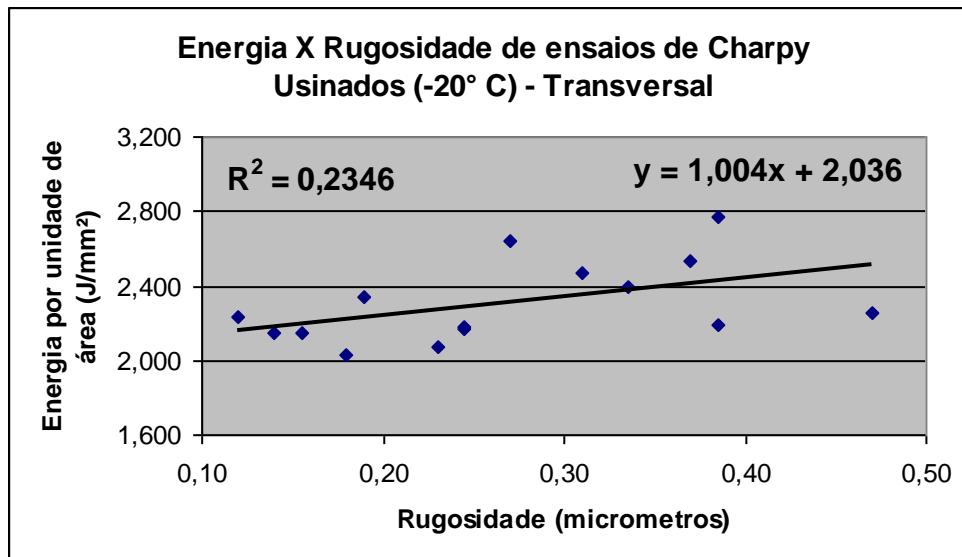


Gráfico 04 – Curva energia versus rugosidade para ensaios de Charpy transversal, usinados e temperatura de ensaio de -20° C.

Para o gráfico 05 também foi possível observar pequeno aumento da energia média por unidade de área com o aumento da rugosidade (corpos de prova retificados, temperatura de ensaio de -20°C e direção de teste transversal).

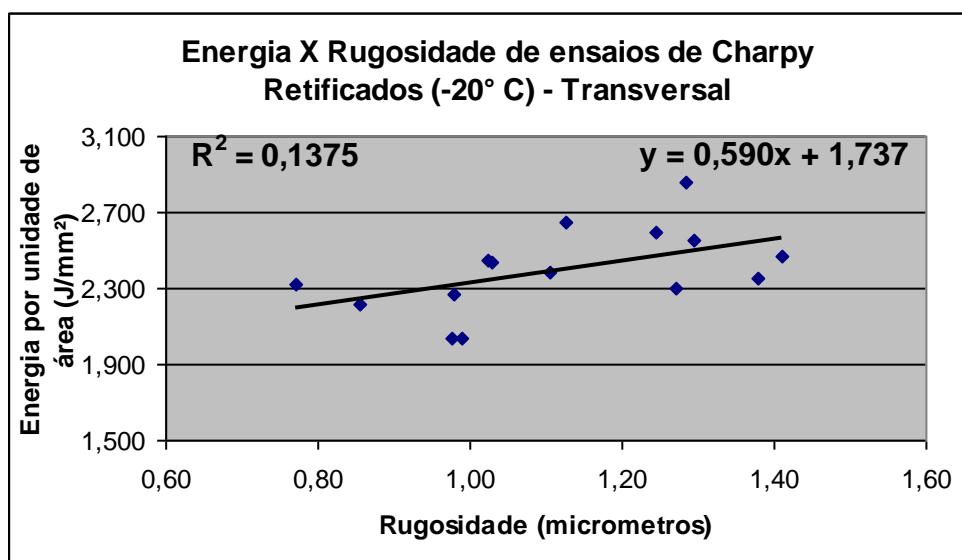


Gráfico 05 – Curva energia versus rugosidade para ensaios de Charpy transversal, retificados e temperatura de ensaio de -20° C.

Para o gráfico 06 também foi possível observar pequeno aumento da energia média por unidade de área com o aumento da rugosidade, e também uma maior dispersão nos resultados (corpos de prova usinados, temperatura de ensaio de -20°C e direção de teste longitudinal).

