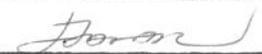


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**INSTRUMENTAÇÃO DE UM PÊNDULO
PARA ENSAIO DE IMPACTO CHARPY**

N.º Pub. FEM 33/94

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR DANIEL YVAN MARTIN
DELFORGE E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 04/02/94.



ORIENTADOR

DANIEL YVAN MARTIN DELFORGE

Orientador: Prof. Dr. Itamar Ferreira

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Mecânica da
Univerdade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos ne-
cessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Me-
cânica na Área de Materiais e Processos de Fabricação.

Fevereiro de 1994

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Título da Dissertação: "INSTRUMENTAÇÃO DE UM PÊNDULO DE
ENSAIO DE IMPACTO CHARPY"

Autor: DANIEL YVAN MARTIN DELFORGE

Orientador: Prof. Dr. ITAMAR FERREIRA

Aprovado por:



Prof. Dr. ITAMAR FERREIRA
Presidente



Prof. Dr. PAULO YSHIMINE



Profª Dra ANA MARIA MARTINEZ NAZAR

Campinas, 04 de Fevereiro de 1994



0088046

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Itamar Ferreira pela orientação, apoio, e incentivo constante.

Aos professores Adyles Arato Júnior e João Pedro Quirino do Departamento de Engenharia Mecânica da FEIS/UNESP, pela colaboração na instalação do sistema de aquisição de dados e na simulação por elementos finitos, realizados neste trabalho.

Ao grande amigo Ruís Camargo Tokimatsu, pelas discussões gerais sobre o assunto deste trabalho.

Aos amigos Marino Teixeira Caetano e Elias Amaral dos Santos, do Departamento de Engenharia Mecânica da FEIS/UNESP, pela colaboração na usinagem das células de carga e dos corpos de prova e, pela digitação do presente trabalho.

Ao amigo Valdeir Antônio Rodrigues, pela colaboração na parte fotográfica.

Aos meus pais e às minhas queridas
Éricka e Sirlene.

TITLE: INSTRUMENTATION OF THE IMPACT CHARPY TEST

ABSTRACT

The conventional Impact Charpy Test allows for the determination of the total absorbed energy (E_T) for fracture of notched specimens. However, such energy is the result obtained by adding two important values : the absorbed energy due to the initiation of fracture (E_i), and the absorbed energy due to the propagation of this fracture. The aim of the present work has been to instrument the Impact Charpy Test, by means of extensometry and data acquisition and digitalization techniques in order to evaluate the E_i and E_p components. After a brief review of the: i) Conventional impact Charpy test; ii) Metallic materials fracture toughness theory ; iii) Dynamic analysis instrumentation basic requirements, a rig is described which four load cells were installed along the hammer tup , and employing two different methods: experimental and finite elements analysis, the best site for location of the foil strain-gages was determined. Afterwards, some impact tests were used to evaluate the performance of the instrumentation, using notched Charpy specimens in the following metallic alloys: i) High-strength aluminium; ii) Low-carbon steel; iii) Medium-carbon steel; iv) 300M steel. During the tests, it was observed that when the hammer's initial velocity decreased, in the high-strength aluminium, low-carbon steel and 300M steel cases (2.0m/s or 3.0m/s), the maximum load values to initialize the specimens fracture, was significantly increased, and when total ductile fracture occurred, those maximal loads resulted very similar to the expected loads. On the other hand, for increasing hammer's initial velocity (5.5m/s), and occurred brittle Charpy specimens fracture, the maximal load are too much decreased.

TÍTULO: Instrumentação de um pêndulo de ensaios de impacto Charpy

RESUMO

O ensaio de impacto Charpy convencional, possibilita que se determine a energia total (E_T) absorvida para fratura de um corpo de prova entalhado, de dimensões padronizadas. Entretanto, sabe-se que essa energia total, resulta da soma de duas componentes: a energia necessária para iniciar a fratura (E_i) mais a energia necessária para a propagação dessa fratura (E_p). No presente trabalho, é instrumentado um pêndulo de ensaio de impacto Charpy, utilizando-se técnicas de extensometria e de aquisição e digitalização de sinais, com o objetivo de se determinar as duas componentes (E_i e E_p), cuja soma define a energia total absorvida. Inicialmente, além de um breve estudo sobre: i) Ensaio de impacto Charpy; ii) Tenacidade à fratura de materiais metálicos; iii) Análise das condições básicas necessárias para instrumentação de ensaios dinâmicos, são confeccionadas quatro células de carga, nas quais são avaliados os melhores locais de colagem dos extensômetros, com base em dois métodos: experimental e por elementos finitos. A verificação da eficiência da instrumentação e do sistema de aquisição de dados foi feita, realizando-se alguns ensaios em condições de carregamento dinâmico, aplicados a corpos de prova Charpy, entalhados. Os materiais utilizados na confecção dos corpos de prova, são: Liga de alumínio Al 7050, aço ABNT 1020, aço ABNT 4140 e aço 300M de utilização aeronáutica. Verificou-se que para a liga de alumínio Al 7050 e para os aços ABNT 1020 e 300M, quando se diminui a velocidade inicial de impacto (entre 2.0 e 3.0 m/s), os valores das cargas máximas para iniciar a fratura, aumentam significativamente e, que quando ocorre fratura completamente dúctil ou escoamento generalizado dos corpos de prova, as cargas atingem valores próximos aos estabelecidos com carregamento monotônico, apoiado em três pontos. Já, quando se observam velocidades iniciais de impacto mais elevadas (da ordem de 5.5m/s) e, fratura completamente frágil dos corpos de prova, as cargas atingidas são muito inferiores às estabelecidas, nos ensaios com apoio em três pontos.

SUMÁRIO

	página
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	01
1.1. Considerações gerais.....	01
1.2. Transição de comportamento dúctil-frágil dos aços de baixa resistência.....	06
1.3. Objetivos do presente trabalho.....	07
 CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA.....	 08
2.1. O ensaio de impacto Charpy.....	08
2.2. Critérios para determinação da temperatura de transição dúctil-frágil.....	11
2.3. Principais fatores químicos e metalúrgicos que afetam na temperatura de transição.....	14
2.4. Variáveis externas que influenciam na temperatura de transição.....	19
2.5. Ensaio de tenacidade à fratura em deformação plana.....	21
2.6. Análise do ensaio Charpy Instrumentado.....	26
2.7. Considerações gerais acerca do ensaio Charpy Instrumentado.....	30
2.8. Análise das oscilações inerciais devido ao impacto.....	31
2.9. Condições básicas necessárias para instrumentação de um pêndulo Charpy.....	37
 CAPÍTULO 3 - INSTRUMENTAÇÃO DO ENSAIO CHARPY.....	 40
3.1. Projeto da célula de carga.....	40
a) Estimativa das forças e dos tempos envolvidos no ensaio.....	40
b) Escolha do material da célula de carga.....	42
c) Escolha dos extensômetros.....	42
d) Determinação do local de colagem dos extensômetros.....	43
e) Especificação e dimensões do elemento sensível da célula de carga.....	48
3.2. Fabricação das células de carga experimentais.....	51
a) Usinagem e tratamentos térmicos.....	51
b) Colagem dos extensômetros.....	52

3.3. Aferição das células de carga e ensaios preliminares.....	56
a) Especificação dos equipamentos.....	56
b) Montagem do sistema.....	57
c) Resultados obtidos da aferição das célula de carga C_I e C_{II}	59
d) Ensaios preliminares, envolvendo as células de carga C_I e C_{II}	61
e) Conclusão.....	65
 CAPÍTULO 4 - ENSAIOS EM CONDIÇÕES REAIS DE IMPACTO, COM A CÉLULA DE CARGA C_{III}	 67
4.1. Materiais e Métodos.....	67
4.2. Caracterização da resistência à flexão em três pontos em condições estáticas.....	69
 CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	 72
5.1. Curvas obtidas dos ensaios com a liga Al 7050-T76.....	72
5.2. Curvas obtidas dos ensaios com o aço ABNT 1020.....	74
5.3. Curvas obtidas dos ensaios com o aço ABNT 4140.....	79
5.4. Curvas obtidas dos ensaios com o aço 300M.....	80
5.5. Determinação das cargas máximas.....	83
5.6. Determinação das energias absorvidas para início de fratura.....	84
5.7. Análise e discussão dos resultados.....	85
 CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	 92
 BIBLIOGRAFIA.....	 94

1. Introdução

1.1. Considerações Gerais

Normalmente, os cálculos estruturais em engenharia mecânica são fundamentados na aptidão dessas estruturas de resistirem elasticamente aos esforços impostos durante a sua utilização. Esses esforços podem ser aplicados pela combinação dos seguintes modos:

- i) Sobre uma área considerável ou de forma puntual;
- ii) Estático, monotônico, cíclico ou impulsivo;
- iii) Tração, flexão, torsão ou compressão.

Apesar da complexidade das equações obtidas da teoria da elasticidade e utilizadas nos cálculos estruturais, as soluções existentes e os métodos de cálculos atuais são bastante satisfatórios, quando os materiais são considerados livres de descontinuidades.

No entanto, a predição de fraturas, notadamente as que se iniciam a partir de um defeito no material, até algumas décadas, não eram previstas na metodologia convencional do cálculo estrutural.

Atualmente, é possível introduzir-se na concepção de uma estrutura, as limitações dos esforços que dependem do tamanho e geometria dos defeitos no material, tais como: trincas,

microtrincas, porosidades, inclusões metálicas e não metálicas. Porém, essa possibilidade é oferecida a estruturas fabricadas com metais de alta resistência, no âmbito da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) portanto, frágeis, quando comparados aos metais de elevada ductilidade.

Um material é dito frágil, se quando submetido a esforços, não consegue deformar-se de forma apreciável, sem fraturar-se. Esse fato não implica que sua resistência à fratura seja baixa. Essa definição é incompleta, pois materiais que normalmente são tidos como sendo dúcteis, dependendo da temperatura, do estado de tensões e da velocidade de deformação a que são submetidos, podem apresentar comportamento completamente frágil.

Os problemas causados pela fragilização de estruturas metálicas, remontam desde o final do século passado e, em particular, com estruturas soldadas, ocorreu uma série de acidentes espetaculares dos quais pode-se citar, entre muitos, os seguintes [1]:

- ponte do Zoo de Berlim (Alemanha/1936);
- ponte do Canal Albert (Bélgica/1938);
- ponte de "Ouest des Trois Rivières" (Canadá/1951).

Com outras estruturas de aço soldadas, tais como vasos de pressão, gazodutos, navios e aeronaves, também ocorreram fraturas, algumas das quais, catastróficas, devido à fragilização dos materiais.

Para se ter uma noção da extensão do problema que a fragilização de estruturas metálicas representa, pode-se citar que com o advento da II Guerra Mundial, devido à necessidade de alta produção, os americanos optaram pela fabricação de cascos de navios inteiramente soldados e, não rebitados como feito normalmente àquela época. Dos 4.694 navios da série "Liberty", 1.289 apresentaram falhas estruturais importantes e 233 navios apresentaram fratura frágil grave e muitos partiram-se completamente. É interessante ressaltar que parte desses acidentes ocorreu em dias de inverno rigoroso e, com as embarcações paradas no porto, ou seja, sem nenhuma solicitação considerável [7].

Estudos posteriores de amostras retiradas dessas estruturas mostraram que a fratura frágil de estruturas metálicas depende, entre outros, de quatro fatores fundamentais:

- i) A temperatura;
- ii) Os defeitos na estrutura interna dos materiais;
- iii) As concentrações de tensão em certas regiões da estrutura provenientes do projeto de fabricação;
- iv) Taxa de deformação.

As figuras 1.1 a 1.3, ilustram alguns casos de fraturas, citados acima.

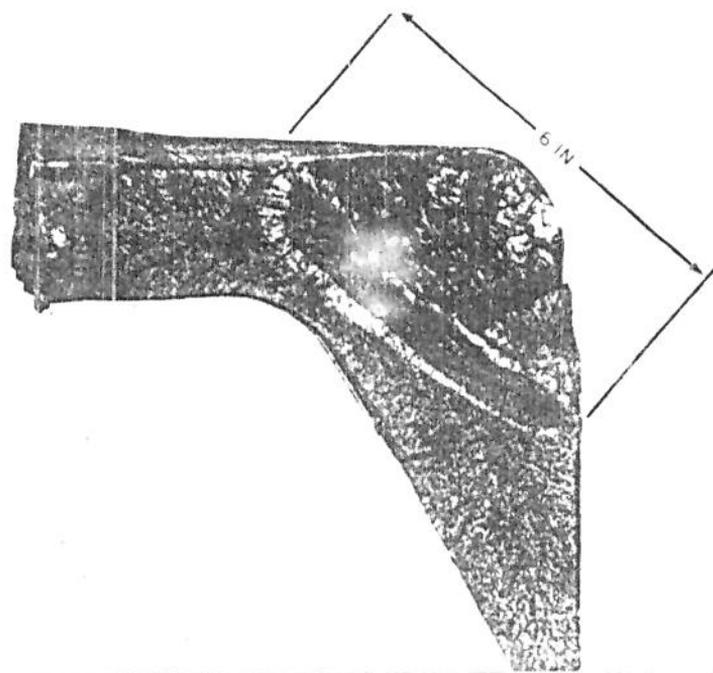
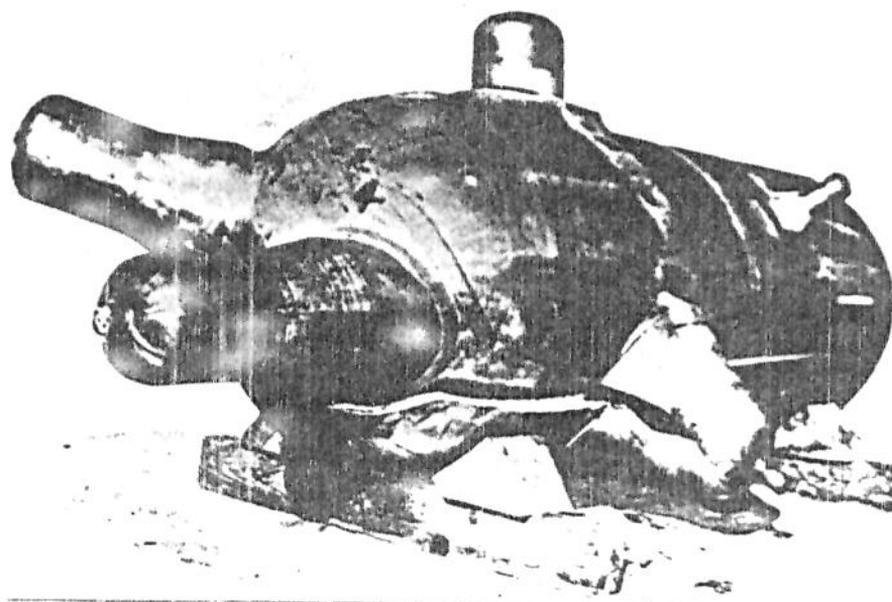


Figura 1.1. Rompimento de um reservatório de pressão de 920mm de diâmetro. Nota-se uma região de concentração de tensão, proveniente do projeto [1].

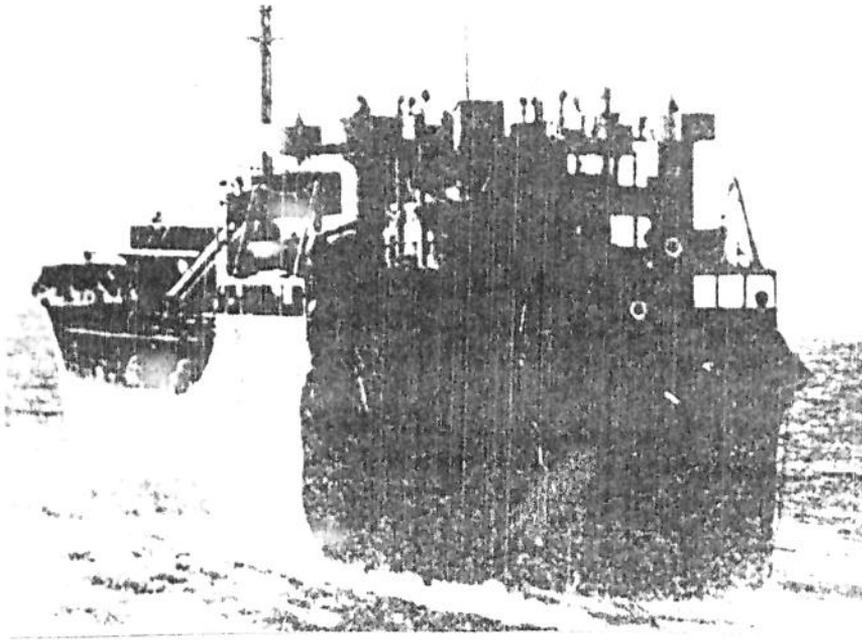


Figura 1.2. Ruptura de um navio da série 'Liberty' [28].



Figura 1.3. Rompimento de um reservatório, a 90°C [1].

1.2. Transição de comportamento dúctil-frágil dos aços de baixa resistência

Alguns materiais de baixa resistência, notadamente o aço com baixo teor de carbono, possuem comportamento dúctil a temperatura ambiente e perdem a capacidade de se deformar plasticamente e tornam-se frágeis a baixas temperaturas. Esse comportamento resulta numa faixa de transição de comportamento dúctil-frágil (ou frágil-dúctil), que pode ser avaliada com uma certa facilidade, através do ensaio Charpy convencional, do qual obtém-se uma curva de energia total absorvida (em Joules) versus temperatura. A energia total absorvida traduz-se em tenacidade à fratura, como propriedade que depende fundamentalmente da temperatura, da geometria do corpo de prova, da configuração do entalhe e da taxa de deformação.

Nos últimos anos, uma parcela considerável de pesquisadores vem estudando um método de se determinar um parâmetro chamado: "Fator de intensificação de tensão dinâmico - K_{II} ", através do ensaio Charpy instrumentado.

A instrumentação do martelo instalado no pêndulo da máquina de ensaio Charpy, nos fornece várias informações acerca dos esforços envolvidos durante o impacto, o que não ocorre com o ensaio Charpy convencional que, como foi visto, nos fornece unicamente a energia total absorvida pelo corpo de prova, ao fraturar-se.

1.3. Objetivos do presente trabalho

Este trabalho tem por objetivo, a instrumentação de um pêndulo de ensaio de impacto Charpy, por meio de uma célula de carga, utilizando-se técnicas de extensometria e de aquisição e digitalização de sinais, para valores de energia absorvida de até 150 J. A importância dessa instrumentação, reside no fato de que o ensaio Charpy convencional, fornece apenas dados de energia total absorvida pelo corpo de prova e, portanto, não se consegue distinguir a energia absorvida para iniciar a fratura, da energia absorvida para a propagação dessa fratura, o que, é possível de se conseguir, instrumentando o pêndulo de ensaio Charpy.

A eficiência do sistema, será verificada, avaliando-se o Fator de Intensificação de Tensão Dinâmico Aparente - K_{JDa} , de algumas ligas metálicas.

2. Caracterização da tenacidade à fratura

2.1. O ensaio de impacto Charpy convencional

Neste ítem, é analisado o ensaio de impacto Charpy, pois ele se destaca pela sua simplicidade e aceitação quase universal. Dentre os diversos tipos de entalhes, o mais comumente utilizado é o entalhe em V (mais adiante, é feita uma breve análise do efeito do entalhe). As figuras 2.1 e 2.2 referem-se ao corpo de prova de impacto de Charpy com entalhe em V (tipo A) e ao método de aplicação da carga, respectivamente.

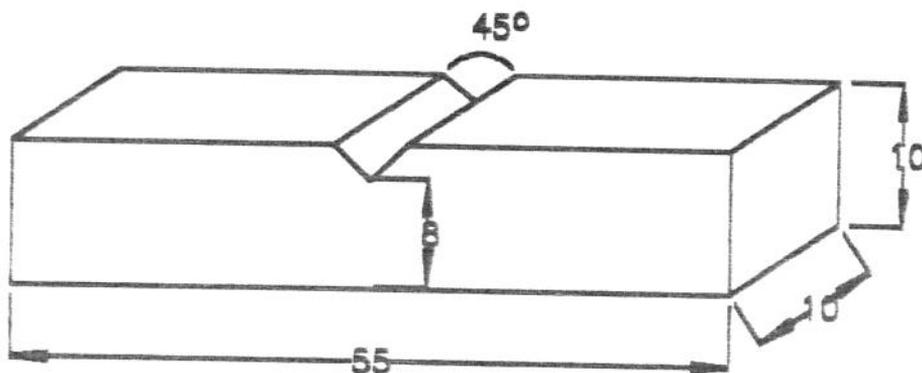


Figura 2.1. Corpo de prova para o ensaio de impacto Charpy, com entalhe em V (tipo A). Neste caso, o raio do fundo do entalhe é: $\zeta = 0,25\text{mm}$.

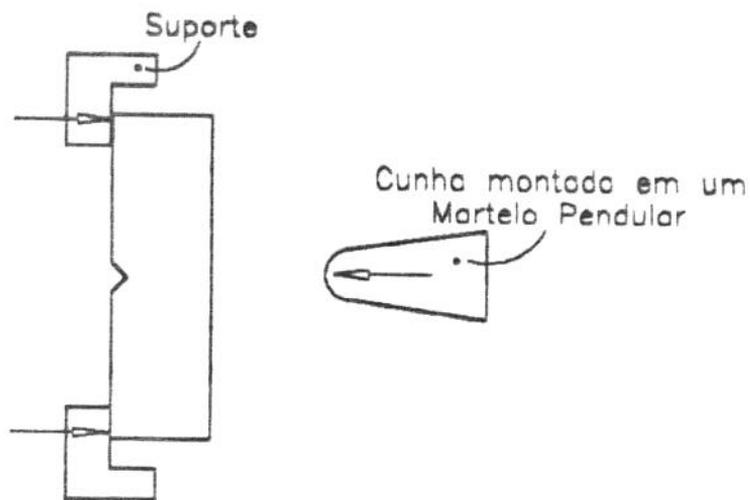


Figura 2.2. Método de aplicação da carga, num corpo de prova Charpy

Na execução do ensaio, o corpo de prova é apoiado em suas duas extremidades, como uma viga simples bi-apoiada que é golpeada do lado oposto ao entalhe.

O efeito desse tipo de tensionamento é o de imprimir ao metal da base do entalhe, um estado triaxial de tensão. É interessante notar que o ensaio de impacto (ensaio dinâmico) é muito mais rápido do que o ensaio de tração normal (ensaio monotônico), em termos de velocidade de aplicação da carga, que é da ordem de milhares de vezes maior para o primeiro caso [5].

A velocidade elevada de deformação é consequência do golpe dado por uma cunha montada no centro de percussão de um martelo pendular, que é solto de uma altura pré-fixada. Como o martelo cai sempre da mesma altura (o que não impede que a velocidade inicial de impacto seja modificada, variando-se essa

altura), ele possui uma energia potencial constante, quando golpeia o corpo de prova, que geralmente é da ordem de 300 J. A fratura do corpo de prova consome energia do martelo, que é indicada diretamente na máquina de ensaio. A energia gasta na fratura é a característica obtida do ensaio. Se a fratura for completamente dúctil, a energia será elevada, ao passo que, para fratura totalmente frágil, a energia gasta é baixa.

Esse tipo de ensaio, é um método simples de se acompanhar a mudança do tipo de fratura de um aço, em função da temperatura na qual o corpo de prova se encontra, no instante do impacto. Na Figura 2.3, é mostrado uma curva típica de transição do comportamento dúctil em função da temperatura de ensaio. Nota-se que a transição não se dá numa determinada temperatura, mas sim, numa faixa de temperatura [7].

Quando examinam-se as superfícies fraturadas, vê-se que há uma correlação razoável entre a fração da secção transversal que fraturou de maneira dúctil e a energia gasta para romper o corpo de prova [7,1].

A mudança de comportamento dúctil/frágil pode ser verificada pelo exame das superfícies fraturadas, o que leva a um critério para se determinar a temperatura de transição dúctil/frágil. Esse critério leva em conta que a temperatura de transição é aquela em que se verifica 50% de fratura dúctil e 50% de fratura frágil, a qual ocorre na região central da superfície fraturada, definindo-se assim, a temperatura de transição com base na aparência da fratura [4].

