

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
Curso de Especialização em Otimização de Sistemas

Monografia de Especialização

**“Análise de correlação linear entre a energia absorvida dos ensaios Charpy e DWTT por meio da ferramenta MINITAB”**

Autor: Fernanda Lima Marçal  
Orientador: Prof. Ana Paula Couto da Silva  
Maio de 2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
Curso de Especialização em Otimização de Sistemas

Fernanda Lima Marçal

“Análise de correlação linear entre a energia absorvida dos ensaios Charpy e DWTT por meio da ferramenta MINITAB”

Monografia apresentada no Curso de Especialização de Otimização de Sistemas da Universidade Federal de Minas Gerais.

Área de Concentração: Gestão Industrial  
Orientador: Prof. Ana Paula Couto da Silva

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2016

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do ICEx - UFMG**

Marçal, Fernanda Lima.

M313a Análise de correlação linear entre a energia absorvida dos ensaios Charpy e DWTT por meio da ferramenta Minitab. / Fernanda Lima Marçal. Belo Horizonte, 2016. ix, 38 f.: il.; 29 cm.

Monografia (especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Ciência da Computação.

Orientadora: Ana Paula Couto da Silva

1. Computação 2. Produtividade industrial. 3. Correlação (Estatística). 4. Siderurgia. I. Orientadora. II. Título.

CDU 519.6\*61 (043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO  
ESPECIALIZAÇÃO EM OTMIZAÇÃO DE SISTEMAS: ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
GESTÃO INDUSTRIAL

**ANÁLISE DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE A ENERGIA ABSORVIDA DOS  
ENSAIOS CHARPY E DWTT POR MEIO DA FERRAMENTA MINITAB**

FERNANDA LIMA MARÇAL

Monografia apresentada aos Senhores:

Prof. Ana Paula Couto da Silva  
Orientadora  
DCC - ICEx - UFMG

Prof. Geraldo Robson Mateus  
DCC - ICEx - UFMG

Prof. Renato Martins Assunção  
DCC - ICEx - UFMG

Belo Horizonte, 07 de julho de 2016

À Deus pela vida e oportunidade de busca do aprendizado,  
Ao meu amado marido Vladimir, pelo incentivo, orientação e companheirismo,  
Aos meus pais e irmã pela construção sólida do conceito de família,  
À Ana Couto pela orientação e dedicação exemplar,  
Aos meus amigos, em especial os da Engenharia Industrial da Usiminas e da  
Ger. de Laboratórios Ipatinga,  
Com muito carinho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE NOTAÇÕES .....	ix
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xi
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos .....	3
1.1.1 Objetivos Específicos .....	3
1.2 Contribuições .....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Teste de Impacto.....	5
2.2 Ensaio Charpy.....	6
2.3 Ensaio DWTT .....	10
2.4 Análise de Correlação e Regressão Linear Simples e Múltipla .....	11
2.5 Trabalhos relacionados Norma API.....	15
3. METODOLOGIA.....	16
3.1 Metodologia de coleta de dados .....	16
3.2 Fluxo dos ensaios - USIMINAS .....	17
3.3 Ferramenta para filtro dos dados .....	18
3.4 Análise de Correlação Linear .....	18
4. ANÁLISE DOS DADOS.....	20
4.1 Análise estatística das variáveis .....	20
4.2 Análise de correlação linear simples .....	23
4.3 Cenário 1: Análise de correlação linear múltipla .....	27
4.4 Cenário 2: Análise de correlação linear múltipla .....	31
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	34
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	37

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Dimensões do ensaio Charpy em mm (Fonte: CIMM, 2010). .....	7
Figura 2.2 – Curva típica de um material que apresenta uma transição dúctil-frágil significativa (Fonte: CIMM, 2014).....	8
Figura 2.3 – Comportamento de diferentes materiais submetidos ao ensaio de impacto (Fonte: CIMM, 2014). .....	9
Figura 3.1 – Fluxograma: Sequência de atividades dos ensaios no Laboratório de Teste Mecânico.....	18
Figura 4.1 – Resultado da energia absorvida do ensaio Charpy. ....	20
Figura 4.2 – Resultado da energia absorvida do ensaio DWTT.....	22
Figura 4.3 – Gráfico da correlação linear simples: energia absorvida DWTT x Charpy. ....	24
Figura 4.4 – Resultado da correlação linear simples entre energia absorvida dos ensaios DWTT e Charpy. ....	25
Figura 4.5 – Resultado da correlação linear múltipla entre energia absorvida do ensaio DWTT e demais variáveis analisadas. ....	28
Figura 4.6 – Gráfico da correlação linear múltipla: energia absorvida DWTT x (espessura da amostra, temperatura DWTT, temperatura Charpy e energia absorvida do Charpy).....	30
Figura 4.7 – Comparativo dos dados reais de DWTT e aqueles encontrados por meio da equação de correlação linear simples e múltipla.....	31
Figura 4.8 – Resultado da correlação linear múltipla entre energia absorvida do ensaio DWTT e demais variáveis analisadas. ....	32
Figura 5.1 – Tela do sistema em desenvolvimento para armazenamento das informações do ensaio DWTT.....	35

**LISTA DE TABELAS**

Tabela IV. 1 – Dados excluídos do Charpy e DWTT.....	23
--	----

**LISTA DE NOTAÇÕES**

DWTT	<i>Drop-Weight Tear Test</i>
CLC	<i>Continuos On line Control</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>

## RESUMO

O projeto e a fabricação de produtos siderúrgicos têm como base as propriedades mecânicas dos materiais, que constituem uma das características mais importantes dos metais em suas várias aplicações na engenharia.

A planta de Chapas Grossas é uma área da siderurgia que produz materiais empregados em aplicações críticas, como a fabricação de oleodutos e navios. A necessidade de garantir as propriedades mecânicas e certificar a qualidade desses materiais requer ensaios padronizados e devidamente avaliados.

Cientes dos custos e das dificuldades encontradas na realização do ensaio de Queda de Peso DWTT (*Drop-Weight Tear Test*) torna-se necessário buscar novas formas de garantir ao cliente um material cujo comportamento, quando sob a ação de esforços, expressa suas propriedades em função de trincas e/ou deformações dentro da especificação.

O objetivo deste trabalho é verificar a existência de correlação linear entre a energia absorvida dos ensaios Charpy e DWTT e, a partir disto, formular uma equação que traduza o modelo, o que possibilitaria a exclusão do ensaio DWTT, para os materiais que exigem ensaio Charpy, e conseqüentemente a eliminação de seus custos, sem afetar a qualidade do material.

A análise será elaborada a partir de um levantamento amostral das variáveis presentes na realização dos ensaios, dentre elas, a energia absorvida pelo corpo de prova, que é o parâmetro de aprovação do material para o cliente. O estudo está restrito às amostras do material CLC (*Continuous On line Control*) / API (*American Petroleum Institute*) da planta de Chapas Grossas.

**Palavras-chave:** Correlação, Energia absorvida, Charpy, DWTT.

## ABSTRACT

The design and manufacture of steel products are based on the mechanical properties of materials, which constitute one of the most important characteristics of the metals in their various applications in engineering.

The Plate Mill Plant is an area of the steel industry that produces materials used in critical applications such as the manufacture of pipelines and ships. The need to ensure the mechanical properties and ensure the quality of these materials requires standardized and properly assessed trials.

Aware of the cost and the difficulties encountered in performing the DWTT (Drop Weight Tear Test) it is necessary to seek new ways to ensure to the customer a material whose behavior, when under the action of forces, expressed its properties due to cracks and / or deformations within specification.

The goal of this study is to test the existence of a linear correlation between the absorbed energy of Charpy and DWTT tests and, from this, formulate an equation that represents the model, which would allow the exclusion of DWTT test for materials that require Charpy test. Thus, the cost of this test would be eliminated without affecting the assurance of the materials quality.

The analysis will be obtained from a sample survey of the variables involved in the tests, including mainly the energy absorbed by the test specimen, which serves as the material approval parameter to the client. The study is restricted to samples of materials CLC (Continuous Online Control) / API (American Petroleum Institute) of Plate Mill Plant.

**Keywords:** Correlation, Absorbed Energy, Charpy, DWTT.

## 1. INTRODUÇÃO

As propriedades mecânicas do material são controladas rigorosamente, fundamentadas na aplicação do aço. Ensaios são criados, a partir do surgimento de novos propósitos de utilização do aço. Podemos citar, por exemplo, o surgimento de novos desafios na indústria petrolífera. À medida que a produção de petróleo avançou em direção a águas ultraprofundas, maiores foram os investimentos no desenvolvimento de materiais e técnicas de produção, de forma a atender às condições cada vez mais severas de pressão e temperatura do meio submarino (FARIA, 2015).

Tendo em vista a necessidade de garantir a qualidade do material, diferentes testes são realizados visando verificar se o material atenderá com eficiência os requisitos de sua aplicação. Entre diversos testes, nesta monografia serão analisados os de Charpy e DWTT (*Drop-Weight Tear Test*), que seguem padrões impostos por normas internacionais como a API (*American Petroleum Institute*).

Conforme SOUZA (2004) esses ensaios são empregados para o estudo de fratura frágil nos metais, como teste de aceitação do material. O ensaio DWTT utiliza corpos de prova semelhantes aos corpos de prova Charpy, porém de tamanho maior.

A complexidade dos resultados destes ensaios está atrelada aos efeitos das diversas variáveis envolvidas nas alterações das propriedades mecânicas ao longo das etapas que compõem o processo de produção do aço, como por exemplo, o percentual de carbono e a temperatura de laminação. Como o objeto deste estudo é a correlação entre os ensaios Charpy e DWTT, as variáveis dos processos de Aciaria e Laminação, por exemplo, não serão abordadas, pois seus valores se manterão constantes para ambos os ensaios já que os corpos de prova serão retirados de uma mesma amostra de determinado material. As variáveis que têm contribuição efetiva nos resultados

serão consideradas, sendo elas: espessura da amostra, energia absorvida e temperatura dos ensaios.

As principais vantagens do teste Charpy consistem na simplicidade e no tamanho reduzido do corpo de prova, o que facilita sua locomoção nas etapas de realização do ensaio. O teste pode ser executado em diversos campos de temperaturas. Além disso, o corpo de prova é adequado para medir as diferenças de comportamento para materiais de baixa resistência ao impacto como os aços estruturais. Também é, frequentemente, usado para fins de controle de qualidade e de aprovação de materiais (CIMM, 2010). Apesar da preparação do corpo de prova do DWTT ser mais simples, o custo deste ensaio é mais elevado quando comparadas às dimensões da amostra retirada do produto para realização do teste, e é mais lento que o Charpy, no que tange ao tempo de homogeneização e à dificuldade de locomover o corpo de prova.

Os ensaios Charpy e DWTT buscam obter a ductilidade do material visando o atendimento das propriedades mecânicas impostas por diferentes normas internacionais, tal como a API, que será tratada neste estudo no que tange à busca de correlação entre os ensaios Charpy e DWTT.

