

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO ANTONIO FERREIRA STEQUE  
YURI PAVINI CRISTOVÃO

**DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ABSORVIDA EM UM ENSAIO DE  
IMPACTO DO MARTELO DE CHARPY ATRAVÉS DE UMA CÂMERA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2016

JOÃO ANTONIO FERREIRA STEQUE  
YURI PAVINI CRISTOVÃO

**DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ABSORVIDA EM UM ENSAIO DE  
IMPACTO DO MARTELO DE CHARPY ATRAVÉS DE UMA CÂMERA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico, do Departamento Acadêmico da Mecânica – DAMEC, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientador: Prof. Ms. Fernando Henrique de Oliveira Camara.

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2016



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Cornélio Procópio  
Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME



---

FOLHA DE APROVAÇÃO

**DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ABSORVIDA EM UM ENSAIO DE IMPACTO DO  
MARTELO DE CHARPY ATRAVÉS DE UMA CÂMERA**

**POR**

**JOÃO ANTONIO FERREIRA STEQUE**

**YURI PAVINI CRISTOVÃO**

Trabalho de conclusão de curso foi apresentado às 10:20hs do dia 24/06/2016 como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

**Prof. Dr. Adailton Silva Borges**  
(UTFPR)

---

**Prof. Me. Adriano Silva Borges**  
(UTFPR)

---

**Prof. Me. Fernando Henrique de Oliveira Camara**  
(UTFPR)  
**ORIENTADOR**

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

*Dedicamos este trabalho a nossas famílias  
que sempre nos apoiaram.*

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família, por todo o incentivo e apoio ao longo de nossa jornada na universidade.

Aos amigos e professores, que contribuíram significativamente para o enriquecimento de nosso trabalho. Em especial ao nosso colega e amigo, Henrique Sidney Rissá, que muito nos ajudou no decorrer do nosso trabalho. Agradecemos também nosso professor e orientador, Fernando Henrique de Oliveira Camara, por toda sua disponibilidade e orientação.

## RESUMO

O ensaio de Impacto por meio do Martelo de Charpy é muito utilizado em diversos setores industriais para determinação da energia necessária para ocorrer a fratura de um material. O presente trabalho fundamenta-se na determinação da energia absorvida pelo corpo de prova em um ensaio de impacto do Martelo de Charpy, por meio de uma câmera. Foi utilizado um algoritmo em MatLab, para analisar e processar os quadros de imagens capturados por meio de uma câmera e, com ferramentas matemáticas, obteve-se as características dinâmicas do ensaio. Adicionalmente, foi desenvolvido um modelo matemático para determinação da energia absorvida pelo corpo de prova. O presente trabalho foi concluído com a validação do modelo, comparando-se os resultados da energia de impacto do modelamento matemático com os resultados obtidos através do algoritmo.

**Palavras-chave:** Ensaio de impacto; Câmera;

## ABSTRACT

The Impact test using the Charpy hammer is widely used in several industrial sectors to determine the amount of energy required to fracture the material. This work is based on the determination of the energy absorbed by the Charpy specimen in an impact testing of Charpy hammer by way of camera. An algorithm in Matlab was used to analyze and process the image frames captured by a camera and with mathematical tools, obtained the dynamic characteristics of the test. In addition, a mathematical model was developed to determine the energy absorbed by the specimen. This work was concluded with the validation of the model, comparing the impact energy results of the mathematical model with the results obtained through the algorithm and other research.

**Palavras-chave:** Impact test; camera;

## Lista de Figuras

Figura 1 - Modelos de ensaio de Impacto .....	13
Figura 2 - Corpo de prova ensaio de Charpy .....	16
Figura 3 - Corpo de prova utilizado na análise .....	16
Figura 4 - Relação material x Energia absorvida para diferentes temperaturas - 1...17	
Figura 5 - Relação material x Energia absorvida para diferentes temperaturas – 2..17	
Figura 6 - Classificação de Sinais. a) Sinal contínuo. b) Sinal discreto (obtido a partir de amostragem). .....	20
Figura 7 - Efeito Aliasing .....	21
Figura 8 - Formação de uma imagem (pixel).....	22
Figura 9 - Alvo em destaque      Figura 10 - Alvo em destaque no MatLab Fonte: Autoria própria      Fonte: Autoria própria .....	23
Figura 11 - Fluxograma do Software .....	25
Figura 12 - Modelo do Martelo de Charpy.....	26
Figura 13 - Inputs do algoritmo.....	27
Figura 14 - Corpo de prova posicionado .....	28
Figura 15 - Saída do algoritmo .....	29
Figura 16 - Altura inicial e final .....	31
Figura 17 - Primeira etapa CP1 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y .....	33
Figura 18 - Primeira etapa CP1 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X; Gráfico da Aceleração em X .....	33
Figura 19 - Segunda etapa CP1 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y .....	34
Figura 20 - Segunda etapa CP1 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X c) Gráfico da Aceleração em X .....	34
Figura 21 - CP1 - Resultado obtido pelo relógio ( $E_{rel} = 11,5$ ).....	35
Figura 22 - Primeira etapa CP2 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y .....	36
Figura 23 - Primeira etapa CP2 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X; Gráfico da Aceleração em X .....	37



Figura 24 - Segunda etapa CP2 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y .....	38
Figura 25 - Segunda etapa CP2 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X; Gráfico da Aceleração em X .....	38
Figura 26 - CP2 - Resultado obtido pelo relógio (Erel = 11,6 kpm) .....	39
Figura 27 - Primeira etapa CP3 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y .....	40
Figura 28 - Primeira etapa CP3 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X; Gráfico da Aceleração em X .....	40
Figura 29 - Segunda etapa CP3 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da aceleração em Y.....	41
Figura 30 - Segunda etapa CP3 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da aceleração em X.....	42
Figura 31 - CP3 - Resultado obtido pelo relógio (Erel = 11,2 kpm) .....	42
Figura 32 - Primeira etapa CP4 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y .....	44
Figura 33 - Primeira etapa CP4 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X; Gráfico da Aceleração em X .....	44
Figura 34 - Segunda etapa CP4 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y .....	45
Figura 35 - Segunda etapa CP4 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X; Gráfico da Aceleração em X .....	45
Figura 36 - CP4 - Resultado obtido pelo relógio (Erel = 11,4 kpm) .....	46
Figura 37 - Gráfico Energia absorvida x Temperatura para 20 °C – Resultado da literatura .....	47

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Especificações do martelo de Charpy .....	26
Tabela 2 - Tabela dos resultados Ecalc x Erel .....	47
Tabela 3 - Análise .....	47
Tabela 4 - Tabela dos resultados Ecalc x Elit.....	48

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
2.1	ENSAIO DE IMPACTO – MARTELO DE CHARPY .....	15
2.2	CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE CHARPY .....	16
2.3	FREQUENCIA – VELOCIDADE DE GRAVAÇÃO .....	18
2.4	TEOREMA DE AMOSTRAGEM.....	19
2.5	PIXEL.....	21
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DO MARTELO DE CHARPY ATRAVÉS DA CÂMERA</b> .....	<b>23</b>
3.1	FUNCIONAMENTO DO ALGORITIMO.....	23
3.2	METODOLOGIA .....	25
3.3	MODELAMENTO MATEMÁTICO .....	29
3.3.1	Energia absorvida pelo Corpo de Prova .....	29
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	<b>32</b>
4.1	PRIMEIRO CORPO DE PROVA (CP1):.....	32
4.2	SEGUNDO CORPO DE PROVA (CP2): .....	35
4.3	TERCEIRO CORPO DE PROVA (CP3):.....	39
4.4	QUARTO CORPO DE PROVA (CP4):.....	43
4.5	RESULTADO GERAL .....	46
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ensaio de impacto consiste em colocar um material em teste através de altas taxas de deformação. Esse tipo de teste permite determinar qual a fragilidade do material analisado, ou em outras palavras, o comportamento dúctil-frágil do material, mediante condições específicas. (Kruger, 2003)

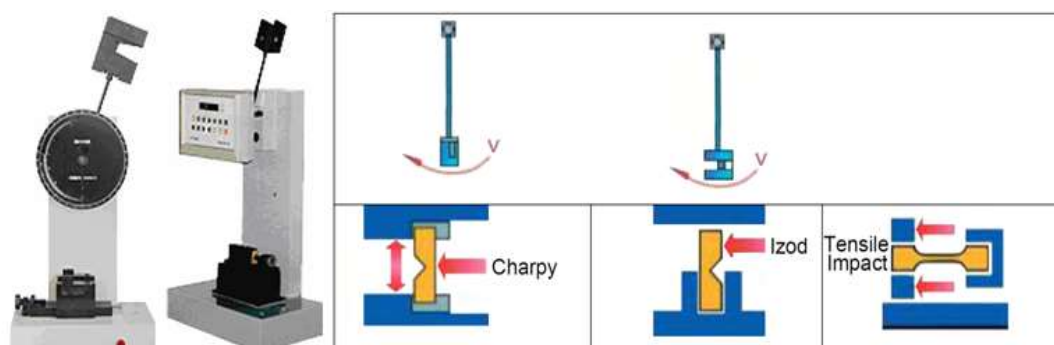
A quantidade de energia global absorvida por uma amostra de material é medida neste tipo de ensaio, através da ação de choque, com uma força determinada para rompê-lo. O princípio físico utilizado é baseado na transformação de parte da energia potencial armazenada pelo pêndulo, em repouso, em energia de ruptura do corpo de prova, durante o movimento que o martelo realiza. (Correa, Yamakawa & Hage, 1999)

Segundo Kruger (2003), dois tipos de ensaios de impacto realizados para entender o comportamento dos materiais são o de Charpy e Izod. Estes ensaios foram desenvolvidos no século XX, sendo os dois mais antigos ensaios realizados, e permitem determinar características dos materiais, como por exemplo, a tenacidade dos materiais.

De acordo com Ferrante (1996 citado por Kruger, 2003 pg. 12), nos ensaios de impacto, corpos de prova entalhados são submetidos ao impacto de um dado peso sob temperaturas conhecidas em uma máquina pendular. Os resultados apresentados são obtidos na forma de energia absorvida pelo corpo de prova durante o impacto, em função da temperatura.

O ensaio de impacto por martelo ou pêndulo consiste na liberação do pêndulo, inicialmente em repouso, que oscila na direção descendente atingindo o corpo de prova. O pêndulo continua o movimento de forma reduzida já que parte da sua energia foi absorvida no impacto. No ensaio de Izod o corpo de prova é entalhado a 28 mm da extremidade, com forma V, com seção quadrada de 10 mm e 75 mm de comprimento (Correa, Yamakawa & Hage, 1999). Já no ensaio de Charpy, o corpo de prova possui seção quadrada de 10mm e 55mm de comprimento, sendo também entalhada de forma V (Kruger, 2003).

Um modelo de máquina de ensaio de impacto pode ser observado na Figura 1, com uma demonstração dos tipos mencionados:



**Figura 1 - Modelos de ensaio de Impacto**  
 Fonte: (<http://www.dnbr.net/drupal/node/240>)

O ensaio de Charpy possui suas vantagens e desvantagens quando comparado aos outros ensaios existentes. Ele é muito utilizado na indústria devido a sua fácil utilização, simplicidade, alta velocidade nas análises, obtenção de resultados diretamente na máquina. Este ensaio também apresenta limitações, como não permitir obter grandes informações sobre o processo da fratura e consegue-se obter apenas a energia global absorvida no ensaio. Além disso, podem surgir incertezas nos resultados devido ao sistema de medição utilizado.

Com o advento de sistemas de medição de deslocamentos via câmera, é possível monitorar todo o movimento do pendulo durante o ensaio de Charpy. Deste modo, pode-se obter resultados mais precisos da energia absorvida pelo material. A câmera mostra a trajetória do movimento, o deslocamento, que com o uso de um software implementado em MatLab, adaptado de Leonardi (2015), permite o estudo de cada ponto ao longo da trajetória, onde espera-se obter as características dinâmicas do ensaio. Como exemplo desta utilização, tem-se os exemplos citados por Lenz, Saavedra Filho & Bezerra (2014). Os autores apresentam a utilização de câmeras tradicionais de uso comum para estudar o comportamento de corpos em movimento, como um carrinho que é solto do topo de uma rampa. Com a utilização de uma câmera pode-se capturar vídeos comuns em taxas de ordem de dezenas de quadros por segundo. Após a captura do vídeo, é possível criar um mapa do movimento quadro a quadro. Enfim, é possível obter dezenas de pontos experimentais a serem avaliados. Este tipo de utilização de câmera associado com o ensaio de Charpy permite obter maiores conhecimentos sobre o movimento do martelo, em

principal no ponto de impacto, e conseqüentemente as características do material avaliado.

No presente trabalho busca-se determinar a energia absorvida por um corpo no ensaio de Charpy através de uma câmera, podendo assim também ser tornar uma ferramenta de calibração do mesmo, averiguação de resultados obtidos, além de ser uma ferramenta de fácil utilização no âmbito industrial.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral a determinação da energia absorvida por um corpo no ensaio de impacto de um martelo de Charpy, através da utilização de uma câmera.