2.2. Critérios para determinação da temperatura de transição dúctil/frágil

Vários são os critérios que levam à determinação da temperatura de transição dúctil/frágil, dentro de uma faixa, pois como é mostrado na Figura 2.3, não há uma temperatura determinada na qual um metal ferroso se torna bruscamente frágil, mas a transição ocorre dentro de uma faixa de temperaturas. Todavia, por conveniência, é comum utilizar o termo temperatura de transição de um metal. Contudo, esse termo necessita de uma definição cuidadosa, havendo várias maneiras de expressá-lo. Um deles, como viu-se anteriormente, é considerar a temperatura na qual a superfície do corpo de prova rompido, apresenta-se 50% dúctil e 50% frágil. Existem entre outros dois modos largamente utilizados para se definir a temperatura de transição. Um deles utiliza a energia média (TM), isto é, a temperatura na qual a energia absorvida cai para a metade da diferença entre a energia necessária para fratura completamente dúctil e a fratura completamente frágil do corpo de prova, e um outro que utiliza a temperatura na qual um corpo de prova rompe com uma energia fixa, geralmente 20 ou 27J (T20). A figura 2.3, ilustra os dois últimos critérios [4,6].

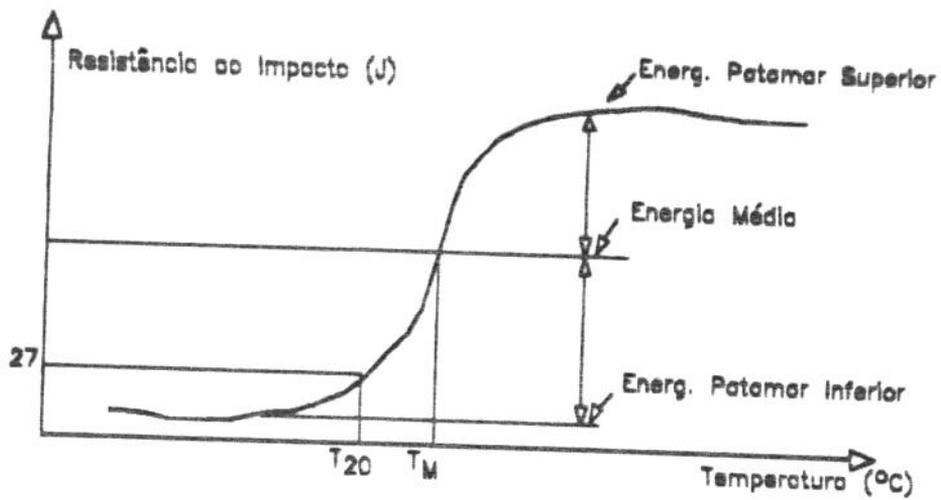


Figura 2.3. Utilização dos critérios T_{20} e T_M na determinação da temperatura de transição.

Outros critérios estabelecem que a temperatura de transição é:

a) Baseados no aspecto da superfície de fratura:

- i) Aquela na qual se tem 70% de cristalinidade [6];
- ii) A maior, na qual se tem 100% de cristalinidade, e que define a temperatura de ductilidade nula [7];
- iii) A menor, na qual se notam indícios de fratura normal (paralela à superfície fraturada) [6];

b) Aquela onde se adota um certo valor de expansão lateral; usualmente 0,38 mm [4].

Na Tabela 2.1 é mostrada a temperatura de transição, em função de vários critérios de determinação da temperatura de transição. Nesta tabela, nota-se uma certa disparidade entre os valores de temperatura de transição.

Tabela 2.1. Temperatura de transição de vários aços, em função dos critérios: 20J, 0,38mm de expansão lateral e 50% de ductilidade (ou 50% de cristalinidade) [4].

MATERIAL	σ_e (MPa)	TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO (°C)		
	σ_t (MPa)	20J	0,38mm	50%Dúctil
Aço C-Mn Laminado a quente	210/442	27	17	46
Aço baixo carbono laminado a quente	385/570	-24	-22	12
Aço temperado e Revenido	618/688	-71	-67	-54

σ_e = Limite de escoamento

σ_t = Limite de resistência

No caso das análises efetuadas em amostras testadas pelo ensaio Charpy, obtidas dos cascos dos navios "Liberty" (II Guerra Mundial), verificou-se que estes jamais teriam falhado a temperaturas superiores às definidas pelo critério 20J.

Finalmente, a pergunta é: qual critério deve-se utilizar na determinação da temperatura de transição?

A seguir, é feito um breve estudo sobre os principais fatores químicos e metalúrgicos que afetam na temperatura de transição. Neste caso, não se levará em conta os critérios de determinação de temperatura de transição, ora apresentados.

2.3. Principais fatores químicos e metalúrgicos que afetam na temperatura de transição de aços

Existem muitos elementos de liga que afetam na temperatura de transição. Variando apenas o teor de carbono, quanto mais alto este teor, maior a susceptibilidade à fratura frágil perto da temperatura ambiente. O fósforo exerce um efeito ainda mais considerável sobre a temperatura de transição e esta é uma das razões pelas quais ele é indesejável nos aços ao carbono, comuns. Outros elementos, como o manganês, têm um efeito totalmente inverso sobre a temperatura de transição, abaixam-na, ao invés de aumentá-la.

A seguir, apresenta-se uma série de figuras que ilustram a influência de algumas variáveis, na temperatura de transição de ligas ferrosas:

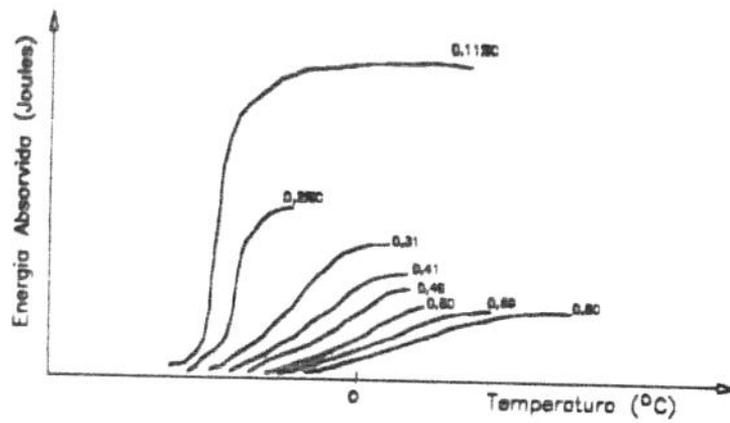


Figura 2.4. Efeito da %C na curva temperatura de transição dúctil-frágil versus energia absorvida [4].

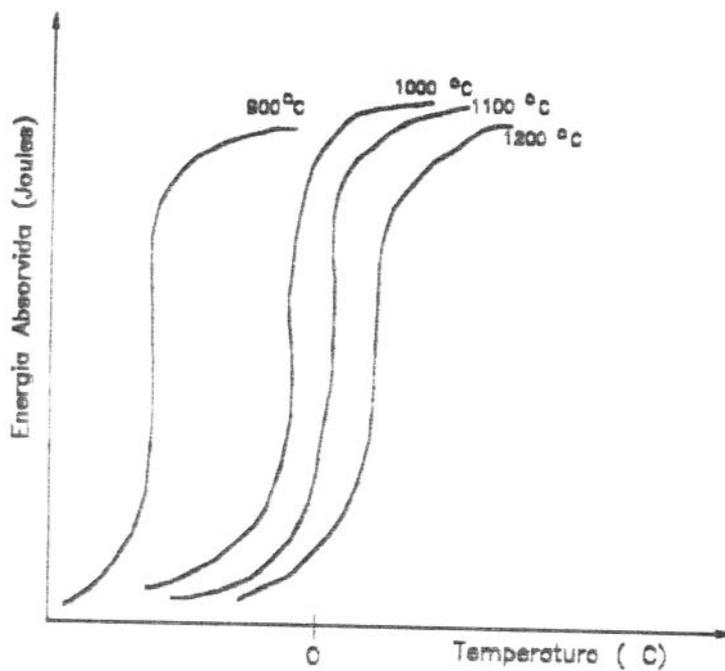


Figura 2.5. Efeito da temperatura de normalização, na curva temperatura de transição dúctil-frágil versus energia absorvida, para um aço de baixo carbono [6].

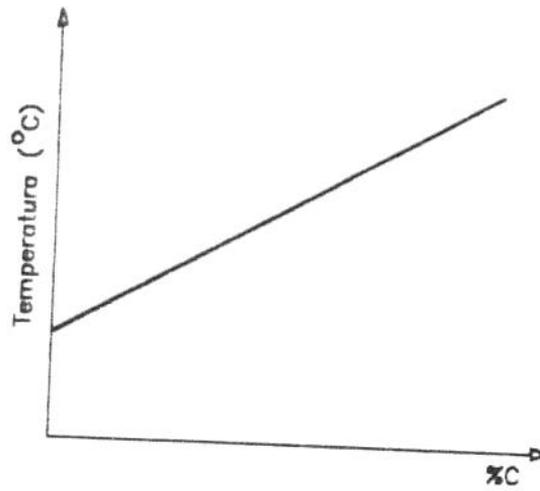


Figura 2.6. Efeito do teor do carbono sobre a temperatura de transição de um aço. Critério da energia média - ensaio Charpy com entalhe em V [5].

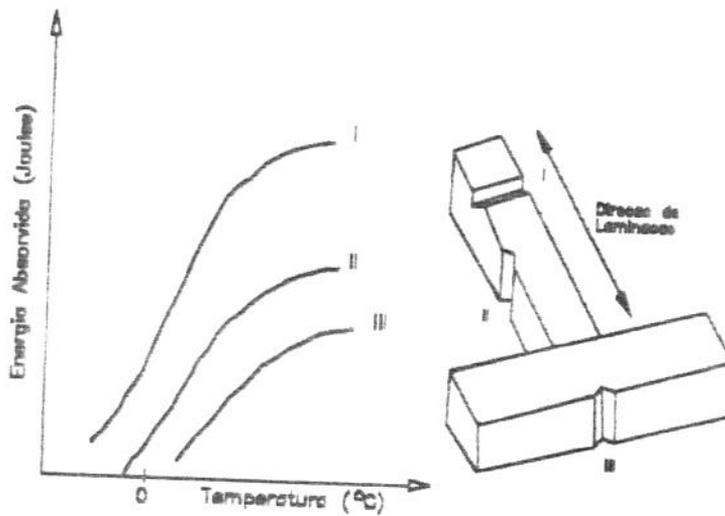


Figura 2.7. Efeito da orientação do corpo de prova, com relação à direção de laminação, nas curvas de transição Charpy. Esse tipo de variação das curvas, dá-se principalmente devido às mudanças anisotrópicas e ao direcionamento de tensões internas, provocadas pelo trabalho mecânico no interior do material [7].

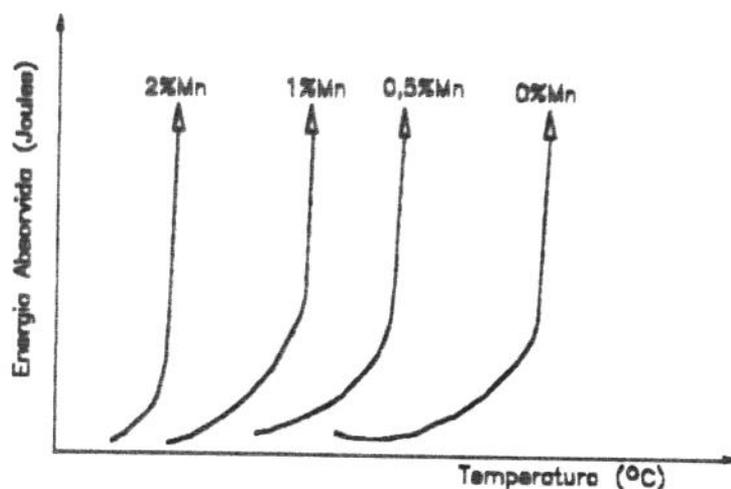


Figura 2.8. Efeito da % Mn na curva de energia de impacto versus temperatura. O manganês, em aços do baixo carbono, atua no sentido de diminuir a tendência da formação de um "filme" de FeS nos contornos de grãos de cementita, além disso, ele é um refinador de grãos e produz uma estrutura de perlita fina [4].

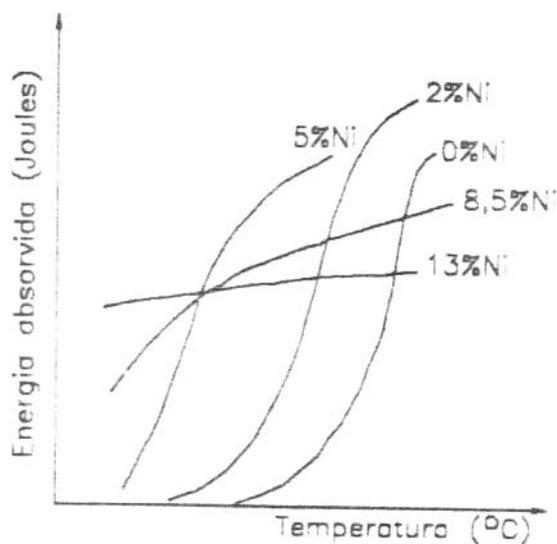


Figura 2.9. Efeito da % Ni na curva de energia de impacto versus temperatura. Segundo Tetelman e Hertzberg, sabe-se que ele estabiliza a austenita abaixando assim a sua temperatura de decomposição, resultando numa diminuição da temperatura de transição [4,6].

Como foi visto, o número de variáveis que afetam na temperatura de transição dúctil-frágil de materiais ferrosos é grande. Dentre elas, pode-se ainda citar a microestrutura. Um exemplo típico do efeito da resistência ao impacto é mostrado na figura 2.10, onde foi feita uma comparação entre dois valores de resistência ao impacto Charpy, em função da temperatura, para um mesmo aço, submetido a dois tratamentos térmicos que produziram no metal o mesmo nível de dureza. Um aço foi temperado e revenido para se obter cementita esferoidizada e o outro foi normalizado (resfriado ao ar) para produzir perlita. Vê-se que existe uma diferença de temperatura de transição entre a estrutura de cementita esferoidizada e a perlítica. Esse fato justifica a obtenção de estrutura contendo cementita esferoidizada, em estruturas que exigem alta tenacidade, ou seja: alta resistência ao impacto, em certas temperaturas.

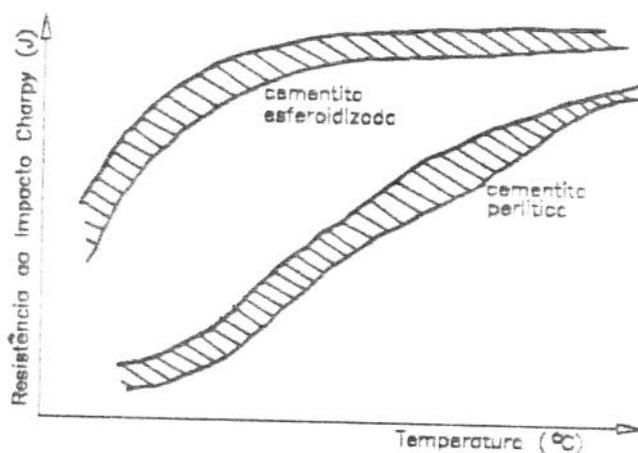


Figura 2.10. Efeito de dois tratamentos térmicos sobre a resistência ao impacto a baixa temperatura do aço ao carbono ABNT 4340. Ambos produziram a mesma dureza, porém as temperaturas de transição são bastante diferentes. Os dados estão dentro de uma faixa, para indicar a dispersão [5].

2.4. Variáveis externas que influenciam na temperatura de transição

Além dos fatores químicos e metalúrgicos, tem-se também as variáveis externas (ao material), que influenciam no comportamento mecânico e de fratura, dos materiais metálicos; essas variáveis são: temperatura, taxa de deformação e severidade do entalhe. A Figura 2.11 ilustra de maneira simplificada, a influência dessas variáveis no comportamento mecânico dos materiais metálicos. Nota-se que há tendências à fragilização com a diminuição da temperatura ou com o aumento da taxa de deformação ou com a severidade do entalhe.

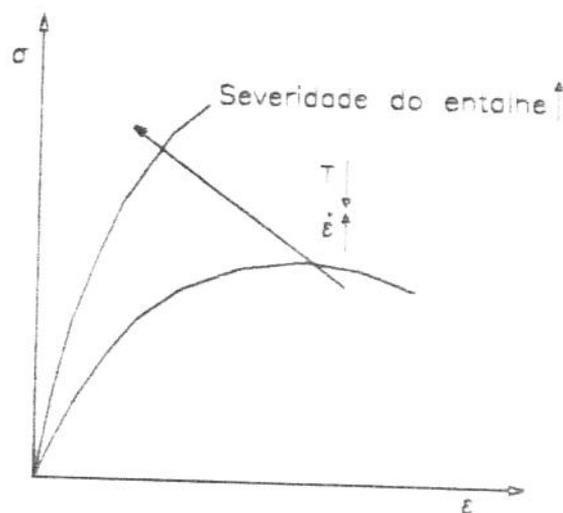


Figura 2.11. Influência das variáveis externas, temperatura (T), taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) e severidade do entalhe, no comportamento mecânico (curva tensão-deformação), de materiais metálicos [4].

Como visto anteriormente, a temperatura exerce grande influência na energia absorvida no ensaio de impacto de aços. Os aços, de baixa resistência e também os outros materiais metálicos com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), apresentam uma transição de comportamento dúctil-frágil (ou frágil-dúctil) muitas vezes abrupta, devido à mudança no micromecanismo de fratura; abaixo da transição, ocorre fratura frágil pelo micromecanismo de clivagem (fratura transgranular brilhante) e acima da transição, a fratura ocorre pelo micromecanismo alveolar ("Dimples"). Assim, o ensaio de impacto é importante na caracterização da temperatura de transição desses materiais. Já os metais e ligas metálicas, com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e hexagonal compacta (HC), são menos influenciadas pela temperatura, sendo portanto menos importantes em termos do ensaio de impacto [7].

A severidade do entalhe representa grande importância no comportamento mecânico e fratura dos materiais metálicos. Em geral, os materiais de alta resistência mecânica são mais sensíveis ao entalhe. Quanto maior a severidade do entalhe, maiores são os níveis de triaxialidade de tensões nas proximidades da raiz do entalhe.

A severidade do entalhe depende basicamente da raiz da ponta do entalhe, da espessura do espécime e do comprimento do entalhe. Quanto maior a severidade do entalhe, maior a tendência à fratura frágil. Assim, quanto maiores as dimensões do corpo de prova do ensaio Charpy, maior será a temperatura de transição [4].

Acreditava-se, quando foi proposto o ensaio de impacto em corpos de prova entalhados, no início deste século, que o mesmo, por usar altas taxas de deformação (da ordem de 10^4 s^{-1}) e corpos de prova entalhados, seria bastante adequado para verificar a influência da temperatura, no material, mas por usar corpos de prova de pequenas dimensões, (10x10x55 mm) e raio da raiz do entalhe de 0,25 mm, o ensaio Charpy não caracteriza o comportamento do material, com a máxima severidade possível do entalhe. Surgiu assim, no início dos anos 50, o ensaio de determinação do fator de intensificação de tensão crítico K_{IC} , que utiliza corpos de prova pré-trincados por fadiga, simulando assim, um entalhe com raio de ponta tendendo a zero e dimensões suficientemente grandes para se ter a "máxima severidade possível do entalhe". K_{IC} , representa o valor crítico do fator de intensificação de tensão, obtido com altos níveis de triaxialidade de tensões, mas com baixas taxas de deformação (da ordem de 10^{-5} a 10^{-1} s^{-1}). Daí o surgimento, no início dos anos 60, do fator de intensificação de tensão crítico dinâmico, K_{II} , obtido com altas taxas de deformação, a partir do ensaio de impacto instrumentado.

2.5. Ensaio de tenacidade à fratura em deformação plana (K_{IC})

A tenacidade à fratura em condições de deformação plana, K_{IC} , pode ser considerada como sendo uma propriedade intrínseca do material, que descreve a resistência à fratura,

inerente ao mesmo, na presença de uma trinca aguda. Já que K_{Ic} é baseado na mecânica da fratura linear elástica, este se restringe aos metais de baixa ductilidade tais como: aços de alta resistência, ligas de titânio e ligas de alumínio de alta resistência ou a metais com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado em baixas temperaturas (abaixo da transição).

Para um certo tipo de carregamento e geometria, K_{Ic} representa o valor crítico do fator de intensificação de tensão (K_I), sendo este normalmente expresso por:

$$K_I = \alpha \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.1)$$

onde:

σ - tensão nominal;

α - parâmetro que depende da geometria da trinca e do corpo de prova;

a - tamanho da trinca.

Como K_{Ic} é uma propriedade básica e intrínseca do material, no mesmo sentido que o limite de escoamento, ele varia com importantes variáveis metalúrgicas, tais como tratamento térmico, impurezas, inclusões, etc. Para materiais fortemente dependentes da temperatura e da taxa de deformação, K_{Ic} , geralmente diminui com o decréscimo da temperatura e com o aumento da taxa de deformação [7].

A espessura mínima do corpo de prova (B) para que se obtenha condições de deformação plana e medidas válidas de K_{Ic} é [2,8]:

$$B \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e} \right)^2 \quad (2.2)$$

A figura 2.12 ilustra dois tipos de corpos de prova padronizados pela ASTM E399. Um deles é o corpo de prova compacto para tração e o outro é o corpo de prova de flexão em três pontos. Existem outros tipos de corpos de prova, tais como o corpo de prova cilíndrico com entalhe; em forma de chapa com entalhe apenas em um dos lados; entalhados no centro e duplamente entalhados [8].

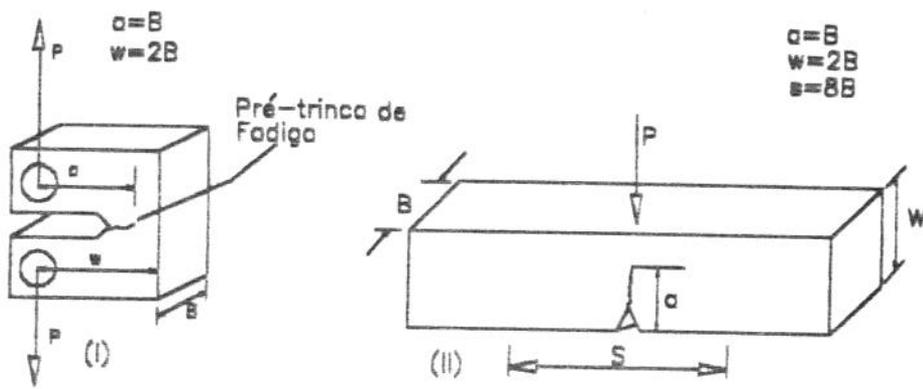


Figura 2.12. Corpos de prova comuns para o ensaio de tenacidade à fratura em deformação plana. (I) corpo de prova compacto para tração. (II) corpo de prova de flexão em três pontos.

Após usinar-se o entalhe no corpo de prova, obtém-se uma pré-trinca por fadiga na raiz do entalhe. O comprimento inicial da pré-trinca inclui a profundidade do entalhe e o comprimento da trinca de fadiga é aproximadamente igual à espessura do corpo de prova. A equação 2.2 deve ser utilizada com um valor estimado de K_{IC} esperado para o material, a fim de se avaliar a espessura do corpo de prova [2,8].

de K_{Ic} . No caso contrário, isto é, se o material não é muito dúctil, então a carga P_5 é denominada P_Q e é utilizada no cálculo de K_Q (equação 2.3).

A curva de deslocamento do tipo II possui um ponto onde existe uma queda repentina da carga, seguida por uma recuperação da mesma. A queda de carga representa uma entrada repentina da frente de propagação da trinca para dentro do material (fenômeno denominado, em inglês, "pop-in"), o que acontece através de uma propagação súbita e instável da mesma. O mesmo critério para excesso de ductilidade é aplicado para curvas do tipo II, e neste caso P_Q é a carga máxima registrada.

A curva do tipo III apresenta completa instabilidade, onde o movimento inicial de propagação da trinca progride rapidamente até a falha total. Este tipo de curva é característico de um "material elástico" muito frágil.

No entanto o comportamento do material até a carga equivalente a 80% de P_5 , nem sempre é linear (devido ao aparecimento de deformação plástica e propagação estável da trinca), e nem sempre se consegue definir o ponto $0,8 P_5$, com acuracidade. Este fato conduziu na adoção pela ASTM, do critério definido pelas desigualdades (2.4) e (2.5) que define uma relação entre P_{max} e P_Q onde P_{max} é a máxima carga observada durante o ensaio [9].

O valor de P_Q determinado pela curva carga-deslocamento, é utilizado para calcular um valor condicional de tenacidade à fratura K_Q que é função da geometria do corpo de prova, comprimento da trinca e a carga crítica P_Q .