Baseado na norma supracitada, feita em 1996, adotou-se como hipótese a existência de uma correlação linear entre a energia absorvida dos ensaios Charpy e DWTT.

A finalidade deste trabalho é identificar o grau de correlação linear entre as energias absorvidas pelos corpos de prova dos ensaios mencionados, realizados com a mesma amostra do material CLC (*Continuous Online Control*) / API gerado na planta Chapas Grossas.

A partir do resultado, se confirmada a linearidade, será formulada uma equação que represente a relação entre os ensaios, possibilitando a exclusão do ensaio

DWTT para os materiais que exigem ensaio Charpy, o que permite reduzir os custos da empresa sem afetar a garantia da qualidade do material.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral do trabalho é identificar se existe correlação linear entre as variáveis de energia absorvida dos ensaios Charpy e DWTT, com aços gerados na planta de Chapas Grossas. Se a hipótese de correlação linear for comprovada, será proposta uma equação que descreve o comportamento das variáveis e o ensaio DWTT poderá ser eliminado para os materiais que exigem ensaio Charpy.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

- Definir o grau de correlação linear existente entre a energia absorvida do Charpy e do DWTT;
- Propor a equação que identifica o valor da energia absorvida do ensaio DWTT a partir da energia absorvida do Charpy;
- Propor a abrangência do trabalho para outros grupos de aço, se confirmada a aplicabilidade do estudo proposto.

## **1.2 Contribuições**

Os resultados encontrados nesta monografia irão fornecer indícios para que seja incluído um novo módulo de análise de correlação entre as variáveis dos ensaios Charpy e DWTT no sistema de armazenamento de dados do DWTT, sendo desenvolvido atualmente na empresa.

O modelo proposto deverá ser ajustado após o acúmulo de uma massa suficiente de dados e confrontado com o resultado de ensaios realizados, até que o mesmo gere valores aproximados dos reais, que permitam a sua validação. O objetivo é criar mecanismos que possam determinar, em tempo

real, o resultado do ensaio DWTT imediatamente após a realização do ensaio Charpy.

Adicionalmente, a metodologia proposta nesta monografia poderá ser estendida a outros tipos de aços, como por exemplo, o API TQ. Assim, a empresa poderá continuar a garantir a qualidade do material, sem gerar custo com o processo do ensaio DWTT.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo apresenta os conceitos relevantes dos ensaios Charpy e DWTT. A seção 2.1 descreve os principais aspectos associados aos testes de impacto. Nas seções 2.2 e 2.3 são apresentadas as características fundamentais dos ensaios Charpy e DWTT. A seção 2.4 aborda assuntos relacionados à ferramenta estatística de correlação e regressão linear simples e múltipla utilizadas neste estudo. Na seção 2.5 é feita uma sucinta apresentação da norma API, que serviu de motivação para a realização deste trabalho.

### **2.1 Teste de Impacto**

O ensaio de impacto é um teste dinâmico utilizado para análise do comportamento de fratura dos materiais. Esse ensaio fornece a energia necessária para fraturar uma amostra padronizada de acordo com as normas ASTM E23 e BS EN ISO 148-1 (FABRICIO et al, 2014).

A tenacidade do material é medida a partir da energia absorvida pelo corpo de prova. Segundo FIGUEIREDO (2004), esta tenacidade indica a quantidade de trabalho que pode ser realizado sobre o material sem causar a sua fratura.

O ensaio de impacto mede a tendência que o metal tem de se comportar de maneira frágil. Utilizam-se as denominações “frágil” e “dúctil” para distinguir falhas ou materiais caracterizados por baixa ou alta tenacidade. A fratura por clivagem é a forma mais frágil de fratura que pode ocorrer em aços (BROEK, 1984).

Assim, um determinado material é classificado como tenaz (dúctil), quando absorve uma apreciável quantidade de energia antes da fratura e a curva de tensão-deformação apresenta uma região com escoamento plástico generalizado. De modo contrário, um material que absorve pouca energia antes da fratura e a curva tensão-deformação apresenta pouco ou quase nenhum

escoamento plástico, fratura de maneira frágil e é pouco tenaz (FIGUEIREDO, 2004). Vale ressaltar que, somente por meio de microscópio eletrônico é possível fazer uma separação entre as duas classificações (SOUZA, 2004).

Adicionalmente, a probabilidade de se encontrar fratura frágil, ou por clivagem, aumenta para menores temperaturas e maiores taxas de deformação, ocorrendo uma transição conhecida nos aços como dúctil-frágil. Para valores menores do que o valor da transição, a fratura precisa de pouca energia e o aço comporta-se de forma frágil (BROEK, 1984).

Os ensaios de ductilidade correlacionam os resultados com as fraturas ocorridas na prática e servem para evitar que aconteçam rupturas de caráter frágil do material em serviço, que pode acarretar prejuízos catastróficos, sem que haja uma deformação plástica visível que prenuncie a fratura (SOUZA, 2004).

## **2.2 Ensaio Charpy**

O teste Charpy é um dos métodos para determinar a resistência e a sensibilidade dos materiais quando submetidos à certa carga de impacto. O objetivo principal é medir a quantidade de energia absorvida pelo material durante a fratura. É essencial para garantir a segurança, confiabilidade e qualidade dos mais diversos materiais. É muito utilizado no setor automobilístico, de aeronaves e em peças específicas utilizadas na indústria (CIMM, 2010).

O teste Charpy é de baixo custo e possui tamanho reduzido de corpo de prova. O corpo de prova é adequado para medir as diferenças de comportamento para materiais de baixa resistência ao impacto como os aços estruturais. Esse teste é usado para fins de controle de qualidade e de aprovação de materiais (CIMM, 2010).

O ensaio é realizado por um pêndulo de impacto. O corpo de prova é fixado em um suporte, na base da máquina. O martelo do pêndulo - com uma borda de aço endurecido - é liberado de uma altura pré-definida, causando a ruptura do corpo em teste (CIMM, 2010).

A Figura 2.1 apresenta os 3 tipos de corpos de prova do ensaio Charpy, (especificados pela norma americana E23), diferenciados pela forma de seu entalhe. Os corpos de prova Charpy são classificados nos tipos A, B e C, todos com uma seção quadrada de 10 mm de lado e um comprimento de 55 mm. O entalhe é feito no meio do corpo de prova e no tipo A tem a forma de um V, no tipo B, a forma de fechadura (“buraco de chave”) e no tipo C, a forma de um U invertido (SOUZA, 2004). Neste trabalho serão utilizados ensaios do tipo A, com entalhe em formato v.

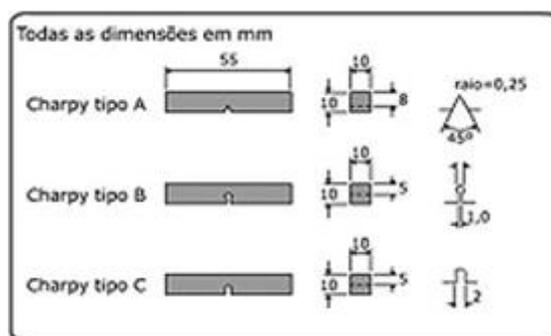


Figura 2.1 – Dimensões do ensaio Charpy em mm (Fonte: CIMM, 2010).

O teste de ductilidade pode ser conduzido em temperatura ambiente ou em temperaturas mais baixas para testar a fragilidade do material. No ensaio Charpy o corpo de prova é bi-apoiado como uma viga simples, com um entalhe central, sendo este posicionado de forma que o entalhe fique na face oposta à face de impacto. O posicionamento do entalhe é tal que o impacto ocorre na região de maior tensão - a seção transversal média do corpo de prova (CIMM, 2010).

Uma das principais funções do ensaio de impacto Charpy é determinar se um material apresenta ou não uma transição dúctil-frágil com a variação da

temperatura de ensaio. Caso ocorra esta transição, a faixa de temperatura que acontece este fenômeno deve ser determinada (GARCIA et al., 2012). A Figura 2.2 apresenta um exemplo de curva de transição dúctil-frágil típica, cujo material apresenta comportamentos bem discrepantes em função da temperatura a qual é submetido: em baixas temperaturas o montante de energia absorvida é pequeno e ocorre a fratura por clivagem, enquanto que, em temperaturas mais altas, ocorre alta absorção de energia e fratura por cisalhamento. A fratura por clivagem possui movimento de destacamento de ocorrência súbita, comportamento frágil e aparência visual brilhante. A fratura por cisalhamento possui movimento de escorregamento de ocorrência gradual, com deformação e comportamento dúctil e aparência visual fosca e fibrosa.

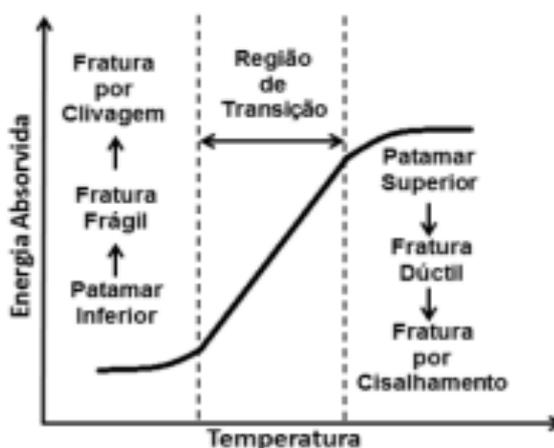


Figura 2.2 – Curva típica de um material que apresenta uma transição dúctil-frágil significativa (Fonte: CIMM, 2014).

A Figura 2.3 apresenta exemplos de diferentes curvas de transição, obtidas por meio de ensaios de Charpy. Cada uma das curvas pertence a um tipo de material com características diferentes, e devido a isso, são direcionadas a aplicações distintas. Assim, fica evidente a importância de se conhecer as faixas de transição de cada material para que os requisitos desejados sejam mantidos por toda a gama de temperatura a qual o material será submetido durante a sua posterior utilização.

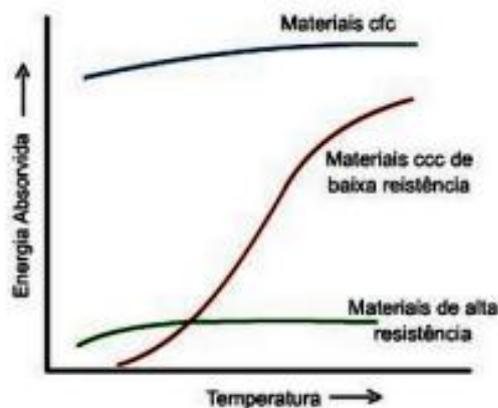


Figura 2.3 – Comportamento de diferentes materiais submetidos ao ensaio de impacto (Fonte: CIMM, 2014).

A energia absorvida pelo corpo de prova necessária para a sua deformação e seu rompimento é medida através da fórmula:

$$E_{abs} = F \times L \times (1 - \cos\beta)$$

Onde:

F é a força de impacto (mgh), que é certificada (calibrada) = 189,9N

L é o comprimento do pêndulo, que é certificado (calibrado) = 0,8m

$\beta$  é o ângulo obtido em graus

Quanto menor a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material àquela solicitação dinâmica (SOUZA, 2004).