Objetivos específicos:

- Estudar a teoria sobre o ensaio de Charpy, método de conservação de energia e energia de impacto;
- Estudar o software de análise dos vídeos;
- Determinar um modelo matemático para determinação da energia absorvida pelo corpo de prova;
- Monitorar o movimento do pendulo no ensaio através de uma câmera;
- Análise de Resultados dos resultados obtidos através algoritmo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, será apresentada uma introdução aos métodos utilizados para entendimento do processo, desde a teoria do martelo de Charpy até teorias para o entendimento do uso do software atrelado a câmera.

### 2.1 ENSAIO DE IMPACTO – MARTELO DE CHARPY

O ensaio de Charpy é um ensaio de impacto, onde o choque representa um esforço de natureza dinâmica, essa carga é aplicada bruscamente e repentinamente. Nesse impacto, não se leva em conta só a força de aplicação, mas também, a velocidade da aplicação da força. Temos que força associada a velocidade resulta em energia. Então o ensaio de Charpy consiste em medir a energia que foi absorvida por determinado material, quando submetida a um esforço ou choque.

A máquina que realiza esse tipo de ensaio, tem o comportamento similar a um pêndulo, que ao ser elevado a uma posição inicial adquire uma certa energia potencial ( $E_i$  = energia inicial), e ao ser solto esse mesmo, em seu percurso, se choca com um material e segue sua trajetória até uma altura final, apresentando uma energia final ( $E_f$  = energia final). A diferença das energia inicial e final, resulta na energia absorvida pelo corpo de prova, então  $E_{abs}$  (Energia absorvida). Nas Equações 1 a 3 são apresentados os cálculos para determinação dessas energias.

$$E_{abs} = E_{p_i} - E_{p_f} \quad (1)$$

Levando em conta a energia potencial nos pontos iniciais e finais, tem-se:

$$E_{p_i} = m_{inicial} * g * H_{inicial} \quad (2)$$

$$E_{p_f} = m_{final} * g * H_{final} \quad (3)$$

Sendo, M = massa , g = gravidade e H = altura.

Como no ensaio avaliado as massas e a gravidade são constantes, tem-se apenas a mudança da altura.  $H_i$  e  $H_f$  representam a altura inicial e final do pêndulo

Charpy, respectivamente. A altura inicial do pendulo nos ensaios de Charpy são predeterminadas, então a única incógnita nesse caso é a altura final, sendo ela a determinante para encontrar a energia absorvida.

## 2.2 CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE CHARPY

Como já citado, o ensaio de Impacto é um ensaio dinâmico, empregado para o estudo da fratura frágil. O corpo de prova é padronizado e provido de um entalhe para localizar a sua ruptura e produzir um estado triaxial de tensões, quando ele é submetido a uma flexão por impacto. A norma internacional encarregada de padronizar os ensaios de impacto é a ASTM E23, aplicada aos materiais metálicos.

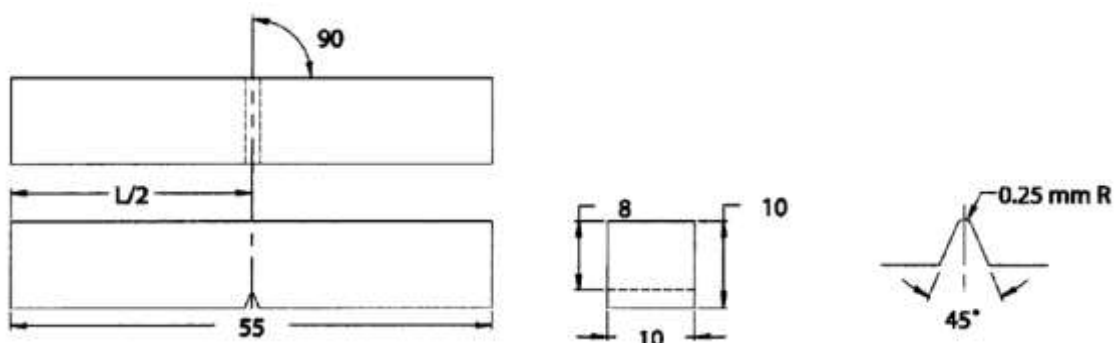


Figura 2 - Corpo de prova ensaio de Charpy  
Fonte: American Society for Testing and Materials, 2007



Figura 3 - Corpo de prova utilizado na análise  
Fonte: Autoria Própria



O tipo do material do corpo de prova influência de maneira direta na energia absorvida pelo mesmo. Para o material aço carbono, de acordo com Shackelford (2008) , BHADSHIA e HONEYCOMBE (2006) o conteúdo de carbono em sua composição química também influencia significativamente na temperatura de transição, conforme mostra a Figura 04 e Figura 05

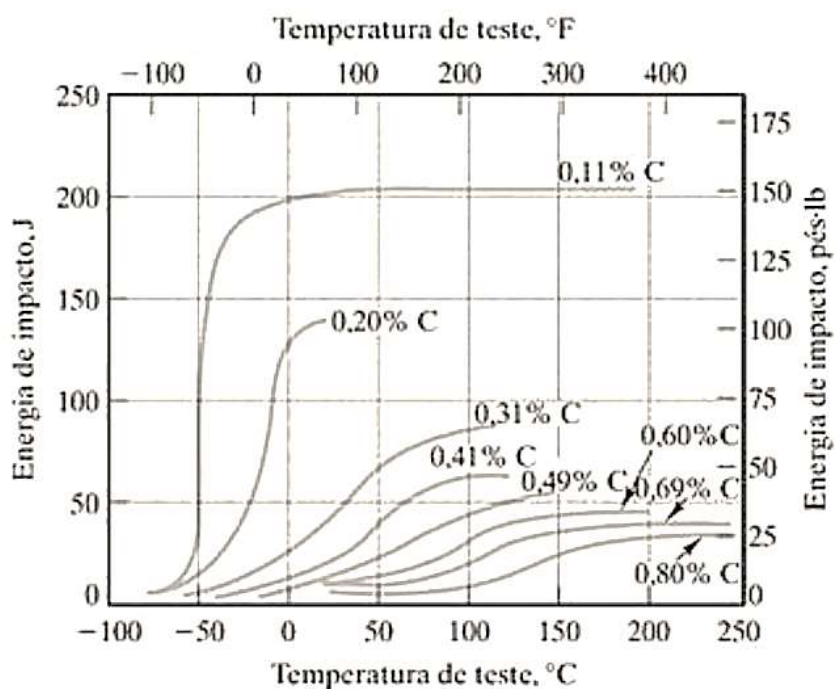


Figura 4 - Relação material x Energia absorvida para diferentes temperaturas - 1  
Fonte: Shackelford (2008)

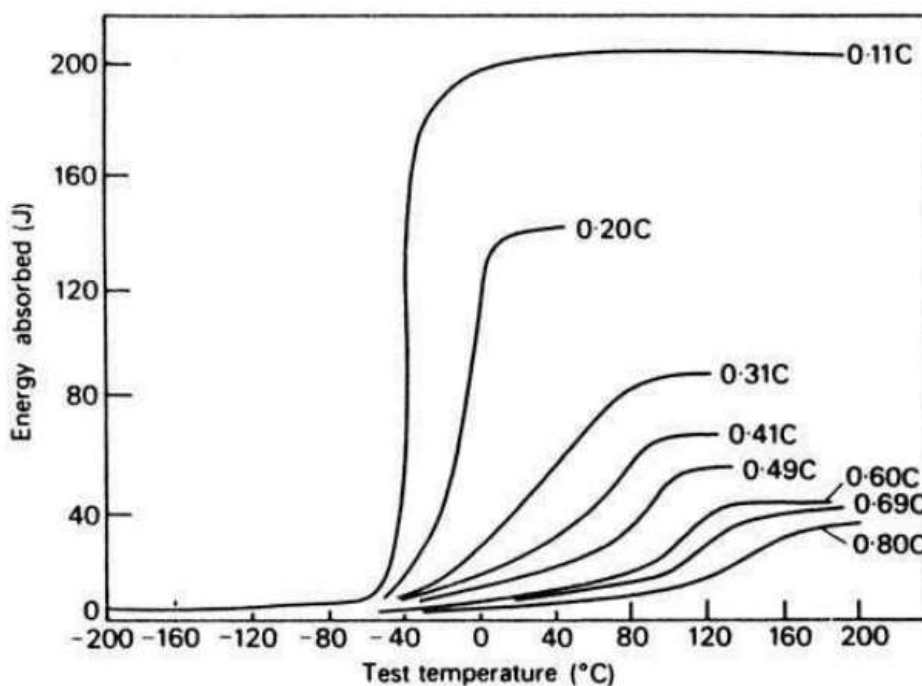


Figura 5 - Relação material x Energia absorvida para diferentes temperaturas - 2  
Fonte: Bhadesia; Honeycombe (2006)

### 2.3 FREQUENCIA – VELOCIDADE DE GRAVAÇÃO

Vídeo, do latim *videre* (ver), tem em sua definição ser um “conjunto de imagens estáticas que transmitem a sensação de movimento” (Chapman e Chapman, 2009). Para Max Wertherimer, em 1912, descreveu o fenômeno “movimento beta”, onde um conjunto de imagens apresentadas sequencialmente dá a ilusão de que os objetos estão em movimento (Sarris, 1987). Para Gill et al. (2003), pode-se definir um vídeo como uma sucessão ordenada e rápida de imagens relacionadas, em um fluxo contínuo que produz a impressão de movimento. Portanto, a frequência, taxa de quadros ou velocidade de gravação, é a quantidade de imagens, que formam o vídeo, que são gravadas em um determinado tempo.

De acordo com Leonardi (2015), para que uma gravação tenha uma reconstrução digital mais real possível um aspecto muito importante para a análise de movimentos através de uma câmera digital é a frequência de amostragem, ou em outras palavras, quantos quadros por segundo estão sendo gravados. Segundo a Adobe, para que o vídeo tenha um movimento suave, uma taxa de quadros é necessário, ou seja, mais quadros por segundo são utilizados para exibir uma sequência de imagens.

Essa taxa varia conforme diferentes padrões dos países, modo de armazenamento, entre outros. Analisando a definição tem-se o pensamento de que quanto maior a taxa de quadros que um vídeo tenha melhor será, porém isso não funciona dessa maneira. Como já destacado pela Adobe (2016), a desvantagem da maior quantidade de quadros e conseqüentemente uma qualidade maior, no entanto, é que as taxas de quadro maiores necessitam de um volume maior de dados, utilizando mais largura de banda do equipamento que está processando as imagens, no nosso caso a câmera digital, isso significa, maior capacidade de transmissão dados de um determinado meio para outro, necessitando então de uma maior velocidade que os dados passam através desta rede específica. Portanto, apesar de ser o melhor, produzir uma gravação com uma taxa mais alta: quanto mais quadros forem exibidos por segundo, maior o trabalho do software e conseqüentemente do processador.

Sendo assim, a capacidade de processamento do computador, quase sempre é o limitante para a taxa ideal, exigindo que os programadores saibam equilibrar a

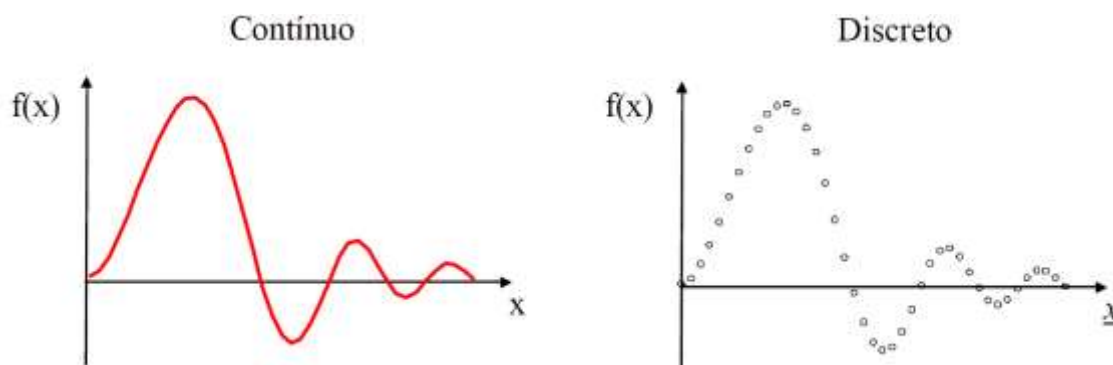
qualidade pretendida com o hardware disponível, o que nem sempre é possível. Isso porque em uma regra geral para se ter uma maior taxa de quadros, maior será a necessidade de CPU. De acordo com NISHIHARA (1996), a quantidade de memória  $Q$ , requerida para o armazenamento dos quadros é determinada pelos seguintes: Número de bits por amostra (nbits), duração da linha ativa do vídeo ( $t$ ), frequência de amostragem utilizada ( $f$ ), número de linhas horizontais ( $Nh$ ), número de linhas verticais ( $Nv$ ), esquema de digitalização ( $E$ ) e números de quadrados a serem capturados ( $NQ$ ), assim como, (4). De acordo com a equação (5), pode-se concluir, então, que a frequência de captura de quadros é diretamente proporcional a quantidade de memória para o processamento.

$$Nq = t \cdot f \quad (4)$$

$$Q = \frac{E \cdot t \cdot f \cdot Nv \cdot Nh \cdot Nbits}{8} \quad (5)$$

## 2.4 TEOREMA DE AMOSTRAGEM

Para melhor entendimento do conceito de imagem digital e frequência de gravação é necessário antes discutir sobre funções contínuas e funções discretas. Para Scuri (2002), analogamente para uma função contínua, pode-se pensar em uma linha sem emendas que se define indefinidamente, ou em outras palavras infinita. Matematicamente diz-se que é uma função real definida na reta toda, no grupo dos reais ( $R$ ), o que significa então que para cada valor de  $x$  fornecido sempre existe um único valor para  $f(x)$ . Por outro lado, uma função discreta, simplificada são pontos que ao ser ligados simulariam uma função contínua. Matematicamente, seriam tomados valores pontuais ao longo de  $x$  e guardado o valor correspondente de  $f(x)$ , como pode ser observado na Figura 2.