No caso do corpo de prova para flexão em três pontos, tem-se, [2,9]:

$$K_Q = \frac{P_Q \cdot S}{B w^{\frac{3}{2}}} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (2.3)$$

onde S = distância entre os pontos de apoio;

$$f(a/w) = 3(a/w)^{1/2} [1.99 - (a/w)(1-a/w)(2.15 - 3.93 a/w + 2.7a^2/w^2)] / 2(1+a/w)(1-a/w)^{3/2}$$

Portanto, o critério adotado pela ASTM impõe que:

$$Se \frac{P_{máx}}{P_Q} < 1,10 \quad (2.4)$$

e

$$E e a \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_c} \right)^2 \quad (2.5)$$

Então $K_Q = K_{Ic}$, caso contrário o ensaio torna-se inválido.

2.6. Análise do Ensaio Charpy Instrumentado

Foi visto no item 1.2, que nos últimos anos, uma parcela considerável de pesquisadores, vem estudando um método de se determinar um parâmetro chamado: "Fator de Intensificação de Tensão Crítico Dinâmico - K_{II} ", através do ensaio Charpy instrumentado.

A instrumentação do martelo instalado no pêndulo da máquina de ensaios de Charpy, fornece várias informações acerca dos esforços envolvidos durante o ensaio, Na figura 2.14 é vista uma curva teórica típica de força x tempo, obtida a partir do ensaio Charpy instrumentado.

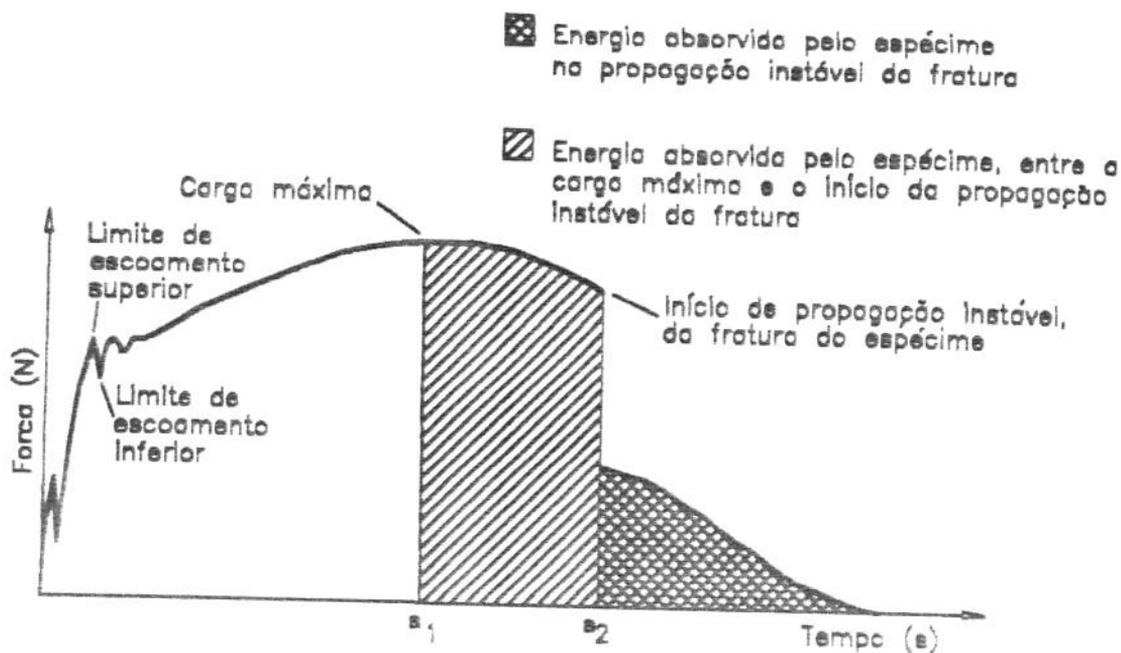


Figura 2.14. Curva teórica típica obtida do ensaio Charpy instrumentado [10,24].

Dependendo do material e das condições microestruturais é possível obter-se dessa curva, as seguintes informações [11].

- i) Limite de escoamento inferior;
- ii) Limite de escoamento superior;
- iii) Carga máxima;
- iv) Energia para iniciação da fratura.

Além disso, assumindo-se que a velocidade do pêndulo permanece constante no decorrer do ensaio, é possível obter-se a energia absorvida pelo corpo de prova, até fratura completa, calculando-se a área sob a curva obtida no ensaio, resolvendo-se a seguinte integral [4]:

$$E_1 = V_0 \int_0^t p dt \quad (2.6)$$

onde:

E_1 = Energia total, considerando-se a velocidade do pêndulo constante;

V_0 = Velocidade inicial do pêndulo;

F = Força instantânea;

t = Tempo.

Na realidade não é válido assumir que a velocidade do pêndulo permanece constante durante o ensaio pois, de fato, a velocidade do pêndulo decai com o aumento da carga instantânea. No entanto, Augland [12] estabeleceu a seguinte correlação, que visa calcular a energia total absorvida pelo corpo de prova, ao fraturar-se:

$$E_t = E_1(1-\alpha) \quad (2.7)$$

$$\alpha = \frac{E_1}{4 E_0} \quad (2.8)$$

onde:

E_t = Energia total para fraturar o corpo de prova

E_0 = Energia potencial inicial do pêndulo.

O ensaio Charpy convencional, como foi visto, mede a energia total (E_t) absorvida pelo corpo de prova, que é a soma da energia gasta para iniciar a fratura (E_i) mais a energia gasta na propagação da trinca de fratura (E_p), ou seja:

$$E_t = E_i + E_p \quad (2.9)$$

No entanto, nesse caso, E_t é lido diretamente na máquina de ensaios, como sendo um valor global, sem que se consiga E_i e E_p separadamente.

A instrumentação do pêndulo do ensaio de impacto Charpy baseia-se num sinal emitido por uma célula de carga e registrado num osciloscópio de memória, em forma de uma curva carga x tempo. Neste caso, é possível conseguir-se dissociar os valores de energia de iniciação (E_i) e propagação (E_p), da trinca de fratura, em duas componentes distintas [4].

2.7. Considerações gerais acerca do ensaio Charpy instrumentado

No princípio da década de 60, alguns pesquisadores, notadamente B. Augland, iniciaram uma série de estudos com ensaios de impacto instrumentado, com a finalidade de se determinar a tenacidade à fratura dinâmica, K_{ID} , dos materiais metálicos. Neste caso, obtêm-se curvas de carga x tempo a partir de ensaios dinâmicos instrumentados, citados na referência [1], tais como: Charpy, queda de peso, tração dinâmica, Schnadt, Batelle, Pellini, Robertson e outros .

Com os valores da carga necessária para que ocorra o início da propagação da trinca, é possível determinar-se a tenacidade à fratura dinâmica, K_{ID} , utilizando-se as equações convencionais de mecânica de fratura, que possibilitam o cálculo do fator de intensificação de tensão, K_{IC} (Equações 2.3, 2.4 e 2.5), pois para metais de alta resistência, $K_{IC} = K_{ID}$ [13].

No entanto, existem dificuldades e incertezas que são inerentes aos ensaios dinâmicos em geral e, particularmente na determinação dos valores de tenacidade à fratura, em condições de deformação plana. Em primeiro lugar, tem-se as oscilações no registro do tempo de aplicação da carga, o que frequentemente causa erros na determinação do valor real das forças envolvidas no carregamento [14,15].

No caso do ensaio Charpy instrumentado, a caracterização dos esforços é dificultada pelos efeitos de inércia

e das vibrações (ondas de choque) induzidas no corpo de prova e no equipamento de ensaio. Os efeitos de inércia atingem um valor máximo devido à elevada aceleração produzida nos primeiros instantes de contato entre o pêndulo e o corpo de prova, pois antes da iniciação da fratura, ele se deforma no regime elástico [16,17]. As forças de inércia (ou forças de deformação elástica), podem ser avaliadas submetendo-se um corpo de prova ao ensaio Charpy instrumentado, porém, sem que o mesmo seja bi-apoiado. Desse modo, consegue-se avaliar o valor da força necessária para acelerar o corpo de prova, na direção e sentido de ação do pêndulo [11,18].

2.8. Análise das oscilações inerciais devido ao impacto

No caso da análise vibracional do ensaio Charpy instrumentado, o principal objetivo é o de se conseguir registrar um sinal de primeira ordem. No entanto, os sinais de segunda e terceira ordens, podem estar envolvidos durante o registro da curva força x tempo, podendo assim, mascarar a resposta da célula de carga, durante o impacto [19].

O sinal gerado pela célula de carga (do pêndulo instrumentado), na verdade, é uma combinação bastante complexa das seguintes componentes [16,18,19,20]:

- i) A verdadeira resposta do corpo de prova, aos esforços aos quais é submetido;
- ii) As forças inerciais sentidas pela célula de carga, e que são provenientes da aceleração sofrida pelo corpo de

- prova, ao se deformar ainda no regime elástico;
- iii) As flutuações de baixa frequência, oriundas da energia elástica armazenada no sistema, ou seja, das ondas de tensão refletidas;
- iv) Ruídos de alta frequência, na faixa de 1.000 Hz, causados pelo sistema eletrônico de amplificação, que podem ser minimizados utilizando-se extensômetros de alto ganho (por exemplo, semicondutores). Além disso, é possível realizar-se uma filtragem eletrônica.

As oscilações inerciais, como já foi citado, são oriundas da aceleração imposta ao corpo de prova, com relação ao conjunto: pêndulo e célula de carga. Essa componente, representa uma faixa entre 20 e 30 μ s, e é caracterizada como sendo a primeira oscilação, que pode ser verificada na rampa de subida da curva Força x Tempo, da figura 2.15.

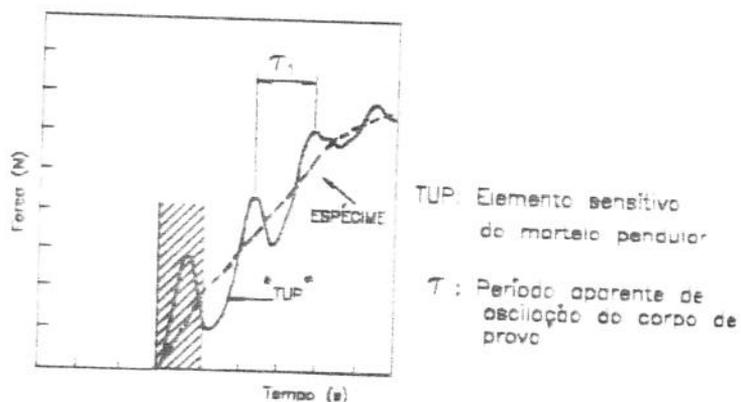


Figura 2.15. Comparação entre o sinal típico emitido pelo pêndulo instrumentado e o sinal esperado, emitido pelo corpo de prova. Neste caso, o corpo de prova também foi instrumentado com extensômetros de sacrifício [21].

A magnitude dessas oscilações inerciais é definida como sendo uma relação que envolve impedância acústica da célula de carga, do corpo de prova e a velocidade inicial de impacto.

A carga inercial é máxima no instante do impacto e decresce rapidamente com o incremento da velocidade imposta ao corpo de prova; em síntese, ocorre uma deformação elástica do corpo de prova, antes do início da fratura.

Saxton [21], publicou em 1974 um trabalho, no qual ele concluiu que:

$$P_I = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} V_0 \quad (2.10)$$

onde:

- P_I = Magnitude das oscilações inerciais;
- Z_i = $CD_i \rho_i$. impedância acústica do material;
- CD_i = Velocidade de dilatação da frente de onda, no material;
- ρ_i = Densidade do material;
- V_0 = Velocidade inicial de impacto.

OBS: SE $i=1$, REFERIMO-NOS AO MATERIAL QUE CONSTITUI O CORPO DE PROVA.
SE $i=2$, REFERIMO-NOS AO MATERIAL QUE CONSTITUI A CÉLULA DE CARGA.

Na curva Força x Tempo obtida a partir do ensaio Charpy instrumentado, a porção do período em que são também registradas as oscilações inerciais, é essencialmente função da geometria do corpo de prova e da impedância acústica da célula de carga e do corpo de prova. No caso de corpos de prova de aço ou alumínio, esse período pode variar na faixa de 20 a 30 μs [22].

Da interação de forças entre a célula de carga e o corpo de prova, resulta liberação da energia elástica armazenada na máquina de ensaio de impacto. No entanto, quando essas forças são repentinamente transformadas (por exemplo: início do impacto, limite elástico, fratura instável), há uma correspondente e repentina liberação dessa energia elástica armazenada. Essa variação energética é transformada num amortecimento senoidal, transformando as oscilações em forças de interação entre a célula de carga e o corpo de prova. O modo de vibração do corpo de prova, é a combinação dos modos 1, 2 e 3, mostrados na figura 2.16. [16].

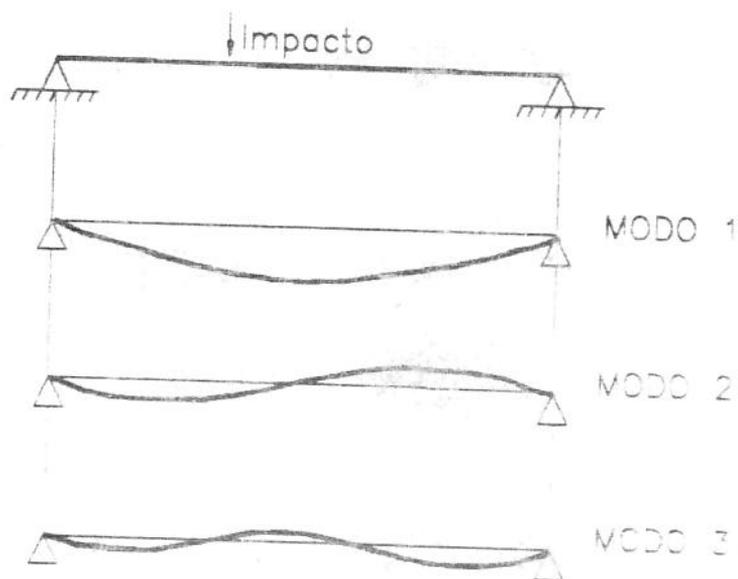


Figura 2.16. Modos de vibração de uma viga bi-apoiada, submetida a um impacto, na sua região central.

Pode-se supor que, as variações repentinas na interação das forças também geram ondas refletidas de tensão, (elas também são chamadas de "ondas de dilatação") na célula de carga e

no corpo de prova [23].

No caso do pêndulo Charpy instrumentado, a célula de carga comporta-se como um sólido elástico que, quando submetido a um impacto, não responde instantaneamente pois, ocorre uma atenuação e defasagem do sinal emitido pelos extensômetros da célula de carga.

A atenuação e a defasagem do sinal, citados acima, representam uma certa limitação em sistemas dinâmicos que, no caso do ensaio Charpy instrumentado, é decorrente de alguns fatores bem conhecidos, tais como: rigidez do sistema e anisotropia estrutural dos materiais envolvidos.

Quando se deseja analisar a performance de um ensaio de impacto instrumentado ou analisar os resultados obtidos a partir desse ensaio, deve-se também levar em consideração os efeitos da limitação da frequência de resposta do sistema eletrônico de aquisição de dados.

Na figura 2.17 vê-se uma curva arbitrária que representa a atenuação da amplitude do sinal, versus frequência de resposta de um sistema mecânico ou elétrico, com entrada impulsiva de sinal.

Na figura 2.17 f_r é a frequência do sinal de amplitude, menor que um valor padrão relativo à máxima amplitude. Quando se observa a curva real, f_r é a frequência comumente especificada pelos fabricantes, relativa à atenuação específica do sinal de amplitude A ou A_r . É muito comum adotar-se o valor 3 decibéis (3dB) de atenuação.

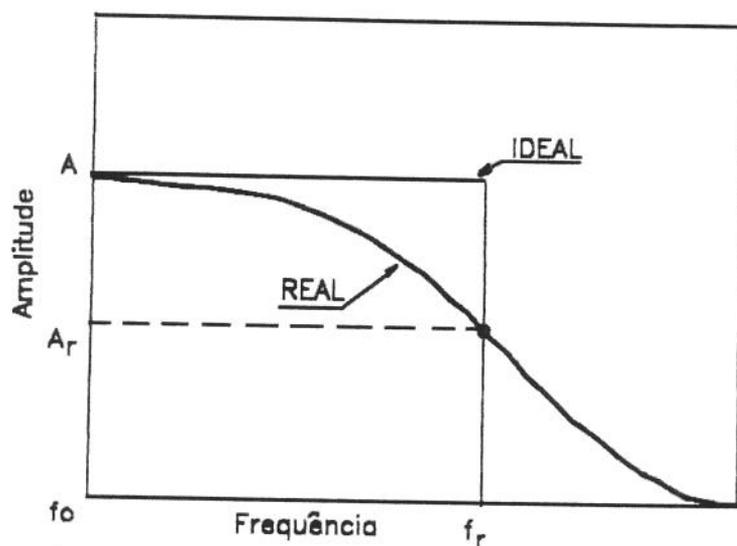


Figura 2.17. Ilustração esquemática das curvas de resposta de frequência ideal e real, para um sistema mecânico ou elétrico.

No caso em pauta, o decibel é definido como sendo:

$$dB = 20 \log \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \quad (2.11)$$

onde:

V_1 = Tensão de excitação da célula de carga (volts);

V_2 = Tensão de resposta do sistema (volts).

Essa redução corresponde a aproximadamente 30% de redução, na amplitude do sinal.

A seguir, é feita uma breve análise das condições básicas necessárias, na instrumentação de um pêndulo Charpy.

2.9. Condições básicas necessárias para a instrumentação de um pêndulo charpy

No caso particular da instrumentação do pêndulo Charpy, atenuações inferiores a 10% dentro de uma banda de frequências suficientemente larga, asseguram resultados satisfatórios, pois esse percentual corresponde a 0,915dB de atenuação da amplitude do sinal [16].

Com base nas pesquisas desenvolvidas pelo Electric Power Research Institute (EPRI), sobre a avaliação da tenacidade à fratura de aços utilizados na fabricação de vasos de pressão de utilização nuclear, o impacto entre a célula de carga e o corpo de prova, provoca o aparecimento de oscilações inerciais, cuja duração é fortemente dependente da velocidade inicial do martelo pendular instrumentado e a dissipação dessas oscilações inerciais, se dá num tempo que varia entre 2τ e 3τ , onde τ é o período de oscilação do corpo de prova, figura 2.18, e é calculado empiricamente com o auxílio da equação (2.12), obtida para $L/W=4$, onde [25]:

L = distância entre os pontos de apoio do corpo de prova;
 W = largura do corpo de prova.

Tem-se então:

$$\tau = 3,36 \left(\frac{W}{S_0} \right) (Y.B.C)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

onde:

W = largura do corpo de prova;

B = espessura do corpo de prova;

C = compliância do corpo de prova;

S₀ = velocidade do som no material.

Y = módulo de Young.

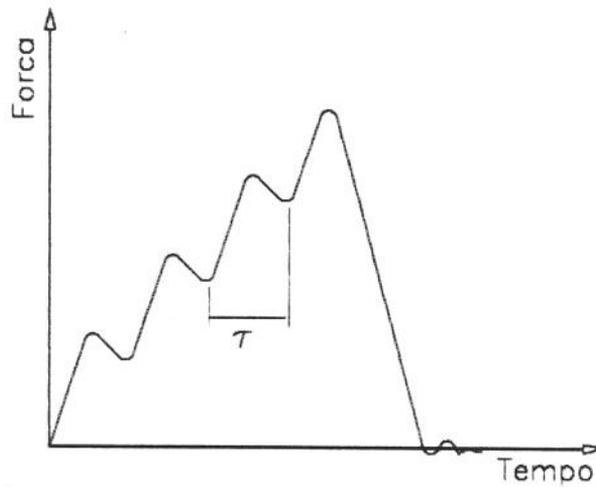


Figura 2.18. Período aparente de oscilação do corpo de prova Charpy, τ .

Se o tempo de duração do impacto for menor do que 2τ , não se consegue registrar o efeito das oscilações inerciais. Na Figura 2.19, tem-se um esquema dos efeitos inerciais, provocados pelo impacto.

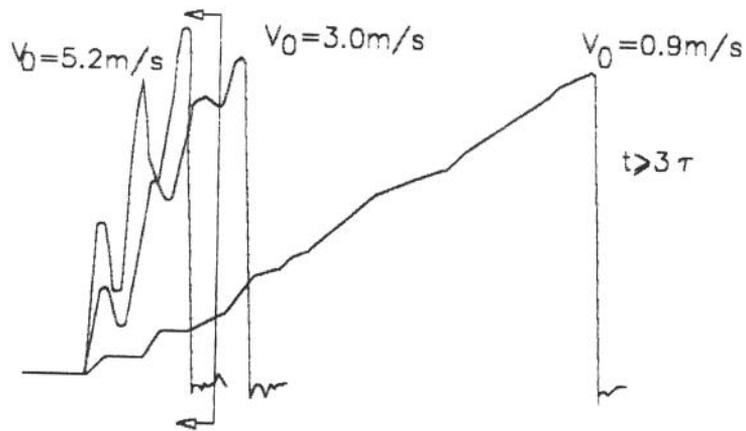


Figura 2.19. Tempo de duração do impacto e critério de aceitação do registro do ensaio.

Para se ter resultados válidos e confiáveis, deve-se ter:

$$t \geq 3\tau \quad (2.13)$$

onde: t = tempo de duração do impacto;

τ = período real de oscilação do corpo de prova.

Se o critério (2.13) não for satisfeito, dificilmente se consegue a captura real do sinal emitido pela célula de carga, que no caso do ensaio de impacto Charpy, ocorre em alguns milisegundos, e é fortemente dependente da velocidade inicial de impacto [25].

3. Instrumentação do ensaio Charpy - Materiais e Métodos

3.1. Projeto da célula de carga

a) Estimativa das forças e dos tempos envolvidos no ensaio.

A estimativa das forças e dos tempos envolvidos no ensaio, foi feita com base na literatura especializada que forneceu dados do ensaio Charpy convencional e instrumentado, resumida na Tabela 3.1 e, com base no valor condicional do fator de intensificação de tensão, K_Q , para o aço 300 M.

a1- Estimativa das forças e tempos envolvidos no ensaio, com base na literatura especializada:

Tabela 3.1. Valores da força máxima (F_{\max}), tempo de duração do impacto (t_T), temperatura (T) e energia absorvida pelo corpo de prova (CV_N), com base na literatura especializada.

AÇO	$T(i)$ [°C]	$T(s)$ [°C]	$F_{\max(i)}$ [KN]	$F_{\max(s)}$ [KN]	$t_T(i)$ [ms]	$t_T(s)$ [ms]	$CVN_{(s)}$ [J]	REF
Média Resistência	-107	21	14	16	0,16	>1,0	150	[21]
0,15%C e 1,4%Mn	-80	80	12	13,5	0,10	>1,6	150	[11]
4340 - Temperado e Revenido a 350°C	-	25	-	25,6	-	0,3	17	[24]
ABNT 4340 temperado e revenido a 550°C	-	25	-	25,6	-	0,7	35	[24]

Nota: Os índices (i) e (s), referem-se, respectivamente, aos patamares inferior e superior do gráfico de tenacidade x temperatura, no ensaio Charpy convencional (Figura 2.3).

a2) Estimativa da força de impacto, com base num valor condicional do fator de intensificação de tensão, K_Q , para um aço de alta resistência, no caso, o aço 300 M de utilização aeronáutica. Portanto, $K_Q = 85 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ [24].

Aplicando-se a equação (2.3), tem-se:

$$K_Q = \frac{F_{m\acute{a}x} \cdot S \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)}{B \cdot W^{\frac{3}{2}}} \quad (3.1)$$

Isolando-se $F_{M\acute{A}X}$, vem:

$$F_{M\acute{A}X} = \frac{K_Q \cdot B \cdot W^{\frac{3}{2}}}{S \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)} \quad (3.2)$$

onde: a = profundidade do entalhe do C.P. Charpy;
 W = largura do c.p.;
 B = espessura do c.p.;
 $F_{M\acute{A}X}$ = força máxima de impacto;
 S = distância entre os pontos de apoio (no caso, $S = 4W$).