A energia medida é um valor relativo e comparativo entre dois ou mais resultados, quando estes são submetidos às mesmas condições de ensaio, isto é, mesma temperatura, mesmo tipo de entalhe e mesma máquina (para garantir o mesmo atrito e mesma velocidade do pêndulo) (SOUZA, 2004).

A temperatura de ensaio tem uma influência decisiva nos resultados obtidos e deve ser mencionada no resultado juntamente com o tipo de corpo de prova ensaiado (SOUZA, 2004).

A ductilidade do metal também pode ser avaliada, no ensaio de impacto, pela porcentagem de contração no entalhe, além de ser possível, também, fornecer a superfície da fratura, quanto ao seu aspecto, por um exame visual que determina se a fratura foi fibrosa (dúctil), granular ou cristalina (frágil) (SOUZA, 2004).

O exame visual da fratura do corpo de prova rompido, aliado à energia absorvida, pode servir para análises de fratura em serviço desses materiais, além de poder também ser utilizado para escolha de materiais em bases comparativas, no caso de metais de resistência média (SOUZA, 2004).

### **2.3 Ensaio DWTT**

O ensaio DWTT consiste em determinar a capacidade de um material em impedir a propagação de uma trinca. Esse método foi desenvolvido pelo Battelle Memorial Institute<sup>1</sup>, e é realizado em conformidade com a especificação API RP 5L3 "Práticas Recomendadas para a Condução de Testes de Queda de Peso" (FARIA, 2015).

Neste teste, o impacto é calculado através da queda de um peso sobre o corpo de prova apoiado e com o entalhe voltado para baixo, sendo realizado em diferentes temperaturas. O resultado do ensaio é a aparência da fratura, após separação completa das partes rompidas (SOUZA, 2004).

O ensaio DWTT se aplica mais frequentemente a tubos de paredes grossas. Por esse ensaio, mede-se o efeito metalúrgico da estrutura, bem como o efeito geométrico dado pela espessura da parede do tubo sobre a temperatura de transição, o que não acontece com o ensaio de impacto Charpy, que apenas mede o efeito metalúrgico, visto que o corpo de prova tem espessura constante, qualquer que seja a chapa ensaiada. Portanto, quando a parede do tubo se torna cada vez mais fina, o efeito geométrico se torna menor, e a

---

<sup>1</sup> Site: [www.battelle.org](http://www.battelle.org)

temperatura de transição determinada pelo ensaio DWTT cai rapidamente, aproximando-se da temperatura de transição dada pelo ensaio de impacto, quando a parede do tubo fica igual à espessura do corpo de prova Charpy (SOUZA, 2004).

Esse ensaio pode ser usado para: escolha de materiais por comparação com outros materiais, obtenção de resultados com relação à temperatura e tensões de trabalho, determinação da probabilidade e análise de ruptura frágil em serviço e o controle de qualidade de materiais (ASM, 1978).

## **2.4 Análise de Correlação e Regressão Linear Simples e Múltipla**

O principal objetivo deste trabalho é analisar a existência de correlação entre os testes Charpy e DWTT. A partir da existência desta correlação, o objetivo é propor um modelo que correlacione os testes.

Assim, seja a variável dependente  $Y$  escrita em função da variável independente  $X$ . A dependência da variável  $Y$  em relação a variável  $X$  pode seguir diversas funções, sejam elas linear, quadrática, cúbica, exponencial, logarítmica, somente para citar alguns exemplos. Para estabelecer o modelo para explicar o fenômeno, deve-se verificar qual tipo de curva e equação que mais se aproxima dos pontos representados no diagrama de dispersão (PETERNELLI, 2004). O diagrama de dispersão é uma ferramenta visual que auxilia em uma primeira análise de como as variáveis estão relacionadas entre si.

Um método estatístico amplamente utilizado para estudar o grau de relacionamento entre essas variáveis é a análise de correlação. De acordo com LIRA (2004), ela mede a intensidade e a direção da relação linear ou não-linear entre duas ou mais variáveis e permite saber se as alterações sofridas por uma delas são acompanhadas por alterações nas demais.

Conforme descreve SIEGEL (1975, p. 220): "O estabelecimento da existência de uma correlação entre duas ou mais variáveis pode constituir o objetivo precípua de uma pesquisa (...). Mas também representar apenas um passo, ou estágio, de uma pesquisa com outros objetivos, como, por exemplo, quando empregamos medidas de correlação para comprovar a confiabilidade de nossas observações".

Um dos coeficientes de correlação mais simples é o coeficiente de Pearson, que mede a correlação linear entre duas variáveis e é definido por SANTOS (2015) como:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Onde:

$X_i$  e  $Y_i$  - Valores medidos de ambas as variáveis

$\bar{X}$  e  $\bar{Y}$  - Médias amostrais de ambas as variáveis

Este coeficiente quantifica a força de associação linear entre duas ou mais variáveis e, portanto, descreve quão bem uma linha reta se ajustaria através de uma nuvem de pontos. O coeficiente de correlação pode variar entre  $-1$  (correlação negativa perfeita) e  $+1$  (correlação positiva perfeita). Valores negativos do coeficiente de correlação indicam uma correlação do tipo inversa, isto é, quando  $x$  aumenta  $y$  diminui. Valores positivos do coeficiente de correlação ocorrem quando  $x$  e  $y$  variam no mesmo sentido, isto é, quando  $x$  aumenta  $y$  aumenta ou quando  $x$  diminui  $y$  também diminui (SANTOS, 2015).

Dancey e Reidy (2006) apontam para uma classificação ligeiramente diferente:  $r = 0,10$  até  $0,30$  (fraco);  $r = 0,40$  até  $0,6$  (moderado);  $r = 0,70$  até  $1$  (forte). Independente da classificação adotada, o certo é que quanto mais perto de  $1$  (independente do sinal) maior é o grau de dependência estatística linear entre

as variáveis. No outro oposto, quanto mais próximo de zero, menor é a força dessa relação.

A correlação vista até então, segundo SANTOS (2015), quantifica a força da relação entre variáveis distintas. Já a análise de regressão, conforme PETERNELLI (2004), consiste na realização de uma análise estatística com o objetivo de verificar a existência de uma relação funcional entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes.

Quando se verifica por meio do coeficiente de correlação (e pelo próprio aspecto visual do diagrama de dispersão) que existe uma forte relação linear entre duas ou mais variáveis  $X$  e  $Y$ , pode ser de interesse calcular a equação da reta que representa esta relação:  $Y = a + bX$ .  $Y$  é a variável cujo comportamento se deseja explicar e  $X$  a variável a ser usada para explicar o comportamento de  $Y$ , podendo ser mais de uma. Por isso,  $Y$  é denominada variável resposta ou variável dependente, e  $X$  variável explicativa ou variável independente (PINHEIRO et al, 2012).

Suponha a existência de um conjunto de  $n$  pares de dados  $(X_i, Y_i)$ . Este conjunto de dados é utilizado pelo método dos mínimos quadrados para obter a equação da reta que melhor se ajusta aos  $n$  pontos correspondentes a esses dados no plano bidimensional. Como, em geral, a relação de dependência linear entre  $X$  e  $Y$  não é perfeita, costuma se introduzir na equação um termo relativo ao erro do modelo de predição:  $Y = a + bX + \text{erro}$ . Assim, para cada um dos pontos observados  $(X_i, Y_i)$ , mantendo fixos  $a$  e  $b$ , podemos escrever:  $Y_i = a + bX_i + (\text{erro})_i$  (PINHEIRO et al, 2012).

O método dos mínimos quadrados para determinar os coeficientes  $a$  e  $b$ , consiste em encontrar os valores de  $a$  e  $b$  que minimizam:

$\sum_{i=1}^n (Y_i - (a + bX_i))^2$ , ou seja, a soma dos quadrados das  $n$  diferenças entre os dois valores de  $Y$ : o observado ( $Y_i$ ) e o valor ajustado  $\hat{Y}_i$ , calculado por meio da equação da reta  $(a + bX_i)$  (PINHEIRO et al, 2012).

As fórmulas que nos permitem calcular os valores de a e b a partir dos dados são:

$$a = \frac{\sum y_i}{n} - b\left(\frac{\sum X_i}{n}\right) = \bar{Y} - b\bar{X}$$

$$b = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} = \frac{\sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n}}{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}} = \frac{n\sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

Segue interpretação dos coeficientes:

- ✓ b mede a inclinação ou coeficiente angular da reta de regressão;
- ✓ a mede o valor de Y quando X é igual a zero, ou seja, o intercepto da reta de regressão (PINHEIRO et al, 2012).

O modelo de regressão linear pode ser simples, formado por uma variável independente, ou múltiplo, formado por duas ou mais variáveis independentes (SANTOS, 2015).

Na regressão linear múltipla são consideradas duas ou mais variáveis independentes que possivelmente influenciam no valor de Y, a variável dependente. Deve ser identificado o impacto coletivo das variáveis independentes, assim como a contribuição individual delas para o efeito geral da variável preditora.

O modelo de regressão múltipla relaciona a variável resposta y com as n variáveis explicativas xi:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \text{erro}$$

Onde:

$\beta_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ ;

p são os parâmetros a serem estimados;

erro é uma variável aleatória desconhecida que interfere na verdadeira relação linear.

## 2.5 Trabalhos relacionados Norma API

O estudo realizado tem como embasamento a norma API de 1996 que denota as práticas recomendadas aos ensaios de Charpy e DWTT e auxilia, como um guia, na concepção do equipamento de testes DWTT.

É apresentado, por exemplo, a relação entre a energia máxima para fraturar as amostras Charpy com entalhe V (CVN) e exemplares DWTT com entalhe Chevron (Empresa americana de petróleo) e prensado.

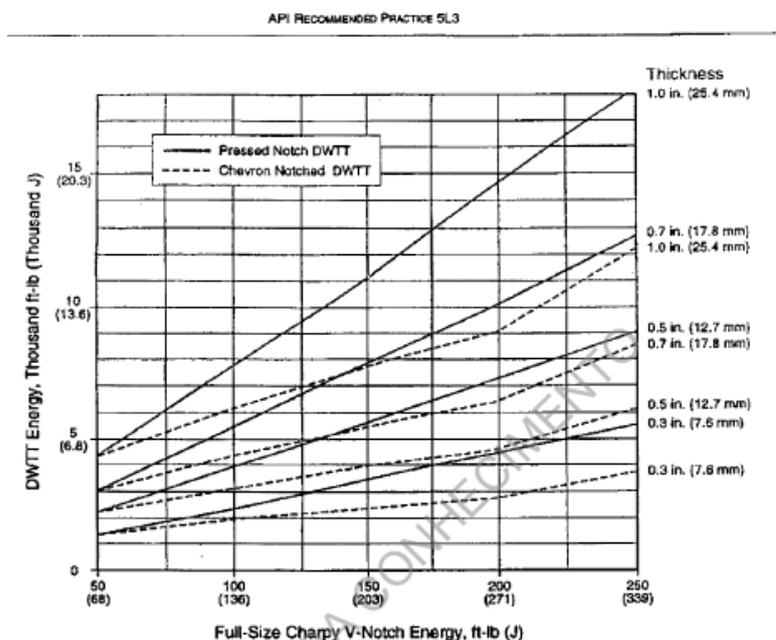


Figura 2.4 – Relação entre energia do Charpy e energia DWTT.