**Figura 6 - Classificação de Sinais. a) Sinal contínuo. b) Sinal discreto (obtido a partir de amostragem).**

**Fonte: Scuri (2002).**

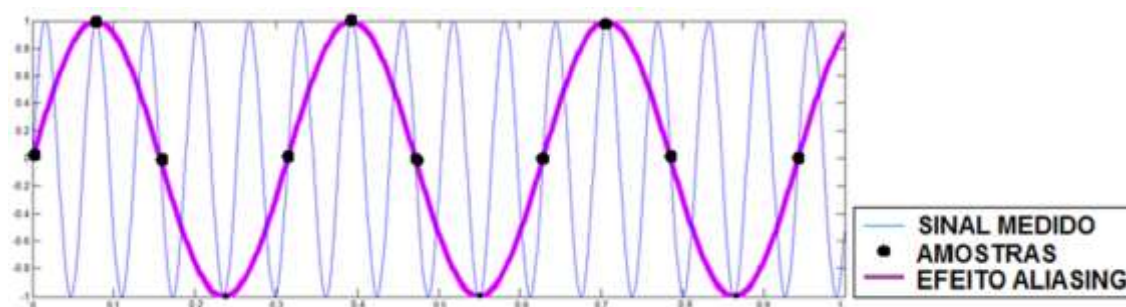
Para Higuntí e Kitano (2003, p. 3), “Sinais definidos para todo instante de tempo são chamados de sinais de tempo contínuo, porém, sinais definidos apenas em determinados instantes de tempo são chamados de sinais de tempo discreto.”

O processo de discretização do eixo  $x$  (o domínio) é chamado de Amostragem, o do eixo  $f(x)$  (o contradomínio) é chamado de Quantização. Em resumo, a discretização de qualquer sinal contínuo primeiro passa por uma amostragem e depois passa por uma quantização. Além disso, não é possível armazenar um sinal que se estenda indefinidamente, portanto o sinal digital também é limitado a um intervalo do domínio.

De acordo com Leonardi (2015), para que uma reconstrução seja bem sucedida, ou seja uma amostragem seja correta, o sinal discriminado deve apresentar a mesma forma do sinal analógico original. Para que o processo de amostragem seja eficiente para reconstruir o sinal, uma taxa de amostragem mínima que deve ser utilizada é a “frequência de Nyquist” (OPPENHEIM, 1989). De acordo com o Teorema de Nyquist, um sinal contínuo poderá ser apropriadamente amostrado somente se esse não possuir uma frequência maior que a metade da frequência de amostragem, ou em outras palavras a frequência de discretização deve ser maior que o dobro do sinal real, que será capturado.

Para o melhor entendimento da relação entre a taxa de amostragem e a frequência máxima do sinal original e o sinal amostrado, será discutido um exemplo utilizado por Leonardi (2015). Neste exemplo, o sinal analógico original, que possui frequência de 15,87 Hz, é representado por uma linha contínua azul, ao passo que os marcadores pretos representam o sinal amostrado a uma taxa de 13,90 Hz. Após a

reconstrução pode-se observar que o sinal amostrado é diferente do sinal real. Leonardi (2015) conclui que “o sinal amostrado não corresponde mais ao sinal original, pois possui uma frequência bem mais baixa. Isto ocorreu porque a máxima frequência contida no sinal analógico era menor que a taxa de amostragem, contrariando o Teorema de Nyquist. Este fenômeno é chamado de aliasing (ou mascaramento do sinal)”, estes sinais estão representados na Figura 7.



**Figura 7 - Efeito Aliasing**  
Fonte: LEONARDI (2015)

## 2.5 PIXEL

Uma imagem digital é uma representação de uma cena, de um exato momento por meio de um conjunto de pequenos elementos de tamanhos finitos, chamados de pixels, colocados em um arranjo bidimensional, similar a uma matriz. De acordo com Gozales (2008), uma imagem pode ser analisada como uma função,  $f(x,y)$ , onde  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais, como pode ser observado na Figura 8. Portanto, uma imagem é formada por um número finito de elementos, onde cada um tem uma localização particular e um valor. Isso significa, então, que um pixel é a menor unidade da imagem eletrônica.

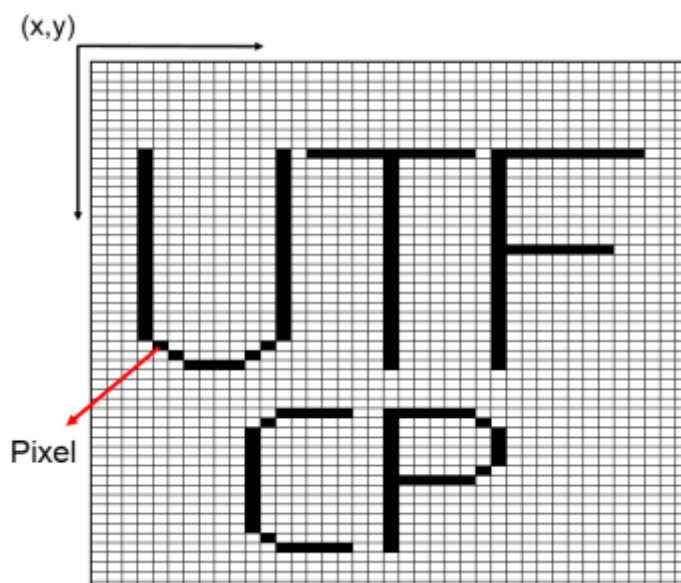


Figura 8 - Formação de uma imagem (pixel).  
Fonte: Autoria Própria

### 3 ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DO MARTELO DE CHARPY ATRAVÉS DA CÂMERA

Neste capítulo, o objetivo é apresentar os resultados da simulação do deslocamento do martelo de Charpy através de câmera e compara-lo com o modelamento efetuado.

#### 3.1 FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO

O software utilizado, como já dito anteriormente, de Leonardi (2015). Segundo Leonardi (2015, p. 32), foi adaptado por Henrique Sidney Rissá, o software é um “algoritmo implementado em Matlab para análise estática e dinâmica de alvos em um vídeo, importa o vídeo nos principais formatos como, por exemplo, AVI, MOV, entre outros”.

Durante a preparação do ensaio realizado, o primeiro passo foi destacar um ponto da estrutura, esse ponto é o alvo que foi analisado pelo software. Após o destaque do alvo, as gravações foram realizadas. Para o presente trabalho foi utilizado um adesivo na cor vermelha como alvo, que foi colado no martelo, como pode ser observado na Figura 9.

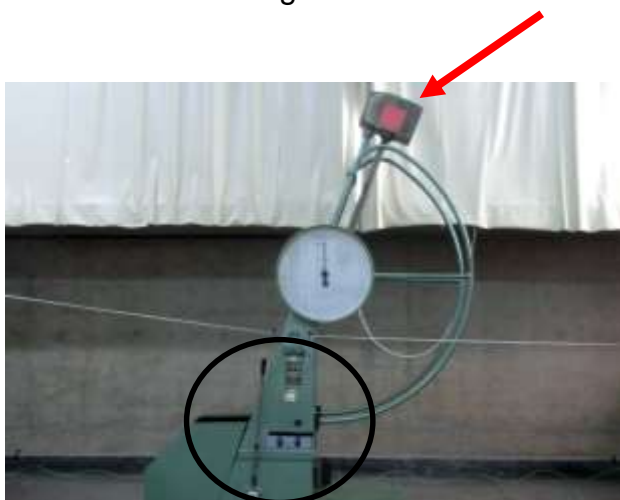


Figura 9 - Alvo em destaque  
Fonte: Autoria própria

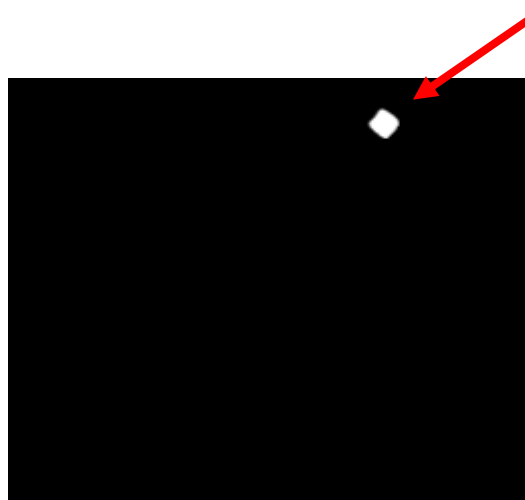


Figura 10 - Alvo em destaque no MatLab  
Fonte: Autoria própria

O sistema de cores utilizado pelo software foi o RGB (Red, Green e Blue). De acordo com Severino (2009, p. 34) esse “é um modelo de cor desenvolvido com base nos dispositivos gráficos que apresentam as três cores primárias: vermelho, verde e azul”, e a partir de uma combinação dessas três cores, variando suas intensidades, pode-se demonstrar todas as outras.

Com o vídeo gravado e carregado no software iniciou-se o processamento de imagem, fazendo um processamento do vídeo quadro a quadro. O processamento acontece seguindo um fluxo como determinado por Leonardi (2015), começando por uma separação do alvo do restante da imagem, para isso são utilizadas ferramentas computacionais que deixam somente o alvo de interesse em evidência facilitando a análise.

Em seguida, foram aplicados filtros que eliminam alvos que tem a mesma cor mas que não fazem parte da análise, evitando que o software informe um resultado errado ou desnecessário. Desse modo, o que se obteve foi uma imagem binária, onde o alvo foi destacado em branco, como pode ser observado na Figura 10.

Com o alvo em destaque, foi encontrado o centroide deste, e então armazenado em uma matriz, fazendo isso quadro a quadro e a partir disso encontrando a variação da posição do centroide do alvo, ou em outras palavras o deslocamento do alvo (LEONARDI, 2015). Para que o software informe o valor do deslocamento em uma unidade real deve ser feita uma relação com uma dimensão real da imagem e a resolução da imagem ou em outras palavras a quantidade de pixel da imagem. Como usado por Leonardi (2015), uma imagem que apresenta dimensão horizontal real de 81 mm e resolução nessa mesma direção de 640 pixel, apresenta então uma relação de 0,1265625 mm/pixel. Utilizando esse índice é possível obter um deslocamento em milímetros.

Leonardi (2015) também afirma que para uma análise do tipo dinâmica, esse deslocamento deve ser analisado por uma Transformada Rápida de Fourier.

O fluxograma, apresentado na Figura 12, mostra a sequência, etapa por etapa, de como ocorre a análise pelo software.





Figura 11 - Fluxograma do Software  
Fonte: LEONARDI (2015)

### 3.2 METODOLOGIA

Nesta seção, a metodologia proposta é apresentar os métodos utilizados para a realização da simulação do deslocamento do martelo de Charpy junto ao algoritmo.

Na análise foi utilizado o martelo de Charpy da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, do seguinte modelo: VEB WERKSTOFFPROFMASCHINEN LEIPZIG, cujas características podem ser observadas na Figura 13.



Figura 12 - Modelo do Martelo de Charpy  
Fonte: Autoria própria

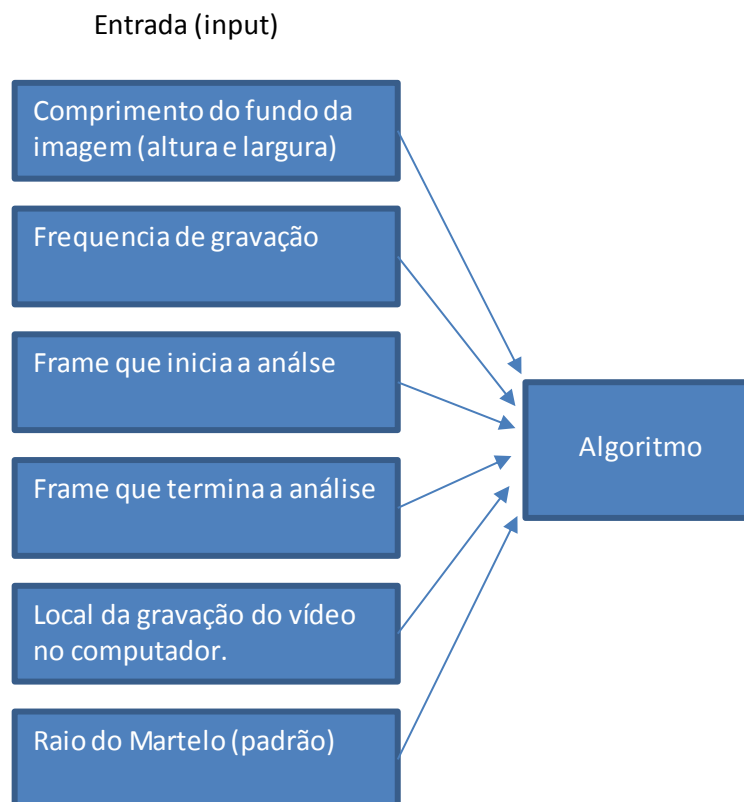
Com as seguintes especificações:

Tabela 1 - Especificações do martelo de Charpy

Energia Máxima(kpm)	Comprimento Pêndulo (mm)	Massa do Pêndulo (kg)
30	825	18.75

Fonte: Autoria própria

Para a realização das análises são necessárias as seguintes entradas:



**Figura 13 - Inputs do algoritmo**  
**Fonte: Autoria própria**

As análises foram realizadas na seguinte ordem:

- 1 - A priori foi colocado um alvo em vermelho no centro do martelo, como o da Figura 9. Tal adesivo é necessário para o reconhecimento do alvo pelo algoritmo.
- 2 - Em seguida foi posicionada a câmera no local adequado, em uma posição que se fosse possível gravar todo o movimento realizado pelo martelo.
- 3 – Após o posicionamento da câmera foram realizadas as medições do fundo da imagem, sendo a altura (vertical) e a largura (horizontal) que foram abrangidas pela gravação, a unidade utilizada deve ser em milímetros.
- 4 – Posiciona-se o corpo de prova no local adequado de acordo com a norma utilizada.