Neste caso tem-se:

$$a = 2,0 \text{ mm};$$

$$W = 10,0 \text{ mm} \quad \text{e} \quad S = 40,0 \text{ mm}$$

$$B = 10,0 \text{ mm};$$

$$S.f(a/w) = 4,66, \text{ calculado para } a/w=0,2 \text{ (Eq.2.3)}$$

$$K_Q = 85 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

Fazendo-se um ajuste das unidades e aplicando-se a equação (3.2), obtém-se:

$$F_{MÁX} = 18 \text{ kN}$$

a3) Conclusão

Comparando-se os valores de $F_{MÁX}$ obtidos da literatura e, apresentados na tabela 3.1, e o valor calculado, vê-se que existe uma correlação. Será, portanto, arbitrado um valor de $F_{MÁX}$ igual a 25kN.

b) Escolha do material da célula de carga

O material escolhido, foi um aço fabricado pela Villares S/A, recomendado para aplicações onde choque e impacto são as principais solicitações. Trata-se do VW-3, cuja composição é a seguinte [26]:

$$0,45 \text{ C} - 1,0 \text{ Si} - 1,4 \text{ Cr} - 0,2 \text{ Mo} - 2,0 \text{ W} - 2,0 \text{ V}$$

c) Escolha dos extensômetros [27]

Neste caso, optou-se por extensômetros do tipo "advance" cuja composição é:

$$44 \text{ Ni} - 54 \text{ Cu} - 1 \text{ Mn}$$

Esse tipo de liga confere ao extensômetro algumas características desejáveis, na instrumentação do pêndulo Charpy, tais como: baixa mudança do fator de calibração com a temperatura e excelente fator de sensibilidade (k), quando utilizado em células de carga, em aço de alta resistência.

Dados dos Extensômetros

Fabricante:Kiowa

Procedência:Japão

Tipo:KFC - 2 C1 - 11 - Axial de alta sensibilidade

Comprimento da Resistência:2,0 mm

Resistência:(120,0 \pm 0,3) ohms

Fator de Sensibilidade à Deformação: $k=2,12 \pm 1\%$

Coefficiente de Dilatação Térmica:10,8 P.P.M./°C

Base: Poliéster

d) Determinação do local de colagem dos extensômetros

A determinação do local de maior deformação do elemento sensível da célula de carga, foi feita com base em dois métodos: d_1 - modelamento por elementos finitos; d_2 - método experimental.

d_1 - Modelamento por Elementos Finitos

Neste caso, como pode ser visto na Figura 3.1, uma malha de sólidos para modelamento e análise por elementos finitos, contendo 100 nós, do elemento sensível da célula de carga e, aplicada ao programa computacional Cosmos, versão 1.52, foi desenvolvida pelo núcleo de apoio computacional do DEM-FEIS-UNESP.

A Figura 3.1, mostra um furo no elemento sensitivo da célula de carga, próximo à zona de impacto que se situa próxima aos nós 75 e 25. Espera-se que esse furo se deforme, como se deformaria um anel dinamométrico, aumentando assim a sensibilidade da célula de carga.

Na Figura 3.2, pode-se verificar o local de maior deformação do elemento sensitivo da célula de carga, constituído por um furo vazado, em cujas paredes serão colados os extensômetros, para a realização de testes preliminares.

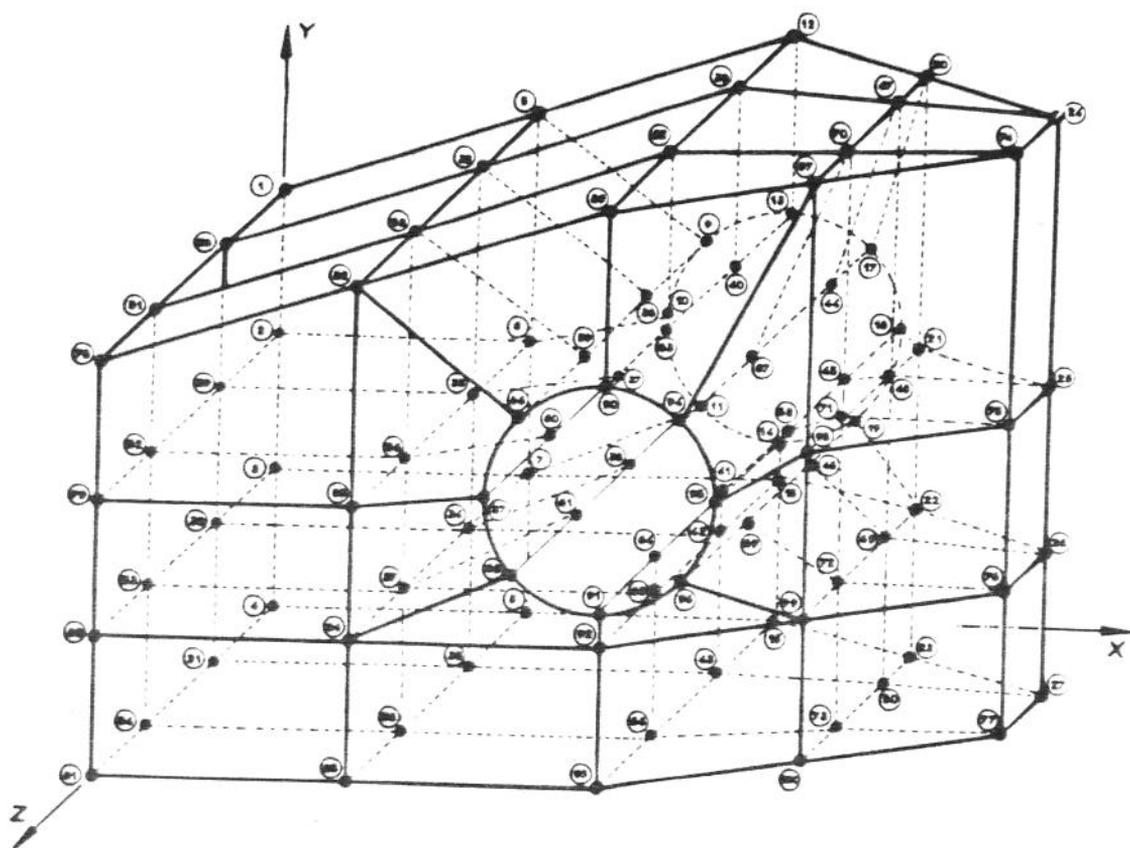


Figura 3.1. Malha de sólido para modelamento em elementos finitos - 100 nós do elemento sensitivo da célula de carga-Charpy instrumentado

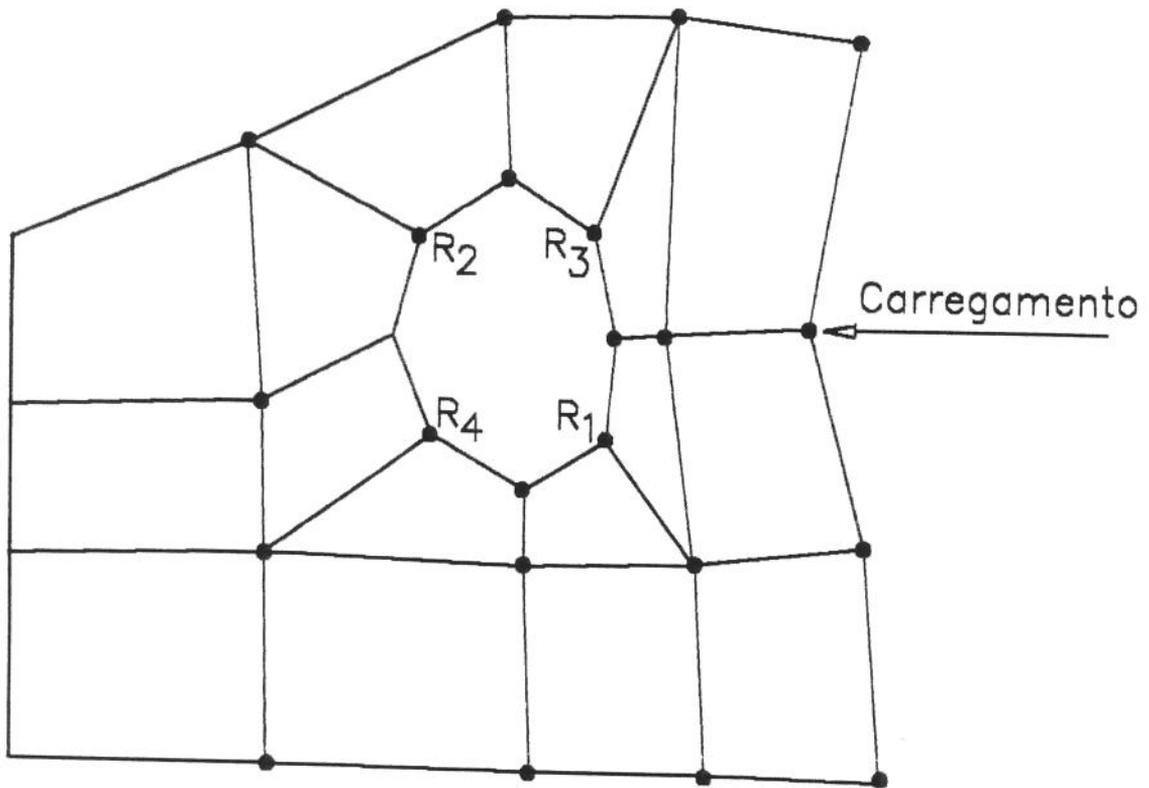


Figura 3.2. Deformação do elemento sensetivo, obtido na simulação com elementos finitos, com carregamento simulado e, local da colagem dos extensômetros, R_1 , R_2 , R_3 , R_4 .

d_2 - Método Experimental

Neste caso, como não se dispunha de um equipamento para fotoelasticidade para a verificação das regiões de maior deformação, optou-se pelo rastreamento dessas regiões.

O rastreamento e análise das regiões de maior

deformação, foi realizado aplicando-se uma carga estática de 25kN numa célula de carga experimental, em cuja superfície colou-se vários extensômetros, em locais estrategicamente escolhidos, como pode ser visto esquematicamente na Figura 3.3

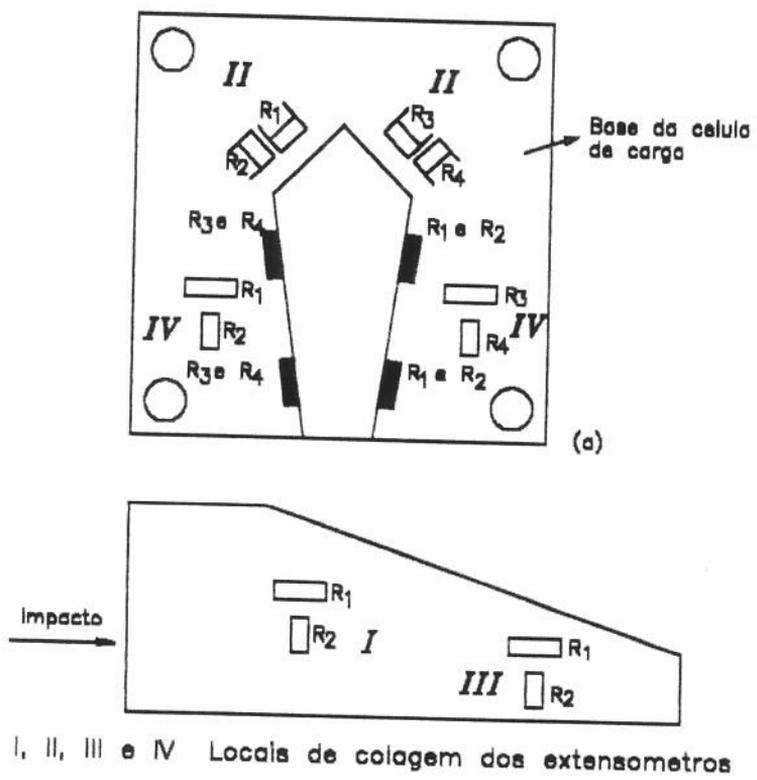


Figura 3.3. Locais de colagem dos extensômetros, para determinação experimental das regiões de maior deformação da célula de carga experimental.

Resultados do Rastreamento dos Locais de Maior Deformação da Célula de Carga Experimental

A Tabela 3.2 resume o rastreamento dos locais de maior deformação da célula de carga experimental para uma carga estática de 25kN. Os resultados são fornecidos em milivolts, e lidos diretamente no amplificador de sinais, com excitação da ponte de Wheatstone de 5,0 volts e sensibilidade de 1,0 mV/V.

Tabela 3.2. Resultados do rastreamento dos locais de maior deformação da célula de carga experimental.

LOCAIS DE COLAGEM DOS EXTENSÔMETROS	DEFORMAÇÃO MÁXIMA [mV]
I	0,48
II	0,16
III	0,36
IV	0,14

d₃ - Conclusão

Os resultados obtidos por elementos finitos, mostraram-se bastante satisfatórios, tendo em vista o número reduzido, porém, suficiente de nós, da malha de sólido para modelamento em elementos finitos (Figura 3.1). Por outro lado, a Tabela 3.2 nos mostra que os locais I e III apresentaram as maiores deformações. Esse fato justifica a fabricação de 4 células de carga, a fim de se comprovar qual o local de colagem dos extensômetros levariam a um melhor desempenho do elemento sensitivo da célula de carga, tendo em vista que em situação real, a aplicação de carga é dinâmica e não estática, como realizada no carregamento simulado em elementos finitos e no método experimental.

e) Especificação e Dimensões do Elemento Sensitivo da Célula de Carga

A Figura 3.4, ilustra as dimensões do elemento sensitivo das células de carga. Deve-se ressaltar que essas características dimensionais foram adotadas com base na norma da ASTM E23 [28], e que serão adotadas na confecção de todas as células de carga.

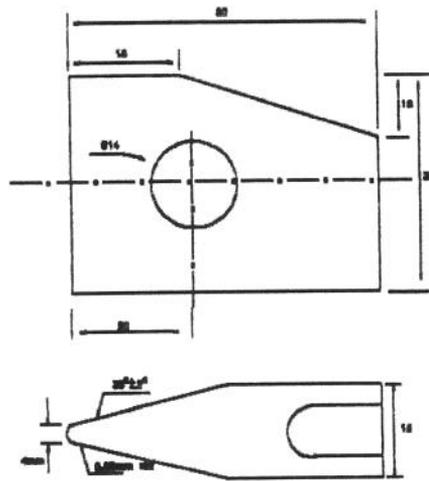


Figura 3.4. Elemento sensível da célula de carga para ensaio de impacto Charpy instrumentado (Dimensões em mm).

A seguir, tem-se as Figuras 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8, que mostram, esquematicamente, os locais de colagem dos extensômetros no elemento sensível das células de carga: C_I , C_{II} , C_{III} e C_{IV} , respectivamente.

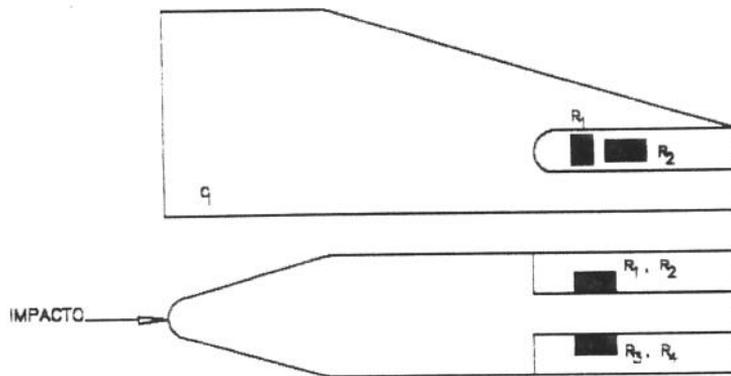


Figura 3.5. Locais de colagem dos extensômetros no elemento sensível da célula de carga - C_I . Neste caso, a aquisição de sinal, se fará em meia ponte.

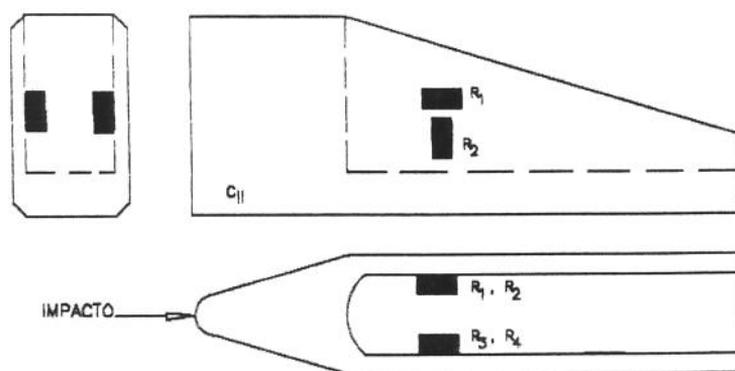


Figura 3.6. Locais de colagem dos extensômetros no elemento sensitivo da célula de carga - C_{II} . Neste caso, a aquisição de sinal se fará em meia ponte.

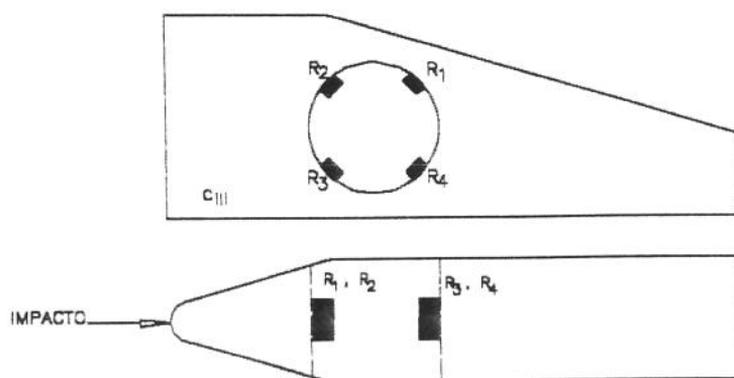


Figura 3.7. Locais de colagem dos extensômetros no elemento sensitivo da célula de carga - C_{III} . Neste caso, a aquisição de sinal se fará em ponte completa.

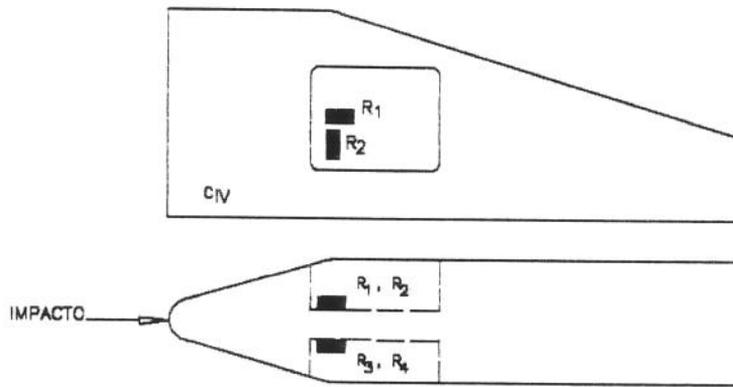


Figura 3.8. Locais de colagem dos extensômetros no elemento sensitivo da célula de carga - C_{IV} . Neste caso, a aquisição de sinal se fará em ponte completa.

3.2. Fabricação das células de carga

a - Usinagem e tratamentos térmicos

Para facilitar a usinagem, optou-se pelo recozimento do aço VW-3, segundo recomendações do fabricante, ou seja: pré-aquecimento lento e uniforme até 800°C , em caixa, com carvão vegetal triturado, como proteção contra descarbonetação superficial, mantida a essa temperatura por cerca de 4 horas, com posterior resfriamento lento, à razão de 15°C por hora, até 600°C . Atingida essa temperatura, as peças foram retiradas e levadas ao ar calmo para resfriamento até a temperatura ambiente.

Posteriormente à usinagem, as peças foram submetidas a um ciclo de tratamentos térmicos de têmpera e revenido em carvão vegetal triturado como proteção superficial, segundo as seguintes etapas, recomendadas pelo fabricante do aço:

- ETAPA 1: pré-aquecimento lento até 750°C;
- ETAPA 2: aquecimento rápido até 950°C, para austenitização;
- ETAPA 3: tempo de permanência de 30 minutos a 950°C;
- ETAPA 4: esfriamento em óleo mineral, à temperatura ambiente;
- ETAPA 5: imediatamente após a têmpera, as peças foram revenidas a 250°C durante 3 horas;
- ETAPA 6: esfriamento ao ar calmo.

A dureza alcançada foi de 55 HRC.

b) Colagem dos extensômetros

A colagem dos extensômetros foi realizada segundo as seguintes etapas, obedecendo-se rigorosamente as recomendações do fabricante:

- ETAPA 1: Preparo da superfície até lixa 400;
- ETAPA 2: Colagem dos extensômetros e secagem em mufla por 6 horas a 150°C;
- ETAPA 3: Confecção da cabeça de ponte e instalação dos cabos;
- ETAPA 4: Inclausuramento dos extensômetros.



Figura 3.9. As células de carga C_I , C_{II} , C_{III} e C_{IV} , prontas para ensaio em condições reais de carregamento.

A seguir, tem-se as Figuras 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13, que ilustram as células de carga C_I , C_{II} , C_{III} e C_{IV} , mais detalhadamente.

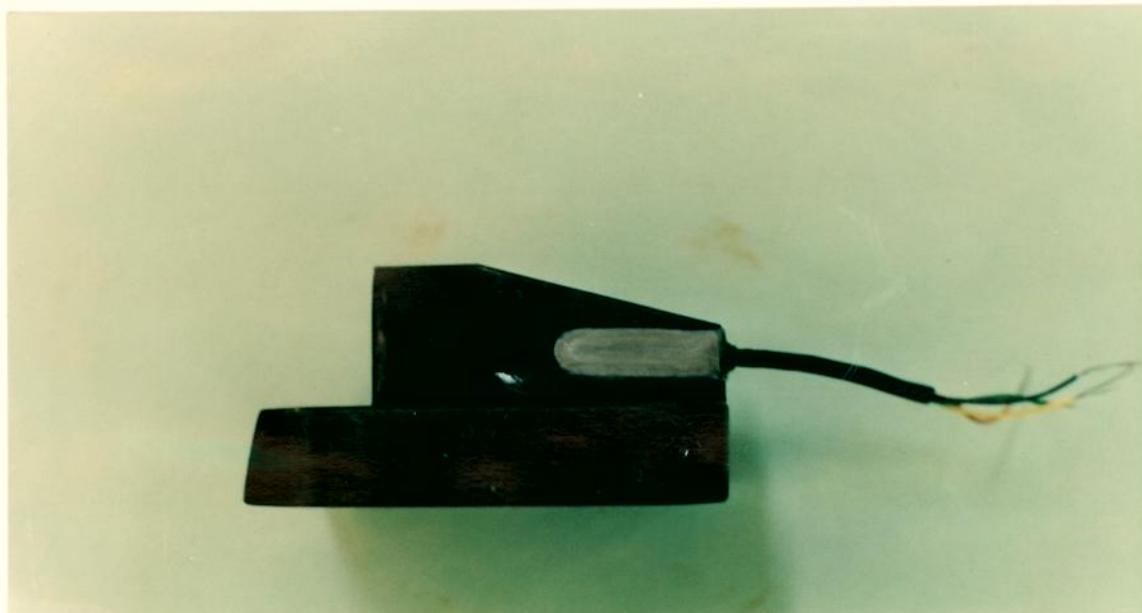


Figura 3.10. Célula de carga C_1 , vê-se na sua lateral, o local de colagem dos extensômetros, protegidos por uma placa metálica.

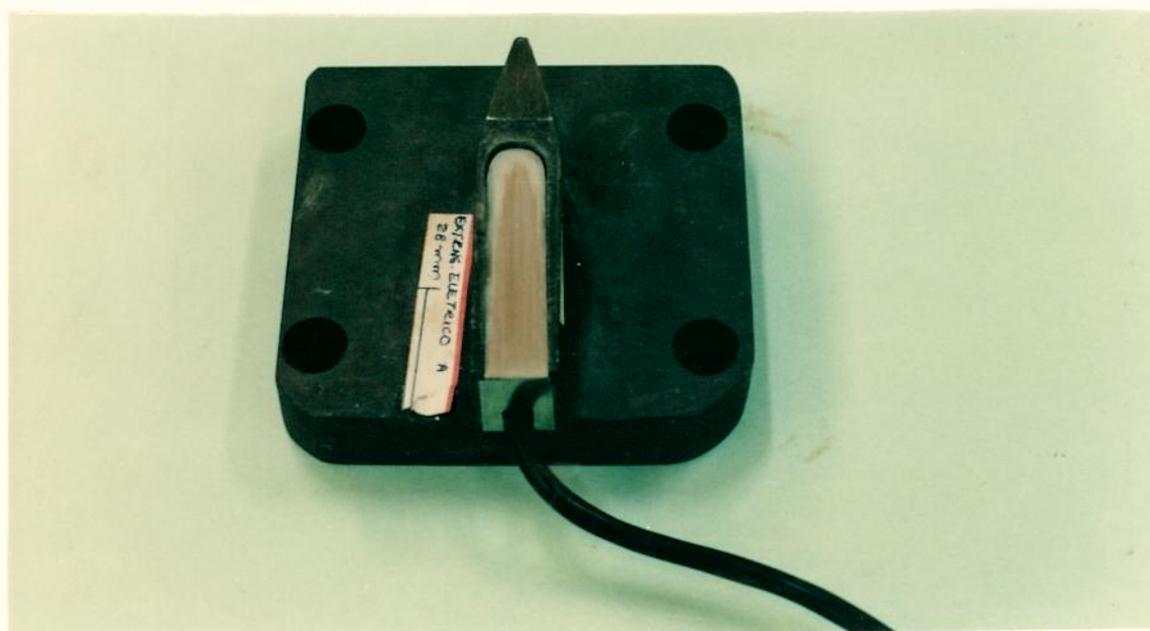


Figura 3.11. Célula de carga C_{11} , vê-se uma canaleta fresada, em cujas paredes internas, colou-se os extensômetros.