Fonte: API (1996).

A Figura 2.4 apresenta o gráfico dos pares ordenados das energias absorvidas dos ensaios Charpy (eixo X) e DWTT (eixo Y) para amostras de diferentes faixas de espessura. A linha contínua é referente as amostras DWTT com entalhe do tipo prensado e a linha pontilhada representa amostras DWTT com entalhe do tipo Chevron. No caso das amostras de Charpy, todas utilizam o entalhe do tipo V. Observa-se que existe correlação entre os valores de energia dos dois ensaios, que representa o resultado de cada teste, com uma melhor linearidade entre Charpy e DWTT com entalhe do tipo prensado.

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia utilizada para coleta de dados e análise dos resultados obtidos.

#### 3.1 Metodologia de coleta de dados

A base de dados do ensaio Charpy utilizada neste trabalho foi obtida através de um banco de dados denominado LEME do Laboratório de Teste Mecânico Usiminas. Os dados do Charpy foram copiados por meio de um arquivo em Access com os filtros necessários à pesquisa.

Como não havia sistema de armazenamento de dados do DWTT, por se tratar de uma máquina recém comprada, a qual ainda não havia sido conectada ao banco de dados da empresa, os dados deste ensaio foram registrados em uma planilha do Excel, a partir da solicitação para utilização neste trabalho.

Como o intuito era correlacionar os dois ensaios a partir de uma amostra de um mesmo material, os ensaios de Charpy e DWTT foram coletados no mesmo período, de nov/15 a fev/16 e a amostra foi de 130 ensaios.

Foram considerados somente os materiais da linha Chapas Grossas, que passaram pelo sistema de resfriamento CLC e que são produzidos conforme a norma API. Os campos pesquisados foram: espessura da amostra, energia absorvida e temperatura dos ensaios.

Na massa de dados do DWTT existiam valores que foram coletados em condições anormais (falha de equipamento, queda de energia, erro do operador, erro de leitura, erro de digitação e etc.). Os chamados *outliers* poderiam afetar de forma substancial o resultado das análises estatísticas. Esses valores discrepantes foram retirados da amostra coletada, permanecendo 70 dados.

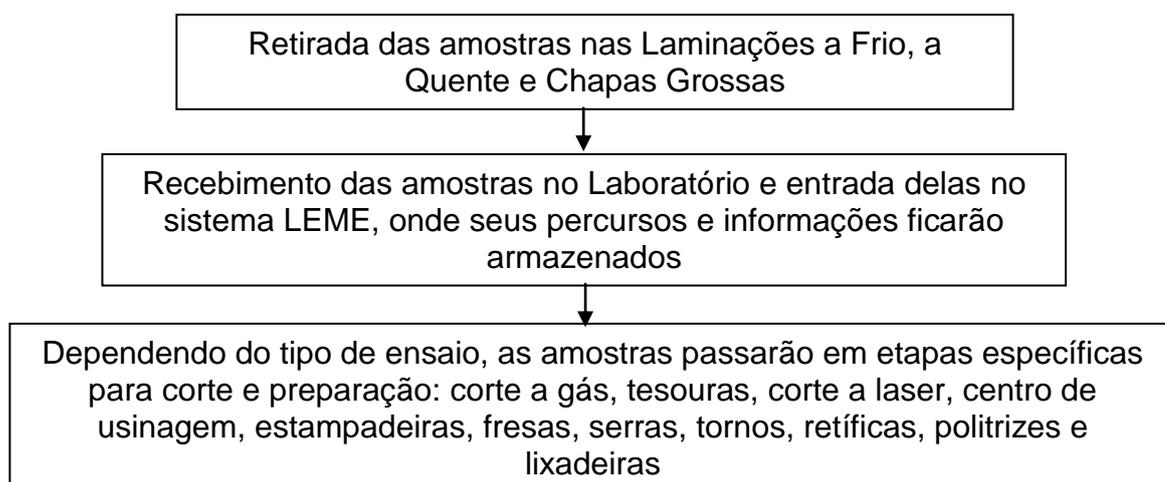
Apesar do número limitado de amostras, este estudo é de importância estratégica para a empresa, pois fornece indícios que reforçam a hipótese da existência de correlação entre os ensaios Charpy e DWTT. Desde a publicação da norma, em 1996, não foram feitos novos estudos que verificassem essa correlação. Este trabalho traz consigo a oportunidade de retomada de um projeto que pode trazer redução de custos para a empresa, além de incentivar o armazenamento confiável de dados, que servirá de base para pesquisas futuras, abrangentes a outros tipos de aço.

### 3.2 Fluxo dos ensaios - USIMINAS

Corpo de prova é o nome dado às amostras de material que serão utilizadas para desenvolver o ensaio. Essas peças são preparadas conforme norma que estabelece as dimensões, o tipo de usinagem, o entalhe e a rota de processo a ser seguida no Laboratório de Teste Mecânico da empresa, conforme os equipamentos aos quais elas precisam ser submetidas.

Na Usiminas, o corpo de prova passa pelas seguintes etapas: receber, preparar e analisar amostras de aço e outros materiais; informar os resultados para as áreas envolvidas e armazenar as amostras, trabalhando em conformidade com as normas de segurança, meio ambiente e qualidade.

O fluxograma apresentado na Figura 3.1 apresenta as etapas que as amostras seguem até serem ensaiadas no Laboratório, independente do teste:



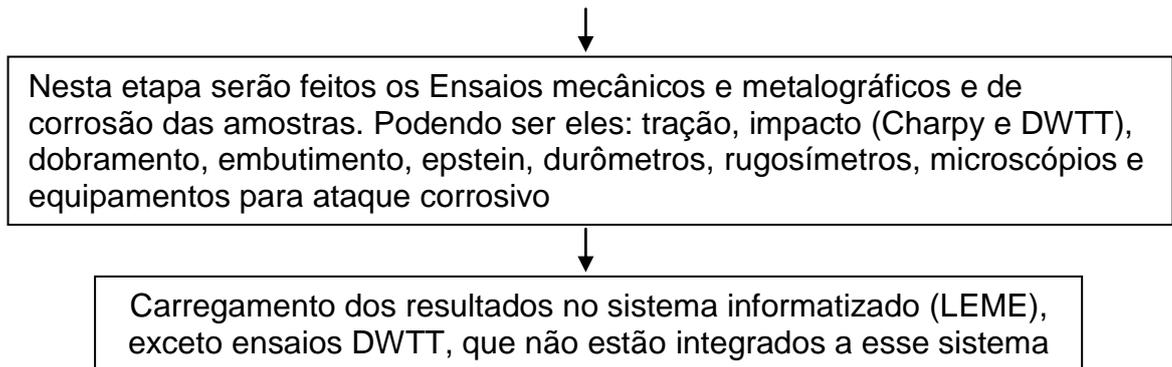


Figura 3.1 – Fluxograma: Sequência de atividades dos ensaios no Laboratório de Teste Mecânico.

### 3.3 Ferramenta para filtro dos dados

Foi elaborada uma análise estatística visando filtrar os dados restantes por meio de um critério que estabelece os limites de controle superior e inferior a partir das características da distribuição dos dados.

Estes dados serão apresentados por meio de um gráfico denominado *boxplot*, que sintetiza em uma mesma figura várias informações relativas à distribuição de uma determinada variável quantitativa. Ele aponta os valores abaixo da cerca inferior =  $Q1 - \frac{3}{2} \times DIQ$  ou acima da cerca superior =  $Q3 + \frac{3}{2} \times DIQ$ , que se baseia em medidas mais resistentes para a identificação de observações discrepantes (PINHEIRO et al, 2012).

### 3.4 Análise de Correlação Linear

Nesta etapa foi elaborada a análise de correlação entre as variáveis de energia absorvida dos ensaios Charpy e DWTT, com aços gerados na planta Chapas Grossas. Para tal, foi utilizado o coeficiente de Pearson devido à menor complexidade e pelo pressuposto da linearidade direta entre as duas variáveis. Quando a relação entre as variáveis não é linear, mas uma função monotônica, Spearman pode resultar num coeficiente maior que a correlação de Pearson, mas a desvantagem é que o coeficiente de correlação de Spearman é menos

sensível a *outliers* (casos distantes da curva). A correlação de Kendall (ou tau) vai na mesma linha não-paramétrica da correlação de Spearman, ao ser uma correlação de "rankings". A desvantagem: ser sensível demais ao pequeno número de observações quando usada como medida de associação entre variáveis, resultando em coeficientes menores.

A partir dos resultados do estudo da correlação entre os testes, propõe-se um modelo que descreve o comportamento das variáveis. Se a hipótese de correlação linear for comprovada, o ensaio DWTT poderá ser eliminado para os materiais que exigem ensaio Charpy.

Para testar a correlação linear entre as variáveis de energia absorvida dos ensaios Charpy e DWTT foi utilizado o MINITAB<sup>2</sup>, devido ao fato de ser o *software* estatístico adotado pela empresa. A facilidade de uso e a quantidade de ferramentas disponíveis tornaram o MINITAB um dos *softwares* estatísticos mais utilizados no mundo. Sua capacidade vai desde o cálculo de estatísticas básicas como média, amplitude, desvio padrão, até os mais complexos estudos de dados não paramétricos.

Portanto, o objetivo é interagir com o *software*, informando-o das operações que se espera que ele faça como testar o grau de correlação e determinar a equação que descreve o modelo e, posteriormente, interpretar os resultados.

---

<sup>2</sup> Site: <https://www.minitab.com>

## 4. ANÁLISE DOS DADOS

Este capítulo descreve as diferentes fases da análise dos dados realizadas neste trabalho. A partir dos dados obtidos após o descarte dos *outliers*, foram aplicados conceitos de análise quantitativa discutidos durante o curso de especialização, como por exemplo, a análise dos quartis e análise de correlação linear simples e múltipla.

### 4.1 Análise estatística das variáveis

Inicialmente foi realizada uma análise dos desvios dos dados coletados, por meio do *boxplot*, ferramenta gráfica para avaliar a distribuição empírica dos dados.

As figuras 4.1 e 4.2 apresentam a aplicação dos gráficos *boxplot* para análise dos dados coletados de energia absorvida do Charpy e DWTT, respectivamente.