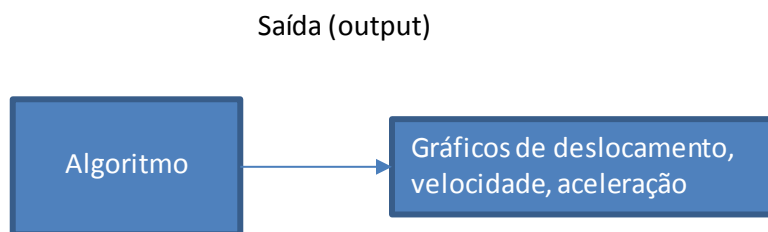
**Figura 14 - Corpo de prova posicionado**  
**Fonte: Autoria própria**

5- Nas gravações foi utilizada uma câmera do modelo: Casio Exilim Ex-zr700. As gravações dos ensaios foram realizadas em uma frequência de 30hz, a frequência da gravação deve ser maior do que a frequência de oscilação do martelo que é de 0,28 Hz.

6 – Após a gravação foi analisado o vídeo, para determinar o frame inicial e final de análise. Nesse trabalho, o objetivo era descobrir a altura inicial e final do martelo, porém a análise era interrompida quando o alvo se posicionava atrás da proteção mostrada na Figura 16, então essa foi feita em duas partes: a primeira para a determinação da altura inicial e a segunda para determinação da altura final. Desse modo, não será possível a determinação da força de impacto, pois o alvo não está visível nesse instante.

Para a determinação do frame, foi feito baseando-se no tempo do vídeo. Por exemplo, em uma das gravações realizada, a análise do martelo começa com tempo de vídeo de 20 segundos, como foi gravada em 30 Hz o frame inicial será 600.

7 – Por fim, foram realizadas as análises gerando os gráficos de deslocamento, velocidade e aceleração, podendo-se utilizar das alturas para determinar a energia absorvida.



**Figura 15 - Saída do algoritmo**  
**Fonte: Autoria própria**

### 3.3 MODELAMENTO MATEMÁTICO

Para a determinação da energia absorvida pelo corpo, foi desenvolvido um modelo matemático baseando-se na lei de conservação de energia.

#### 3.3.1 Energia absorvida pelo Corpo de Prova

A partir do princípio geral da conservação de energia, que diz que a energia total de um sistema isolado é sempre constante. Em outras palavras, um sistema que não interage com outros sistemas, pois interações entre sistemas costumam ser efetuadas por meio de troca de energia entre eles. Dessa forma, a energia mecânica de um sistema no qual agem somente forças conservativas, forças que não modificam a energia mecânica do sistema, não se altera com o passar do tempo. Nesse caso, podemos dizer que a soma das energias cinética e potencial é constante seja qual for o intervalo de tempo.

$$Ec_f + Ep_f = Ec_i + Ep_i \quad (7)$$

Onde:

$Ec_i$  = Energia cinética inicial do pêndulo (J)

$Ec_f$  = Energia cinética final do pêndulo (J)

$E_{abs}$  = Energia Absorvida pelo Corpo de Prova (J)

$Ep_i$  = Energia Potencia inicial do pêndulo (J)

$E_{p_f}$  = Energia Potencia final do pêndulo (J)

Para os casos em questão, será analisado os dois momentos em que eles estão com velocidade nula, são esses o momento inicial e o momento em que atinge a altura máxima no final de seu trajeto.

Como Energia cinética igual:

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (8)$$

Dessa maneira as Energias cinéticas serão nulas também.

Portanto para esse caso:

$$E_{p_f} = E_{p_i} \quad (9)$$

A partir dessa formula podemos concluir que se o corpo percorresse seu trajeto sem nada impedindo seu movimento, sua Energia potencial inicial será igual sua Energia potencial final. Portanto para calcular a energia perdida pelo pendulo, ou em outras palavras, a energia absorvida pelo corpo de prova, deve ser calculada a variação entre as energias potenciais.

$$E_{abs} = E_{p_f} + E_{p_i} \quad (10)$$

Sendo possível calcular a Energia potencial a partir da formula a baixo.

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (11)$$

Onde:

$m$  = massa do pêndulo (kg)

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

Obtem-se:

$$E_{abs} = m \cdot g(h_f - h_i) \quad (12)$$

Onde:

$h_i$  = altura do martelo em relação ao ponto inicial da malha de pixels

$h_f$  = altura do martelo em relação ao ponto inicial da malha de pixels

Vide Figura 16.

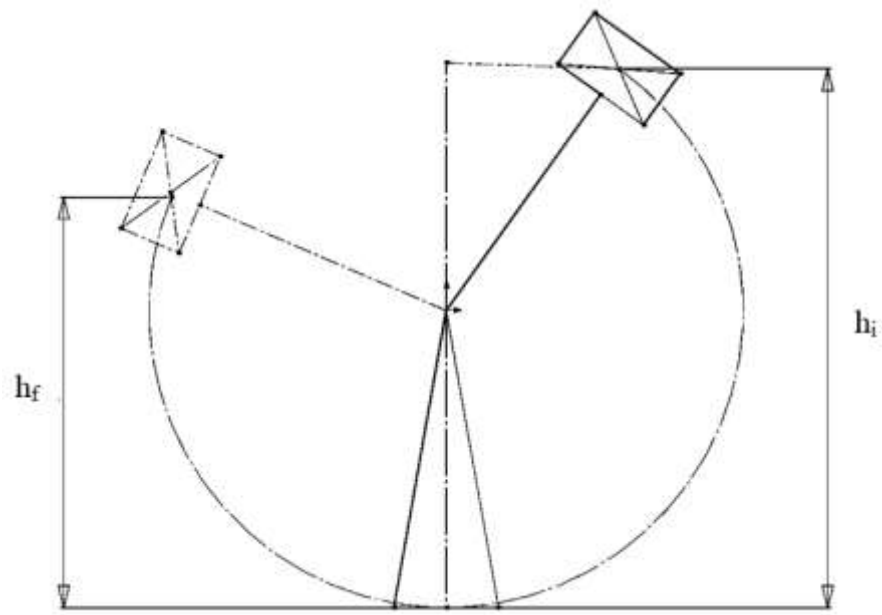


Figura 16 - Altura inicial e final  
Fonte: Autoria própria

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

As análises foram feitas em corpos de provas cujo material é um SAE 1020, todos foram realizados a temperatura ambiente, aproximadamente 25 °C, enquadrado na norma ASTM E23.

As análises foram realizadas em 2 diferentes etapas:

- Primeira etapa: Da altura inicial até o ponto mais baixo (impacto)
- Segunda etapa: Do ponto mais baixo (impacto) até altura final.

Sendo:

CP = Corpo de prova

Elit = Energia absorvida segundo a literatura

Ecalc = Energia absorvida calcula

Erel = Energia absorvida segundo relógio analógico do martelo de charpy

Foram realizadas 4 diferentes análises:

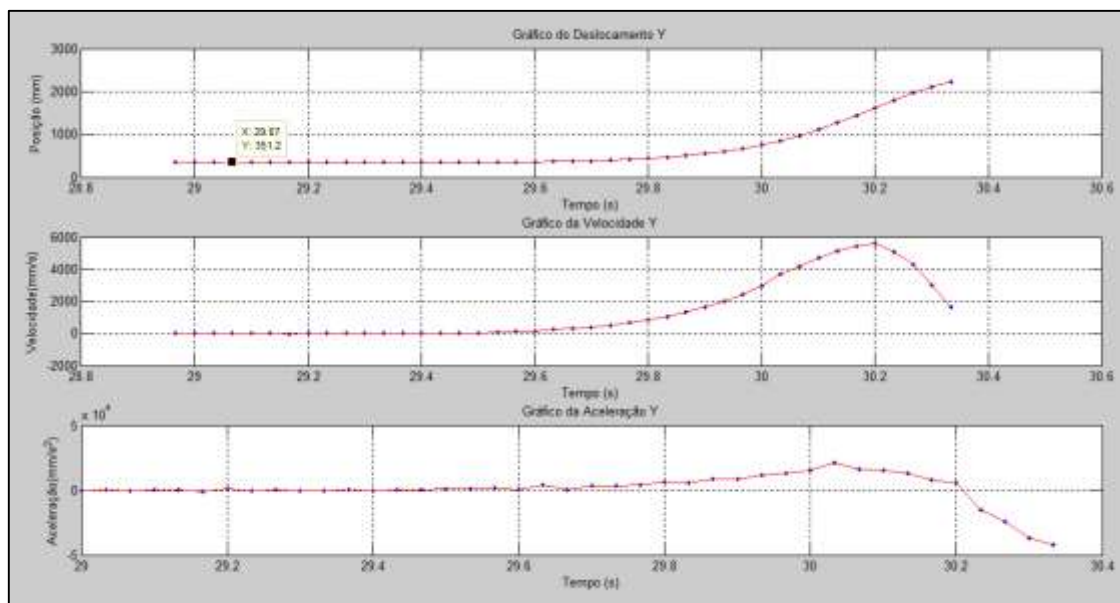
### 4.1 PRIMEIRO CORPO DE PROVA (CP1):

Primeira etapa:

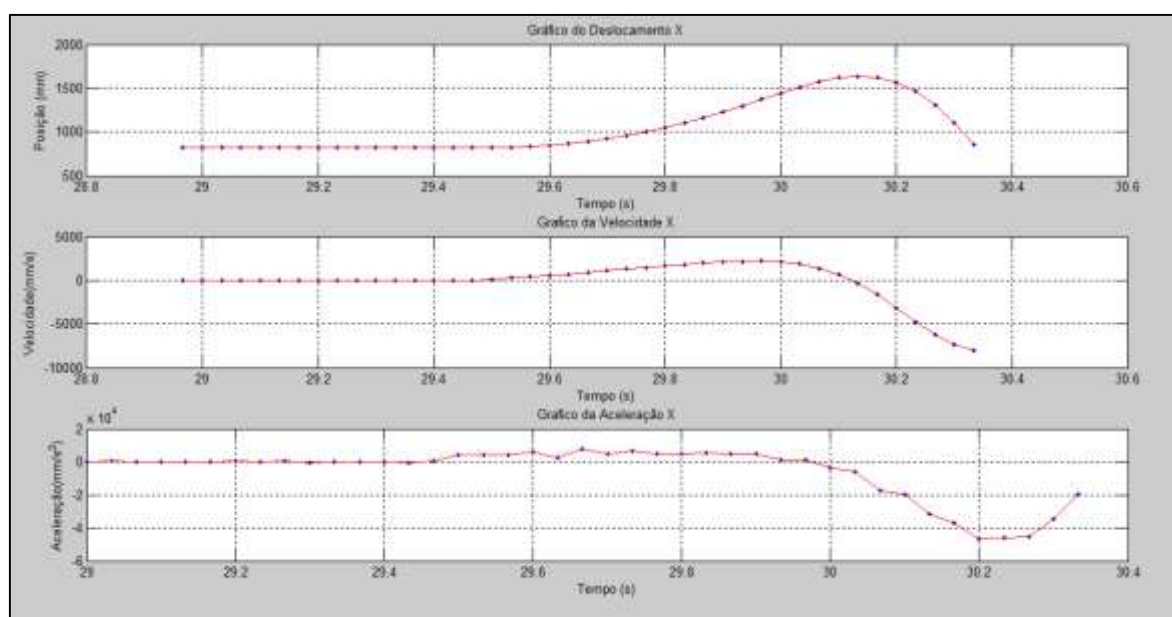
Após os inputs adequados para o algoritmo, de acordo com a análise da primeira etapa do corpo de prova, CP1, esse gera como resposta duas janelas de gráficos com informações de Deslocamento, Velocidade e Aceleração do alvo para um tempo determinado de análise para o eixo Y, como podemos ver na Figura 17, e também uma para o eixo X da gravação, Figura 18.

Para esse trabalho, um resultado importante para essa etapa é a menor altura em Y do martelo, que será utilizada posteriormente para o cálculo da energia absorvida pelo corpo. Esse valor foi encontrado com o auxílio de uma ferramenta que mostra o valor da coordenada de cada ponto, podendo assim, encontrar o ponto do gráfico que apresenta o menor valor. O ponto que encontramos apresenta um valor para a coordenada Y de 351,2 mm como podemos ver na Figura 17, ou seja, o martelo está posicionada a uma distância de 351,2 mm do topo da imagem.