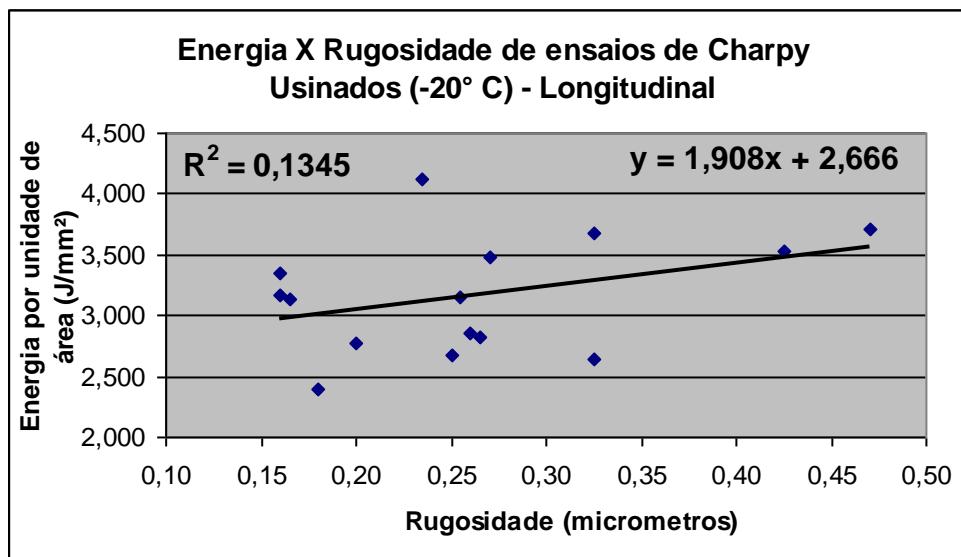


Gráfico 06 – Curva energia versus rugosidade para ensaios de Charpy longitudinal, usinados e temperatura de ensaio de -20° C.

Para o gráfico 07 também foi possível observar pequeno aumento da energia média por unidade de área com o aumento da rugosidade, e também uma maior dispersão nos resultados (corpos de prova retificados, temperatura de ensaio de -20°C e direção de teste longitudinal).

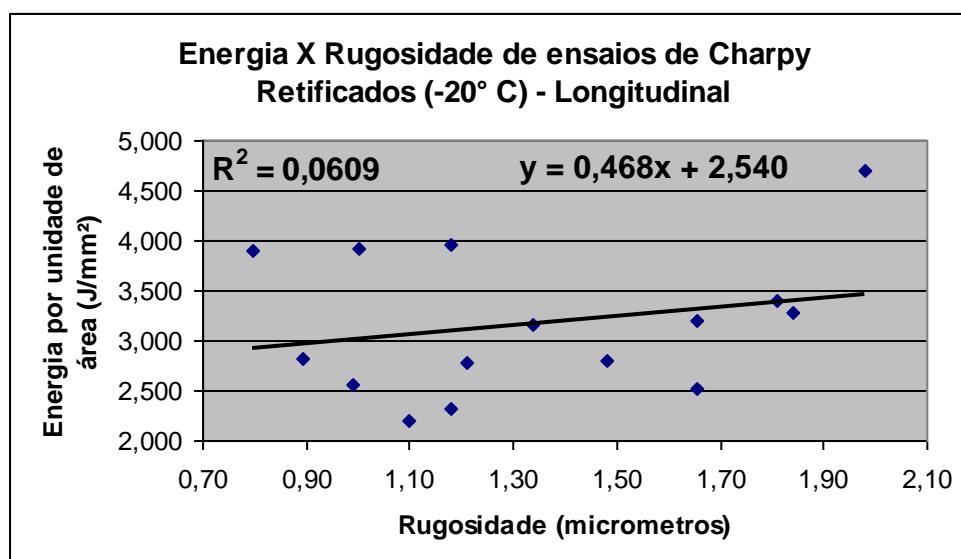


Gráfico 07 – Curva energia versus rugosidade para ensaios de Charpy longitudinal, retificados e temperatura de ensaio de -20° C.

Como pudemos observar, apesar da dispersão dos resultados encontrados, foi possível observar que a energia absorvida nos testes tem uma pequena correlação com a rugosidade superficial obtida na confecção de corpos de prova. Esse pequeno aumento da energia foi observado em praticamente todas as situações analisadas.

Além disso, os corpos de prova retificados (cuja rugosidade média se mostrou mais alta que os corpos de prova usinados) também apresentaram uma energia em média mais alta do que os corpos de prova usinados, com exceção dos ensaios realizados no sentido longitudinal, o que nos leva a crer que quando maior a rugosidade, maior a energia absorvida.