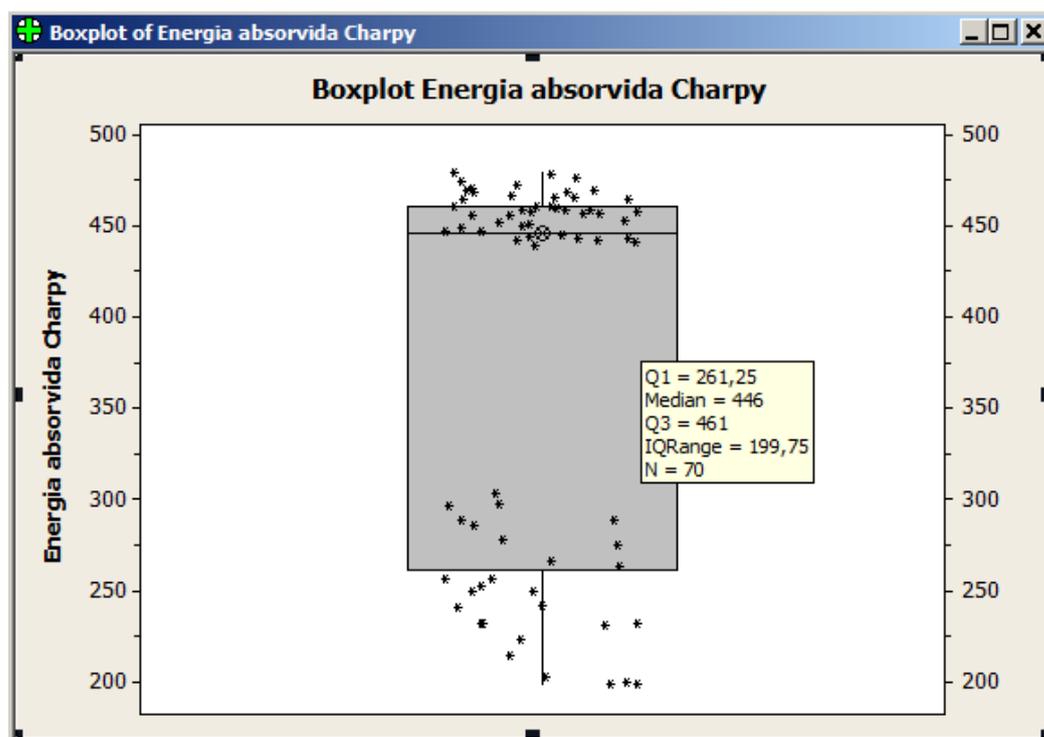


Figura 4.1 – Resultado da energia absorvida do ensaio Charpy.

Na Figura 4.1 a linha central da distribuição corresponde à mediana, que divide a quantidade de dados de energia absorvida do ensaio igualmente em dois grupos. A mediana dos dados de Charpy equivale a 446. A dispersão é representada pela altura do retângulo  $(Q3 - Q1) = 199,75$ . Verifica-se no gráfico que não houve ocorrência de *outliers*.

O retângulo contém 50% dos valores do conjunto de dados. A posição da linha mediana no retângulo informa sobre a assimetria da distribuição. Uma distribuição simétrica teria a mediana no centro do retângulo. Se a mediana é próxima de Q1, então, os dados são positivamente assimétricos. Se a mediana é próxima de Q3 os dados são negativamente assimétricos.

Observa-se que no gráfico apresentado na Figura 4.1 a distribuição dos dados é negativamente assimétrica. A assimetria de determinada base de dados possibilita analisar uma distribuição de acordo com as relações entre suas medidas de moda, média e mediana. Quando a igualdade entre estas medidas de posição não acontece, teremos distribuições assimétricas, ou seja, distribuições em que a elevação do gráfico está mais à direita ou mais à esquerda. Na assimetria negativa:  $média < mediana < moda$ . Esta distribuição é também chamada de assimétrica à esquerda.

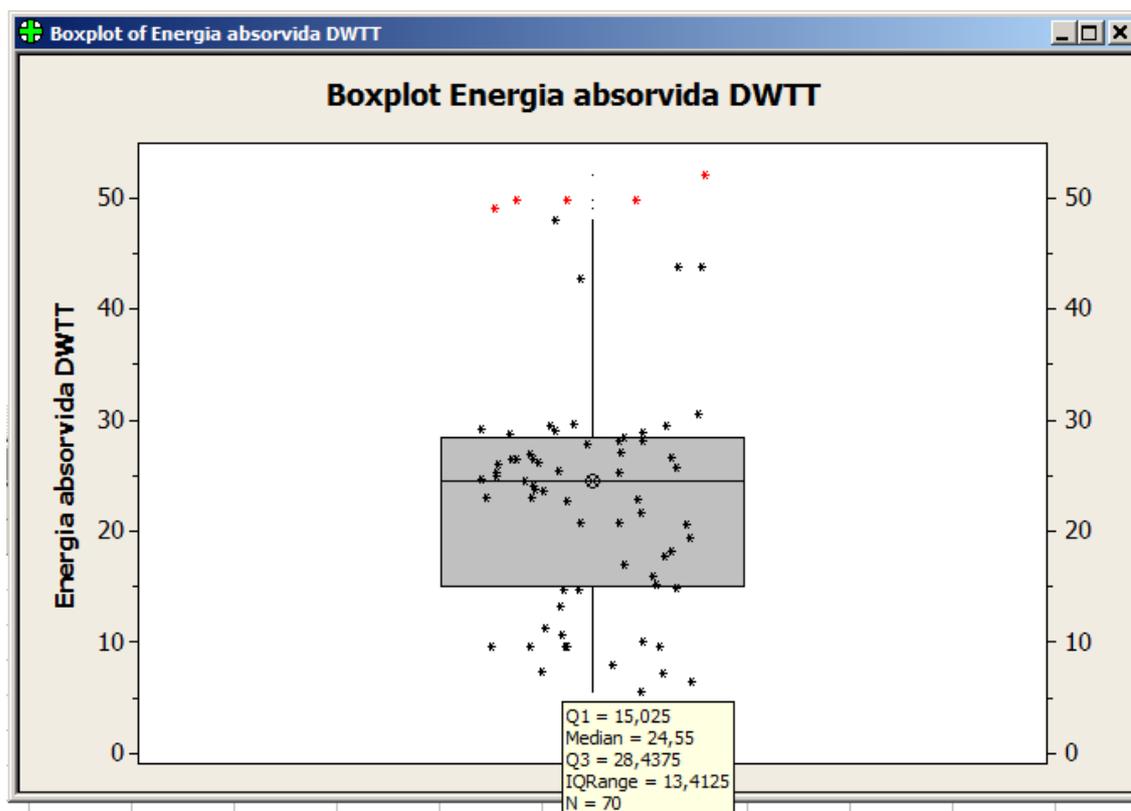


Figura 4.2 – Resultado da energia absorvida do ensaio DWTT.

Na Figura 4.2 a mediana dos valores de energia absorvida do DWTT equivale a 24,55. A dispersão é representada pela altura do retângulo ( $Q3 - Q1$ ) = 13,4125. Observa-se que a distribuição dos dados é negativamente assimétrica, isto significa que  $média < mediana < moda$ . Os pontos identificados por asterisco na cor vermelha representam os *outliers*.

Partindo do pressuposto de uma correlação linear entre as variáveis de energia absorvida de Charpy e DWTT abordada na norma API 1996 e da experiência dos funcionários do Laboratório de Teste Mecânico quanto à relação entre os ensaios de ductilidade, busca-se comprovar a existência de correlação linear (simples e múltipla) entre estes ensaios advindos de uma mesma amostra do material da Linha de Chapas Grossas, com as mesmas características. Sendo assim, para cada *outlier* eliminado do ensaio DWTT, seu correspondente do ensaio Charpy também será excluído, conforme Tabela 4.1 a seguir.

Charpy (X)	DWTT (Y)
459	52,1
467	49,75
445	49,75
466	49,8
442	49

Tabela IV. 1 – Dados excluídos do Charpy e DWTT.

Do total de 70 pontos, foram excluídos os valores acima, permanecendo 65 pares ordenados.

#### 4.2 Análise de correlação linear simples

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam a análise de correlação linear entre a energia absorvida dos ensaios Charpy (representado pela variável independente X) e DWTT (representado pela variável dependente Y).

O coeficiente de Pearson para as amostras analisadas apresenta um valor que corresponde a uma correlação linear moderada de 0,6899 entre a energia absorvida do DWTT e a energia absorvida do Charpy (segundo a definição apresentada em Dancey e Reidy (2006)). Dependendo da área de utilização, alguns autores podem considerar valores próximos de 0,7 como indicativo de forte correlação.

A Figura 4.3 apresenta o diagrama de dispersão das variáveis consideradas. Observa-se que não ocorreram amostras na faixa entre 305 e 440 da energia absorvida do Charpy (eixo X), o que está associado às características do material e não à quantidade de amostras.

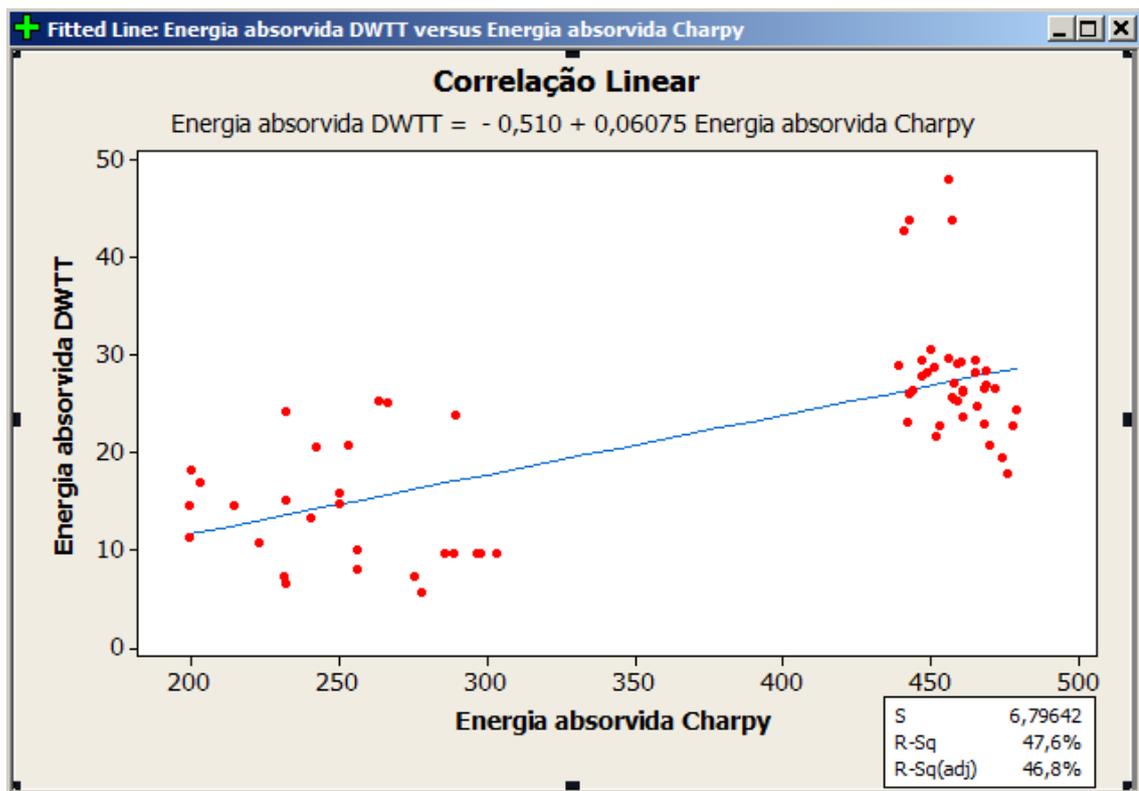


Figura 4.3 – Gráfico da correlação linear simples: energia absorvida DWTT x Charpy.