**Figura 17 - Primeira etapa CP1 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y**  
**Fonte: Autoria Própria**

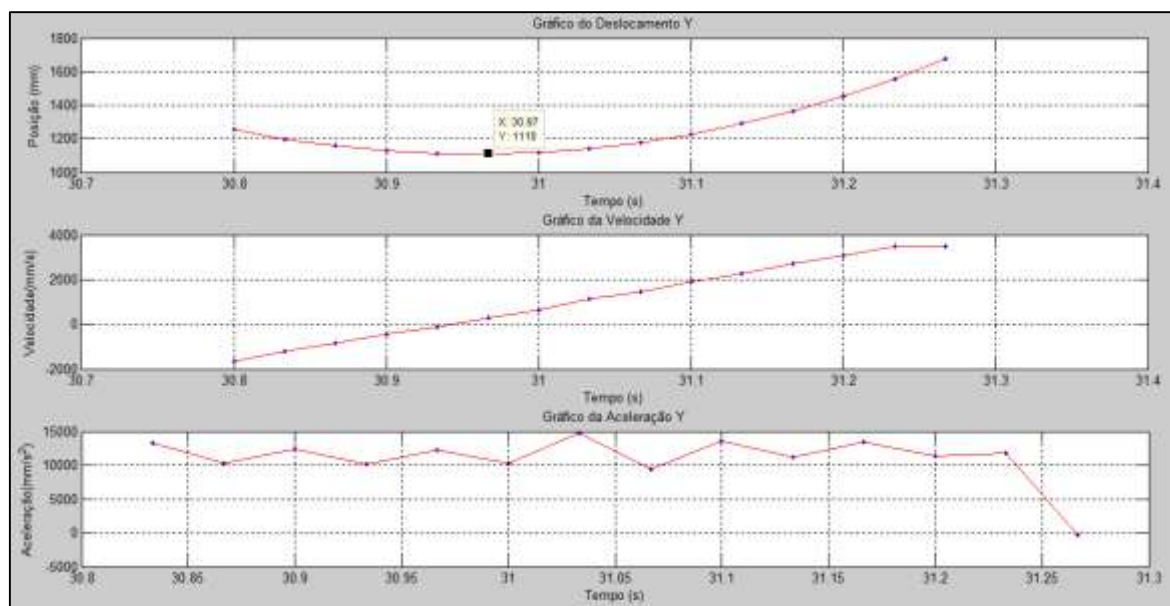


**Figura 18 - Primeira etapa CP1 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X; Gráfico da Aceleração em X**  
**Fonte: Autoria Própria**

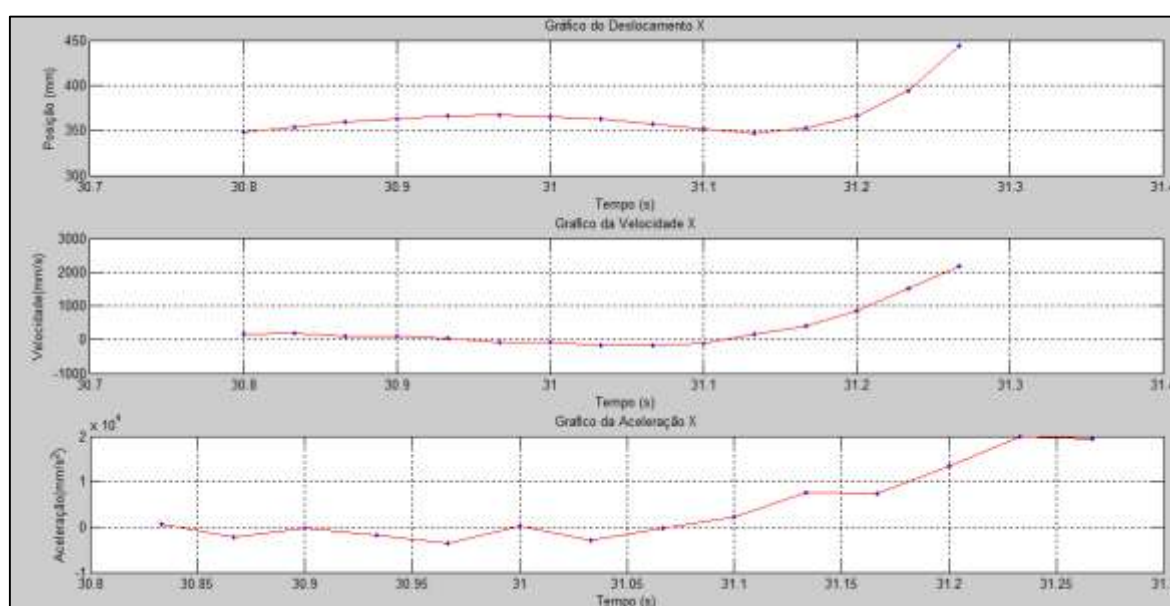
Segunda etapa:

Assim como na etapa anterior o algoritmo gera gráficos de Deslocamento, Velocidade e Aceleração do alvo em destaque em função do tempo para o vetor Y (Figura 19) e para o vetor X (Figura 20). Para essa etapa, deve ser feita uma análise

para encontrar o ponto onde o alvo obteve o menor valor da coordenada Y, no gráfico de deslocamento. O resultado encontrado para essa etapa foi de 1110 mm, Figura 19, que significa que o alvo obteve essa distância do topo da imagem antes de inverter seu movimento.



**Figura 19 - Segunda etapa CP1 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 20 - Segunda etapa CP1 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X**  
**c) Gráfico da Aceleração em X**  
**Fonte: Autoria Própria**

Após o término do ensaio de Charpy, obtemos através do relógio analógico do martelo, o valor da energia absorvida pelo corpo de prova, CP1, que foi de 11,5 kpm como na Figura 21, fazendo uma conversão para Joules, obtemos um valor para a energia absorvida pelo corpo de 112,77 J.



**Figura 21 - CP1 - Resultado obtido pelo relógio (Erel = 11,5)**  
**Fonte: Autoria Própria**

Para obter através do algoritmo a energia absorvida pelo corpo de prova, é necessário encontrar a diferença entre a energia potencial inicial e a energia potencial final do martelo, como foi explicado melhor no modelamento matemático. Portanto para CP1, tem-se uma energia absorvida calculada de 139,57 J. Fazendo uma comparação entre a energia calculada e a energia mostrada no relógio do martelo, encontra-se um erro de 19%.

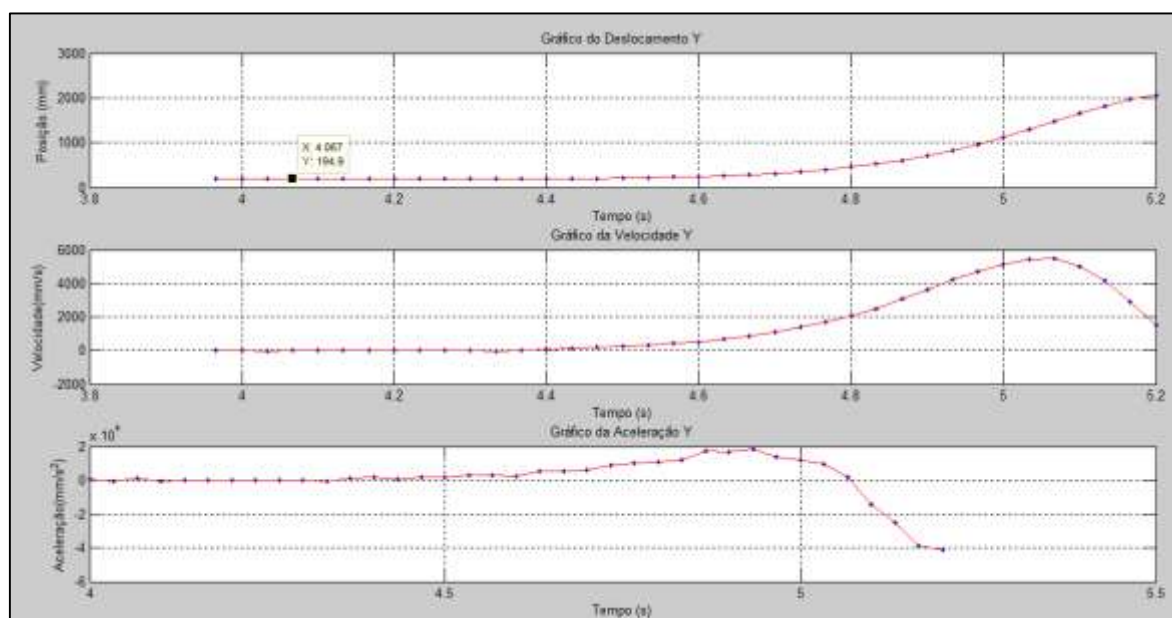
#### 4.2 SEGUNDO CORPO DE PROVA (CP2):

Primeira etapa:

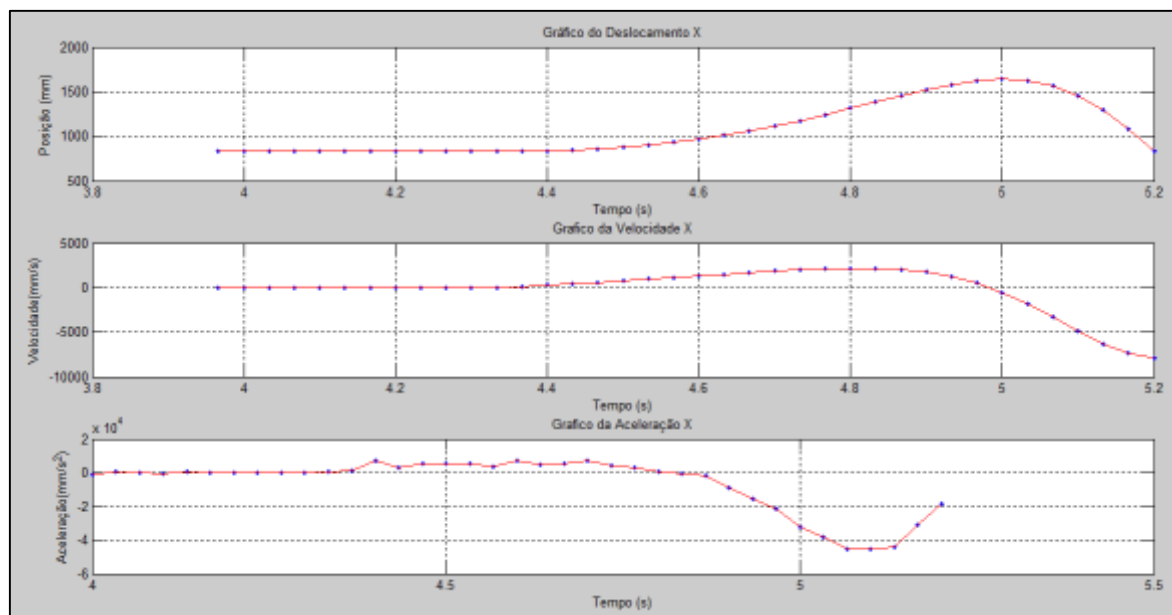
Como na análise anterior, após entrar com os inputs adequados para o algoritmo, esse gera como resposta duas janelas de gráficos com informações de

Deslocamento, Velocidade e Aceleração do alvo para um tempo determinado de análise para o eixo Y, como podemos ver na Figura 22, e também uma para o eixo X da gravação, Figura 23.

Para esse trabalho, um resultado importante para essa etapa é a menor altura em Y do martelo, que será utilizada posteriormente para o cálculo da energia absorvida pelo corpo. Esse valor foi encontrado com o auxílio de uma ferramenta que mostra o valor da coordenada de cada ponto, podendo assim, encontrar o ponto do gráfico que apresenta o menor valor. O ponto que encontramos apresenta um valor para a coordenada Y de 194,9 mm como podemos ver na Figura 22, ou seja, o martelo está posicionada a uma distância de 194,9 mm do topo da imagem.