No processo atual, também foi possível observar esta dispersão de resultados de energia nos testes realizados no sentido longitudinal, isto se dá devido ao processo de laminação a quente de bobinas.

Os testes realizados para o sentido transversal e temperatura de ensaio de 0º C (parâmetros requisitados para esta qualidade de material) mostram que os dados obtidos nos testes para o projeto proposto estão de acordo com o histórico de ensaios realizados até o momento no laboratório de testes da CST, como podemos observar na figura 23.

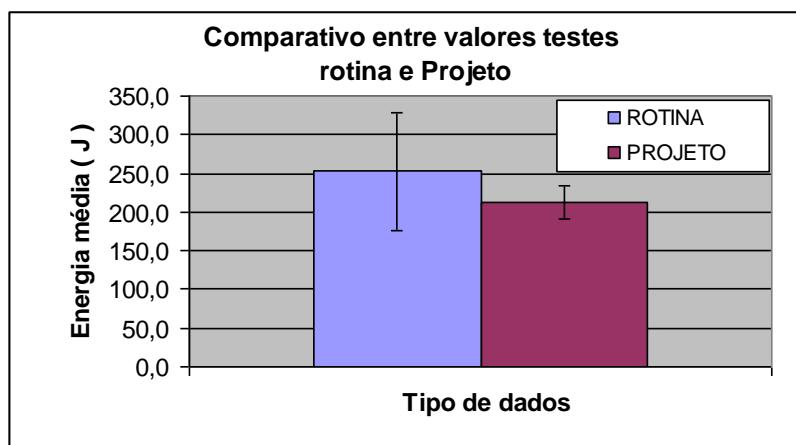


Fig. 23 - Comparativo entre testes de rotina e testes obtidos para o estudo (corpos de prova retificados, sentido transversal e temperatura de 0º C).

O pequeno efeito de aumento da energia absorvida com o aumento da rugosidade não tem explicação aparente, porém existem duas possibilidades a serem consideradas:

- 1) possibilidade de aumento do atrito do corpo de prova com os batentes com o aumento da rugosidade;

2) possibilidade de amortecimento de parte do impacto, gerado pelo amassamento das cristas formadas pela rugosidade mais alta na superfície real do material.

No entanto, um estudo mais detalhado, e um número maior de corpos de prova são de fundamental importância, para concluir com mais exatidão as possibilidades mencionadas acima.

6 - CONCLUSÃO

Os dados mostram que é possível eliminar o processo de retífica do atual fluxograma de confecção de corpos de prova, uma vez que somente o processo de usinagem é suficiente para obter o acabamento exigido pela norma adotada, sem que com isso, perca-se a confiança e a segurança dos dados informados pelo laboratório, já que os valores em média encontrados foram praticamente iguais aos do processo de retífica.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Itamar Ferreira e R.C. Tokimatsu, "Ensaio Charpy - Limitações e campo de aplicação", 54 Congresso Anual da ABM, 1, 30-32, (1999).
- [2] - GARCIA, SPIM, SANTOS, Ensaios dos Materiais, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
- [3] - ASTM Standard E 23 – Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials (2002).
- [4] - GONZÁLEZ, Ricardo V. B.. Rugosidade Superficial – Uma abordagem prática. Manual Mitutoyo do Brasil Ind. Com. Ltda (1997).

8 - ANEXO – Tabela dos dados obtidos nos testes de Charpy

Temperatura de Ensaio: 0° C

Direção do teste: Transversal

Processo de fabricação: Usinados

Tabela 04 – Dados obtidos para os ensaios de Charpy transversal usinados e temperatura de ensaio de 0° C

Nº CP	Rugosidade (µm)	Energia (J)	Energia/Área (J/mm²)
1	0,12	174,9	2,187
2	0,14	199,0	2,485
3	0,14	164,1	2,033
4	0,15	174,9	2,188
5	0,15	175,5	2,426
6	0,16	214,2	2,659
7	0,17	193,0	2,407
8	0,17	175,5	2,192
9	0,19	216,0	2,690
10	0,21	171,3	2,350
11	0,21	224,5	2,804
12	0,25	244,4	3,031
13	0,26	209,3	2,615
14	0,26	186,3	2,332
15	0,29	172,5	2,160
média	0,19	193,0	2,437
desvio	0,05	23,8	0,278

Temperatura de Ensaio: 0° C

Direção do teste: Transversal

Processo de fabricação: Retificados

Tabela 05 – Dados obtidos para os ensaios de Charpy transversal retificados e temperatura de ensaio de 0° C