Como um dos objetivos é propor um modelo de regressão simplificado, considerando o menor número de variáveis possível, possibilitando a diminuição do custo e da complexidade da coleta dos dados, a Figura 4.4 apresenta o modelo especificado através da ferramenta MINITAB.

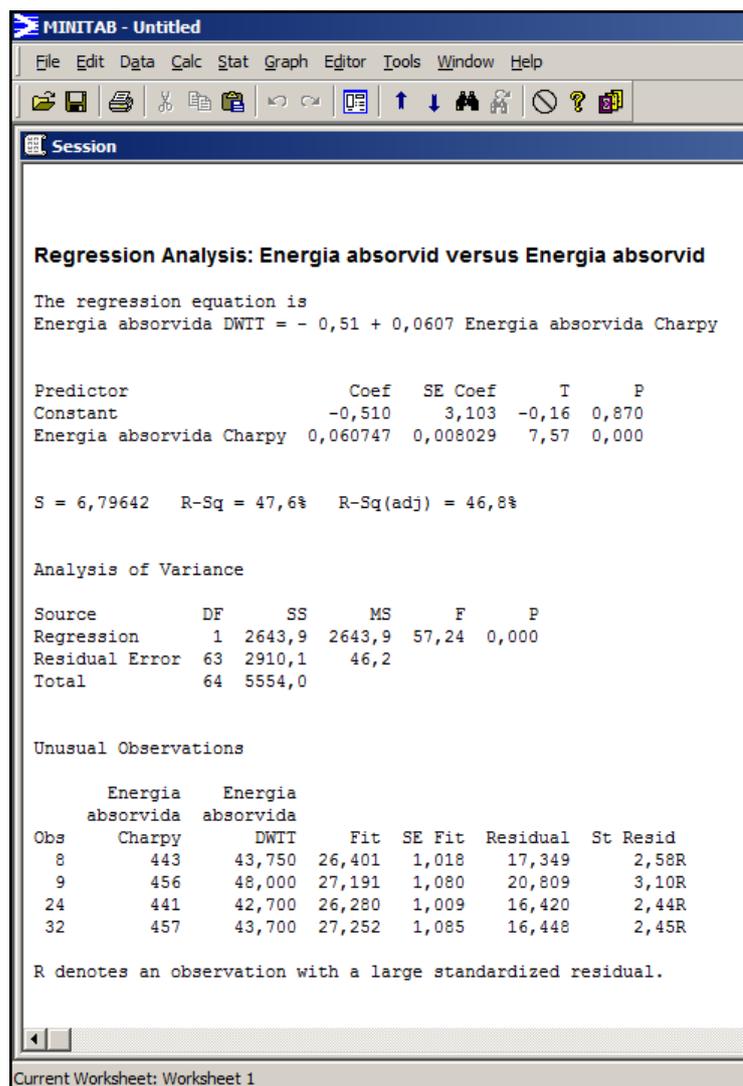


Figura 4.4 – Resultado da correlação linear simples entre energia absorvida dos ensaios DWTT e Charpy.

Algumas considerações podem ser feitas a partir dos resultados apresentados na Figura 4.4:

(1) O modelo linear que descreve a relação entre a energia absorvida pelo ensaio DWTT (variável Y) e a energia absorvida pelo ensaio Charpy (variável X) é representado pela seguinte equação da reta:  $Y = - 0,51 + 0,06075X$ .

(2) A estimativa do intercepto ( $\hat{a} = - 0,51$ ), o seu erro padrão (3,103) e o valor p é (0,87). O erro padrão de uma estimativa de um coeficiente de regressão mede a precisão das estimativas do valor desconhecido do coeficiente do

modelo, sendo este sempre positivo. Quanto menor o erro padrão, mais precisa é a estimativa. Dividir o coeficiente pelo erro padrão calcula um valor t. Se o valor p associado à estatística t for menor que o nível alfa, você conclui que o coeficiente é significativamente diferente de zero. Neste caso, verifica-se que o valor de p é maior que o valor de alfa (0,05) e por isso você não pode concluir que esse coeficiente é diferente de zero.

(3) A estimativa da inclinação ( $\hat{b} = 0,060747$ ), o seu erro padrão (0,008029) e o valor p é (0,00). Verifica-se que o valor de p é menor que o valor de alfa (0,05), o que permite concluir que esse coeficiente é diferente de zero. Importante ressaltar que o valor positivo do coeficiente de inclinação ocorre quando x e y variam no mesmo sentido, isto é, quando x aumenta y aumenta ou quando x diminui y também diminui.

(4) O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é  $R\text{-Sq} = 47,6\%$  e o coeficiente de determinação ajustado para o número de parâmetros é  $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 46,8\%$ . Este resultado mostra que menos de 50% dos dados são explicados pelo modelo, dando indícios da necessidade de uma análise mais aprofundada de outras variáveis (por exemplo, espessura da amostra) que possam ser utilizadas para a definição de um modelo de regressão mais completo.

(5) O primeiro conjunto de *outliers* apresentado nesta monografia, era referente aos dados de energia absorvida do Charpy e DWTT, individualmente. O relatório da correlação também apresenta resíduos padronizados, pontos que tornaram a correlação mais fraca, sendo esses candidatos a *outlier*. São os pares ordenados (X; Y) nas posições a seguir: 8° (443;43,75); 9° (456; 48); 24° (441; 42,7) e 32° (457; 43,7).

(6) Ao considerar somente o p da regressão, o modelo apresentado pode ser considerado significativo. No entanto, o coeficiente de determinação pode ser considerado baixo neste caso, conforme discutido no ponto (4).

Considerando somente a variável energia absorvida, o modelo linear simples não se mostrou muito eficiente, explicando menos de 50% das amostras coletadas. Estes resultados corroboram a necessidade de utilizar um conjunto mais amplo de variáveis, principalmente se estes valores podem ser coletados

durante o processo industrial. Assim, a seção 4.3 apresenta os resultados obtidos quando outras variáveis são consideradas e um modelo de regressão linear múltipla é utilizado.

#### **4.3 Cenário 1: Análise de correlação linear múltipla**

Como o coeficiente de determinação ajustado da correlação linear considerando somente a variável energia absorvida tem um valor moderado de 46,8%, será apresentado nesta seção, um modelo de regressão linear múltipla. Para tal, foi utilizado um novo conjunto de variáveis, além da energia absorvida pelo ensaio Charpy (variável independente  $X_4$ ): a espessura da amostra (variável independente  $X_1$ ), a temperatura do ensaio DWTT (variável independente  $X_2$ ) e a temperatura do ensaio Charpy (variável independente  $X_3$ ).

A Figura 4.5 apresenta os resultados da análise de regressão linear múltipla entre as energias absorvidas e temperaturas do Charpy e do DWTT e a espessura da amostra.

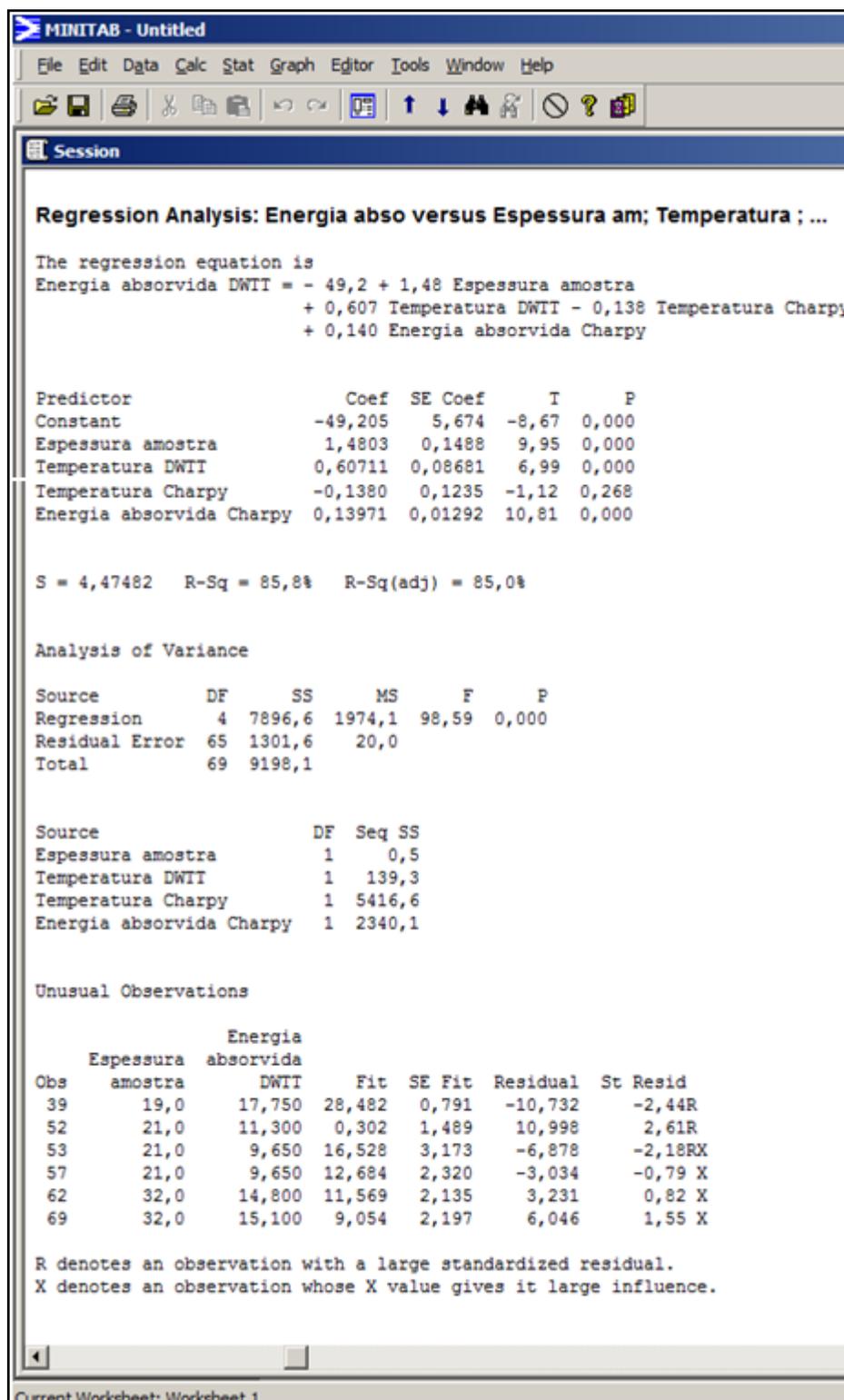


Figura 4.5 – Resultado da correlação linear múltipla entre energia absorvida do ensaio DWTT e demais variáveis analisadas.