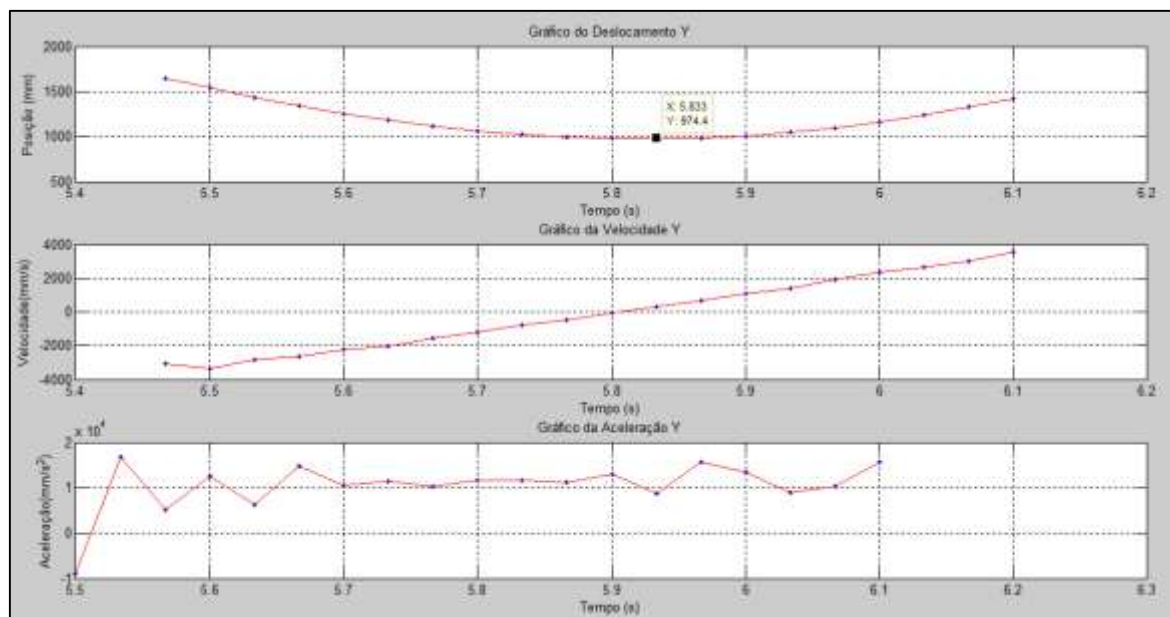
**Figura 22 - Primeira etapa CP2 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y**  
Fonte: Autoria Própria



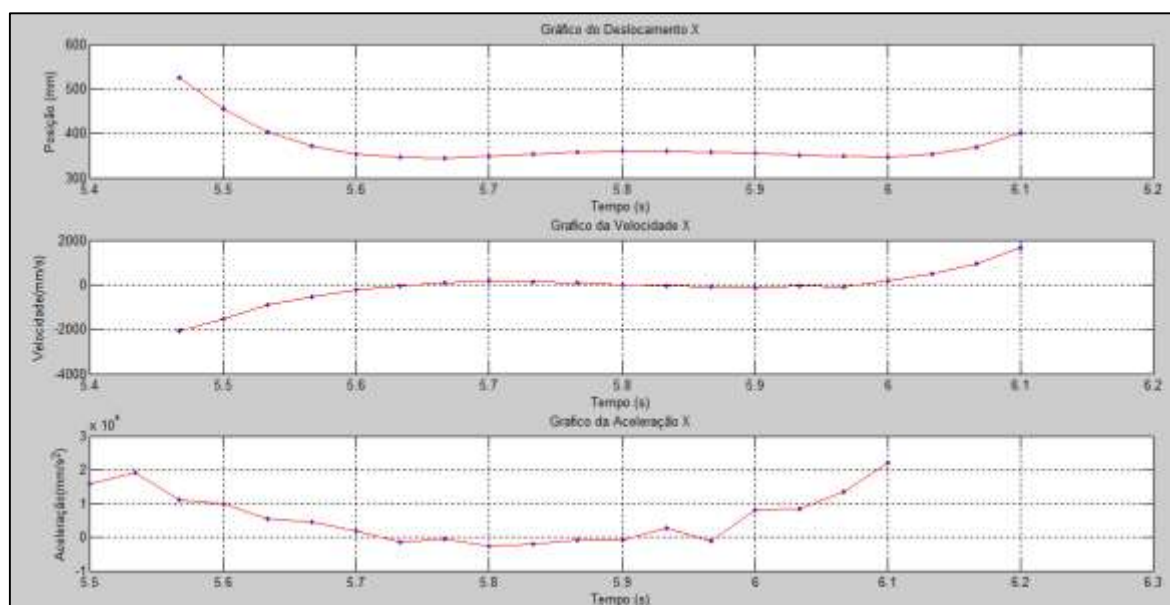
**Figura 23 - Primeira etapa CP2 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X; Gráfico da Aceleração em X**  
**Fonte: Autoria Própria**

Segunda etapa:

Similar como na etapa anterior o algoritmo gera gráficos de Deslocamento, Velocidade e Aceleração do alvo em destaque em função do tempo para o vetor Y (Figura 24) e para o vetor X (Figura 25). Para essa etapa, deve ser feita uma análise para encontrar o ponto onde o alvo obteve o menor valor da coordenada Y, no gráfico de deslocamento. O resultado encontrado para essa etapa foi de 974,4 mm, Figura 24, que significa que o alvo obteve essa distância do topo da imagem antes de inverter seu movimento.



**Figura 24 - Segunda etapa CP2 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 25 - Segunda etapa CP2 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X; Gráfico da Aceleração em X**  
**Fonte: Autoria Própria**

Feito o ensaio de impacto, obtemos através do relógio analógico do martelo, o valor da energia absorvida pelo corpo de prova, CP2, que foi de 11,6 kpm, fazendo uma conversão para Joules, obtemos um valor para a energia absorvida pelo corpo de 113,75 J, Figura 26.





**Figura 26 - CP2 - Resultado obtido pelo relógio (Erel = 11,6 kpm)  
Fonte: Autoria Própria**

Através da diferença entre a energia potencial inicial e a energia potencial final do martelo encontrada pelo algoritmo, como foi explicado melhor no modelamento matemático, podemos encontrar a energia absorvida pelo corpo de prova. Que para CP2, tem-se uma energia absorvida calculada de 143,38 J. Fazendo uma comparação entre a energia calculada e a energia mostrada no relógio do martelo, encontra-se um erro de 21%.

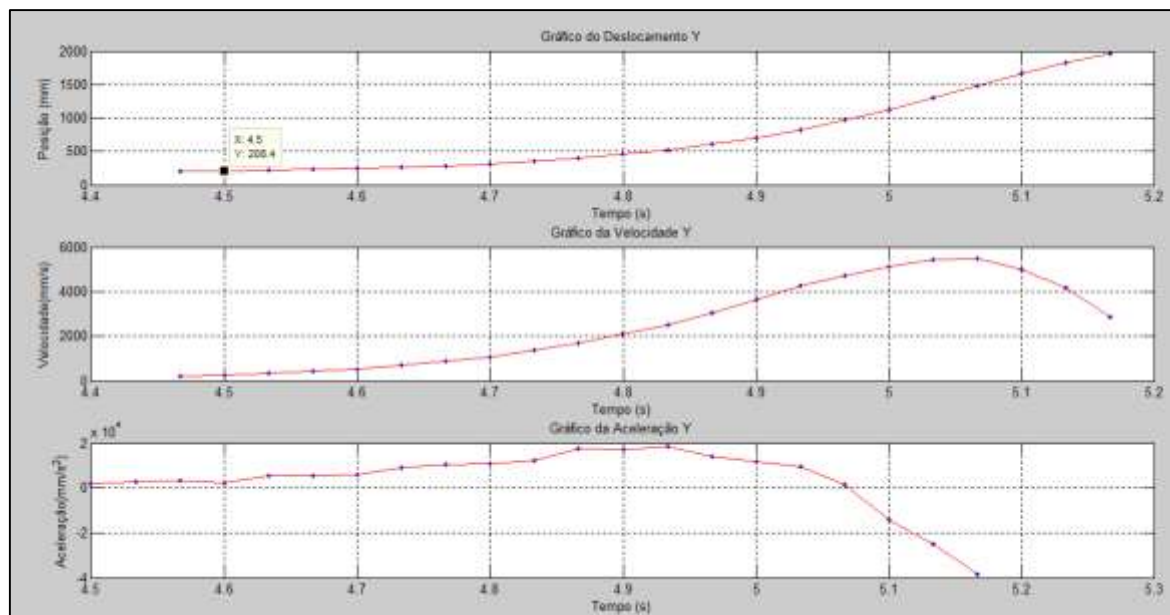
#### 4.3 TERCEIRO CORPO DE PROVA (CP3):

Primeira etapa:

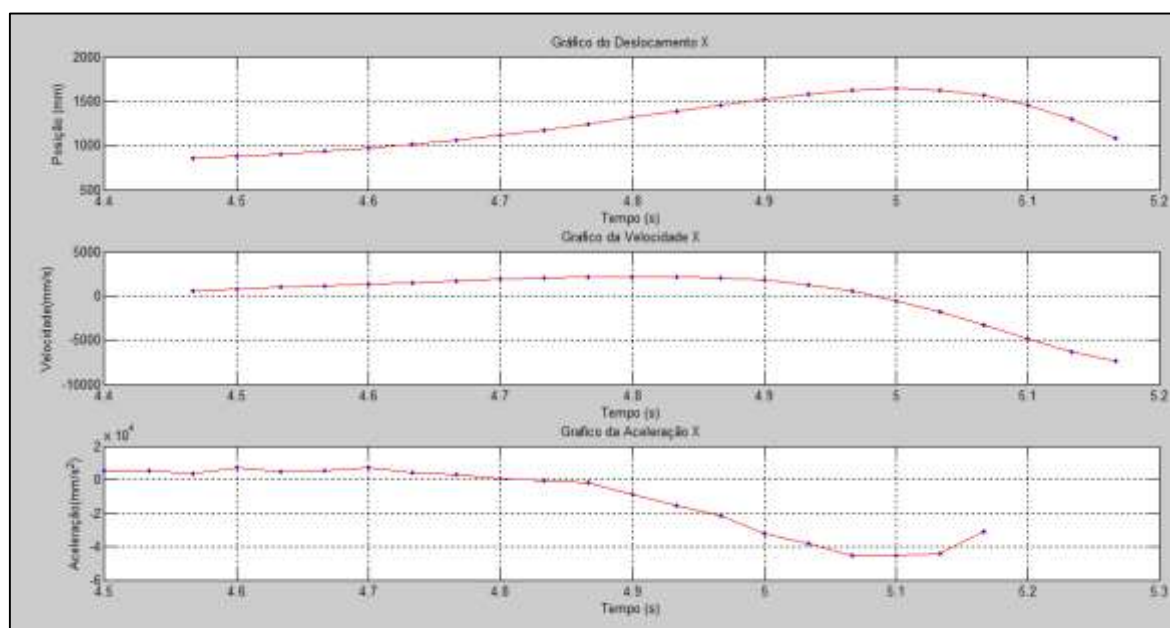
Após os inputs adequados para o algoritmo, de acordo com a análise da primeira etapa do corpo de prova, CP3, esse gera como resposta janelas de gráficos com informações de Deslocamento, Velocidade e Aceleração do alvo para um tempo determinado de análise para o eixo Y, como podemos ver na Figura 27, e também uma para o eixo X da gravação, Figura 28.

Para esse trabalho, um resultado importante para essa etapa é a menor altura em Y do martelo, que será utilizada posteriormente para o cálculo da energia absorvida pelo corpo. Esse valor foi encontrado com o auxílio de uma ferramenta que

mostra o valor da coordenada de cada ponto, podendo assim, encontrar o ponto do gráfico que apresenta o menor valor. O ponto que encontramos apresenta um valor para a coordenada Y de 208,4 mm como podemos ver na Figura 27, ou seja, o martelo está posicionada a uma distância de 208,4 mm do topo da imagem.



**Figura 27 - Primeira etapa CP3 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y**  
**Fonte: Autoria Própria**

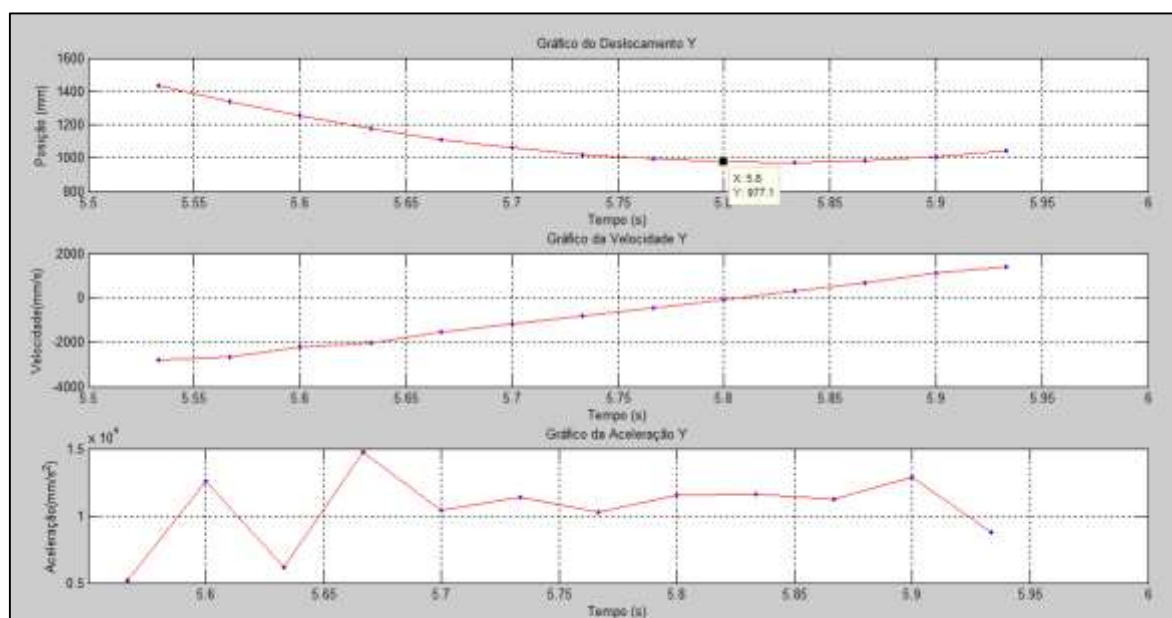


**Figura 28 - Primeira etapa CP3 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X; Gráfico da Aceleração em X**  
**Fonte: Autoria Própria**