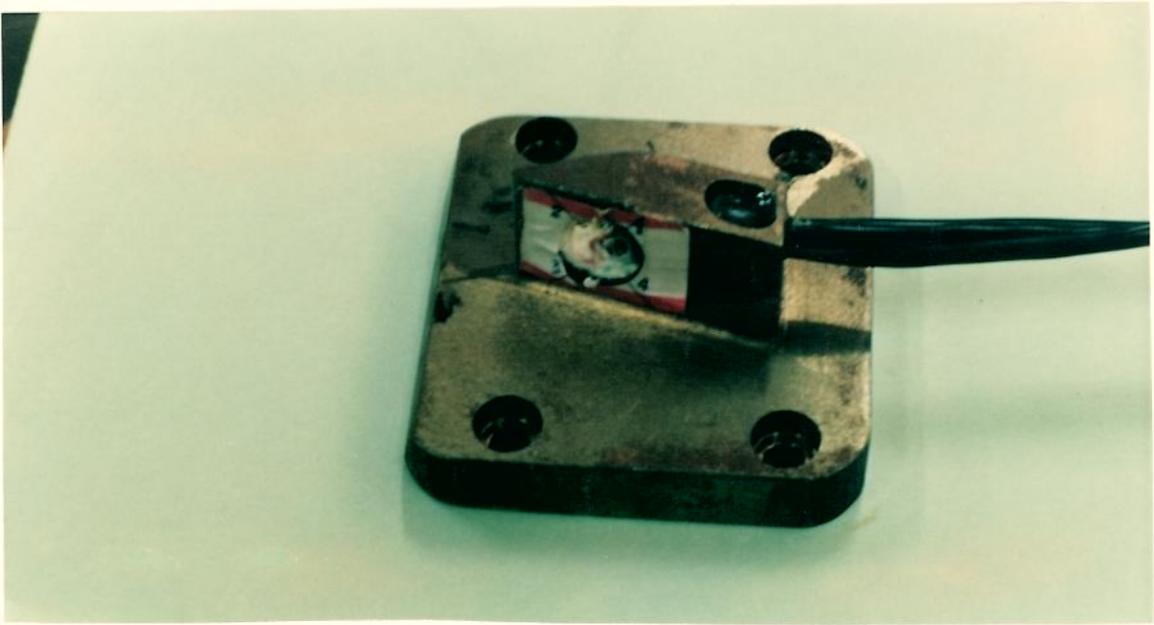


Figura 3.12. Célula de carga C_{III} . Observa-se um furo próximo à região de impacto, onde colocou-se os extensômetros.

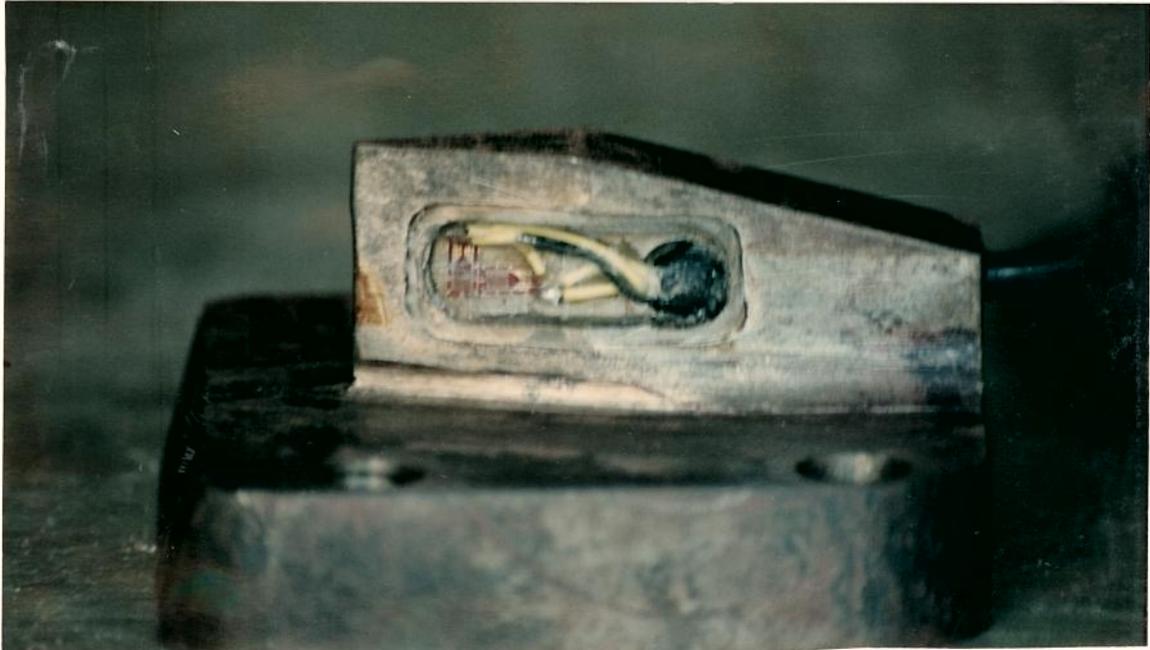


Figura 3.13. Célula de carga C_{IV} . Vê-se dois extensômetros colados a 90° , um em relação ao outro.

preliminares

Neste ponto, o trabalho foi dividido em duas fases. Na 1ª fase, ensaiaram-se as células de carga C_I e C_{II} e na 2ª fase, ensaiaram-se células de carga C_{III} e C_{IV} .

1ª Fase: Aferição e ensaios das células de carga C_I e C_{II} :

A célula de carga utilizada no ensaio Charpy instrumentado, é essencialmente de utilização dinâmica. Por esse motivo, existe uma forte tendência de se aferir esse tipo de equipamento dinamicamente. No entanto, a aferição com aplicação de cargas estáticas fornece resultados próximos aos do carregamento dinâmico e, é um procedimento bastante usual, confiável e muito menos complexo [16,18,24].

Considerando-se esse fato, optou-se pela aferição estática das células de carga.

a) Especificação dos Equipamentos

i) Máquina universal de ensaio de tração/compressão

Marca: HECKERT - Capacidade: 1000kN

ii) Anel dinamométrico com leitura em relógio comparador micrométrico.

Marca: Salcras

Carga máxima permissível: 50 kN

Classe de Precisão: 1%

iii) Amplificador de sinais e indicador digital de deformação

e deslocamento.

Marca: Transdutec

Modelo: TMDE

Tensão de excitação da ponte: 5,0 V

Frequência portadora: $5 \pm 1\%$ kHz (0,005s)

Resposta em frequência: até 1.000 hZ (0,001s)

Classe de precisão: 0,1%

iv) Osciloscópio digital Tektronix, de memória

Resposta em frequência: até 100 MHz

Capacidade de memória: até 4 kbytes

Classe de precisão: 0,1%

b) Montagem do Sistema

A Figura 3.14 apresenta em forma de diagrama de blocos, o esquema de montagem utilizado na aferição das células de carga C_I e C_{II}

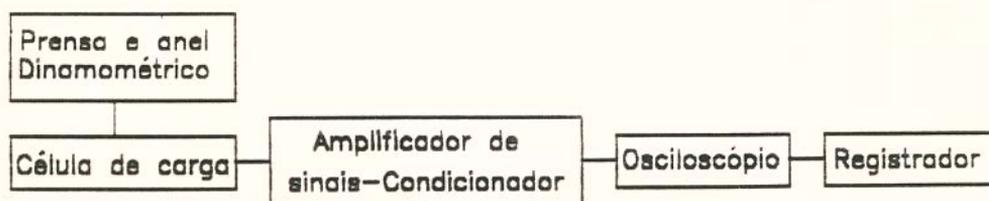


Figura 3.14. Esquema da montagem, na aferição das células de carga C_I e C_{II} .

As Figuras 3.15 e 3.16 ilustram a montagem em questão, com notas auto-explicativas.

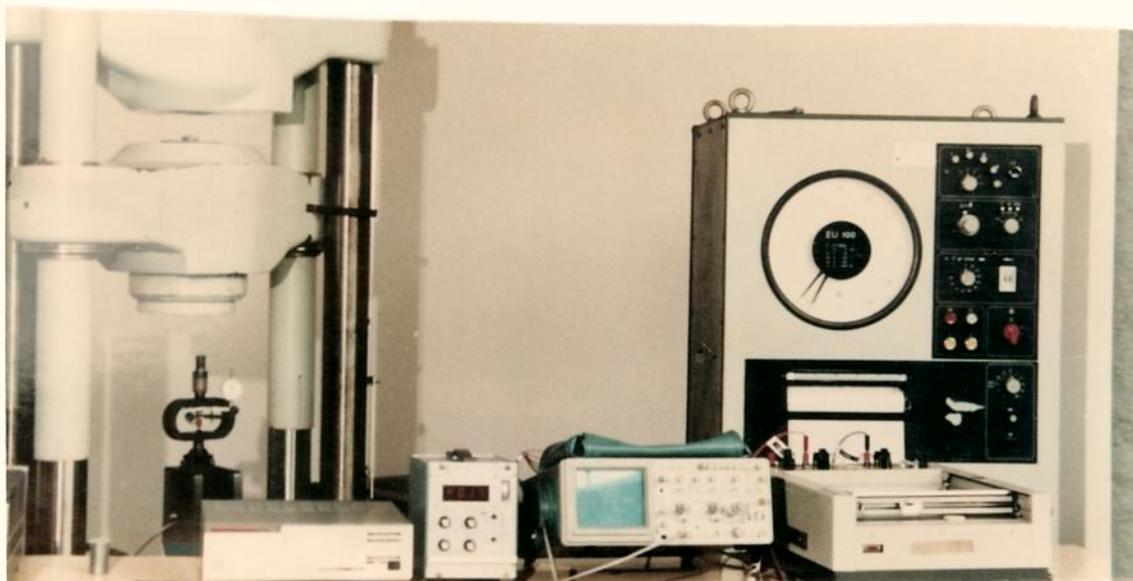


Figura 3.15. Vista geral da montagem para aferição das células de carga C_I e C_{II} . Máquina de ensaio de tração/compressão; anel dinamométrico com leitura direta; osciloscópio digital com memória.

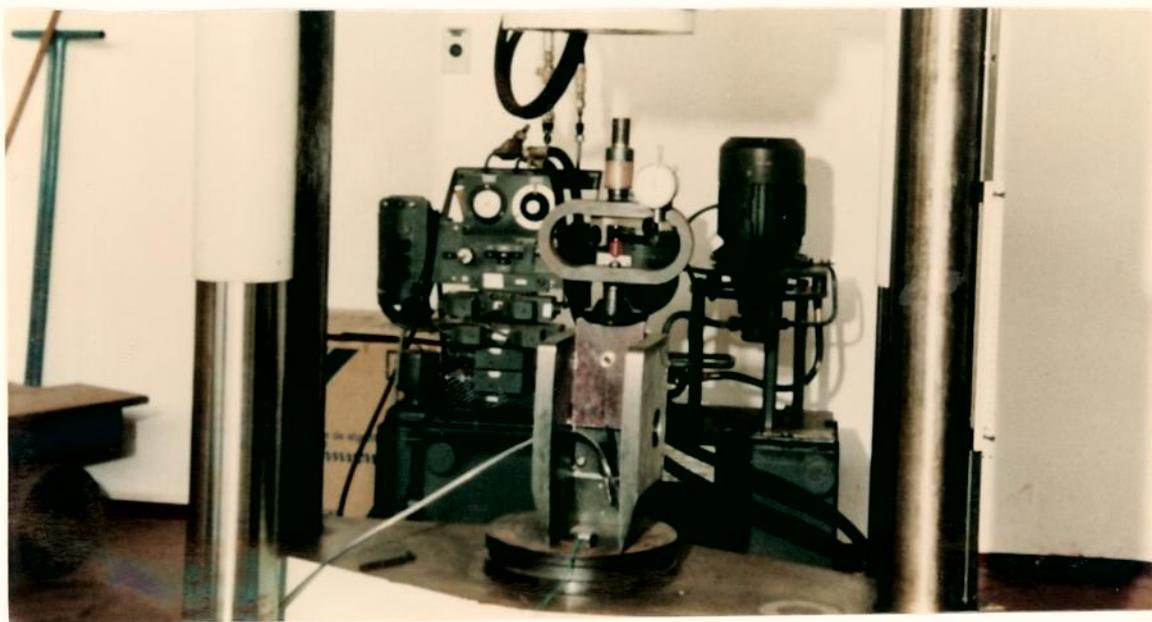


Figura 3.16. Vista detalhada da montagem para aferição das células de carga C_I e C_{II} . Vê-se entre as colunas da prensa, o martelo pendular no qual está instalada a célula de carga C_I .

c - Resultados obtidos da aferição das células de carga C_I e C_{II}

As Tabelas 3.3 e 3.4, trazem um resumo dos resultados obtidos da aferição das células de carga C_I e C_{II} , incluindo as regressões lineares.

Tabela 3.3. Aferição da célula de carga - C_I

CARGA APLICADA [kN]	DESBALANCEAMENTO DA PONTE [mV]
2,5	0,035
5,0	0,073
7,5	0,106
10,0	0,141
12,5	0,176
15,0	0,198

Regressão linear- RL_I : Força = 75,152 (mV) - 0,381 (3.3)

Coefficiente de correlação: $R_I^2 = 0,995$

Tabela 3.4. Aferição da célula de carga - C_{II}

CARGA APLICADA [kN]	DESBALANCEAMENTO DA PONTE [mV]
2,5	0,052
5,0	0,100
7,5	0,150
10,0	0,198
12,5	0,249
15,0	0,298

Regressão linear- RL_{II} : $F = 50,722 \text{ (mV)} - 0,101$ (3.4)

Coeficiente de correlação: $R_{II}^2 = 0,999$

d) Ensaios preliminares, envolvendo as células de carga - C_I e C_{II}

d1 - Especificação dos equipamentos

Além do indicador digital de sinais e do osciloscópio, especificados no item 3.3-a, foi utilizado um PC-AT 286, juntamente com programas de: determinação da matriz de pontos (em Turbo Pascal 5.0) e de aquisição de dados (em Linguagem C), fornecidos através de interface serial RS-232, do osciloscópio, desenvolvidos no Departamento de Engenharia Mecânica FEIS-UNESP. A célula de carga foi montada num pêndulo Charpy convencional, Heckert, procedente da antiga RDA.

d₂ - montagem do sistema.

A Figura 3.17 mostra em forma de diagrama de blocos, a montagem do sistema de aquisição de dados.

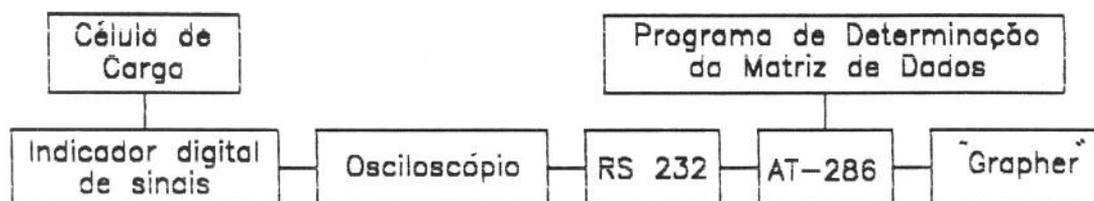


Figura 3.17. Montagem do sistema de aquisição de dados.

d₃ - Ensaios preliminares em condições reais

I- Célula de Carga C_I

Inicialmente, foram ensaiados cerca de 40 corpos de prova Charpy simplesmente entalhados (entalhe em V), em aço ABNT 1020 recozidos, para ajuste do sistema eletrônico digital de

aquisição de dados. No entanto, a célula de carga C_I mostrou-se totalmente ineficiente, para os níveis de carga envolvidos no ensaio, ou seja, energia absorvida no ensaio Charpy convencional inferior a 150 Joules, provavelmente, devido ao fato dela ser excessivamente robusta, o que levou à falta de sensibilidade.

II- Célula de Carga C_{II}

Neste caso, também foram ensaiados cerca de 40 corpos de prova Charpy, nas mesmas condições. Esta célula de carga também mostrou ser de baixa sensibilidade, para os níveis de carga envolvidos.

2ª Fase: Aferição das Células de Carga C_{III} e C_{IV} .

Neste caso, as aferições foram realizadas nas mesmas condições adotadas no caso das células de carga C_I e C_{II} .

Os resultados obtidos estão resumidos nas Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5. Aferição da célula de carga C_{III} .

CARGA APLICADA [kN]	LEITURA NO OSCILOSCÓPIO [mV]
0,94	0,2
1,46	0,3
2,00	0,4
3,06	0,6
4,00	0,8
4,60	0,9
5,20	1,0
6,19	1,2
7,77	1,5

Regressão Linear- RL_{III} : Força = $5,24(mV) - 0,108$ (3.5)

Coefficiente de Correlação: $R^2_{III} = 0,9997$

Tabela 3.6. Aferição da célula de carga C_{IV} .

CARGA APLICADA [kN]	LEITURA NO OSCILOSCÓPIO [mV]
0,96	0,2
1,63	0,4
1,90	0,5
2,60	0,7
2,91	0,8
3,27	0,9
3,56	1,0
4,25	1,2
5,23	1,5

Regressão Linear- RL_{IV} : Força = $3,29(\text{mV}) + 0,295$ (3.6)

Coefficiente de correlação: $R^2_{III} = 0,9997$

e) Conclusão

Analisando-se as Tabelas 3.3. e 3.4., verifica-se, além do excelente coeficiente de correlação, que a célula de carga C_{II} é mais sensível do que a C_I . Esse fato já era esperado, com base na Tabela 3.2. e na diminuição da robustez dessa célula de carga, pois os extensômetros foram colados nas paredes internas de um rasgo fresado (Fig. 3.6.), formando assim, uma espécie de diafragma.

No entanto, quando em situação real de ensaio, essas duas células de carga, mostraram baixos níveis de sensibilidade, para os níveis de carga envolvidos no ensaio, ou seja, energia envolvida no ensaio Charpy convencional inferior a 150 Joules.

Verificou-se, experimentalmente, a ineficiência dos métodos utilizados no projeto e colagem dos extensômetros das células de carga C_I e C_{II} , ainda que o equipamento de aquisição de dados fosse regulado para um máximo nível de sensibilidade e um mínimo nível de amplificação de ruídos.

Já as células de carga C_{III} e C_{IV} , como pode ser verificado nas tabelas 3.5 e 3.6, apresentaram boa sensibilidade. No caso da célula de carga C_{III} , vê-se que para uma carga de 7,77kN, a resposta foi de 1,5 volts, ao passo que para a célula de carga C_{IV} , para uma carga de 5,23 kN, a resposta foi também de 1,5 volts, o que sugere que, além do excelente coeficiente de correlação

linear, a célula de carga C_{IV} é mais sensível do que a célula de carga C_{III} . A seguir, tem-se o capítulo 4, no qual são realizados ensaios em condições reais de impacto, para vários materiais e em diversas condições, utilizando-se a célula de carga C_{III} . É interessante ressaltar que a célula de carga C_{IV} , não será ensaiada pois, a mesma, foi danificada no transcorrer dos ensaios preliminares, em condições reais de impacto.

4. Ensaaios em condições reais de impacto, com a célula de carga C_{III}

Para se verificar o desempenho da célula de carga C_{III} , foram realizados vários ensaios, em condições reais de impacto, para alguns materiais e condições diferentes.

4.1. Materiais e Métodos

Os materiais e condições utilizados para se verificar o desempenho da célula de carga C_{III} , estão especificados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Materiais e condições de ensaio, utilizados nas experiências com a célula de carga C_{III}.

MATERIAL	TEMPERATURA DE ENSAIO [°C]	VELOCIDADE INICIAL DE IMPACTO [m/s]	CONDIÇÃO METALÚRGICA
Liga Al 7050	Ambiente	2,65 ----- 2,00	Envelhecido-T76
Aço ABNT 1020	Ambiente ----- 50 ± 5 ----- 80 ± 5 ----- 100 ± 5	5,48 ----- 3,90	Completamente recozido
Aço ABNT 4140	Ambiente	5,48	Completamente recozido
Aço 300 M	Ambiente	3,16 ----- 2,00 ----- 1,73	Completamente recozido

Para a realização dos ensaios nas temperaturas 50, 80 e 100°C, os corpos de prova foram aquecidos em forno tipo mufla e o controle da temperatura dos corpos de prova, foi feito com um termopar de contato - Cromel/Alumel.

Todos os corpos de prova do tipo Charpy, foram usinados de acordo com a norma ASTM E-23 [28], com plano de entalhe orientado na direção L-T, conforme a figura 4.1. Assim, as dimensões dos corpos de prova, são: 10x10x55mm, com entalhe em V, conforme a figura 2.1.

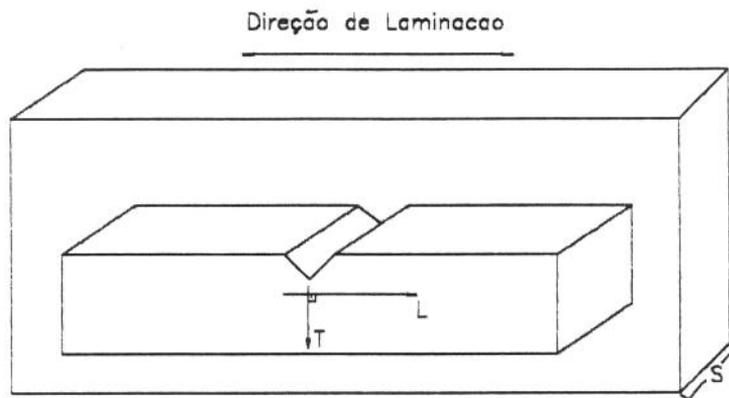


Figura 4.1. Orientação do plano de entalhe, em função da direção de laminação das placas que originaram os corpos de prova Charpy entalhados.

4.2. Caracterização da resistência à flexão em três pontos, em condições "estáticas"

Os corpos de prova entalhados, do ensaio de impacto Charpy, foram ensaiados previamente em condição monotônica ("estática"), à flexão apoiados em três pontos, simulando a geometria de carregamento do ensaio de impacto, com o objetivo de

caracterizar a resistência à flexão dos materiais citados na Tabela 4.1. Esses ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio de compressão marca Pavitest modelo PVT 042, dotada de um anel dinamométrico com leitura em relógio comparador micrométrico, com capacidade máxima de 50 kN. Neste caso, foram realizados três ensaios em cada um dos materiais, e adotados os valores médios obtidos, com desvios inferiores a 2%. Os resultados se encontram na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Resistência à flexão em três pontos/carga máxima e o correspondente K_a , em condições de carregamento monotônico ("estático"), à temperatura ambiente.

MATERIAL	CARGA MÁXIMA [kN]	K_a [MPa \sqrt{m}]
Al 7050-T76	10,2	47,5
Aço ABNT 1020	11,2	52,2
Aço ABNT 4140	15,4	71,8
Aço 300M	16,7	77,8

observação: A carga máxima da liga Al 7050 - T76 e do aço ABNT 1020, referem-se ao escoamento generalizado e dos aços ABNT 4140 e 300M, à carga de ruptura.

O parâmetro K_a - Tenacidade à Fratura Aparente, foi calculado a partir da equação 2.3 Assim, o mesmo, representa o Fator de Intensificação de Tensão K_{Ic} (ou K_{I0}) para corpos de prova Charpy, com entalhe em V, sem pré-trinca de fadiga [30], com carregamento monotônico e taxa de deformação da ordem de 10^{-2} s^{-1} .

A montagem do sistema de aquisição de dados, para os ensaios da célula de carga C_{III} , foi idêntica àquela esquematizada na figura 3.17. e mostrada na figura 4.2. com maior detalhamento.