Na Figura 4.5 identifica-se os seguintes pontos:

(1) A equação da reta ajustada:

$$Y = - 49,2 + 1,48X_1 + 0,607X_2 - 0,138X_3 + 0,140X_4$$

Onde:

Y representa a energia absorvida do DWTT;

$X_1$  a espessura da amostra;

$X_2$  Temperatura do ensaio DWTT;

$X_3$  Temperatura do ensaio Charpy;

$X_4$  Energia absorvida do ensaio Charpy.

(2) A estimativa do intercepto ( $\hat{a} = - 49,205$ ) e o seu erro padrão (5,674).

(3) A estimativa da inclinação: ( $\hat{b}_1 = 1,4803$ ) e o seu erro padrão (0,1488)

referentes a  $X_1$ ; ( $\hat{b}_2 = 0,60711$ ) e o seu erro padrão (0,08681) referentes a  $X_2$ ;

( $\hat{b}_3 = -0,1380$ ) e o seu erro padrão (0,1235) referentes a  $X_3$ ; ( $\hat{b}_4 = 0,13971$ ) e o

seu erro padrão (0,01292) referentes a  $X_4$ .

(4) O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é  $R\text{-Sq} = 85,8\%$  e o coeficiente de determinação ajustado para o número de parâmetros é  $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 85,0\%$ .

(5) O quadro da análise de variância para a regressão, indica que o modelo de regressão linear foi significativo, já que a fonte de variação associada ao modelo (*Regression*) é significativa ( $P = 0.000$ ). No entanto, a análise será focada no coeficiente de determinação ajustado, que indica o percentual dos dados que são significativamente representados pela equação proposta.

(6) O relatório também apresenta resíduos padronizados, sendo esses candidatos a *outlier*. São os pares ordenados ( $X_1$ ; Y) nas posições a seguir, sendo o  $X_1$  referente a espessura da amostra: 39° (19; 17,75); 52° (21; 11,30) e 53° (21; 9,65).

O modelo explica 85% da variabilidade total da variável resposta. O  $R^2$  não decresce quando são adicionadas variáveis preditoras a um modelo, mesmo se estas novas variáveis não servirem de fato para explicar o comportamento da variável resposta, não devendo ser interpretado em modelos múltiplos. O  $R^2$  ajustado corrige este problema, pois é ajustado para o número de termos presentes no modelo.

A Figura 4.6 apresenta os valores de energia absorvida no ensaio DWTT (eixo Y), correlacionados às variáveis testadas no modelo (eixo X) de maneira independente. Nos três primeiros gráficos (Espessura amostra, Temperatura DWTT e Temperatura Charpy) pode-se observar um comportamento peculiar que é inerente ao processo de testes, uma pequena variação da energia absorvida do DWTT para cada valor representado no eixo X. Isso também ocorre porque ao analisar a variável  $X_1$ , por exemplo, as demais variáveis X não foram mantidas constantes, ou seja, na análise da espessura da amostra não foram fixadas as temperaturas do DWTT e do Charpy e a energia absorvida do Charpy.

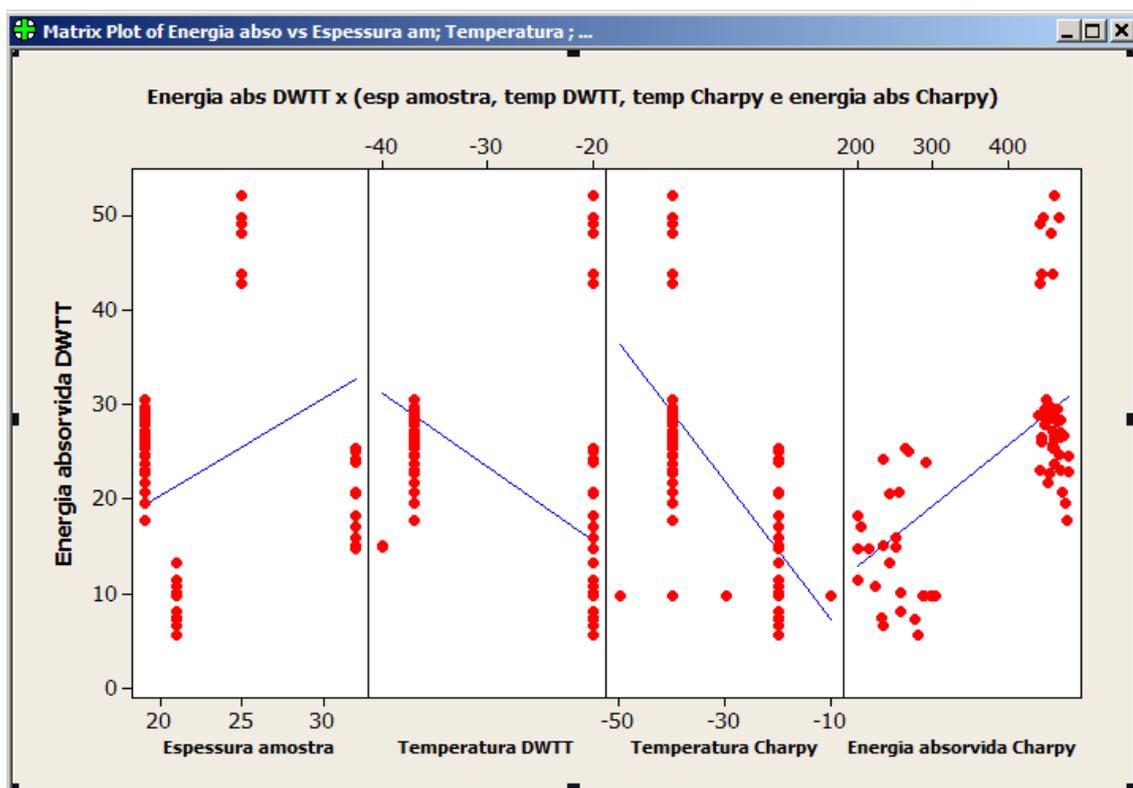


Figura 4.6 – Gráfico da correlação linear múltipla: energia absorvida DWTT x (espessura da amostra, temperatura DWTT, temperatura Charpy e energia absorvida do Charpy).

Após observar as influências individuais das variáveis analisadas na energia absorvida, elas foram agrupadas de forma a gerar uma contribuição única no modelo gerado, o que resultou no coeficiente de correlação de 85%.

A equação de regressão linear não pode ser utilizada para extrapolar valores das variáveis independentes (X) além dos coletados para a construção do modelo. Pontos máximos e mínimos dessas variáveis (espessura da amostra, temperatura dos ensaios e energia absorvida do Charpy) são considerados limítrofes para valores de entrada na equação.

Finalizando, a Figura 4.7 apresenta um comparativo dos dados reais de DWTT e aqueles encontrados por meio da equação obtida pela regressão linear simples e a equação obtida pela regressão linear múltipla. Nota-se que os dados obtidos pelo modelo de regressão linear múltiplo se aproximam mais dos dados reais do ensaio, dado que mais informações são consideradas para a sua obtenção.

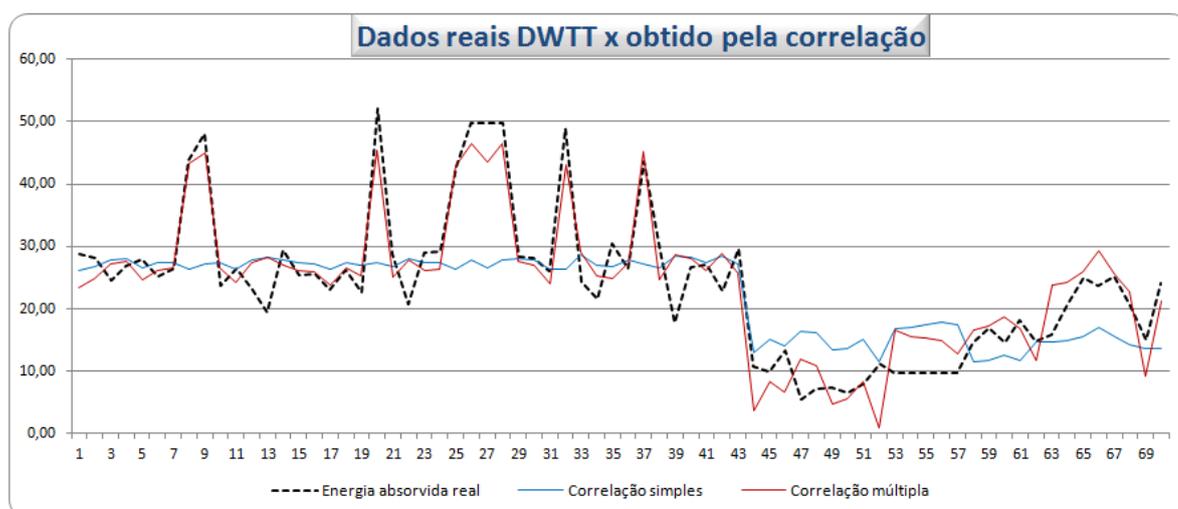


Figura 4.7 – Comparativo dos dados reais de DWTT e aqueles encontrados por meio da equação de correlação linear simples e múltipla.

#### 4.4 Cenário 2: Análise de correlação linear múltipla

Nesta seção é apresentado um segundo cenário do modelo de regressão linear múltipla, desconsiderando a temperatura do DWTT, por ser esta a única variável do DWTT que está sendo contemplada. Para tal, foi utilizada a espessura da amostra (variável independente  $X_1$ ), a temperatura do ensaio

Charpy (variável independente  $X_2$ ) e a energia absorvida pelo ensaio Charpy (variável independente  $X_3$ ). A Figura 4.8 apresenta os resultados da análise de regressão linear múltipla.