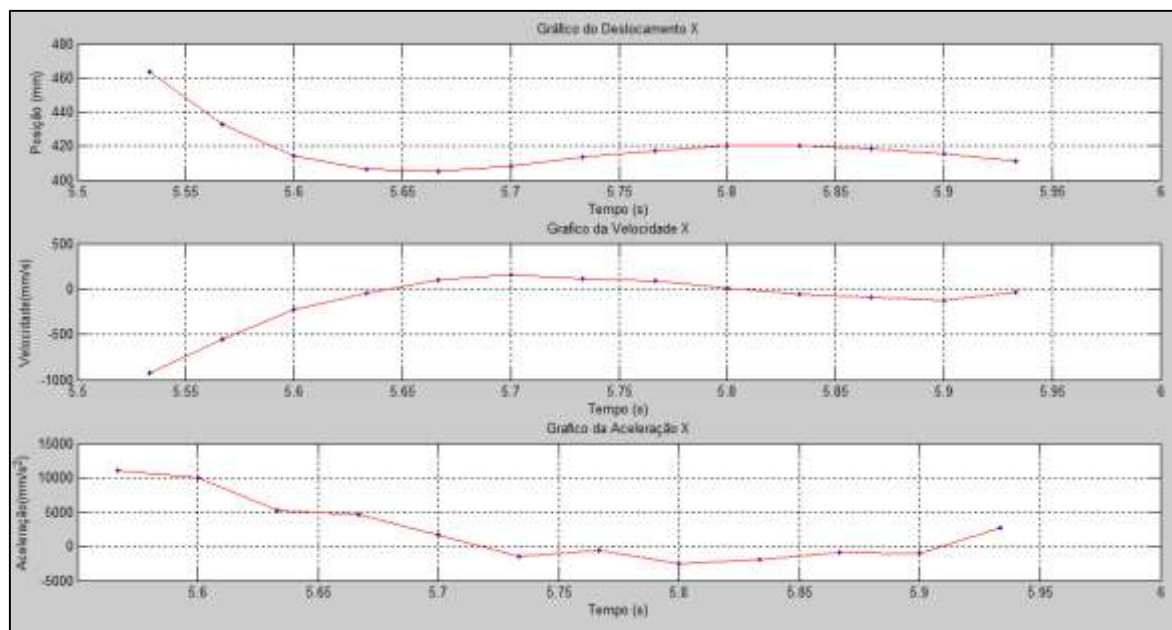


Segunda etapa:

Assim como nos corpos de provas anteriores e similar com a primeira etapa, o algoritmo gera gráficos de Deslocamento, Velocidade e Aceleração do alvo em destaque em função do tempo para o vetor Y (Figura 29) e para o vetor X (Figura 30). Para essa etapa, deve ser feita uma análise para encontrar o ponto onde o alvo obteve o menor valor da coordenada Y, no gráfico de deslocamento. O resultado encontrado para essa etapa foi de 977,1 mm, Figura 29, que significa que o alvo obteve essa distância do topo da imagem antes de inverter seu movimento.



**Figura 29 - Segunda etapa CP3 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da aceleração em Y**  
Fonte: Autoria Própria



**Figura 30 - Segunda etapa CP3 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da aceleração em X**  
**Fonte: Autoria Própria**

Feito o ensaio de impacto, obtemos através do relógio analógico do martelo, o valor da energia absorvida pelo corpo de prova, CP3, que foi de 11,2 kpm, fazendo uma conversão para Joules, obtemos um valor para a energia absorvida pelo corpo de 109,83 J, Figura 31.



**Figura 31 - CP3 - Resultado obtido pelo relógio (Erel = 11,2 kpm)**  
**Fonte: Autoria Própria**

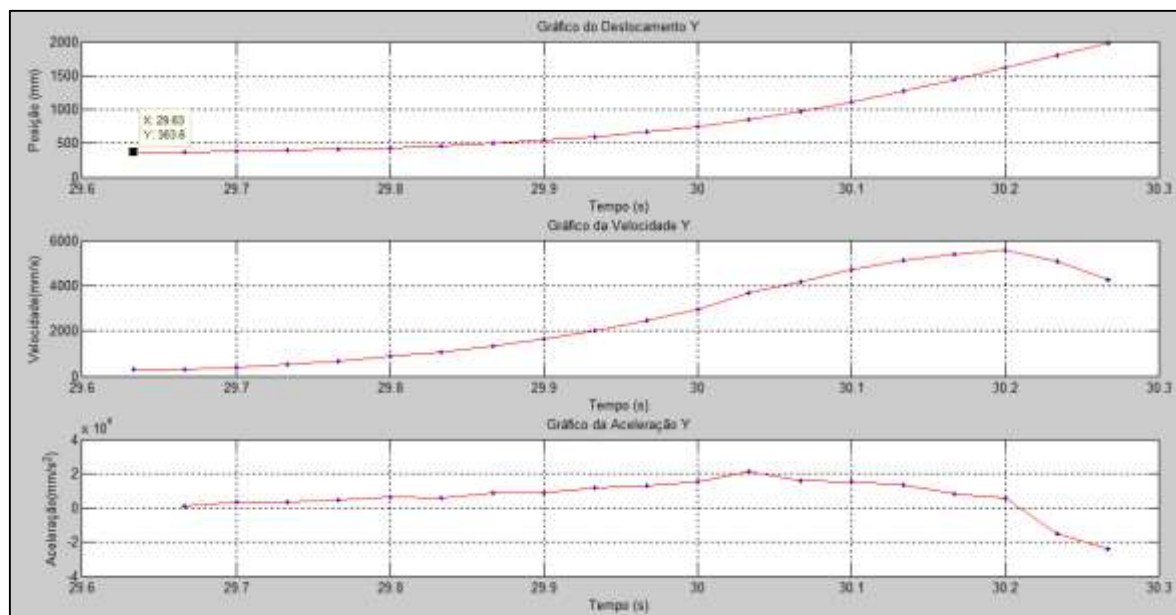
Para obter através do algoritmo a energia absorvida pelo corpo de prova, é necessário encontrar a diferença entre a energia potencial inicial e a energia potencial final do martelo, como foi explicado melhor no modelamento matemático. Portanto para CP3, tem-se uma energia absorvida calculada de 141,39 J. Fazendo uma comparação entre a energia calculada e a energia mostrada no relógio do martelo, encontra-se um erro de 22%.

#### 4.4 QUARTO CORPO DE PROVA (CP4):

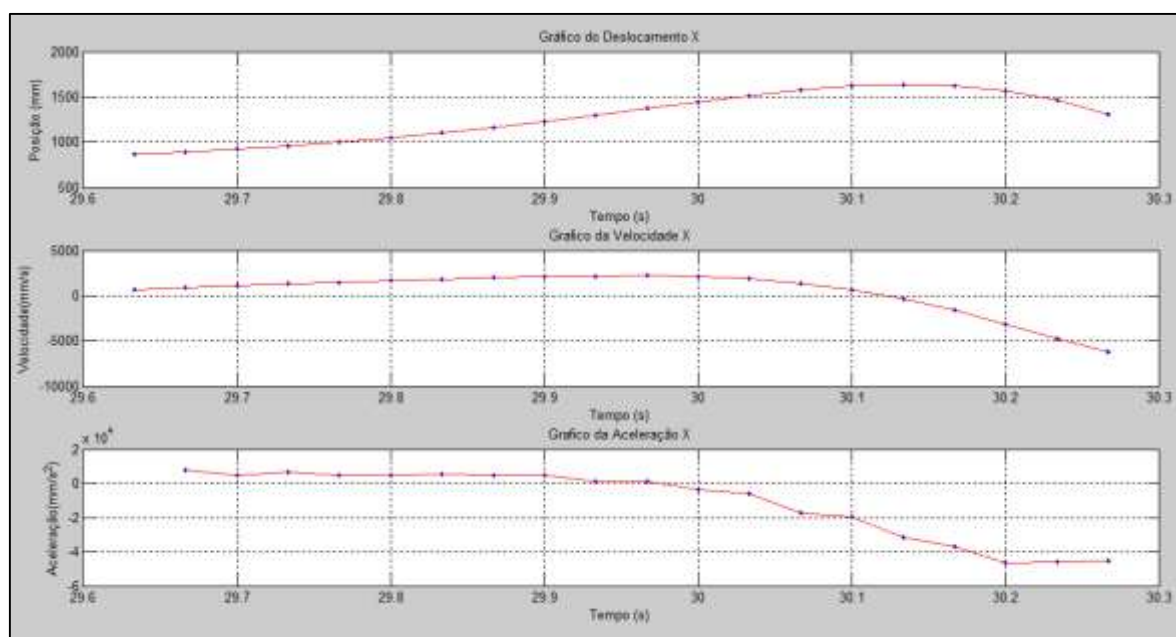
Primeira etapa:

Após os inputs adequados para o algoritmo, de acordo com a análise da primeira etapa do corpo de prova, CP4, esse gera como resposta duas janelas de gráficos com informações de Deslocamento, Velocidade e Aceleração do alvo para um tempo determinado de análise para o eixo Y, como podemos ver na Figura 32, e também uma para o eixo X da gravação, Figura 33.

Para esse trabalho, um resultado importante para essa etapa é a menor altura em Y do martelo, que será utilizada posteriormente para o cálculo da energia absorvida pelo corpo. Esse valor foi encontrado com o auxílio de uma ferramenta que mostra o valor da coordenada de cada ponto, podendo assim, encontrar o ponto do gráfico que apresenta o menor valor. O ponto que encontramos apresenta um valor para a coordenada Y de 363,6 mm como podemos ver na Figura 32, ou seja, o martelo está posicionada a uma distância de 363,6 mm do topo da imagem.



**Figura 32 - Primeira etapa CP4 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y**  
**Fonte: Autoria Própria**

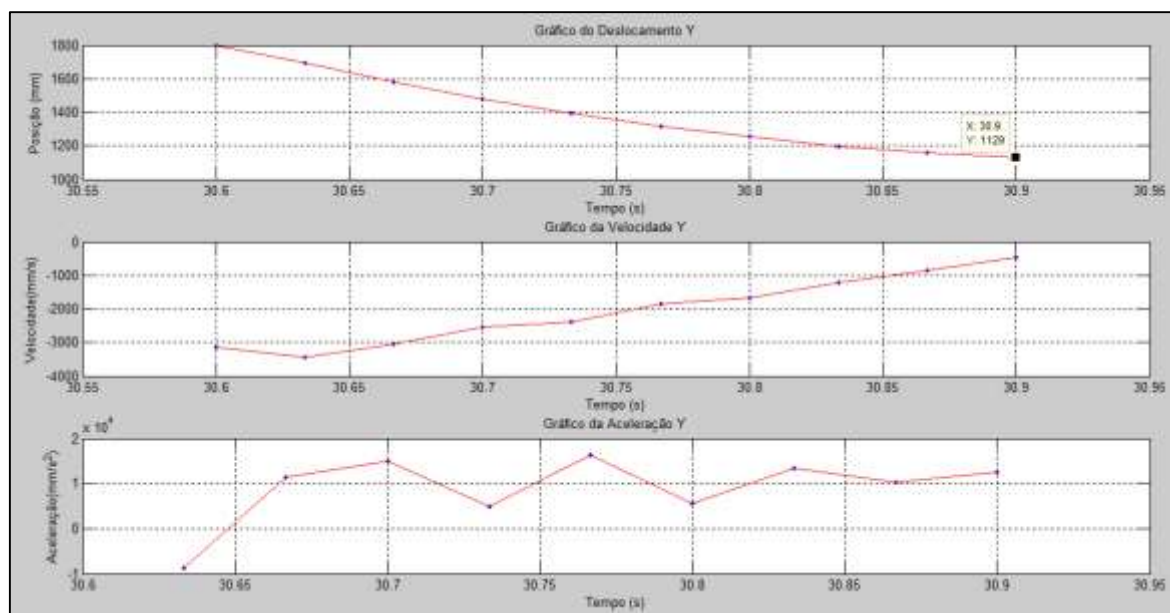


**Figura 33 - Primeira etapa CP4 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X; Gráfico da Aceleração em X**  
**Fonte: Autoria Própria**

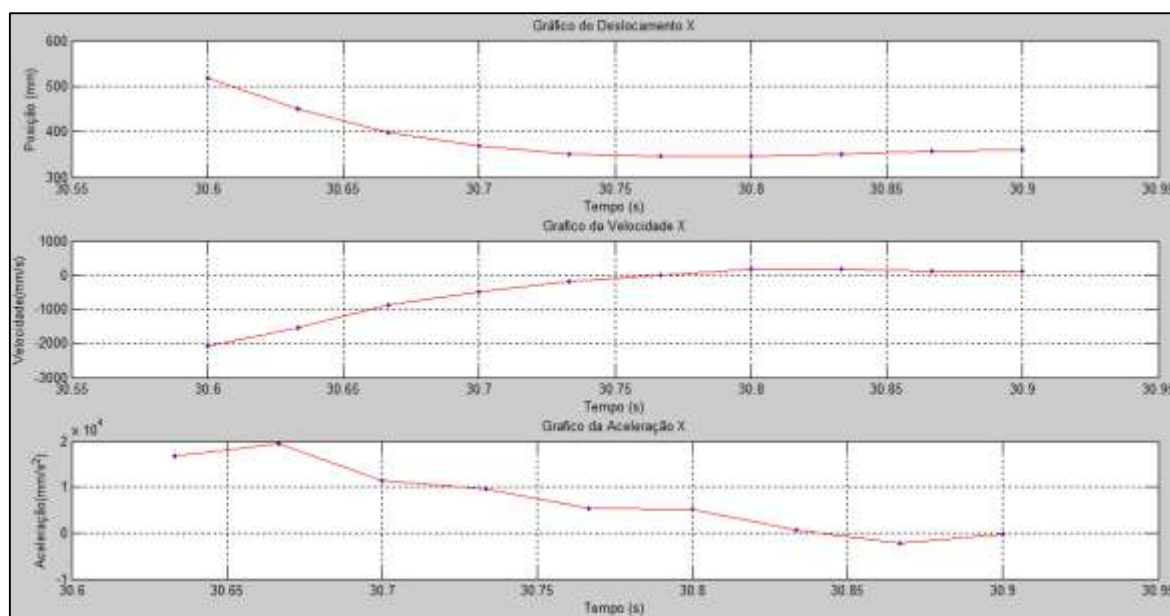
Segunda etapa:

Para a segunda etapa assim como na primeira etapa, o algoritmo gera gráficos de Deslocamento, Velocidade e Aceleração do alvo em destaque em função do tempo

para o vetor Y (Figura 34) e para o vetor X (Figura 35). Para essa etapa, deve ser feita uma análise para encontrar o ponto onde o alvo obteve o menor valor da coordenada Y, no gráfico de deslocamento. O resultado encontrado para essa etapa foi de 1129 mm, Figura 34, que significa que o alvo obteve essa distância do topo da imagem antes de inverter seu movimento.