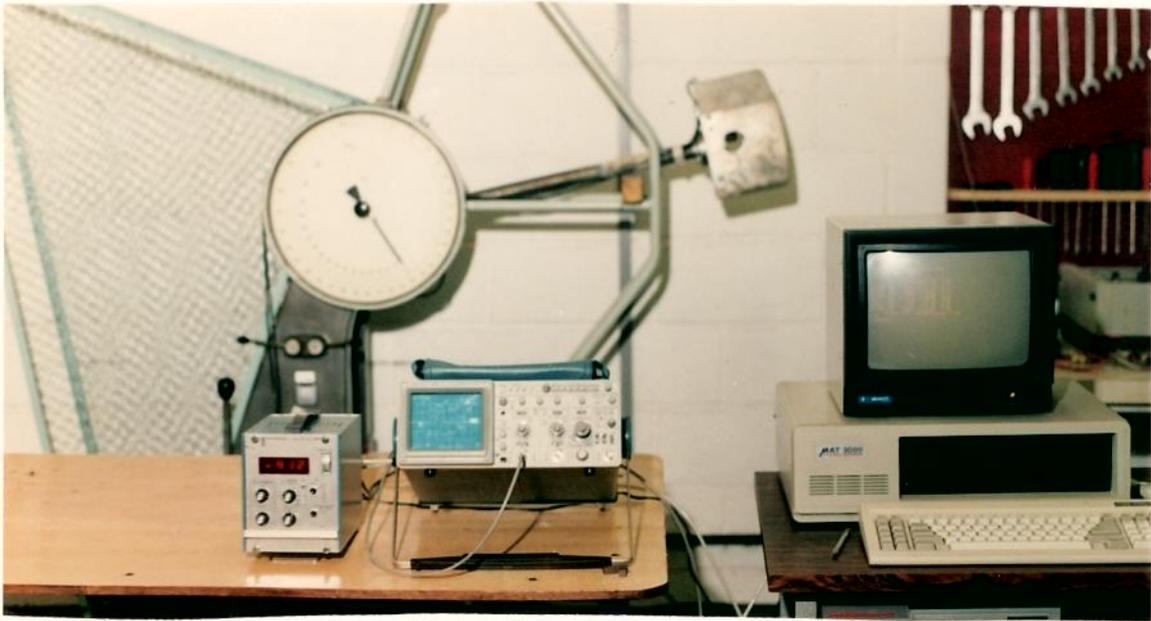


Figura 4.2. Montagem do sistema, para aquisição de sinal, no ensaio Charpy instrumentado. Ao fundo, vê-se o pêndulo, no qual encontra-se a célula de carga C_{III} e, em primeiro plano, da esquerda para a direita, tem-se: indicador digital de sinais, osciloscópio e microcomputador.

5. Resultados e discussão

As figuras de 5.1 a 5.11, ilustram as curvas força x tempo, obtidas a partir dos materiais e ensaios, resumidos na tabela 4.1.

5.1. curvas obtidas dos ensaios com a liga Al 7050:

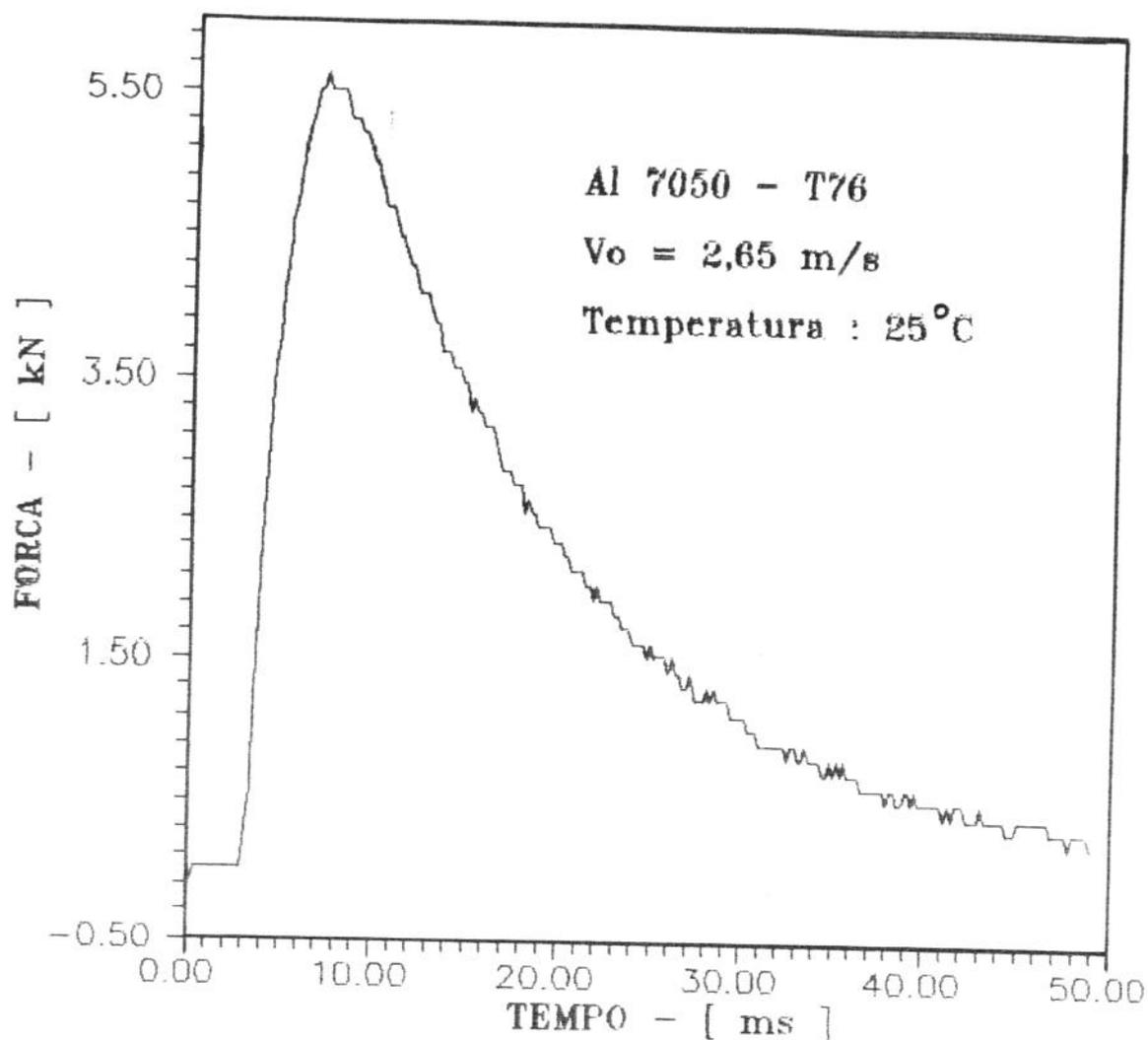


Figura 5.1. Curva força x tempo - Al 7050 T76. Neste caso,

$V_0 = 2,65 \text{ m/s}$, em temperatura ambiente. Houve fratura completa do corpo de prova.

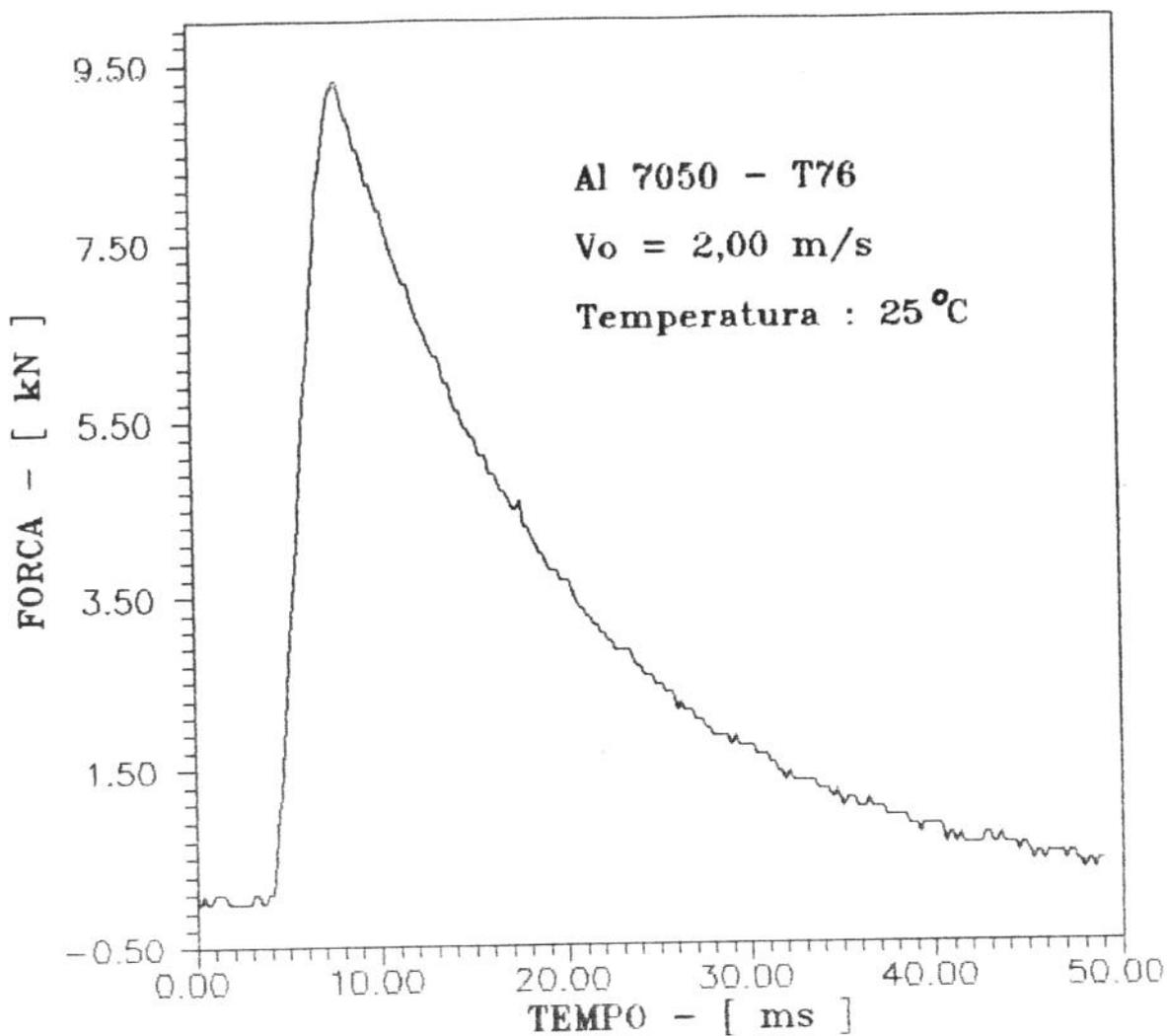


Figura 5.2. Curva força x tempo - Al 7050 T76. Neste caso, $V_0 = 2,0$ m/s, em temperatura ambiente. Atingiu-se o escoamento generalizado do corpo de prova.

5.2. Curvas obtidas dos ensaios realizados com o aço ABNT 1020

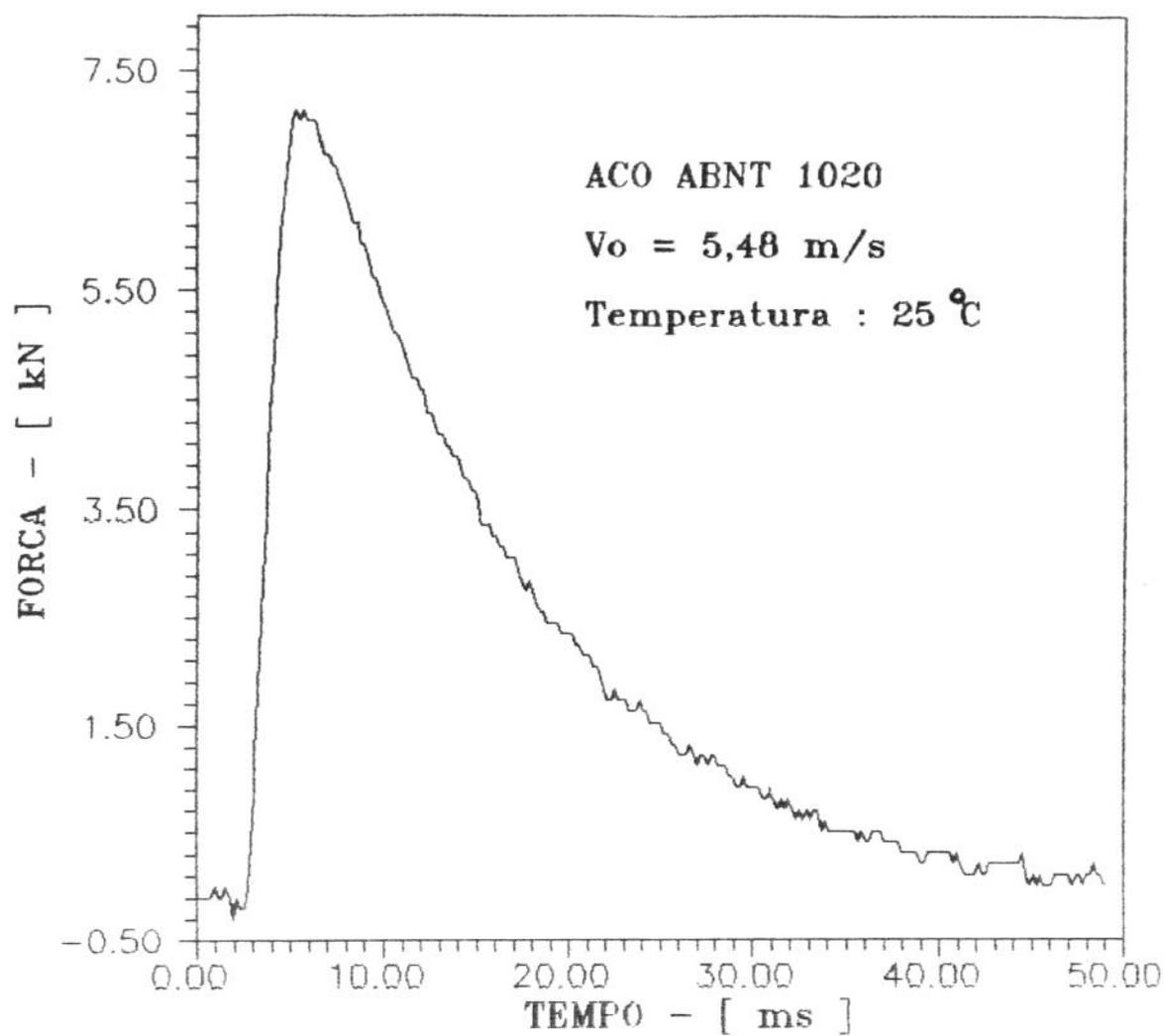


Figura 5.3. Curva força x tempo - Aço ABNT 1020. Neste caso, $V_0=5,48 \text{ m/s}$, em temperatura ambiente. Houve fratura completa do corpo de prova.

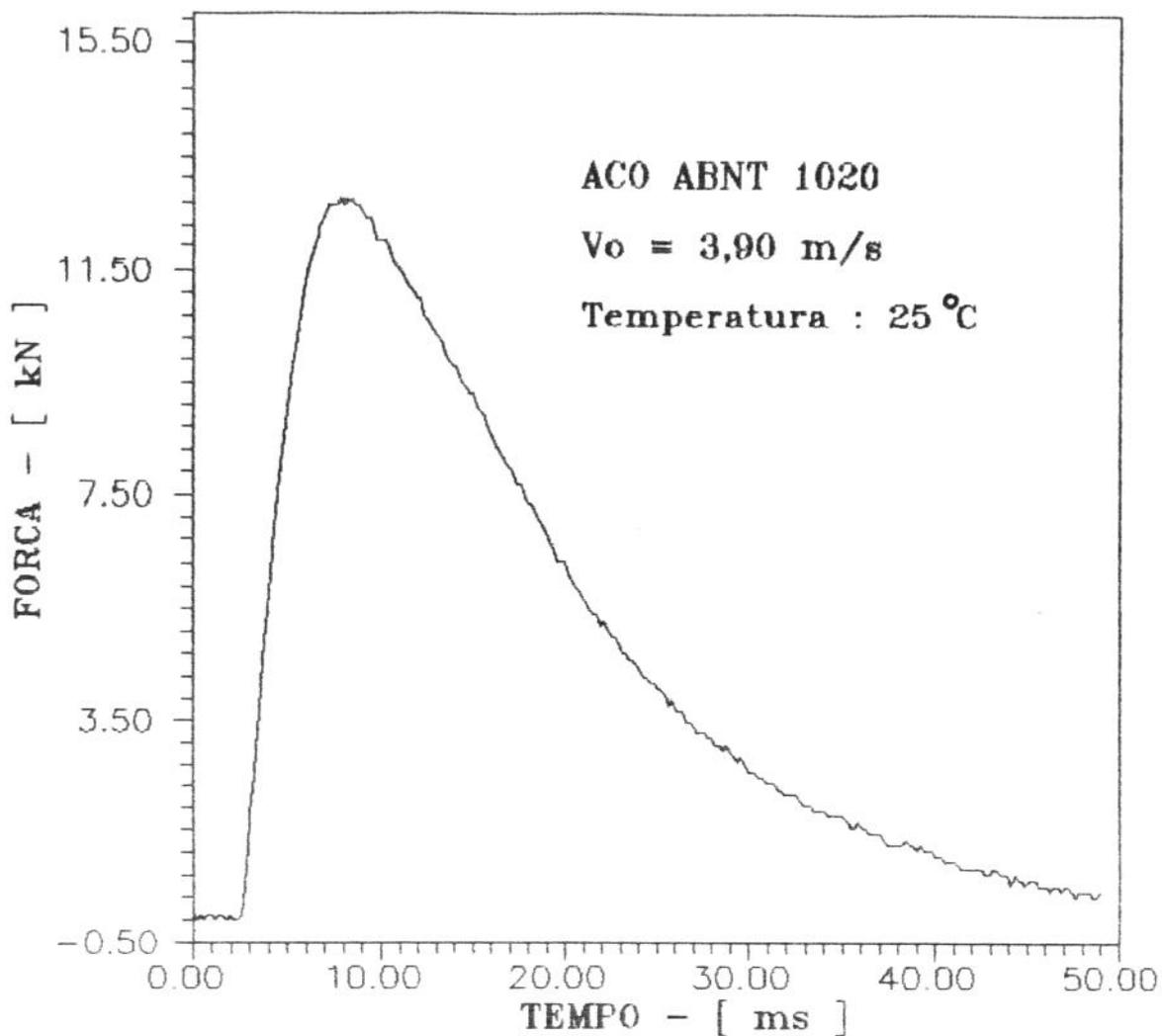


Figura 5.4. Curva força x tempo - Aço ABNT 1020. Neste caso, $V_0 = 3,90 \text{ m/s}$ e temperatura de ensaio $T = 25^\circ\text{C}$. Atingiu-se o escoamento generalizado do corpo de prova.

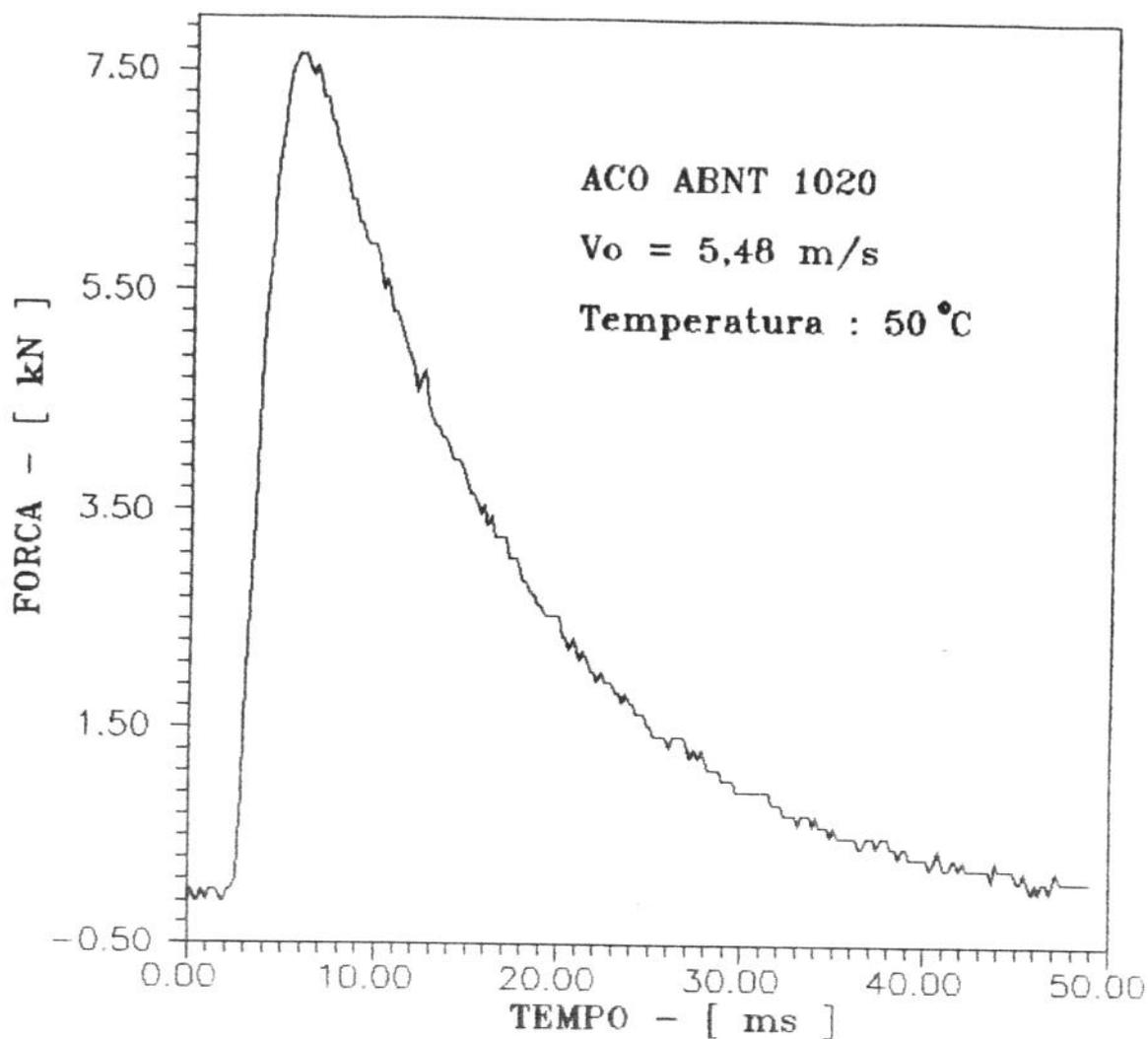


Figura 5.5. Curva força x tempo - Aço ABNT 1020. Neste caso $V_0 = 5,48 \text{ m/s}$ e temperatura de ensaio $T = 50^\circ\text{C}$. Houve fratura completa do corpo de prova.

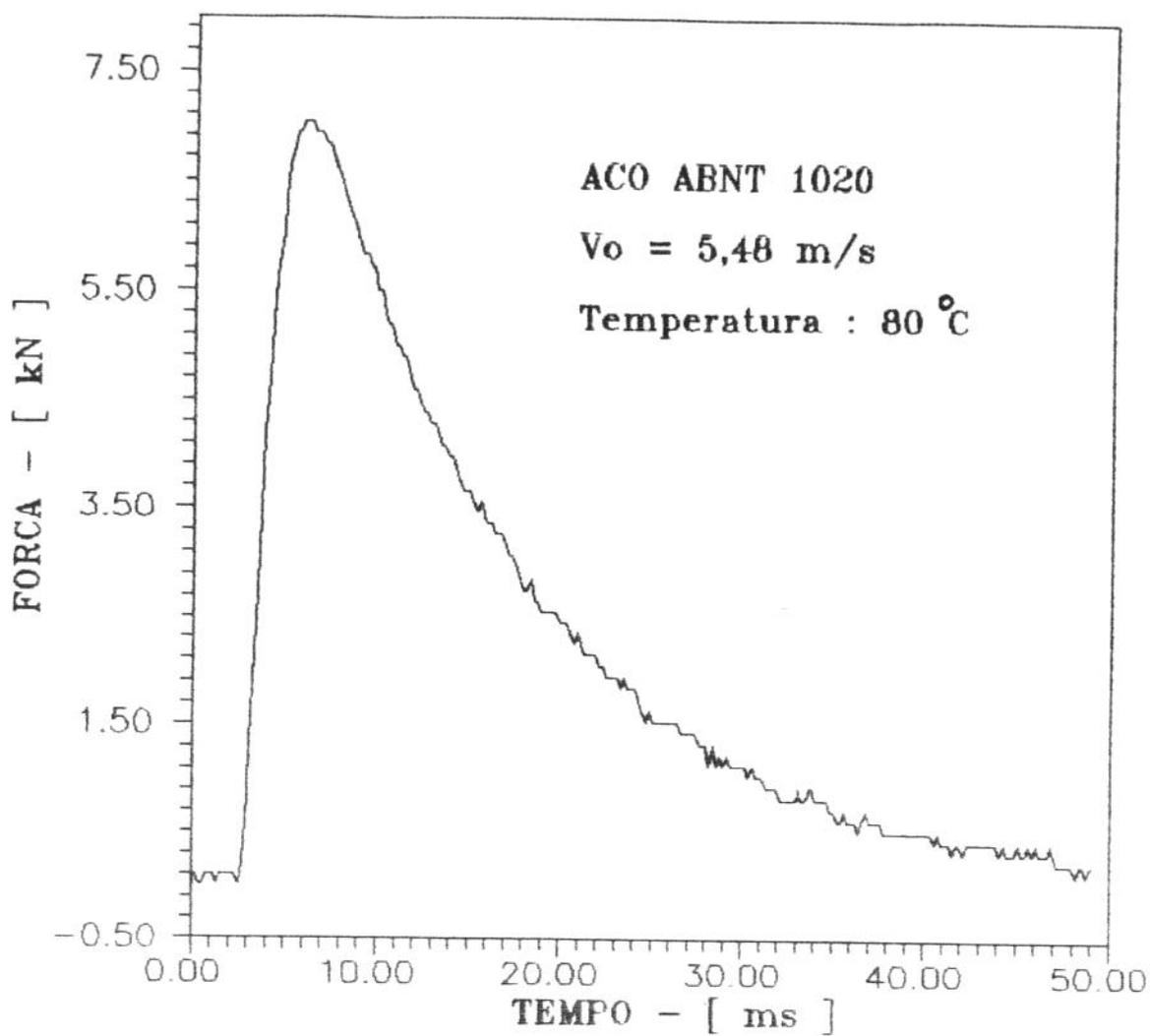


Figura 5.6. Curva força x tempo - Aço ABNT 1020. Neste caso, $V_0 = 5,48$ m/s e temperatura $T = 80^{\circ}\text{C}$. Houve fratura completa do corpo de prova.