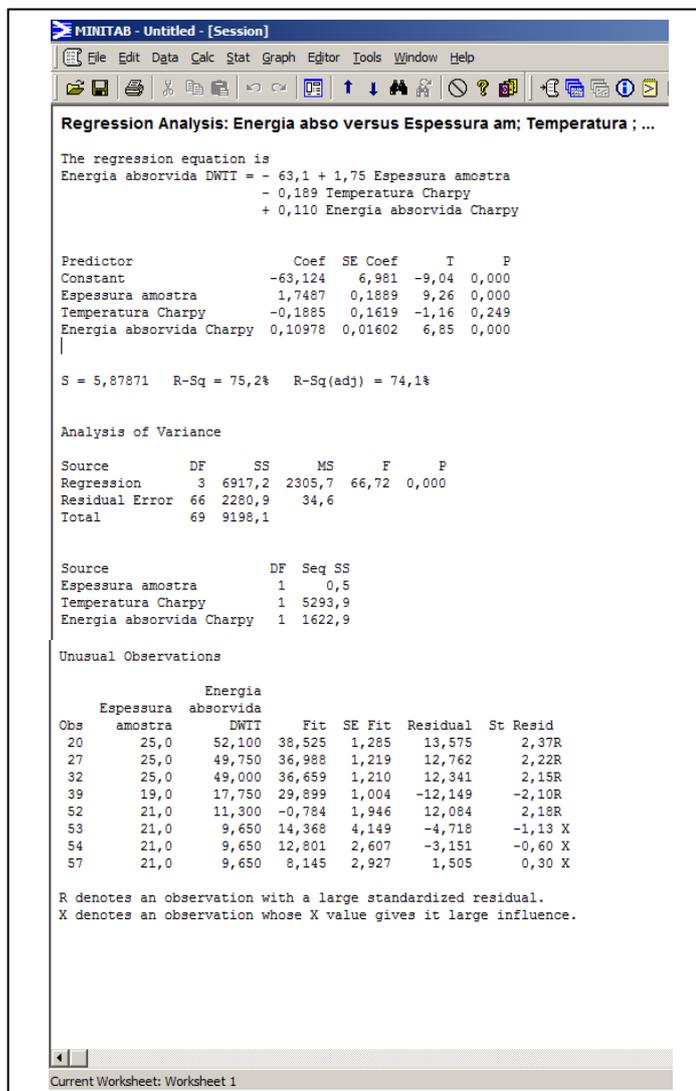


Figura 4.8 – Resultado da correlação linear múltipla entre energia absorvida do ensaio DWTT e demais variáveis analisadas.

Na Figura 4.8 identifica-se os seguintes pontos:

(1) A equação da reta ajustada:

$$Y = - 63,1 + 1,75X_1 - 0,189X_2 + 0,110X_3$$

Onde:

Y representa a energia absorvida do DWTT;

$X_1$  a espessura da amostra;

$X_2$  Temperatura do ensaio Charpy;

$X_3$  Energia absorvida do ensaio Charpy.

(2) O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é  $R\text{-Sq} = 75,2\%$  e o coeficiente de determinação ajustado para o número de parâmetros é  $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 74,1\%$ .

(3) O quadro da análise de variância para a regressão, indica que o modelo de regressão linear foi significativo, já que a fonte de variação associada ao modelo (*Regression*) é significativa ( $P = 0.000$ ). No entanto, a análise será focada no coeficiente de determinação ajustado, que indica o percentual dos dados que são significativamente representados pela equação proposta.

Verifica-se neste cenário que se a temperatura do DWTT for desconsiderada, o coeficiente de determinação ajustado vai reduzir de 85% para 74,1%. Como esta variável não depende da realização do ensaio para ser determinada, a partir do tipo e aplicação do material e solicitação do cliente é possível definir o valor da temperatura, o modelo adotado será aquele que explica 85% da variabilidade total da variável resposta e inclui a temperatura do ensaio DWTT.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma análise estatística que buscava obter a correlação entre ensaios de impacto, Charpy e DWTT. Foram utilizadas métricas embasadas em um estudo feito pela norma API, que teve como foco principal a busca por uma correlação linear entre os ensaios.

Em um primeiro momento, adotou-se como premissa que a correlação linear entre as energias absorvidas pelo corpo de prova dos ensaios Charpy e DWTT seria simples, devido ao fato do princípio dos ensaios ser o mesmo, testar o impacto e medir a ductilidade do material, mesmo sabendo que são realizados em situações diferentes, o primeiro através de um pêndulo e espessura padrão de 10 mm e o segundo da queda livre de uma massa e espessura geralmente igual à da amostra.

Sozinhas, estas variáveis não foram capazes de traduzir o modelo de forma significativa. A partir de então, houve uma busca por outras variáveis que pudessem ter influência na análise, o que transformou a ideia inicialmente proposta em uma análise de correlação linear múltipla.

Com a revisão da norma elaborada em 1996 e reuniões com funcionários experientes do Laboratório de Teste Mecânico, foram definidas supostas variáveis que poderiam contribuir para a correlação entre os ensaios, sendo elas a espessura da amostra e as temperaturas dos ensaios, o que resultou em uma análise de correlação múltipla das variáveis igual a 85%.

O trabalho possibilitou uma revisão de conceitos estatísticos, desde o tratamento dos dados ao desenvolvimento de habilidades sistêmicas por meio da ferramenta MINITAB, bem como conhecimento do fluxo operacional e variáveis que influenciam na correlação entre os resultados dos ensaios.

Um dos desafios do trabalho foi a coleta de dados. Os dados de Charpy foram extraídos de um sistema antigo e os dados de DWTT foram armazenados por solicitação para utilização neste trabalho. Isso exigiu um trabalho criterioso para eliminar *outliers*.

Pelo fato de não ter conseguido uma gama maior de dados, sugere-se que após implementação do sistema de armazenamento dos dados do DWTT, em fase de desenvolvimento por uma equipe de projeto de Tecnologia de Informação (vide tela do sistema na Figura 5.1), a análise seja refeita utilizando a metodologia adotada neste estudo, buscando eliminar o ensaio DWTT e obter seus resultados a partir do Charpy.

Windows - [CPs a Ensaiar - DWTT - CG - Cuba: CUB.061 CAMARA BAIXA TEMPERATURA -8]

Opções

LIBERA REGISTRAR ALTERAR DESFAR RETESTA DESFAR

Num.CP	NA	PPE	Dir	Ret	T. Cuba
I0191492	0	II	C	0	-20
I0191493	0	II	C	0	-20
I0191494	0	II	C	0	-20
I0191496	0	II	L	0	-20
I0191497	0	II	L	0	-20
I0191499	0	II	Q	0	-20

Total Cps: 7 Num.Cp:

Ins. Esp.:  Exp.:

Insp/Org

PCE:  OTIF:

Equipamento do Ensaio

Equipamento de Medição de Temperat.:

Equipamento de Medição da Fratura:

Gravar Imagem

Amostra Referência CTOD:

**Especificação**

OV-Item: 88888888-7 Temperatura Valor: -20 Unid:

Qualidade: NTUCGQC Tipo Entalhe:

Frat. Dúctil Min. Indiv.:  Média:

Valor Energia Min. Indiv.:  Média:

**Informações de DWTT**

Restr. Redução Espessura Cod.Rest.:  Cod.Norma: Nova Temper.:

Esp.: 15  Alterar Temper.:

Fórmulas - Peça 1  1  2  3  4  5  6

Fórmulas - Peça 2  1  2  3  4  5  6

Peça 1 A:  B:

Peça 2 A:  B:

Fratura Dúctil Obtida Peça 1:  Peça 2:  Média:

Fratura Dúctil Avaliação Cont. Integrado

Peça 1 | Peça 2

Entalhe Obtido

Velocidade de Impacto (m/s)

Valor Energia (kJ)

Potenc.:

FGY:

FM:

FIU:

FA:

Obtida:

Obt.Média:

Informações do Martelo

Altura (mm):

Peso (kg):

(FGY) - Energia de Iniciação; (FM) - Energia Força Máxima;  
(FIU) - Energia Propagação; (FA) - Energia Propagação;

Figura 5.1 – Tela do sistema em desenvolvimento para armazenamento das informações do ensaio DWTT.

Para o sistema a ser desenvolvido, foi sugerida a inclusão de uma tela com análise de correlação linear múltipla entre variáveis dos ensaios Charpy e DWTT propostas neste estudo. O modelo deverá ser ajustado após o acúmulo de uma massa suficiente de dados e confrontado com o resultado de ensaios realizados, até que o mesmo gere valores aproximados dos reais, que permitam a sua validação.

Sugere-se que o modelo seja aprimorado através da separação dos dados em grupos mais homogêneos no que tange aos valores de energia absorvida, da identificação da presença ou não de multicolinearidade entre as temperaturas dos ensaios e da justificativa dos dados que apresentam comportamento discrepante em relação à linearidade dos demais. Além dos métodos citados, pode ser implementada a árvore de decisão, que serve como uma estrutura formal nas quais decisões e eventos probabilísticos são vinculados sequencialmente.

Como trabalho futuro, pode-se criar mecanismos que possam determinar, em tempo real, o resultado do ensaio DWTT imediatamente após a realização do ensaio Charpy. Recomenda-se a extensão desta análise a outros aços, além do CLC/API. Assim, a empresa poderá continuar a garantir a qualidade do material, sem gerar custo com o processo do ensaio DWTT.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Petroleum Institute (API), *Práticas recomendadas 5L3*, 3ed., EUA, 1996.

American Society for Metals (ASM), *Metals Handbook*, Vol.10, EUA, 1978.

Broek, D., *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, 3<sup>rd</sup> revised edition, 1984.

CIMM. Temperatura de transição. Disponível em: [www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6580-temperatura-de-transicao](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6580-temperatura-de-transicao). Acesso em: 15 nov. 2015.

DANCEY, Christine & REIDY, John. *Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows*. Artmed, Porto Alegre, 2006.

FABRICIO, Daniel Antonio Kapper; COSTA, Vagner Machado; MENDES, Etiene Benini; REGULY, Afonso; STROHAECKER, Telmo Roberto. *Acreditação do ensaio de impacto charpy: Estudo de caso no LAMEF*. Porto Alegre, 2014.

FARIA, Arlindo Lopes. *Avaliação da ocorrência de fratura inversa em ensaio DWTT em aço de elevada tenacidade [manuscrito]*. Belo Horizonte, 2015.

FIGUEIREDO, Kleber Mendes de. *Tese: Aplicação de ensaio de impacto Charpy instrumentado no estudo da tenacidade à fratura dinâmica nas soldas a arco submerso em aços para caldeiras*. São Carlos, 2004.

Garcia, A.; Spim, J.; Santos, C. A. *Ensaio dos materiais*. 2ed., LTC: Rio de Janeiro, 2012.

LIRA, SACHIKO ARAKI. *Dissertação: Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações*. Curitiba, 2004.

MONTGOMERY, D.C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 2ed. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2003.

PETERNELLI, Luiz Alexandre. Capítulo 9 - Regressão linear e correlação. Disponível em: <http://www.dpi.ufv.br/~peterneli/inf162.www.16032004/materiais/CAPITULO9.pdf>. Acesso em: 23 de Nov.2015.

PINHEIRO, João Ismael D.; CARVAJAL, Santiago S. Ramirez; CUNHA, Sônia Baptista da; GOMES, Gastão Coelho. *Probabilidade e Estatística Quantificando a incerteza*. 5ed, Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

SANTOS, Alcione Miranda dos. Análise de Regressão. Disponível em: <http://www.pgsc.ufma.br/arquivos/aula1.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2015.

SOUZA, Sergio Augusto de. *Ensaio Mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos*. 5ed., 2004.