**Figura 34 - Segunda etapa CP4 - Gráfico do deslocamento em Y; Gráfico da velocidade em Y; Gráfico da Aceleração em Y**  
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 35 - Segunda etapa CP4 - Gráfico do deslocamento em X; Gráfico da velocidade em X; Gráfico da Aceleração em X**  
**Fonte: Autoria Própria**

Como resultado do ensaio de impacto, obtemos através do relógio analógico do martelo, o valor da energia absorvida pelo corpo de prova, CP4, que foi de 11,4 kpm, fazendo uma conversão para Joules, obtemos um valor para a energia absorvida pelo corpo de 111,79 J, Figura 36.



**Figura 36 - CP4 - Resultado obtido pelo relógio (Erel = 11,4 kpm)**  
Fonte: Autoria Própria

#### 4.5 RESULTADO GERAL

Nas Tabela 2 e Tabela 3 são apresentados, em conjunto, as informações obtidas dos ensaios de modo a comparar os valores calculados pelo algoritmo com os apresentados no mostrador do martelo de Charpy.

Tabela 2 - Tabela dos resultados Ecalc x Erel

	CP1	CP2	CP3	CP4
hi	351,20 mm	195 mm	208,40 mm	363 mm
hf	1110 mm	974,40 mm	977,10 mm	1129 mm
Ecalc	139,57 J	143,36 J	141,39 J	140,89 J
Erel	11,50 kpm	11,60 kpm	11,20 kpm	11,40 kpm
Erel	112,78 J	113,76 J	109,83 J	111,80 J
%erro	19%	21%	22%	21%

Fonte: Autoria própria

Tabela 3 - Análise

	Média (J)	Desv. Padrão	Variância
Ecalc	141.31	1.5712	1%
Erel	112.04	1.6748	1%

Fonte: Autoria própria

Na Figura 37 é apresentada a relação que foi considerada para obter o valor de referência que se esperava obter nos ensaios.

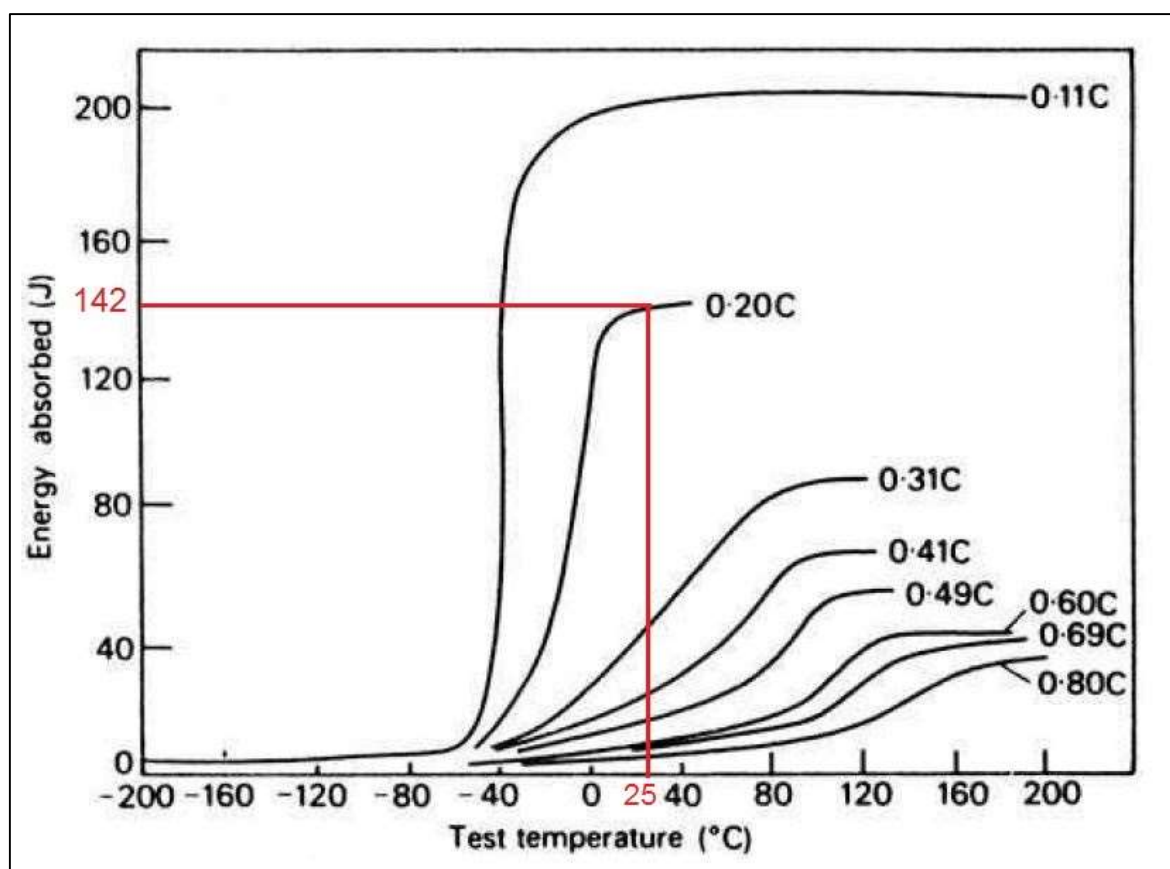


Figura 37 - Gráfico Energia absorvida x Temperatura para 20 °C – Resultado da literatura  
Fonte: Bhadesia; Honeycombe (2006)



Tabela 4 - Tabela dos resultados Ecalc x Elit

	CP1	CP2	CP3	CP4
<b>hi</b>	351,20 mm	195 mm	208,40 mm	363 mm
<b>hf</b>	1110 mm	974,40 mm	977,10 mm	1129 mm
<b>Ecalc</b>	139,57 J	143,36 J	141,39 J	140,89 J
<b>Elit</b>	142 J	142 J	142 J	142 J
<b>%erro</b>	2%	1%	0%	1%

Fonte: Autoria Própria

Ao analisar o gráfico pode-se ver que para uma faixa de temperatura de 0°C a 40°C e para um material com 0.2% de carbono a energia absorvida está dentro da faixa de 120J a 160J. Traçando uma reta perpendicular à temperatura estudada de 25°C, tem-se uma energia absorvida de 142J.

Os valores medidos pelo sistema proposto possuem um erro muito baixo quando comparado com o valor esperado. Desse modo, pode-se concluir que a determinação da energia absorvida pelo material durante o ensaio a partir de uma câmera se mostrou bastante eficaz. Além disso, foi possível obter as características dinâmicas envolvidas no ensaio, que podem ser utilizadas em uma análise mais aprofundada do comportamento do material durante o impacto.

Diante dos resultados acima citados, foi observado que o método de utilização da câmera para determinação da energia absorvida é válido comparando-o com os resultados da literatura. Porém, existe uma diferença entre os resultados obtidos pelo software e os resultados do relógio analógico, a diferença entre os valores foi chamada de “%erro”, e esse erro se manteve praticamente constante para todas as análises, cerca de 21%, indicando que a causa dessa variação é um erro sistemático e não uma causa especial, um erro sistemático pode ser a falta de calibração do mesmo. Também foram feitas análises com materiais desconhecidos e o erro se manteve nessa mesma faixa.

Ao comparar os resultados obtidos com os resultados da literatura, temos um “%erro” com média de 1% (Tabela 4), esse erro pode estar ocorrendo devido a fatores como variação da própria câmera, temperatura, atrito do martelo, composição do material, especificações de usinagem do material segundo a norma. Com isso pode-se validar os resultados obtidos.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho consistiu em uma análise da energia absorvida pelo Corpo de Prova realizada através da utilização de uma câmera, foi utilizado o teorema de conservação de energia aplicando os dados obtidos do algoritmo para encontrar a energia absorvida pelo corpo. Posterior a obtenção dos resultados, foi feita uma comparação entre os resultados calculados, os resultados obtidos pelo relógio analógico do martelo e os encontrados em literatura.

Para melhor entendimento do funcionamento do martelo de Charpy e desenvolvimento de um modelamento matemático, foi realizado um estudo sobre o ensaio de Charpy, métodos de conservação de energia, energia de impacto e também o funcionamento do algoritmo utilizado.

A partir da análise dos resultados obtidos, conclui-se a validação da utilização de uma câmera para a obtenção da energia absorvida pelo corpo de prova quando comparado com os resultados da literatura. No entanto, quando comparado com o resultado do relógio analógico, esse apresenta uma variação constante, indicando um erro sistemático.

O trabalho tem perspectivas de continuidade, podendo-se realizar os ensaios para diferentes materiais, e em diferentes temperaturas podendo assim observar e comprovar o comportamento em um gráfico da energia absorvida x temperatura. Outra perspectiva de continuidade é usar o método adotado para uma alternativa de calibração do martelo.

## REFERÊNCIAS

Adobe Systems Software Ireland Ltd.. **Ajuda do Media Encoder, sobre codificação e compactação de áudio e vídeo.** Helpx.adobe.com.

<https://helpx.adobe.com/br/media-encoder/using/video-audio-encoding-compression.html> (acessado em 10 de abril de 2016).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials.** ASTM E23 – 07a. September, 2007.

BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. **Steels - Microstructure and Properties.** 3ª ed. Elsevier. Jordan Hill, Oxford, UK. 2006. p. 67.

CALLISTER Jr, William D.; **Introdução a Ciência e Engenharia dos Materiais.** 7ª ed. São Paulo: Pearson - Prentice Hall, 2009

CHAPMAN, N. P.; CHAPMAN, J. **Digital multimedia.** 3 ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 732 p., 2009.

CHITOLINA, C.R.; ANTON F.M. **Dimensionamento e fabricação de um dispositivo para ensaio de Charpy.** Faculdade Horizontina. Horizontina, 2003.

CORREA C. A.; YAMAKAWA R. S.; HAGE E. Jr. **Determinação de temperatura de transição dúctil-frágil de plásticos através de testes de impacto instrumentado.** Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Jan/Mar – 1999.

GILL, T.; BIRNEY, B.; AND THE MICROSOFT WINDOWS MEDIA TEAM. **Microsoft Windows Media Resource Kit**. Microsoft Press, 2003.

GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. Prentice Hall, 2008.

HIGUTI R. T.; KITANO C. **Sinais e Sistemas**. UNESP, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Elétrica; Julho de 2003; p 3

KRUGER E. L. **Implementação da norma ISO 14.556 para instrumentação do ensaio Charpy convencional e comparação com nova metodologia proposta**. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. Outubro de 2003.

LENZ, J. A.; SAAVEDRA Filho, N. C.; BEZERRA Jr, A. G. **Utilização de TIC para o estudo do movimento: alguns experimentos didáticos com o software Tracker**. PUC Minas. Abakós, Belo Horizonte, v. 2, n. 2, p. 24–34, maio 2014.

LEONARDI, D. M. **Medida de deslocamentos e vibrações utilizando uma câmera digital como sensor sem contato**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Cornélio Procópio, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Mestrado em Engenharia Mecânica, 2015.

NISHIHARA, R. M. **Estudos para obtenção do hardware de um sistema de aquisição e visualização de vídeo digital**. Campinas, SP: [s.n], 1996. p. 98.

OPPENHEIM, A. V.; SHAFER, R. W. **Discrete-Time signal Processing**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.

SARRIS, V. [Max Wertheimer in Frankfurt-on the beginnings and developmental crisis of Gestalt psychology. Initial studies of motion perception (1910-1912)]. **Zeitschrift fur**

**Psychologie mit Zeitschrift fur angewandte Psychologie**, v. 195, n. 3, p. 283-310, 1987

SCURI, A. E. **Fundamentos da Imagem Digital**. Tecgraf/PUC-Rio; Setembro de 2002; p 13-16.

SEVERINO, O, J. **Mistura de cores: Uma nova abordagem para processamento de cores e sua aplicação na segmentação de imagens**. Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2009

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6<sup>a</sup>. ed. Pearson – Prentice Hall. São Paulo, SP. 2008. p. 177