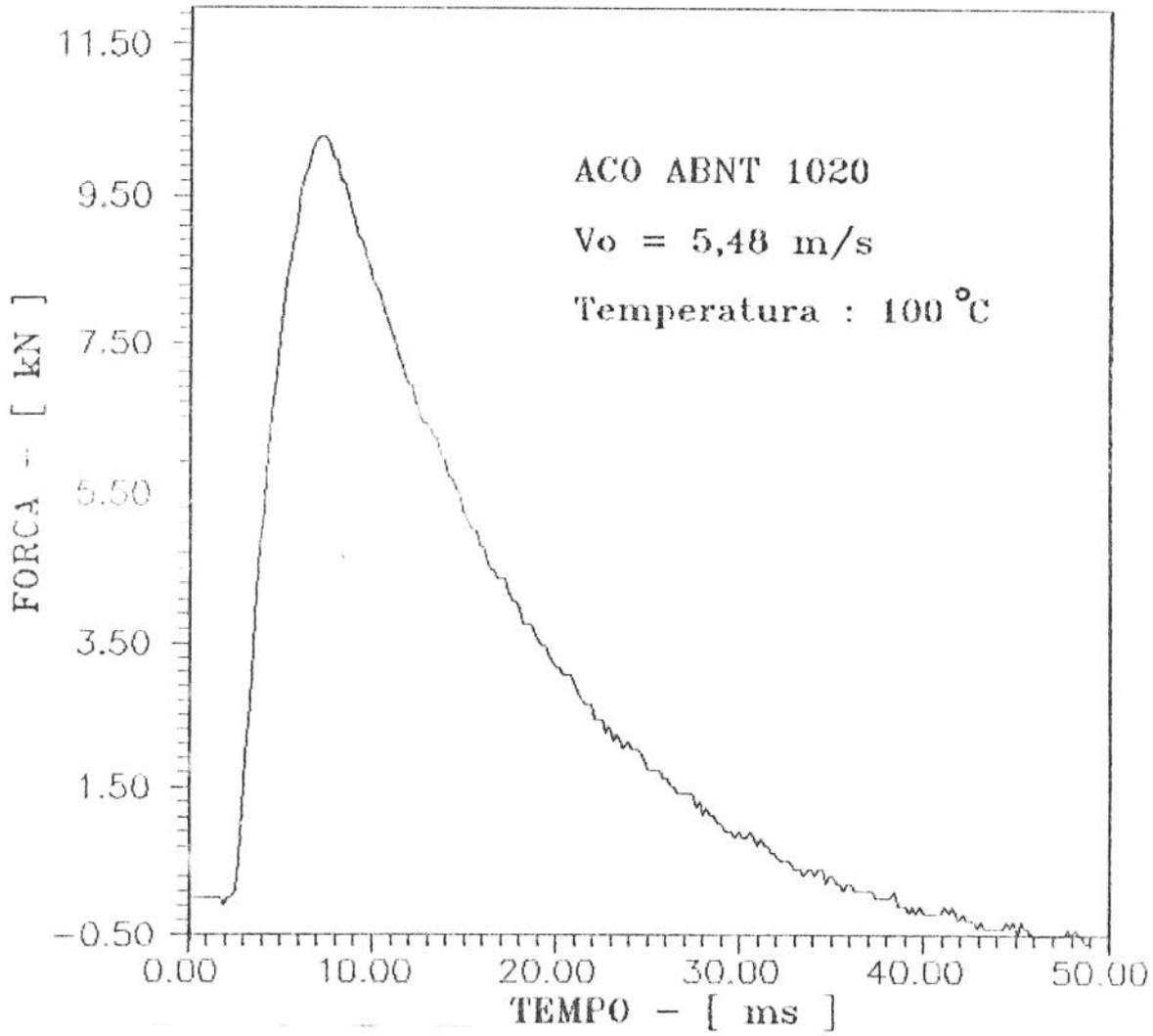


Figura 5.7. Curva força x tempo - Aço ABNT 1020. Neste caso, $V_0 = 5,48 \text{ m/s}$ e temperatura de ensaio $T = 100^\circ\text{C}$. Houve fratura completa do corpo de prova.

5.3. Curva obtida nos ensaios com o aço ABNT 4140

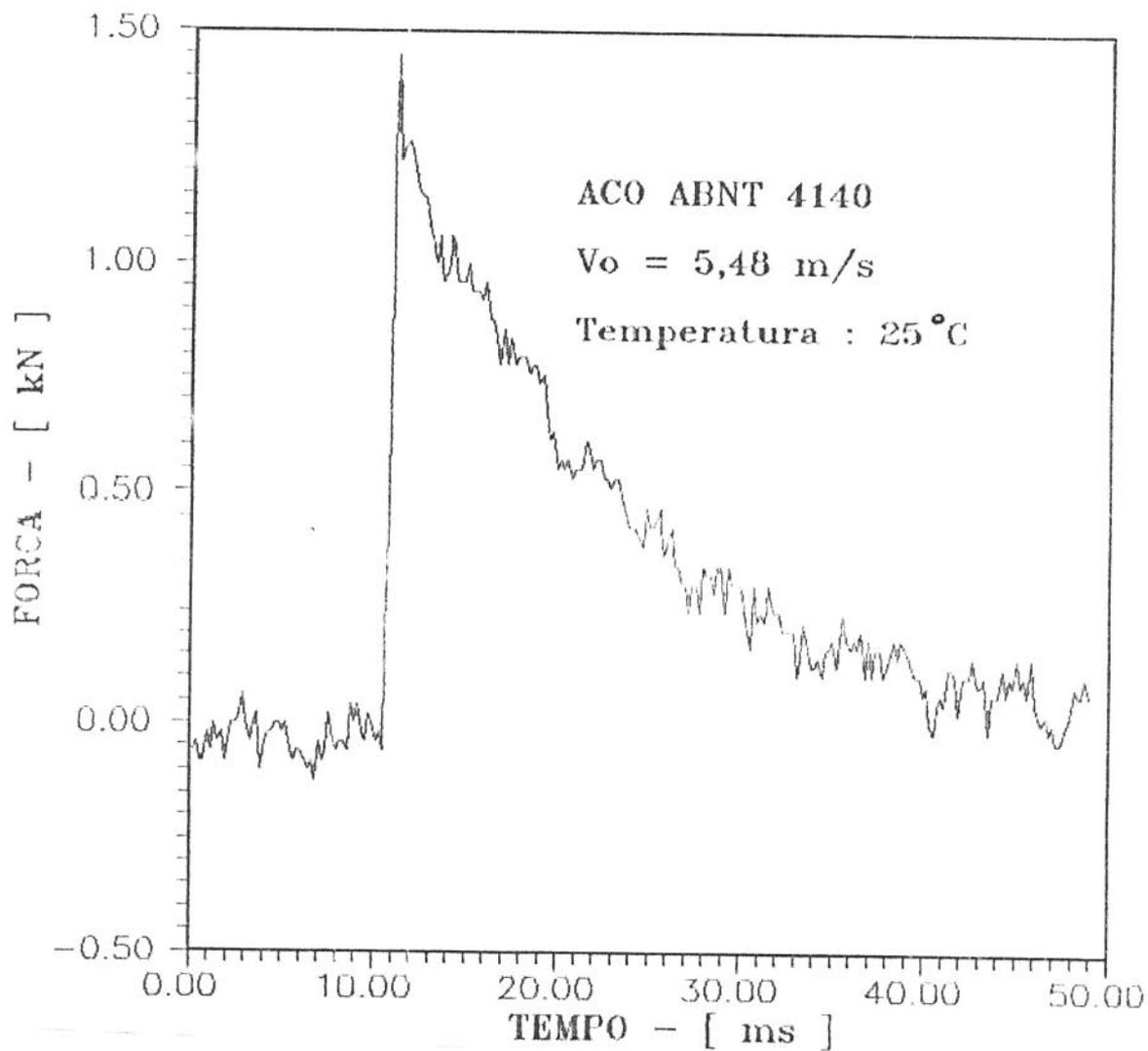


Figura 5.8 Curva força x tempo - Aço ABNT 4140. Neste caso, $V_0 = 5,48 \text{ m/s}$ e temperatura de ensaio $T = 25^\circ\text{C}$. Houve fratura completa do corpo de prova.

5.4. Curvas obtidas dos ensaios com o aço 300M

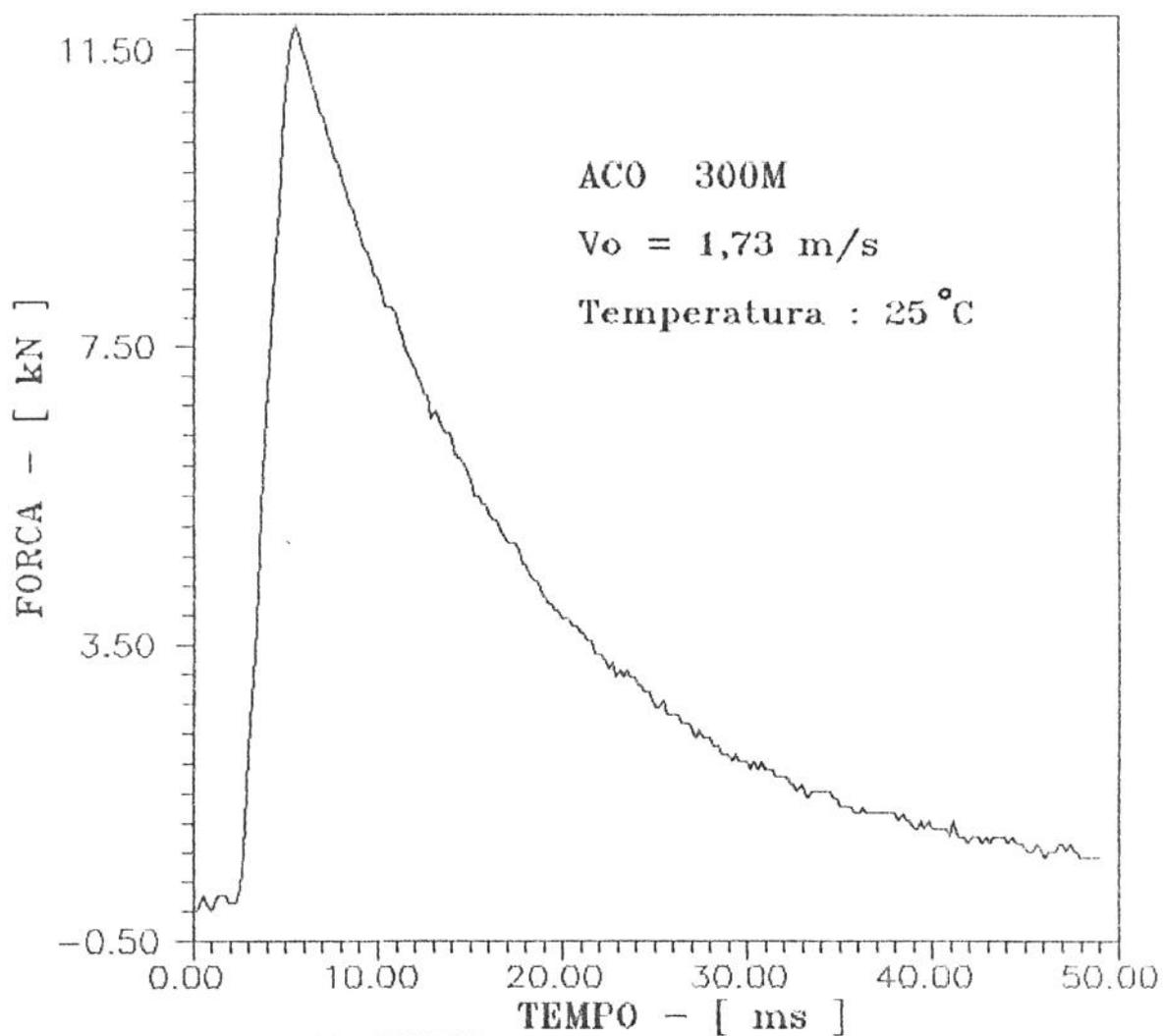


Figura 5.9. Curva força x tempo - Aço 300M. Neste caso, $V_0 = 1,73 \text{ m/s}$ e temperatura de ensaio $T = 25^\circ\text{C}$. Atingiu-se o escoamento generalizado do corpo de prova.

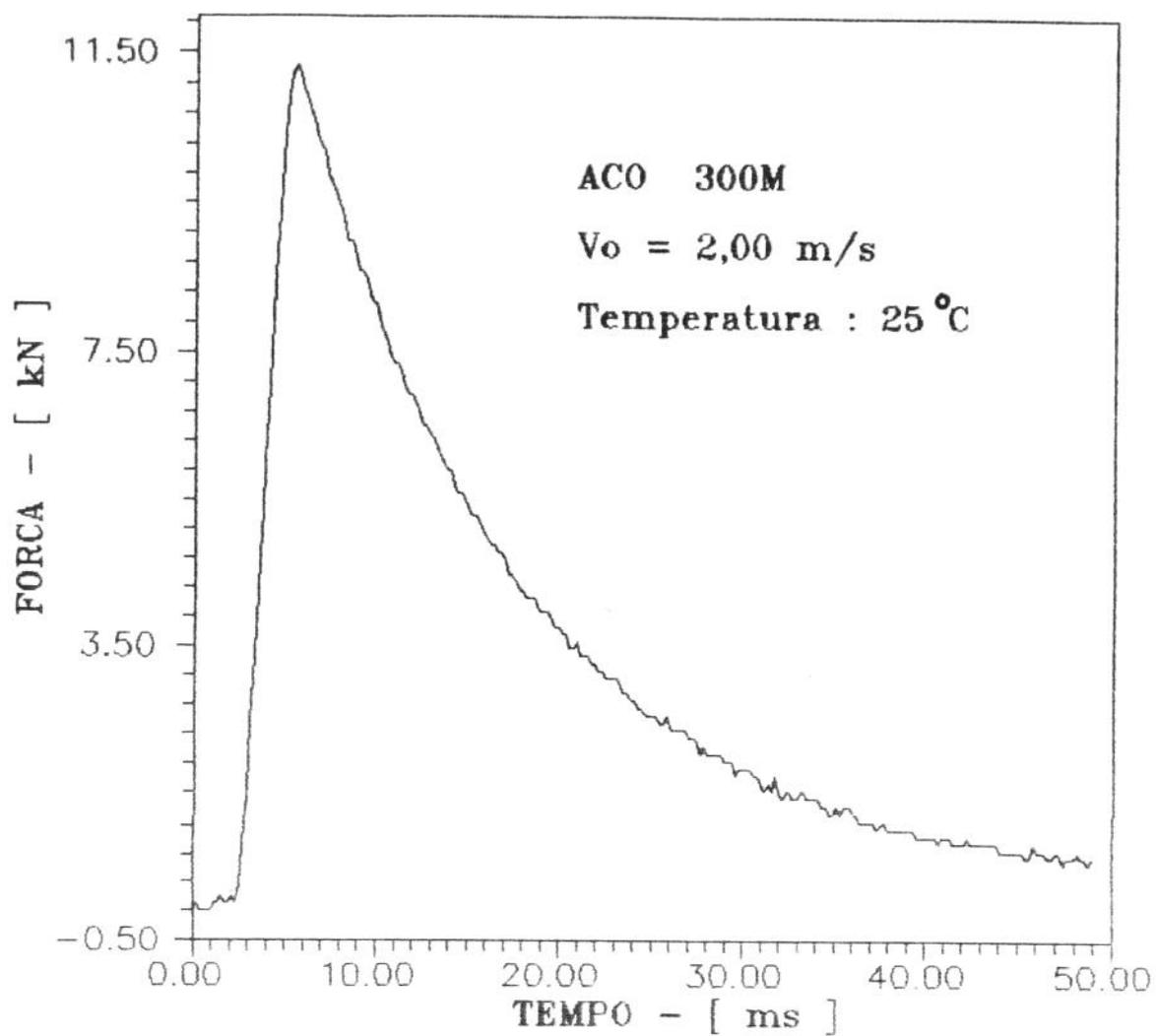


Figura 5.10. Curva força x tempo - Aço 300M. Neste caso, $V_0 = 2,0 \text{ m/s}$ e, temperatura de ensaio $T=25^\circ\text{C}$. Houve fratura completa do corpo de prova.

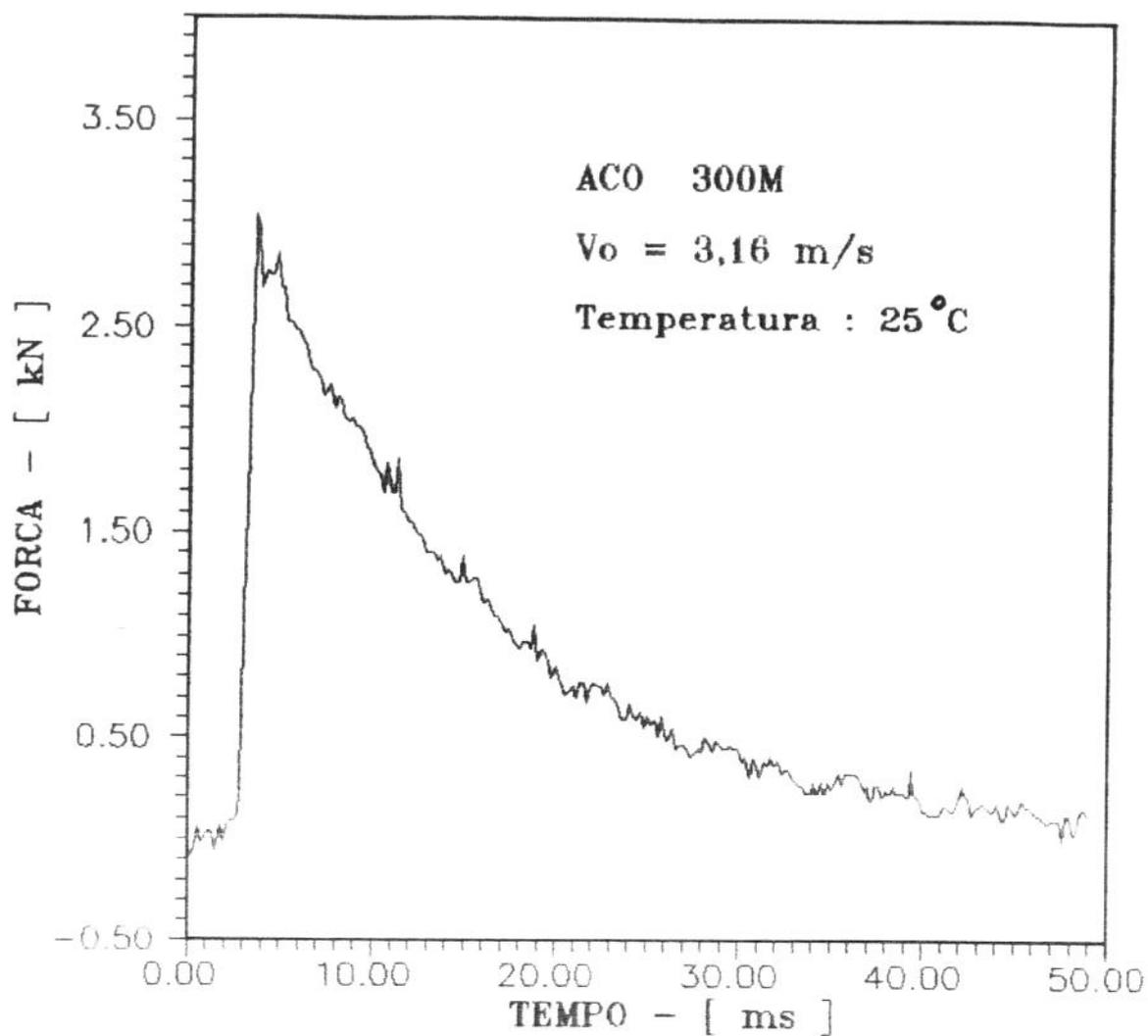


Figura 5.11. Curva força x tempo - Aço 300M. Neste caso, $V_0 = 3,16 \text{ m/s}$ e, temperatura de ensaio $T = 25^\circ\text{C}$. houve fratura completa do corpo de prova.

5.5. Determinação das cargas máximas

A determinação dos valores médios de três ensaios por condição, das cargas máximas de fratura dos corpos de prova Charpy, é feita lendo-se diretamente o valor de máximo, nas curvas das figuras 5.1, 5.2, ..., 5.11, pois nestes casos, a Regressão Linear - RL_{III} (equação 3.5), já se encontra inserida no programa de determinação da matriz de dados e, os valores do Fator de Intensificação de Tensão Dinâmico Aparente, $K_{I Da}$, foram calculados a partir da equação 3.1.

Tabela 5.1. Valores de carga máxima lidos diretamente nas curvas 5.1, 5.2, ..., 5.11, e do Fator de Intensificação de Tensão Dinâmico aparente, calculados a partir da equação 3.1. (valores médios obtidos a partir de três ensaios por condição).

MATERIAL	TEMPERATURA DE ENSAIO [°C]	VELOCIDADE INICIAL DE IMPACTO [m/s]	CARGA MÁX. [kN]	$K_{I Da}$ [MPa \sqrt{m}]
Al 7050 T 76	ambiente	2,65	5,76	26,8
		2,00	9,64	44,9
aço ABNT 1020	ambiente	5,48	7,00	32,7
		3,90	13,21	61,5
	50	5,48	7,65	35,6
	80	5,48	6,90	32,15
	100	5,48	10,50	48,8
	ambiente	5,48	1,46	6,8
aço 300 M	ambiente	1,73	12,05	56,2
		2,00	11,42	53,2
		3,16	3,04	14,2

5.6. Determinação das energias absorvidas para início de fratura

A determinação das energias absorvidas pelos corpos de prova dos diversos materiais ensaiados, para início de fratura, foi feita utilizando-se a equação 2.7, ou seja, integrando-se as curvas obtidas, até carga máxima. Esses valores encontram-se na tabela 5.2, onde se tem:

E_t = energia absorvida pelo c.p, até carga máxima, considerando-se a variação na velocidade do pêndulo, devido impacto (fator alfa - eq.2.8).

E_1 = energia absorvida pelo c.p, até carga máxima, considerando-se a velocidade do pêndulo constante, durante o ensaio de impacto.

Tabela 5.2. Valores de E_t e E_1 , obtidos dos ensaios de impacto e, relativos às curvas 5.1,5.2,...,5.11.

curva da figura:	carga máx. [KN]	E_t [Joules]	E_1 [joules]
5.1	5.76	89.7	97.6
5.2	9.64	105.4	116.8
5.3	7.00	81.6	88.0
5.4	13.21	187.0	232.0
5.5	7.65	97.0	106.4
5.6	7.70	90.0	98.2
5.7	10.50	156.0	188.5
5.8	1.46	0.5	0.5
5.9	12.05	110.9	123.7
5.10	11.42	98.0	176.0
5.11	3.04	8.0	8.0

5.7. Análise e discussão dos resultados

A sobreposição das curvas obtidas nas diversas condições de ensaio, são apresentadas nas figuras 5.13, ..., 5.16.