Nº CP	Rugosidade (µm)	Energia (J)	Energia/Área (J/mm²)
1	1,09	253,4	3,161
2	0,83	210,6	2,641
3	0,91	199,7	2,502
4	0,77	217,9	2,713
5	1,08	219,1	2,748
6	0,89	226,9	3,019
7	0,79	199,0	2,481
8	0,92	225,7	2,835
9	1,03	197,9	2,477
10	1,04	256,4	3,204
11	0,69	198,5	2,484
12	0,82	197,3	2,458
13	0,89	187,6	2,349
14	1,12	197,3	2,462
15	1,01	203,9	2,554
média	0,92	212,7	2,672
desvio	0,13	20,6	0,271

Temperatura de Ensaio: -20° C

Direção do teste: Transversal

Processo de fabricação: Usinados

Tabela 06 – Dados obtidos para os ensaios de Charpy transversal usinados e temperatura de ensaio de -20° C

Nº CP	Rugosidade (μm)	Energia (J)	Energia/Área (J/mm 2)
1	0,25	174,0	2,167
2	0,23	166,0	2,071
3	0,25	174,0	2,184
4	0,12	179,1	2,234
5	0,14	173,1	2,151
6	0,19	186,4	2,340
7	0,34	191,8	2,392
8	0,16	170,8	2,143
9	0,47	181,0	2,257
10	0,31	197,2	2,472
11	0,37	202,7	2,532
12	0,27	211,9	2,646
13	0,18	162,4	2,030
14	0,39	221,6	2,769
15	0,39	174,9	2,191
média	0,27	184,5	2,305
desvio	0,10	17,3	0,216

Temperatura de Ensaio: -20° C

Direção do teste: Transversal

Processo de fabricação: Retificados

Tabela 07 – Dados obtidos para os ensaios de Charpy transversal retificados e temperatura de ensaio de -20° C

Nº CP	Rugosidade (μm)	Energia (J)	Energia/Área (J/mm 2)
1	0,77	186,4	2,324
2	0,86	177,4	2,220
3	0,98	163,6	2,036
4	0,98	181,6	2,273
5	0,99	163,0	2,036
6	1,03	196,0	2,443
7	1,03	196,0	2,438
8	1,11	190,6	2,380
9	1,13	213,0	2,649
10	1,25	208,8	2,592
11	1,27	184,0	2,295
12	1,29	228,8	2,859
13	1,30	204,6	2,550
14	1,38	188,2	2,349
15	1,41	197,9	2,472
média	1,12	192,0	2,394
desvio	0,19	17,7	0,219

Temperatura de Ensaio: -20° C

Direção do teste: Longitudinal

Processo de fabricação: Usinados

Tabela 08 – Dados obtidos para ensaios de Charpy longitudinal usinados e temperatura de ensaio de -20° C

Nº CP	Rugosidade (µm)	Energia (J)	Energia/Área (J/mm²)
1	0,43	282,8	3,532
2	0,24	331,9	4,125
3	0,33	213,0	2,649
4	0,27	279,3	3,483
5	0,26	228,2	2,856
6	0,16	267,6	3,346
7	0,26	252,2	3,151
8	0,33	295,4	3,680
9	0,16	254,0	3,175
10	0,17	250,4	3,137
11	0,20	222,7	2,768
12	0,25	213,0	2,674
13	0,27	226,3	2,822
14	0,47	297,1	3,717
15	0,18	191,8	2,393
média	0,26	253,7	3,167
desvio	0,09	38,7	0,481

Temperatura de Ensaio: -20° C

Direção do teste: Longitudinal

Processo de fabricação: Retificados

Tabela 09 – Dados obtidos para ensaios de Charpy longitudinal retificados e temperatura de ensaio de -20° C

Nº CP	Rugosidade (µm)	Energia (J)	Energia/Área (J/mm²)
1	0,80	309,9	3,895
2	0,90	224,5	2,814
3	0,99	205,1	2,558
4	1,00	313,8	3,916
5	1,10	176,1	2,195
6	1,18	185,8	2,316
7	1,18	317,6	3,963
8	1,21	222,1	2,777
9	1,34	410,8	3,167
10	1,48	223,9	2,801
11	1,66	201,5	2,519
12	1,66	255,2	3,191
13	1,81	271,7	3,399
14	1,84	262,3	3,285
15	1,98	376,3	4,704
média	1,34	263,8	3,167
desvio	0,37	69,6	0,708