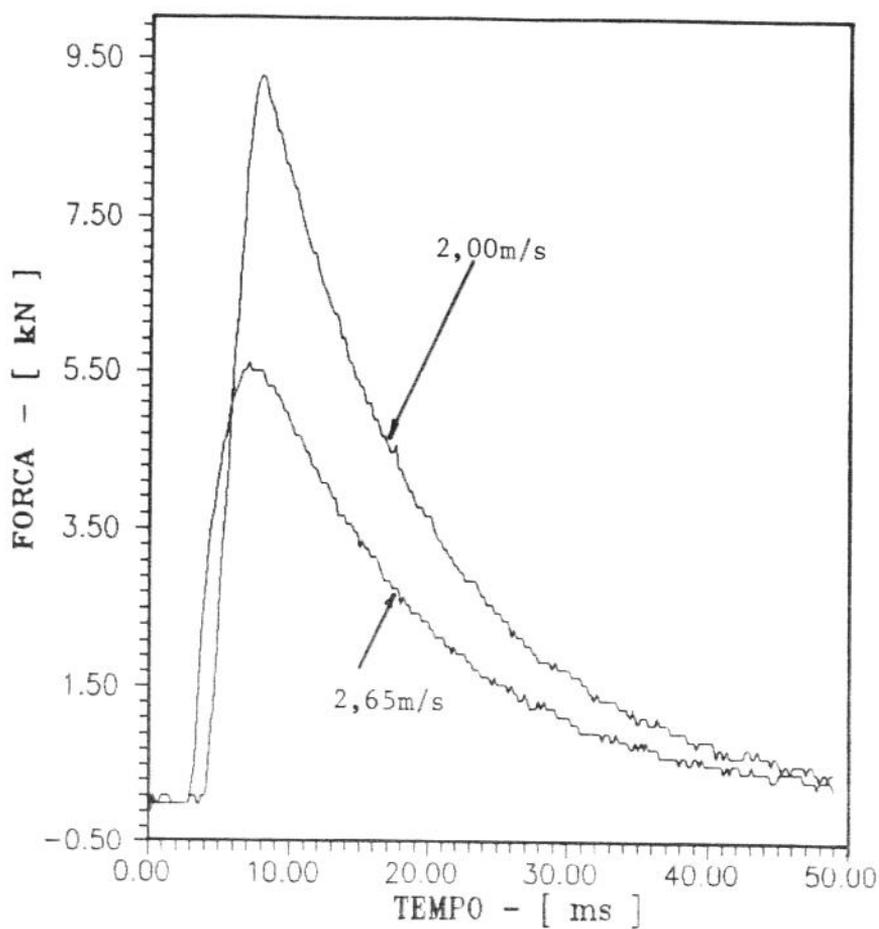


Figura 5.12. Sobreposição das curvas obtidas dos ensaios com a liga Al 7050. Neste caso, tem-se dois valores de velocidade inicial de impacto: 2,00 e 2,65m/s.

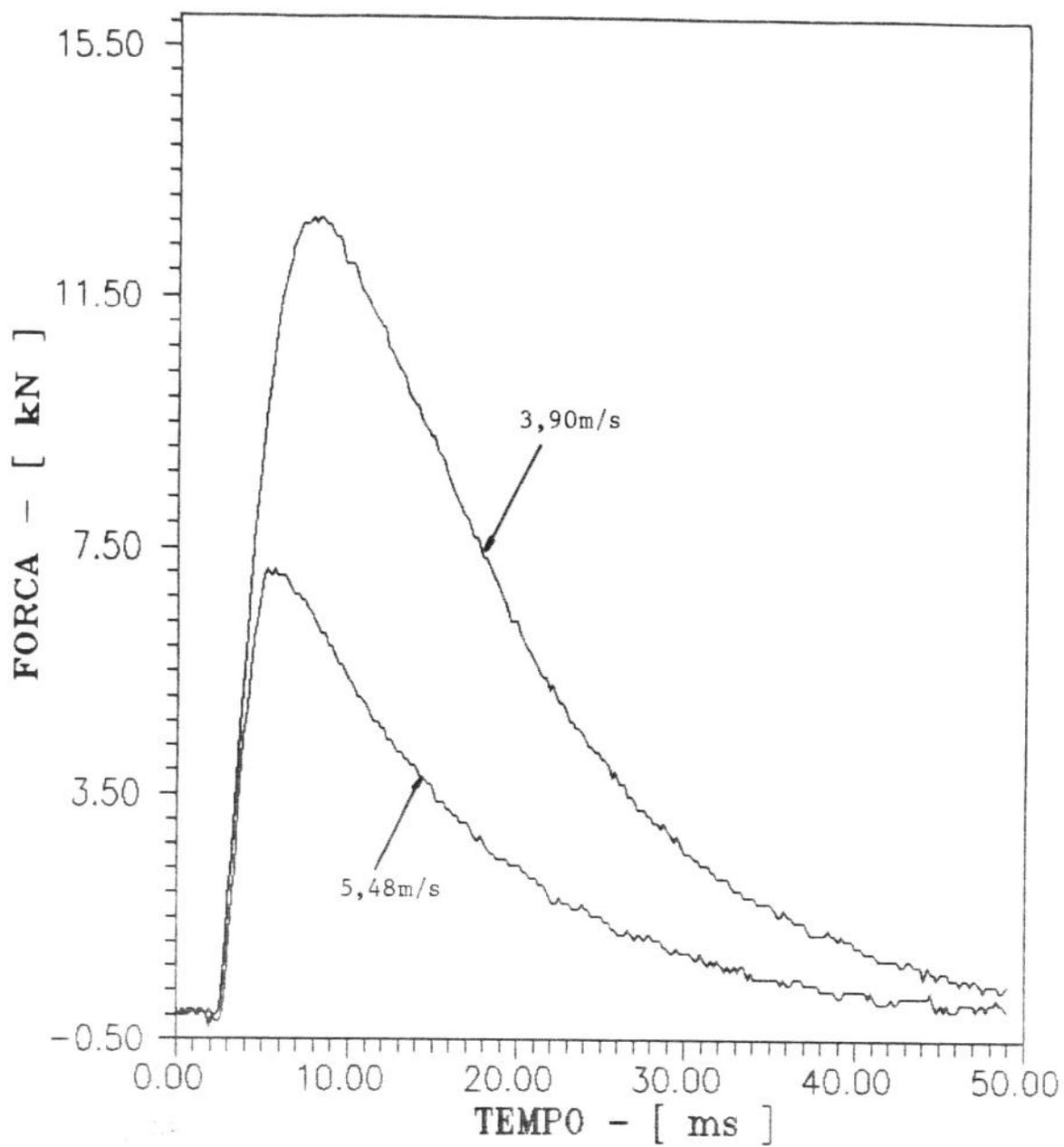


Figura 5.13. Sobreposição das curvas obtidas dos ensaios com o aço ABNT 1020. Neste caso, tem-se dois valores de velocidade inicial de impacto: 3,90 e 5,48m/s.

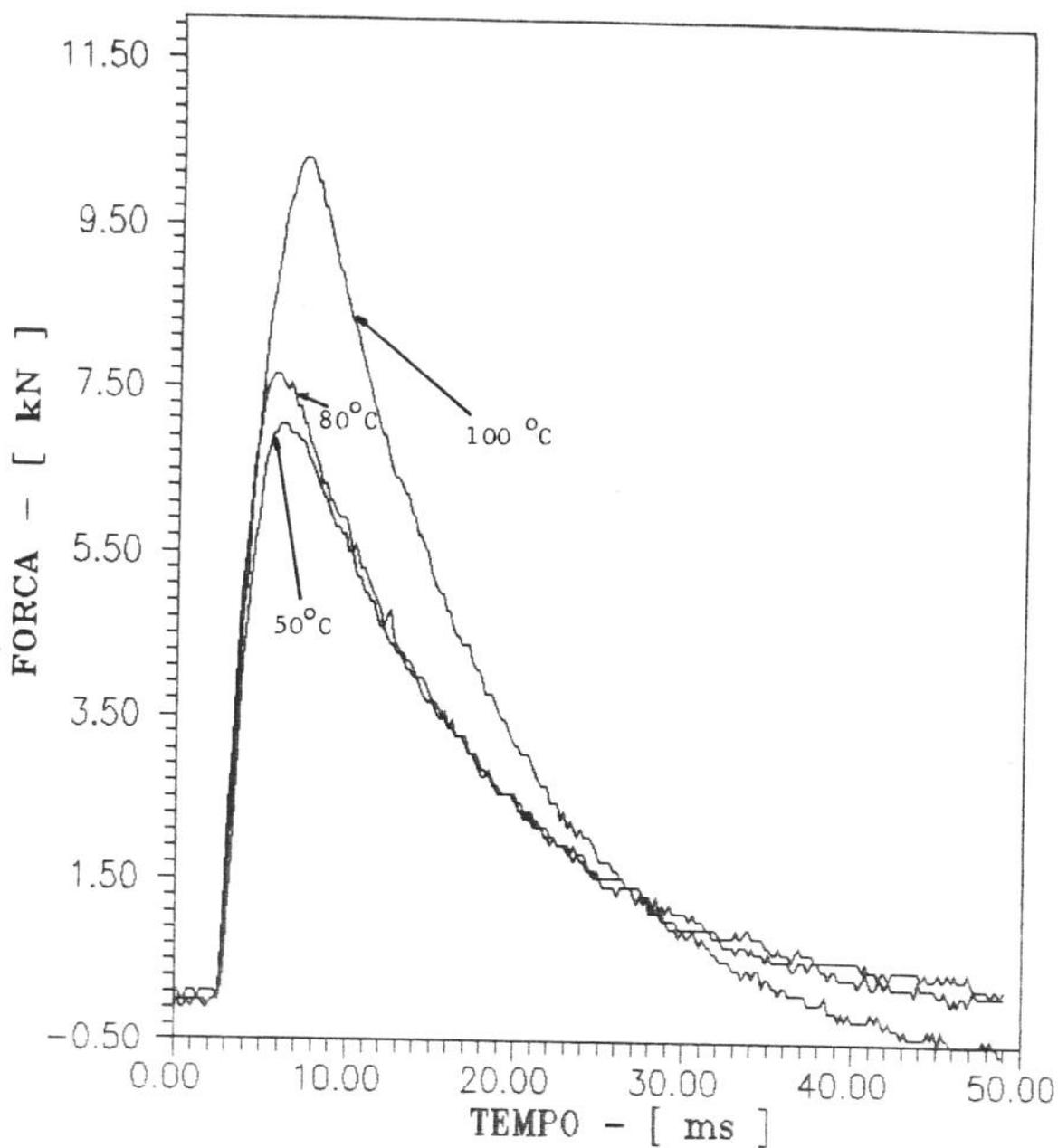
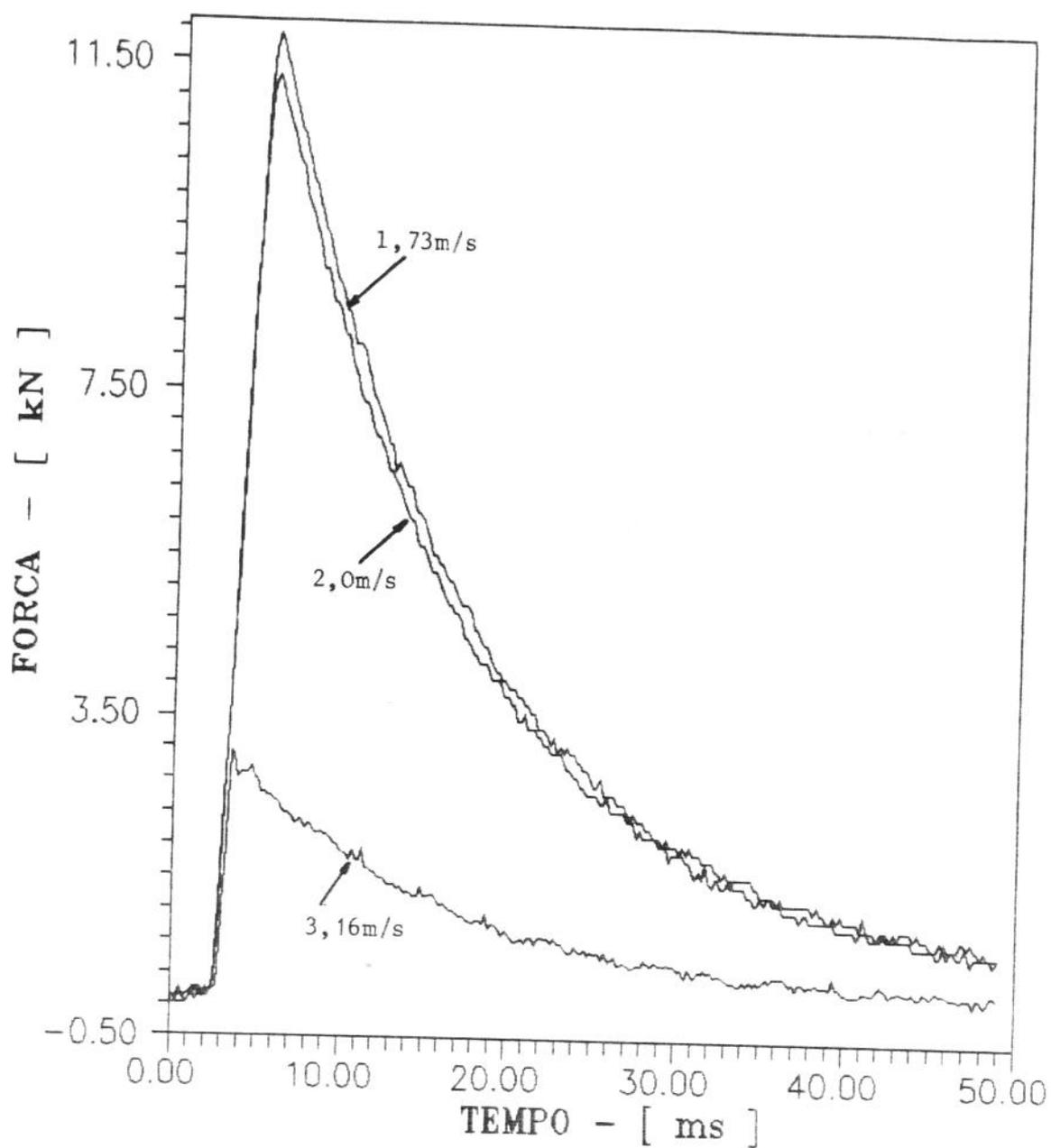


Figura 5.14. Sobreposição das curvas obtidas dos ensaios com o aço ABNT 1020. Neste caso, tem-se tres valores de temperatura de ensaio, no instante do impacto: 50; 80 e 100°C, com velocidade constante de 5,48m/s.



5.15. Sobreposição das curvas obtidas dos ensaios com o aço 300M. Neste caso, tem-se tres valores de velocidade inicial de impacto: 1,73; 2,00; 3,16m/s, em temperatura ambiente de.

As curvas apresentadas na figura 5.12, mostram que a velocidade inicial de impacto, exerce influência, na carga máxima registrada, no caso da liga Al7050.

No caso de $V_0 = 2,00\text{m/s}$, atingiu-se o escoamento generalizado do corpo de prova, o que levou a um registro de carga máxima de $9,64\text{kN}$, contra um valor esperado de $10,2\text{kN}$ (tabela 4.2).

As curvas apresentadas na figura 5.13, referem-se ao aço ABNT 1020 e, mostram que para velocidade inicial de impacto, $V_0 = 3,90\text{m/s}$, a carga máxima registrada, foi de $13,21\text{kN}$, contra um valor esperado de $11,2\text{kN}$ (tabela 4.2). Neste caso, o escoamento generalizado do corpo de prova, também foi alcançado.

As curvas apresentadas na figura 5.14, também se referem ao aço ABNT 1020. Elas mostram que a temperatura do corpo de prova exerce influência na carga máxima alcançada. No caso da temperatura ser de 100°C , o valor de carga máxima, foi de $10,50\text{kN}$, com velocidade inicial de impacto, $V_0 = 5,48\text{ m/s}$.

Já, as curvas apresentadas na figura 5.15, mostram que para o aço 300M, a velocidade inicial de impacto exerce influência na carga máxima alcançada. No caso de se ter escoamento generalizado, a carga máxima alcançada, foi de $12,05\text{kN}$, contra um valor esperado de $16,7\text{kN}$ (tabela 4.2).

Os materiais de alta resistência, tais como o aço 300M, normalmente, não sofrem a influência da velocidade nas quais são ensaiados, ou seja, não sofrem influência da taxa de deformação [7]. No entanto, as curvas da figura 5.15 mostram que a velocidade inicial de impacto exerceu uma certa influência nas cargas máximas

alcançadas. Esse fato provavelmente, se deu devido a dois motivos:

- i) O aço 300M foi ensaiado completamente recozido, ou seja, sem que o mesmo tivesse sido tratado térmicamente, com a finalidade de conferir-lhe melhoria de resistência mecânica, com consequente diminuição de ductilidade.

- ii) No caso do aço 300M, como se alcançou o escoamento generalizado, o tempo de interação entre a célula de carga e o corpo de prova, foi consideravelmente maior do que no caso de se ter fratura completa e em deformação plana.

No caso do aço 1020, a temperatura de ensaio mostrou ter uma certa influência na carga máxima alcançada, o que é evidenciado nas curvas da figura 5.14. No ensaio em temperatura de 100°C, e velocidade inicial de impacto de 5,48 m/s, verifica-se que a carga máxima alcançada, foi de 10,50 kN. Esse valor é bastante próximo daquele obtido no ensaio de flexão, com apoio em três pontos, que foi de 11,20 kN. Provavelmente, houve um aumento na ductilidade do material, devido à elevação da temperatura de ensaio, o que resultou num aumento de tempo de interação entre a célula de carga e o corpo de prova, aumentando assim o tempo de aquisição de sinal, ou seja: a quantidade de dados adquiridos pelo sistema.

Em temperatura ambiente ou a elevadas temperaturas, os materiais de baixa resistência com elevada ductilidade, como é o caso do aço ABNT 1020, sofrem uma considerável influência da taxa de deformação [7]. Esse fato, está muito bem evidenciado nas curvas da figura 5.13, onde se verifica que quanto maior a velocidade inicial de impacto, menor é a taxa de deformação, maior é o tempo de interação corpo de prova/célula de carga e, maior é a carga máxima alcançada.

No caso do aço ABNT 4140, foram realizados vários ensaios e, no entanto, os resultados obtidos foram totalmente insatisfatórios, como pode ser verificado na curva da figura 5.8, que mostra uma curva totalmente degenerada. Esse fato, merece um estudo mais detalhado, já que a carga máxima alcançada deveria aproximar-se daquela apresentada na tabela 4.2.

Na tabela 5.1, são apresentados os valores dos Fatores de Intensificação Dinâmico Aparentes, K_{IDa} . Uma análise desses valores, mostra que quanto menor a velocidade inicial de impacto, mais próximo eles ficam daqueles apresentados na tabela 4.2. No caso do aço ABNT 1020, verifica-se que a velocidade inicial de impacto, exerce uma influência consideravelmente maior do que a temperatura de ensaio.

6. CONCLUSÕES

Deste trabalho, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- 1) A determinação do local de colagem dos extensômetros pelo método experimental e pelo método de simulação de carregamento por Elementos Finitos, mostraram-se bastante satisfatórios;
- 2) Além dos excelentes coeficientes de correlação linear obtidos, a aferição das células de carga pelo método de carregamento estático, mostrou-se bastante eficiente;
- 3) A análise dos resultados obtidos nos ensaios, mostra que no caso em que ocorreu fratura frágil dos corpos de prova, com elevadas taxas de carregamento, os valores de carga máxima alcançados, estão bem abaixo do esperado. Esse fato, comprova que o tempo de resposta de equipamentos de aquisição de sinais, em ensaios dinâmico, exerce profunda influência nos resultados dos ensaios ;
- 4) A colagem dos extensômetros em ponte completa, proporciona uma maior sensibilidade ao sistema de aquisição de dados.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sanz, G. La rupture des aciers. Dans la mécanique de la rupture. Paris: IRSID/CESSID, 1970. v.1, p.5-63.
- [2] Sanz, G. La rupture des aciers. Dans la mécanique de la rupture. Paris: IRSID/CESSID, 1970. v.2, p.16-28.
- [3] Pellini, W.S., Puzak, P.P. Practical consideration in applying laboratory fracture test criteria to the fracture safe design of pressure vessels. [s.l.:s.n.]. nov. 1963. (report, 6030).
- [4] Hertzberg, R.W. Deformation and fracture mechanics of the engineering materials. New York: John Wiley & sons, 3.ed., 1990, p.333-349.
- [5] Reed Hill, R.E. Physical metallurgy principles. New York: Van Nostrand company; Liton Educational, 1982. p.635-701.
- [6] Tetelman, A.S. McEvelly Jr. Fracture of structural materials. New York: John Wiley & sons, 1977. p.275-323.
- [7] Dieter, G. E. Mechanical metallurgy. New York: Mc.Graw-Hill Inc., 2.ed., S.I. metric edition, 1988. p.241-250, 419-450.
- [8] ASTM E399-83. Standard test method for plane strain fracture toughness of metallics materials. 1983.
- [9] Broek, D. Elementary engineering fracture mechanics. in Fracture Research Inc., Galena: Martinus Nijhoff Publishers. Oh., USA.. 4 ed., 1986. p.186-190.

- [10] Server, J.H. Charpy impact testing. In American Society for Metals. Metals Handbook: Impact Testing of Materials. 9.ed., vol.8, Metals Park, 1985
- [11] Cowan, A. Interpretation de l'essai de résilience avec enregistrement. Le soudage dans le monde. In: 6^{ème} Conférence de soudage, 6, 1970, Budapest. [s.n.t.] vol.8, n.1, p.5-7.
- [12] Augland, B. The Impact Charpy Test. London: British Welding Journal. vol.9, 1962. p.343.
- [13] Meyers, M.A., Chawla, K.K. Princípios de Metalurgia Física. São Paulo: ed. Edgard Blucher, 1982. p.127-165.
- [14] Dae June, H., Sun Pil Cho. Evaluation of structure toughness of pressure vessel steel, using Charpy impact test specimens. Journal of Korean Nuclear Society, vol.19, number 1, march 1987. p.247-251.
- [15] Hawley, R.H., Duffy, J., Shin, C.F. Dynamic notched round bar testing. In: American Society For Metals. Metals Handbook. 9 ed. Metals Park, 1981.
- [16] Ireland, D.R. Procedure and problems associated with reliable control of the instrumented impact test: instrumented impact testing. ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, n.563, p.3-29, 1974.
- [17] Giovanola, J.H.J. Fracture testing servohydraulic systems. In: American Society for Metals. Metals Handbook. 9.ed. Metals Park, v.8, 1985. p.259-261.

- [18] Buys, E.C.J., Cowan, A. Interpretation of the instrumented impact test. London: International Institute of Welding, July 1968. p.3-14, (Document X, 458/68).
- [19] Ireland, D.R. Critical review of instrumented impact test. Cambridge: the Welding Institute, 1977, p.47-61. (Conference Technical Report).
- [20] Turner, C.E. Measurement fracture toughness by instrumented impact testing: impact testing of materials. ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, n.466, p.47-53, 1978.
- [21] Saxton, H.J., Ireland, D.R., Server, W.L. Instrumented impact testing. ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, n.563, p.193-198, 1986.
- [22] Turner, C.E., Kennish, H.P., et al. A study of the mechanism of notched bar impact test. London: Imperial College. Departement of Mechanical Engineering, 1979.
- [23] Freire de Aquino, E.M. Ondas em sólidos elásticos estratificados. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1981. p.1-17.
- [24] Fearnehough, G.A., Hoy, B.S. Mechanism of deformation and fracture in the Charpy test as revealed by dynamic record of impact loads. Journal of the Iron and Steels institute, p.912-920, nov.1964.
- [25] Server, W.L. Impact three point bend testing for notched and precracked specimens. ASTM Journal of Testing and Evaluation. Philadelphia, v.6, n.1, p.29-34, 1978.

- [26]Catálogo Villares:Aços para ferramentas.São Paulo:Villares Indústria de Base,1989.
- [27]Strain gages catalog.Tóquio:Kyowa Electronic,1991.
- [28]Standard methods for notched bar impact testing of metallic materials. In:Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia:ASTM,1984.v.13/11,p.210-232.
- [29]Wullaert,R.A.Aplication of the instrumented Charpy impact test:impact test of materials.ASTM Special Technical Publication,Philadelphia,n.466.p.148-169,1970.
- [30]Ritchie,R.O.,Francis,B.,Server,W.L.Evaluation of Toughness in AISI 4340 alloy steel austenitized at low and high temperatures.Metallurgical Transaction A, Vol.7A,p.831-838,june 1976.